



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
ARAGÓN

**APUNTES DE MÁQUINAS SÍNCRONAS Y DE CORRIENTE  
DIRECTA**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

P R E S E N T A :

**JUAN RUBÉN ROJAS ORTEGA.**

**ASESOR: ING. JOSÉ JUAN RAMÓN MEJÍA ROLDAN**



Estado de México

2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

<b>Índice</b>	<b>I</b>
<b>Introducción</b>	<b>III</b>
<b>Capítulo I GENERADOR SÍNCRONO.</b>	<b>1</b>
1.1 Teoría básica de la máquina síncrona.	1
1.2 Generadores síncronos.	12
1.3 Construcción de un alternador síncrono.	14
1.4 Velocidad de rotación de un generador síncrono.	17
1.5 Circuito equivalente de un generador síncrono.	18
1.6 Diagrama fasorial del generador síncrono.	20
1.7 Pruebas de generadores síncronos.	22
1.8 Funcionamiento en paralelo de los generadores de c.a.	24
1.9 Requisitos para la conexión en paralelo.	25
1.10 Procedimiento general para conectar generadores en paralelo.	27
<b>Capítulo II MOTOR SÍNCRONO.</b>	<b>29</b>
2.1 Construcción del motor síncrono.	29
2.2 Principio de funcionamiento de los motores síncronos.	31
2.3 Funcionamiento del motor síncrono con devanado amortiguador.	32
2.4 Circuito equivalente del motor síncrono.	34
2.5 Curva característica de la velocidad-momento de torsión del motor síncrono.	35
2.6 Cambios de carga en un motor síncrono.	39
2.7 Tipos de arranques de un motor síncrono.	40
2.8 Motor síncrono trifásico con devanado amortiguador.	42
<b>Capítulo III GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA.</b>	<b>44</b>
3.1 Fundamentos de las máquinas de corriente directa	45
3.2 Partes básicas de las máquinas de corriente directa	45
3.3 Diagrama de una máquina de corriente directa.	47
3.4 Generadores de corriente directa.	47
3.5 Circuito equivalente de un generador de c.d.	48
3.6 Curva de magnetización de un generador de c.d.	49
3.7 Generador de c.d. con excitación independiente.	51
3.8 Característica del terminal de un generador de c.d. con excitación externa.	52
3.9 Control de la tensión en los bornes.	53
3.10 Análisis gráfico de un generador de c.d. con excitación externa.	54
3.11 El generador de c.d. en derivación.	56
3.12 Creación de voltaje para un generador de c.d. en derivación.	57
3.13 Característica terminal de un generador de c.d. en derivación.	58
3.14 Control del voltaje en el generador de c.d. en derivación.	59
3.15 Análisis gráfico de los generadores de c.d. en derivación.	60
3.16 Generador de c.d. en serie.	61
3.17 Característica terminal de un generador de c.d. en serie.	62
3.18 Generador de c.d. compuesto acumulativo.	63

<b>3.19 Característica terminal de un generador de c.d. compuesto acumulativo.</b>	<b>64</b>
<b>3.20 Control de voltaje de un generador de c.d. Compuesto acumulativo</b>	<b>65</b>
<b>3.21 Análisis grafico de un generador de c.d. compuesto acumulativo.</b>	<b>66</b>
<b>3.22 Generador de c.d. compuesto diferencial.</b>	<b>67</b>
<b>3.23 Característica terminal de un generador de c.d. compuesto diferencial.</b>	<b>68</b>
<b>3.24 Análisis grafico de un generador de c.d. compuesto diferencial.</b>	<b>69</b>
<b>3.25 Acoplamiento en paralelo de los generadores de c.d.</b>	<b>70</b>
<b>Capítulo IV MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.</b>	<b>74</b>
<b>4.1 Circuito equivalente de un motor de c.d.</b>	<b>74</b>
<b>4.2 Motor de c.d. con excitación externa y en derivación.</b>	<b>75</b>
<b>4.3 Característica terminal de un motor de c.d. en derivación.</b>	<b>76</b>
<b>4.4 Control de velocidad en los motores de c.d. en derivación.</b>	<b>78</b>
<b>4.5 El motor de c.d. con imán permanente.</b>	<b>79</b>
<b>4.6 Motor de c.d. serie.</b>	<b>81</b>
<b>4.7 Momento de torsión inducido en un motor de c.d. serie.</b>	<b>81</b>
<b>4.8 Característica terminal de un motor de c.d. serie.</b>	<b>83</b>
<b>4.9 Control de velocidad en los motores de c.d. serie.</b>	<b>85</b>
<b>4.10 Motor de c.d. compuesto.</b>	<b>86</b>
<b>4.11 La característica momento de torsión-velocidad de un motor de c.d. composición acumulativa</b>	<b>88</b>
<b>4.12 La característica momento de torsión-velocidad de un motor de c.d. de composición diferencial.</b>	<b>89</b>
<b>Capítulo V PROBLEMAS.</b>	<b>91</b>
<b>5.1 Serie de ejercicios de máquinas síncronas.</b>	<b>91</b>
<b>5.2 Serie de ejercicios de máquinas de c.d.</b>	<b>100</b>
<b>Conclusiones.</b>	<b>108</b>
<b>Bibliografía.</b>	<b>109</b>

## **INTRODUCCIÓN.**

En el desarrollo del hombre ha sido posible generar la energía eléctrica, sin ella ninguna de las comodidades de la vida actual serían posibles. La máquina síncrona y de corriente directa, trabajando como generadores constituyen la principal fuente de energía obteniéndose de este el 99.9 % de la energía eléctrica consumida a nivel mundial.

Así mismo los motores constituyen una de las principales fuentes de potencia mecánica, utilizados en una gran cantidad de aplicaciones y en amplia gama de potencia.

La máquina eléctrica realiza el proceso de conversión de energía mecánica a eléctrica y de energía eléctrica a mecánica, siendo esta una de sus grandes virtudes.

Por lo cual en el primer capítulo se abordará la teoría básica de la máquina síncrona, para conocer los fenómenos que se involucran en el principio del funcionamiento del generador síncrono. Teniendo estas bases veremos la construcción, su circuito, el comportamiento y su respectiva conexión en paralelo. En el segundo capítulo abarcaremos la construcción, funcionamiento y comportamiento del motor síncrono cuando este sufre un cambio de cargas sobre su eje. Y los métodos básicos para el arranque seguro de un motor síncrono. En el tercer capítulo mencionaremos las ventajas que tiene la corriente directa. Así como los fundamentos y las partes básicas que constituyen a la máquina de c.d. para hacer una descripción de los generadores de corriente directa, cuando se encuentran conectados en sus diferentes conexiones las cuales son: excitación independiente, derivación, compuesto y serie. En el cuarto capítulo describiremos el comportamiento de los motores de corriente directa cuando se encuentran conectados en las siguientes conexiones: excitación externa, derivación, serie y compuesta.

Finalmente el quinto capítulo se centra en una serie de ejercicios resueltos de máquinas síncronas y de corriente directa que son similares a los propuestos en clase por los profesores que imparten esta materia.

En este sentido el propósito del presente trabajo es ofrecer a los estudiantes información que les permita una comprensión más digerible acerca del tema de máquinas síncronas y de corriente directa.

## CAPÍTULO 1. GENERADOR SÍNCRONO.

### 1.1 TEORÍA BÁSICA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA.

#### ***Electromagnetismo.***

El electromagnetismo es un fenómeno que fue descubierto a finales del siglo XVIII y principios del XIX, este fenómeno se descubrió cuando se investigó simultáneamente las teorías de la electricidad y el magnetismo.

El estudio del magnetismo se remonta a la observación de que “piedras” que se encuentran en la naturaleza (esto es magnetita) atraen al hierro. Es posible establecer que todos aquellos fenómenos magnéticos cuando dos cargas están en movimiento, entre ellas surge una fuerza que se denomina fuerza magnética.

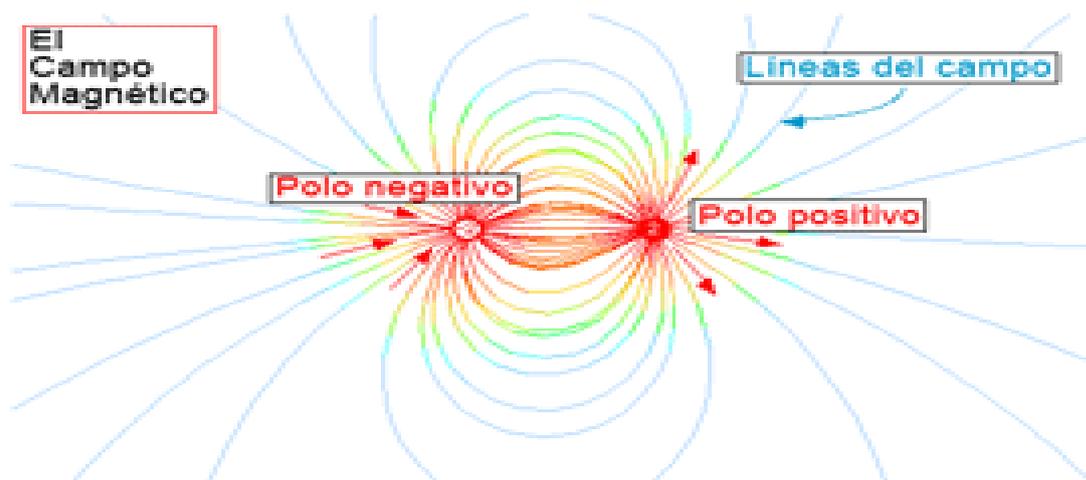
Poco después se comprobó que todo fenómeno magnético era producido por corrientes eléctricas, es decir se lograba de manera definitiva la unificación de magnetismo y la electricidad, originando la rama de la física que actualmente se conoce como electromagnetismo.

#### ***Campo magnético.***

Una barra imantada o un cable que transporta corriente pueden influir en otros materiales magnéticos sin tocarlos físicamente porque los objetos magnéticos producen un "campo magnético". Los campos magnéticos suelen representarse mediante "líneas de campo magnético" o "líneas de fuerza".

En cualquier punto, la dirección del campo magnético es igual a la dirección de las líneas de fuerza y la intensidad del campo es inversamente proporcional al espacio entre las líneas.

Por lo cual el campo magnético es el mecanismo fundamental mediante el cual los motores, generadores y transformadores tienen como finalidad transformar la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa.



**Figura 1.1 El campo magnético.**

Se puede describir mediante cuatro principios básicos como el campo magnético actúa sobre diferentes equipos, estos principios son los siguientes:

- 1.- Si a través de una espira se pasa un campo magnético variable con el tiempo se induce un voltaje en dicha espira. (Esta es la base de la acción transformadora).
- 2.- Al circular corriente por un conductor se produce un campo magnético alrededor de este.
- 3.- Si un conductor por el cual circula corriente, se encuentra dentro de un campo magnético se produce una fuerza sobre dicho conductor. (Esta es la base de la acción motora).
- 4.- Cuando un conductor en movimiento se encuentra inmerso dentro de un campo magnético, en dicho conductor se induce un voltaje. (Esta es la base de la acción generadora)

***Ley de Lenz. Ley de Faraday.***

Ya se anticipó que al igual que una corriente crea un campo magnético, un campo magnético puede crear una corriente eléctrica. Esto es una consecuencia del principio de conservación de la energía: Un sistema tiende a mantener su energía constante.

Como quiera que el magnetismo no es sino una de las formas en que se manifiesta la energía, resulta que una bobina intenta mantener su flujo magnético (su energía magnética almacenada) constante. Si causas externas lo hacen disminuir, la bobina reaccionará creando una corriente que mantenga el flujo inicial. Si, por el contrario, causas externas lo hacen aumentar, la bobina reaccionará creando una corriente que origine un flujo contrario, a fin de disminuir el flujo y mantenerlo en su valor inicial.

Naturalmente esta situación no se puede mantener, ya que una bobina por sí sola no es capaz de generar energía indefinidamente.

Pasado un cierto tiempo, la reacción de la bobina cesará y "aceptará" las condiciones impuestas desde el exterior.

Este comportamiento de las bobinas fue descubierto experimentalmente por Lenz, quien enunció su Ley de la siguiente manera:

*Ley de Lenz.*

Cuando varía el flujo magnético que atraviesa una bobina, esta reacciona de tal manera que se opone a la causa que produjo la variación.

Es decir, si el flujo aumenta, la bobina lo disminuirá, si disminuye lo aumentará. Para conseguir estos efectos, tendrá que generar corrientes que a su vez creen flujo que se oponga a la variación. Se dice que en la bobina ha aparecido una corriente inducida y por lo tanto una fuerza electromotriz inducida.

Se verá un ejemplo aclaratorio: Supongamos que la bobina *situada a la izquierda en la figura 1.2* tiene un flujo nulo. Por lo que la corriente  $I$  será nula también.

Si le acercamos un imán, parte del flujo de éste atravesará la propia bobina por lo que el flujo de la bobina pasará de ser nulo a tener un valor.

La bobina reaccionará intentando anular este aumento de flujo y lo hará creando una corriente  $I$  en el sentido indicado en la figura, porque de esa manera esta corriente creará un flujo contrario oponiéndose al aumento impuesto desde el exterior. Una vez transcurrido cierto tiempo, la bobina se ha amoldado a las nuevas condiciones y el flujo que la atraviesa será el que le impone el imán. Al amoldarse dejará de crear la corriente indicada, que pasará de nuevo a ser cero.

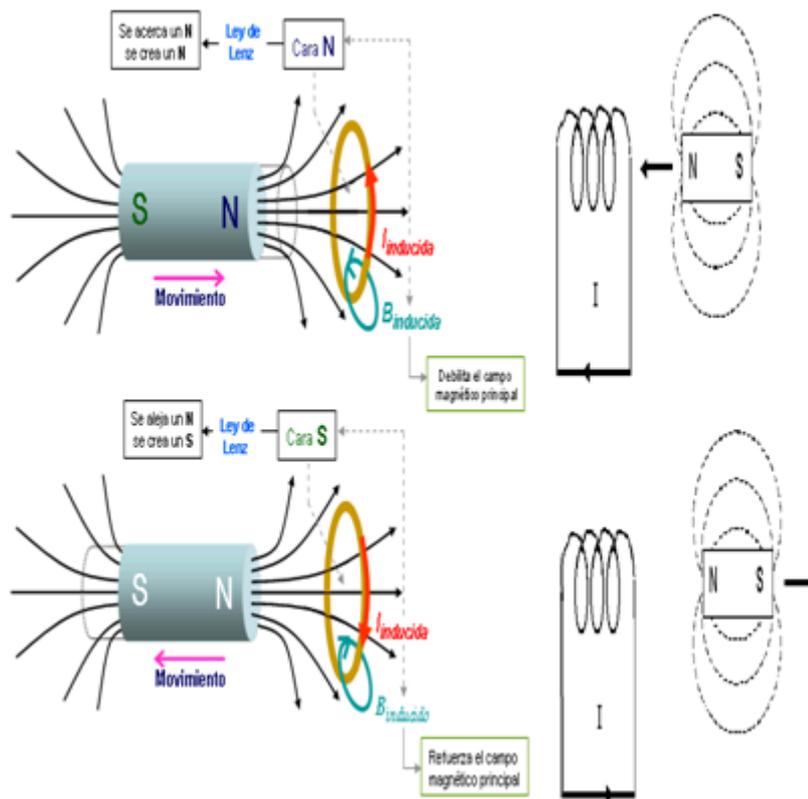


Figura 1.2 Ley de Lenz.

Si ahora se aleja el imán, el flujo que estaba ahora atravesando la bobina disminuirá, por lo que la bobina reaccionará creando de nuevo una corriente esta vez de signo contrario al anterior, para producir un flujo que se oponga a la disminución.

*Ley de Faraday.*

La Ley de Lenz solamente habla de la forma en que se comporta la bobina pero no dice nada acerca de la magnitud de la corriente o de la fuerza electromotriz inducida. Faraday llegó a la conclusión que esta (la fuerza electromotriz **E**) vale:

$$E = -n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Siendo:

**E:** f.e.m. inducida

**n:** número de espiras de la bobina

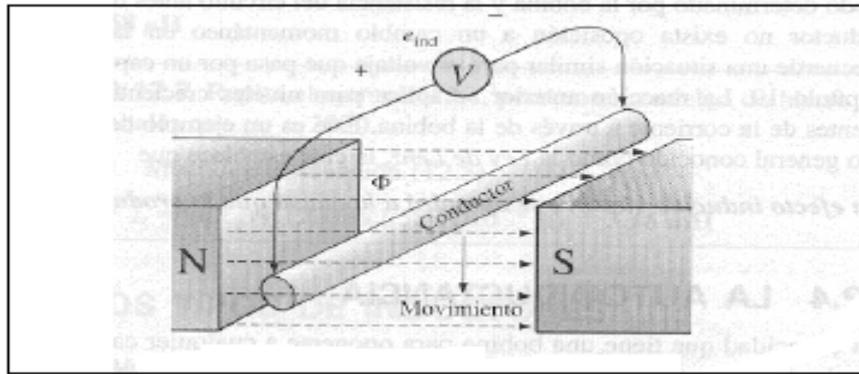
$\Delta\Phi$ : Variación del flujo

$\Delta t$ : Tiempo en que se produce la variación de flujo

**El signo menos (-) indica que se opone a la causa que lo produjo (Ley de Lenz)**

**Por ejemplo:** Si el flujo que atraviesa una bobina de **5 espiras** aumenta de 10 a 11 Webers en una **décima de segundo**, la f.e.m. inducida vale:

$$E = 5 \frac{11 - 10}{0.1} = 5 \times 10 = 50V$$



**Figura 1.3 Generación de un voltaje inducido moviendo un conductor por un campo magnético.**

**Ley de Ampere.**

Siempre que circula una corriente eléctrica en un hilo conductor aparece un campo magnético, cuyas líneas son circunferencias situadas en planos perpendiculares al conductor y con sus centros en él.

La producción de un Campo Magnético por una corriente, está regida por la ley de Ampere.

La ley de Ampere se convierte en:

$$HI_c = Ni$$

Donde H es la intensidad del campo magnético producido por la corriente I net.

Unidades: I= se mide en amperios.

H= en amperios-vuelta por metro.

N= Número de vueltas en la bobina.

$I_c$  = longitud de la trayectoria magnética.

En esta ecuación, H es la magnitud del vector de intensidad de campo magnético H. Por lo tanto, la magnitud de la intensidad de campo magnético en el interior del núcleo es:

$$H = \frac{N_i}{l_c}$$

Puede decirse que la intensidad de campo magnético H es una medida del "esfuerzo" que hace una corriente para crear un campo magnético. La intensidad del flujo magnético producido depende del material del cual esté hecho el núcleo.

### ***Pérdidas en máquinas de corriente alterna.***

Los generadores de corriente alterna toman potencia mecánica para producir potencia eléctrica, mientras que los motores de c.a. toman potencia eléctrica y producen potencia mecánica. En todo caso, no toda la potencia que entra a la máquina aparece en forma útil en el otro extremo pues siempre hay algunas pérdidas en el proceso.

La eficiencia de una máquina de c.a. se define a través de la siguiente ecuación

$$n = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100$$

La diferencia entre potencia de entrada y potencia de salida de la máquina corresponde a las pérdidas que ocurren en el interior.

Las pérdidas que ocurren en las máquinas de c.a. se pueden dividir en las cuatro categorías siguiente:

- Pérdidas eléctricas en el cobre
- Pérdidas eléctricas en el núcleo
- Pérdidas mecánicas
- Pérdidas dispersas o adicionales

*Pérdidas eléctricas o pérdidas en el cobre.*

Pérdidas que ocurren por calentamiento resistivo en los devanados del estator (armadura) y del rotor (campo) de la máquina. En una máquina de a.c. trifásica, las pérdidas en el cobre del estator (SCL) están dadas por la ecuación:

$$P_{SCL} = 3I^2AR_A$$

Donde  $I_A$  es la corriente que fluye en cada fase de la armadura y  $R_A$  es la resistencia de cada fase de la armadura.

Las pérdidas en el cobre del rotor (RCL) de una máquina alterna sincrónica están dadas por:

$$P_{RCL} = 3I_F^2R_F$$

Donde  $I_F$ , es la corriente que fluye en el devanado de campo del rotor y  $R_F$  es la resistencia del devanado de campo. En general, la resistencia utilizada en estos cálculos es la del devanado a la temperatura normal de operación.

*Pérdidas en el núcleo.*

Pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas ocurren en la parte metálica del motor. Estas pérdidas varían con el cuadrado de la densidad de

flujo ( $B^2$ ) y, para el estator, como la 1.5 av potencia de la velocidad de rotación de los campos magnéticos ( $n^{1.5}$ ).

#### *Pérdidas mecánicas.*

En una máquina de c.a. son aquellas asociadas a los efectos mecánicos. Existen dos tipos básicos de pérdidas mecánicas: el *rozamiento* mecánico propiamente dicho y el *rozamiento con el aire*.

Las pérdidas por rozamiento son causadas por fricción en los cojinetes de las máquinas, en tanto que las pérdidas por rozamiento con el aire se deben a la fricción entre las partes móviles de la máquina y el aire encerrado en la carcasa del motor. Estas pérdidas varían con el cubo de la velocidad de rotación de la máquina.

Las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el cobre de la máquina se agrupan con frecuencia bajo el nombre de *pérdidas rotacionales de vacío (sin carga)* de la máquina. En vacío toda la potencia de entrada debe utilizarse para superar estas pérdidas. Entonces, midiendo la potencia.

#### *Pérdidas dispersas o adicionales.*

Las pérdidas dispersas son pérdidas que no se pueden ubicar en ninguna de las categorías anteriores. Sin importar qué tanta precisión se tenga en considerar las pérdidas, siempre hay algunas que se escapan de las categorías anteriores.

Todas estas pérdidas se agrupan en las pérdidas dispersas.

Convencionalmente, en la mayoría de las máquinas, las pérdidas dispersas se toman como 1 % de la plena carga.

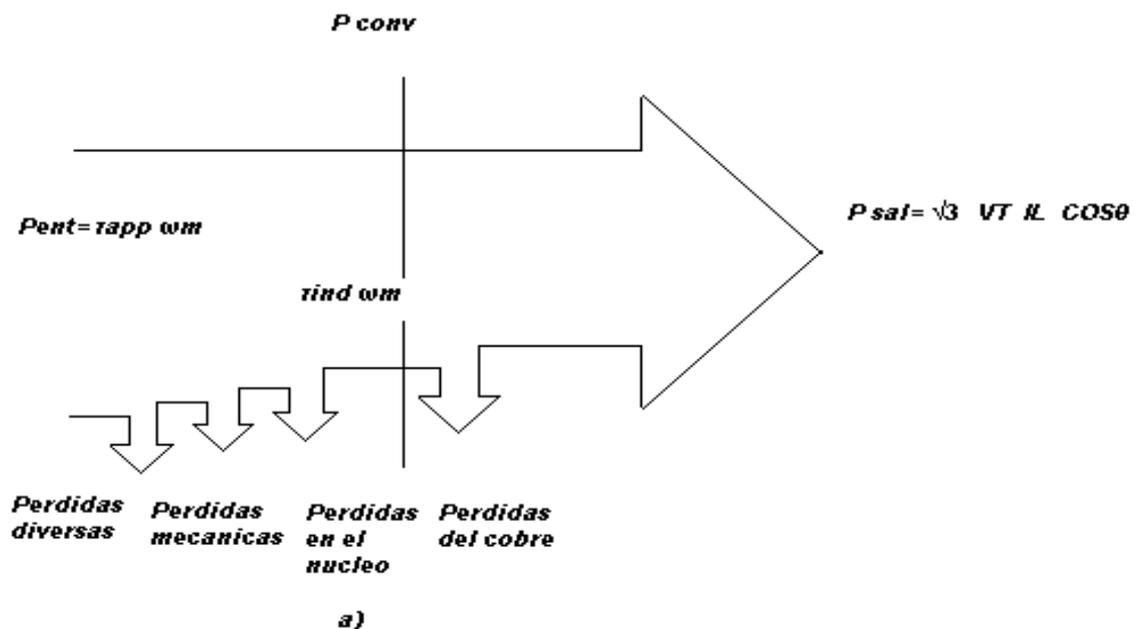
**Diagrama de flujo de potencia.**

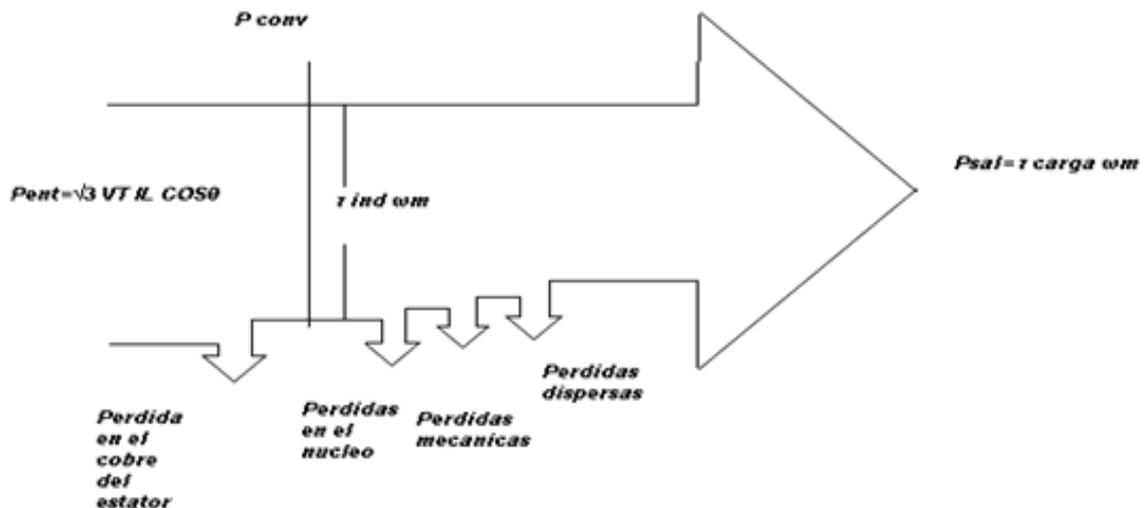
Una de las técnicas más convenientes de considerar las pérdidas de potencia en una máquina es el diagrama de flujo de potencia. En la figura 1.4 se muestra el diagrama de flujo de potencia de un generador y un motor de c.a.

En esta figura, se suministra potencia mecánica a la máquina y luego se restan las pérdidas dispersas, las pérdidas mecánicas y las pérdidas en el núcleo. Una vez que se han restado estas pérdidas, en situaciones ideales, la potencia restante se convierte de potencia mecánica a eléctrica en el punto llamado  $P_{conv}$ . La potencia mecánica que se convierte es igual a:

$$P_{conv} = \lambda i n d \omega m$$

Y se produce la misma cantidad de potencia eléctrica. Sin embargo, ésta no es la potencia que está presente en los terminales de la máquina. Antes de llegar a los terminales, se deben restar las pérdidas eléctricas  $I^2R$ .





b)

**Figura 1.4 a) Diagrama de flujo de potencia de un generador de c.a. trifásico. b) Diagrama de flujo de potencia de un motor de c.a. trifásico.**

### **Máquinas síncronas.**

La máquina síncrona está compuesta básicamente de una parte activa fija que se conoce como *inducido* o ESTATOR y de una parte giratoria coaxial que se conoce como *inductor* o ROTOR. El espacio comprendido entre el rotor y el estator, es conocido como entrehierro.

Esta máquina tiene la particularidad de poder operar ya sea como generador o como motor.

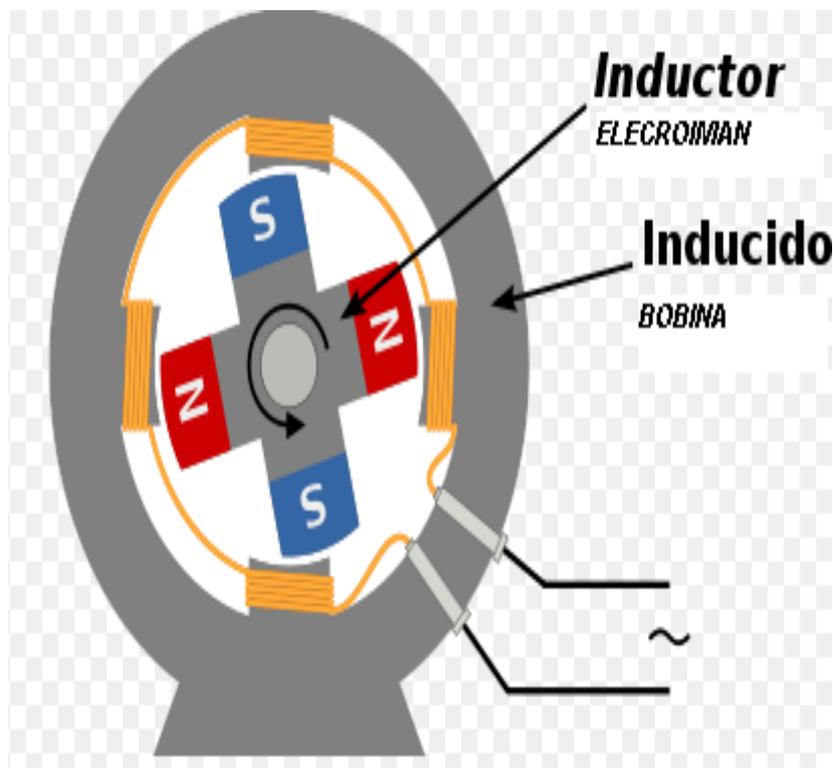
Su operación como alternador se realiza cuando se aplica un voltaje de c.d. en el campo de excitación del rotor y a su vez éste es movido o desplazado por una fuente externa, que da lugar a tener un campo magnético giratorio que atraviesa o corta los conductores del estator, induciéndose con esto un voltaje entre terminales del generador.

Su operación como motor síncrono se realiza cuando el estator es alimentado con un voltaje trifásico de c.a. y consecutivamente el rotor es alimentado con un voltaje de c.c.

## 1.2 GENERADORES SÍNCRONOS.

Los generadores síncronos o alternadores son máquinas sincrónicas que se usan para convertir potencia mecánica en potencia eléctrica de corriente alterna.

El alternador síncrono consiste en un electroimán girando, llamado rotor cilíndrico generalmente al lado de una bobina, el estator conectado en estrella el cual por efecto de la rotación del rotor va a inducir tensión trifásica en el estator, para esto tiene que haber una velocidad relativa entre el rotor (también llamado campo) y el estator (o armadura).



**Figura 1.5 Alternador síncrono.**

Si en un generador síncrono se aplica al embobinado del rotor una corriente continua, se producirá un campo magnético en el rotor. Entonces el rotor del generador se impulsará por medio de un motor primario, lo cual producirá un campo magnético rotatorio dentro de la máquina. Este campo magnético rotatorio inducirá un sistema trifásico de voltajes dentro del embobinado del estator del generador.

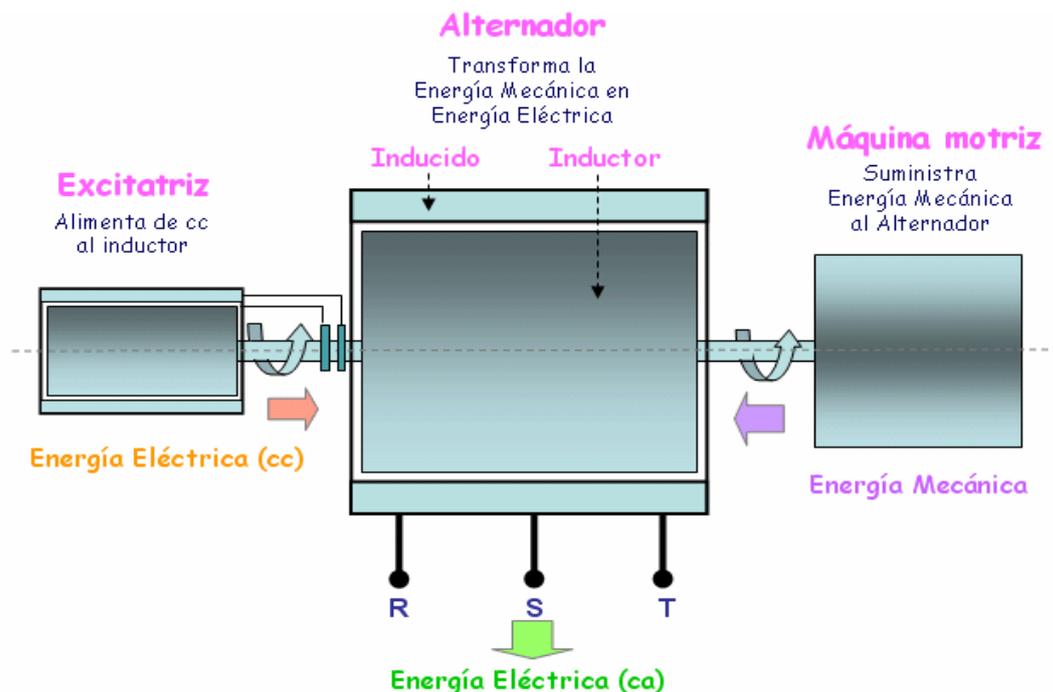
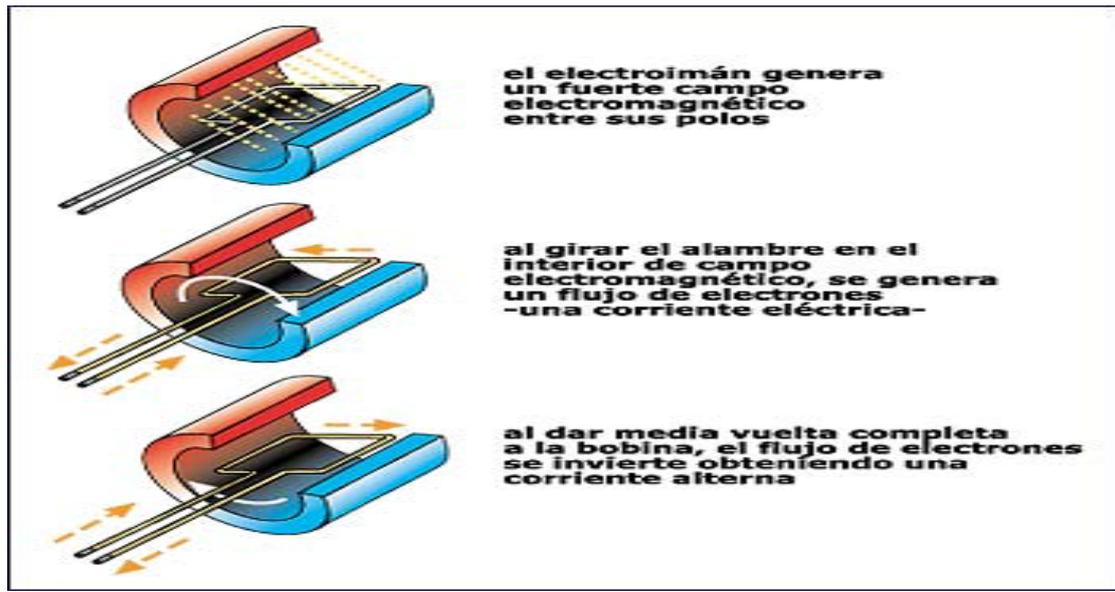
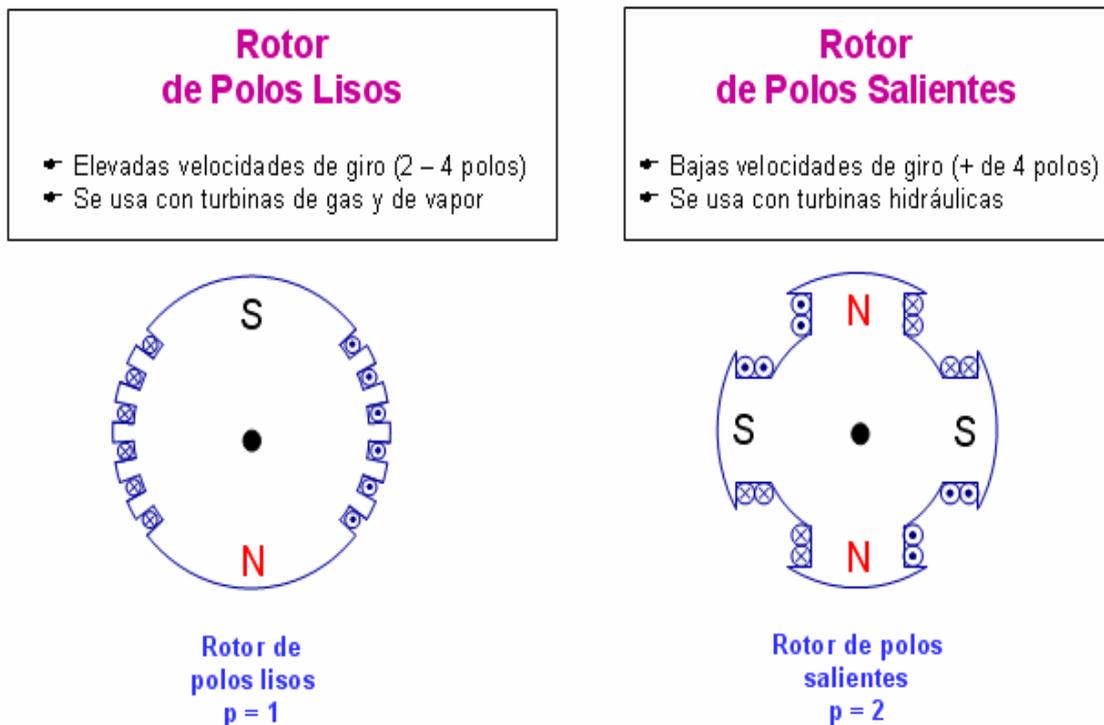


Figura 1.6 Principio de funcionamiento de un alternador síncrono.

### 1.3 CONTRUCCIÓN DE UN ALTERNADOR SÍNCRONO.

El rotor de un generador síncrono es esencialmente un gran electroimán. Los polos magnéticos del rotor pueden ser de construcción saliente o no saliente. El termino saliente significa protuberante o resaltado y un polo saliente es un polo magnético que resalta de la superficie del rotor. Por otra parte, un polo no saliente es un polo magnético construido a ras con la superficie del rotor.

Los rotores de polo no saliente se usan normalmente para rotores de dos o cuatro polos, mientras que los de polo saliente se utilizan normalmente en rotores de cuatro o más polos. Como el rotor está sujeto a cambios en los campos magnéticos, se construye de láminas delgadas para reducir perdidas por corrientes parasitas.



**Figura 1.7 Rotores de polos salientes y lisos.**

Un flujo de c.d. debe alimentar el circuito del campo del rotor. Puesto que este está girando, se necesita un arreglo especial para llevar la fuerza de c.d. a su

embobinado de campo. Hay dos métodos comunes para suministrar esta fuerza de c.d. :

1. Suministrarle al rotor la potencia de c.d. desde una fuente externa de c.d. por medio de anillos de rozamiento y escobillas.
2. Suministro de potencia de c.d. desde una fuente especial de c.d. montado directamente en el eje del generador síncrono.

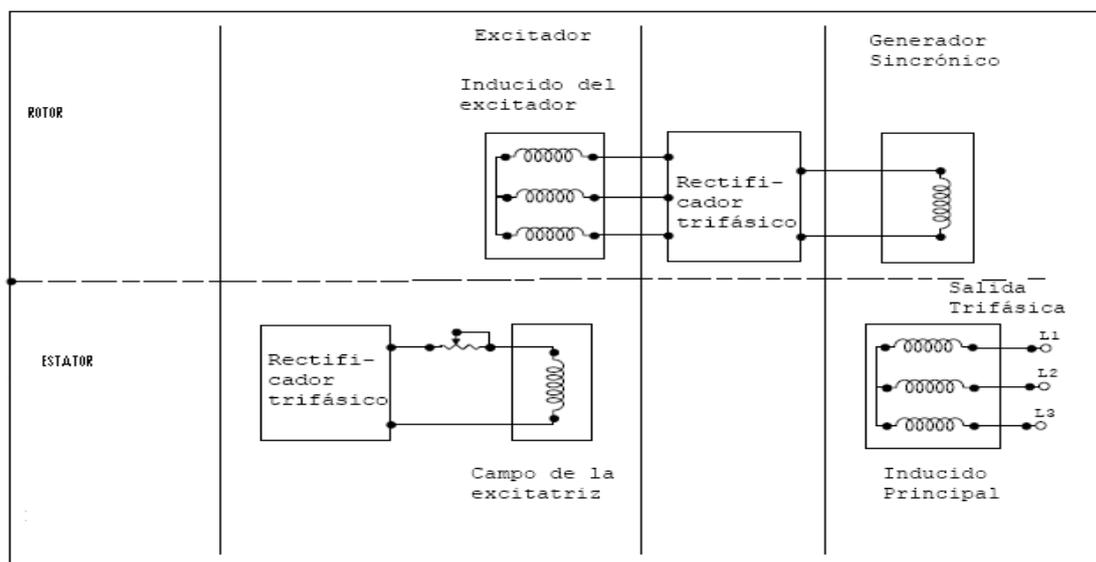
Los anillos de rozamiento son anillos metálicos que envuelven completamente el eje de la maquina, pero aislados de él. Cada extremo del embobinado del rotor de c.d. esta unido a cada uno de los anillos de rozamiento del eje de la maquina síncrona y sobre cada uno de ellos se coloca una escobilla. Si el extremo positivo de una fuente de voltaje de c.d. llega al embobinado del campo en todo momento, sin tener en cuenta la posición angular o la velocidad del rotor.

Los anillos de rozamiento y las escobillas crean algunos problemas cuando se usan para suministrar potencia de c.d. a los embobinados de campo de una maquina síncrona. Ellos aumentan la cantidad de mantenimiento requerido por la maquina, puesto que las escobillas deben examinarse periódicamente para ver su estado de desgaste. Además, las caídas de voltaje en las escobillas pueden ser la causa de pérdidas significativas de potencia en las maquinas con corrientes de campo muy grandes.

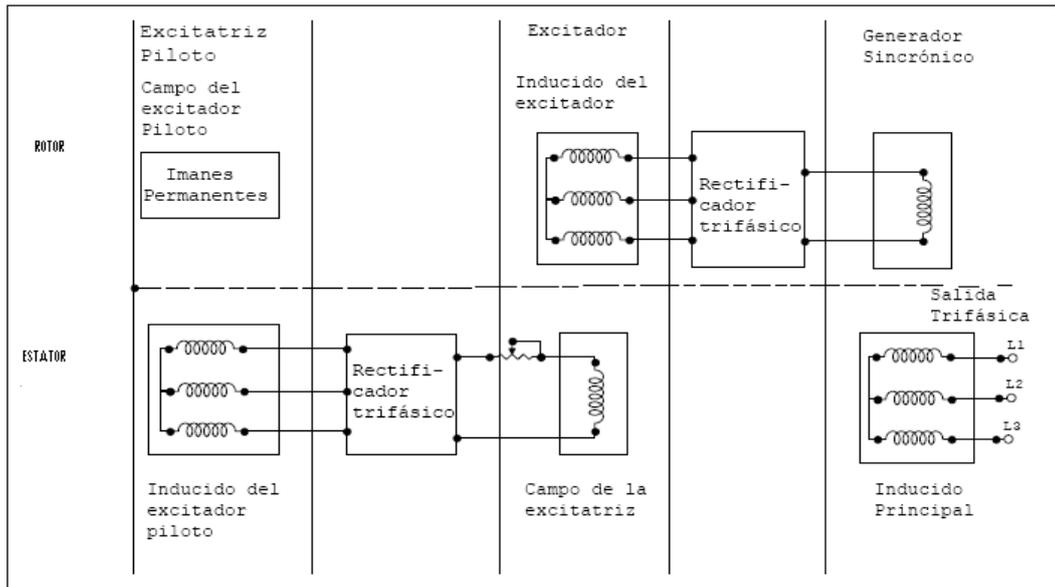
A pesar de estos problemas, los anillos de rozamiento y las escobillas se usan en todas las maquinas síncronas más pequeñas, porque ningún otro método es tan económico para suministrar la corriente de campo. En generadores y motores más grandes, se usan excitatrices sin escobillas para suministrarle la corriente de campo a la maquina. Una excitatriz sin escobillas es un generador de c.d. pequeño con su circuito de campo montado sobre el estator y su circuito de inducido montado sobre el eje del rotor.

La salida trifásica de la excitatriz se rectifica a c.d. con un circuito rectificador trifásico, montado también sobre el eje del generador y luego inyectando al circuito de campo principal. Controlando la escasa corriente de campo de c.d. en la excitatriz (localizada en el estator), es posible ajustar la corriente de campo en la maquina principal sin anillos rozantes ni escobillas. Para hacer la excitación de un generador completamente independiente de cualquier fuente de potencia externa, una pequeña excitatriz piloto se incluye a menudo en el sistema. Una excitatriz piloto es un generador pequeño de c.d. con imanes permanentes montados sobre el eje del rotor y un devanado trifásico sobre el estator; ella produce la potencia para el circuito de campo de la excitatriz, que a su vez controla el circuito de campo de la maquina principal. Si una excitatriz piloto se incluye en el eje del generador, entonces no se necesita potencia eléctrica externa para poner en marcha el generador.

En la figura 1.8 vemos como una corriente trifásica pequeña se rectifica y se usa para alimentar el circuito de campo de la excitatriz, que se encuentra en el estator. La salida del circuito del inducido de la excitatriz en el rotor se rectifica luego y se usa para alimentar la corriente de campo de la maquina principal. En la figura 1.9 los imanes permanentes de la excitatriz piloto producen la corriente de campo de la excitatriz que a su vez produce la corriente de campo de la maquina principal.



**Figura 1.8 Circuito excitatriz sin escobillas.**



**Figura 1.9 Circuito excitatriz sin escobillas que incluye una excitatriz piloto.**

#### **1.4 VELOCIDAD DE ROTACIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO.**

Los generadores síncronos son por definición síncronos, lo que significa que la frecuencia eléctrica que produce está atada o sincronizada con la velocidad mecánica de rotación del generador. El rotor de un generador síncrono se compone de un electroimán al cual se le suministra una corriente directa.

El campo magnético del rotor se mueve según sea la dirección en que se haga girar dicho rotor. Ahora la velocidad de rotación de los campos magnéticos de la maquina se relaciona con la frecuencia eléctrica del estator por medio de la siguiente ecuación.

$$f = \frac{np}{120}$$

f = frecuencia eléctrica, n = velocidad del campo magnético, p = número de polos

Puesto que el rotor gira con la misma velocidad que el campo magnético, esta ecuación relaciona la velocidad de rotación con la frecuencia eléctrica resultante. Dado que la potencia eléctrica es generada a 50 ó 60 Hz, el generador debe girar a una velocidad fija que depende del número de polos de la máquina.

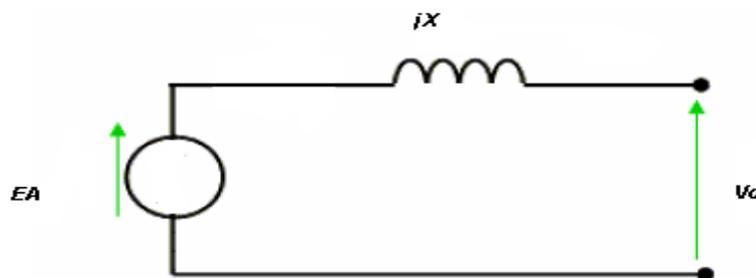
**Velocidades de un genrador síncrono (r.p.m)**

Número de polos	50 Hz	60 Hz
2	3000	3600
4	1500	1800
6	1000	1200
8	750	900
10	600	720
12	500	600

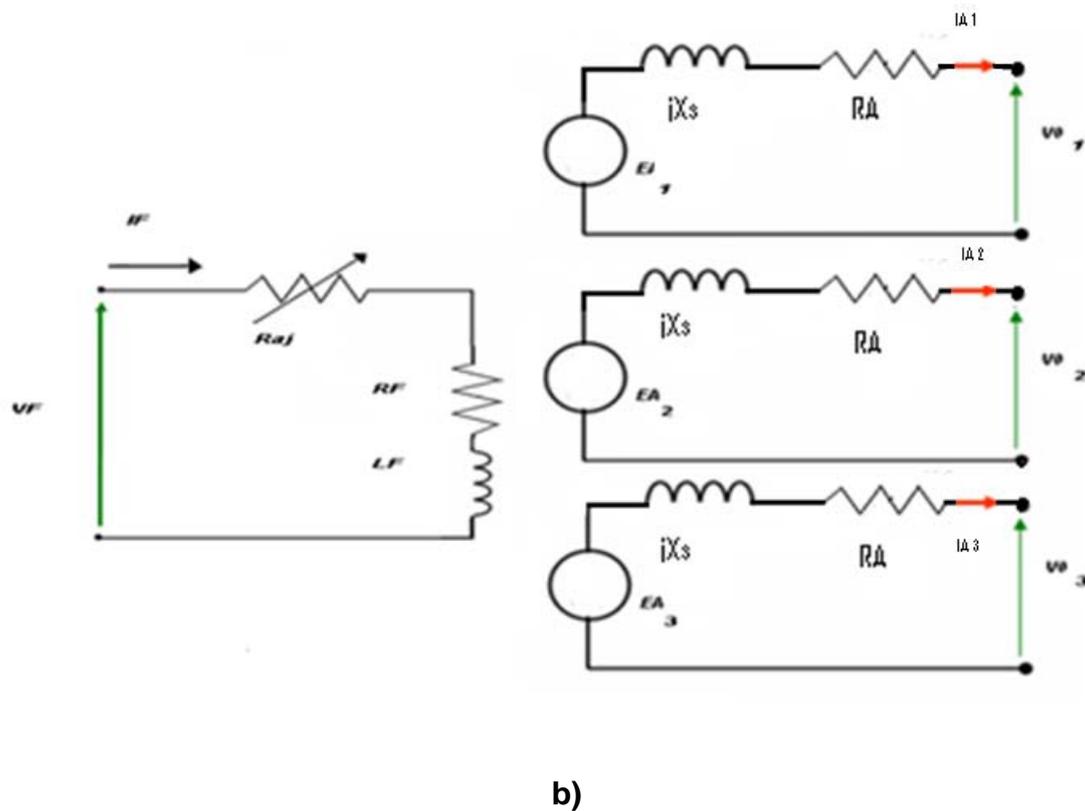
**Figura 1.10** Tabla de velocidades de un generador síncrono.

**1.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR SÍNCRONO.**

El voltaje  $E_A$  es el voltaje generado internamente que se produce en una fase de generador síncrono. Sin embargo, este voltaje  $E_A$  no es, generalmente el voltaje que aparece en los terminales del generador. De hecho, la única vez que el voltaje interno  $E_A$  es el mismo voltaje de salida  $V_\phi$  por una fase, es cuando no hay corriente del inducido que le llegue a la maquina.



a)



**Figura 1.11 a) Circuito equivalente por fase. b) Circuito equivalente de un generador síncrono trifásico.**

¿Por qué el voltaje de salida  $V_\phi$  de una fase, no es igual a  $E_A$  y cuál es la relación entre ambos voltajes?

Hay muchos factores que causan la diferencia entre  $E_A$  y  $V_\phi$ :

1. La distorsión del campo magnético del entrehierro debido a la corriente que fluye en el estator, llamada reacción del inducido.
2. La autoinductancia de las bobinas del inducido.
3. La resistencia de las bobinas del inducido.
4. El efecto de la forma del rotor de polos salientes.

El primer efecto que se menciona, normalmente el más grande es la relación de inducido. Cuando un rotor de generador síncrono gira, se induce un voltaje  $E_A$  en los embobinados del estator del generador. Si una carga se conecta a los

bornes del generador se establecerá un flujo de corriente. Pero un flujo de corriente trifásica del estator, producirá un campo magnético propio en la máquina. Este campo magnético del estator distorsiona el campo magnético original del rotor, lo que modifica el voltaje de fase resultante. Este efecto se le llama reacción de inducido por que la corriente del inducido (estator) afecta en primer lugar, el campo magnético que produjo.

Los efectos de la reacción del inducido y la autoinductancia de la máquina son representados por reactancias, y es costumbre combinarlas en una sola llamada reactancia sincrónica de la máquina.

$$X_S = X + X_A$$

Por lo tanto la ecuación final que describe  $V_\phi$  es:

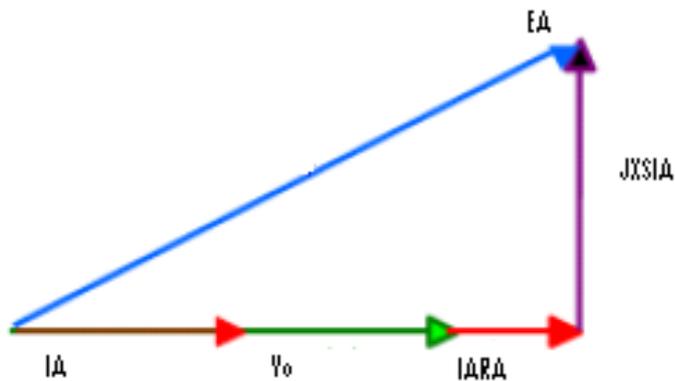
$$V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$$

### **1.6 DIAGRAMA FASORIAL DEL GENERADOR SÍNCRONO.**

Puesto que los voltajes en un generador síncrono son voltajes de c.a. generalmente se representan por fasores. Como los fasores tienen tanto una magnitud como un ángulo, la relación entre ellos se debe expresar en dos dimensiones. Cuando los voltajes presentes en una fase ( $E_A$ ,  $V_\phi$ ,  $jX_S I_A$ , y  $R_A I_A$ ) y la corriente  $I_A$  en la fase se dibujan de tal modo que muestren la relación entre sí, la grafica resultante se denomina un diagrama fasorial.

Por ejemplo en la siguiente figura se muestran estas relaciones cuando el generador alimenta una carga con factor de potencia unitario una carga puramente resistiva. De la ecuación  $V_\phi = E_A - jX_S I_A - R_A I_A$  deducimos que el voltaje total  $E_A$  se diferencia del voltaje en los bornes de la fase  $V_\phi$  por las caídas de voltaje inductivo y resistivo.

Todos los voltajes y corrientes se referencian con  $V_\phi$  el cual arbitrariamente se presume estar en un ángulo de  $0^\circ$ .



**Figura 1.12 Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia unitario.**

Este diagrama fasorial se puede comparar con el de los generadores que funcionan con factores de potencia en atraso y adelanto.

Obsérvese que para un voltaje de fase dado y una corriente de armadura, se necesita un voltaje generado internamente  $E_A$  mayor que las cargas en atraso, que para cargas en adelanto. Por tanto, se necesita una corriente de campo mayor con cargas en atraso para obtener el mismo voltaje terminal, porque:

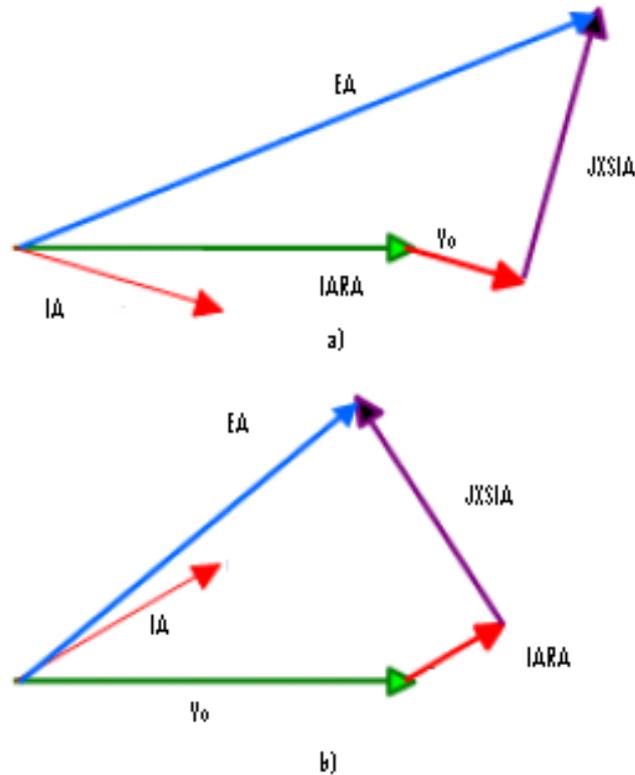
$$E_A = K\phi\omega$$

Y  $\omega$  debe ser constante para mantener una frecuencia constante.

Alternativamente, para una corriente de campo dada y una corriente de carga de magnitud, la tensión en las terminales es menor para carga en atraso y mayor para cargas en adelanto.

En maquinas síncronas reales, la reactancia síncrona es normalmente mucho mayor que la resistencia del embobinado  $R_A$ , así que esta se desprecia

frecuentemente, para resultados numéricos precisos,  $R_A$  deberá tenerse en cuenta.



**Figura 1.13 Diagrama fasorial de un generador síncrono con factor de potencia: (a) en atraso, (b) en adelanto.**

### **1.7 PRUEBAS DE GENERADORES SÍNCRONOS.**

Para obtener los parámetros de un generador síncrono se llevan a cabo tres pruebas sencillas, descritas a continuación.

*La prueba de resistencia.*

Esta prueba se realiza para medir la resistencia del devanado de la armadura de un generador síncrono cuando se halla en reposo y el devanado de campo está abierto.

La resistencia se mide entre dos líneas al mismo tiempo y se toma el promedio de tres lecturas de resistencia como el valor medio de la resistencia  $R_L'$  de línea a línea si el generador esta conectado en Y, la resistencia por fase es:

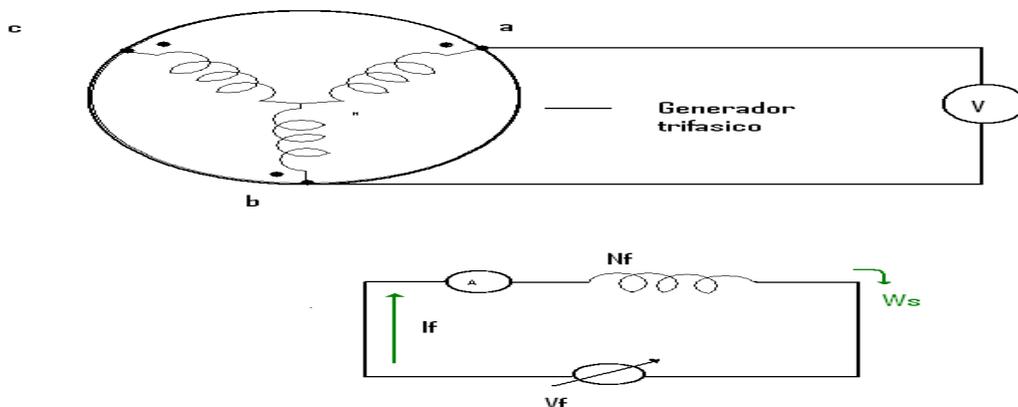
$$R_a = 0.5R_L$$

Sin embargo, para un generador conectado en  $\Delta$ , la resistencia por fase es:

$$R_a = 1.5R_L$$

*Prueba a circuito abierto.*

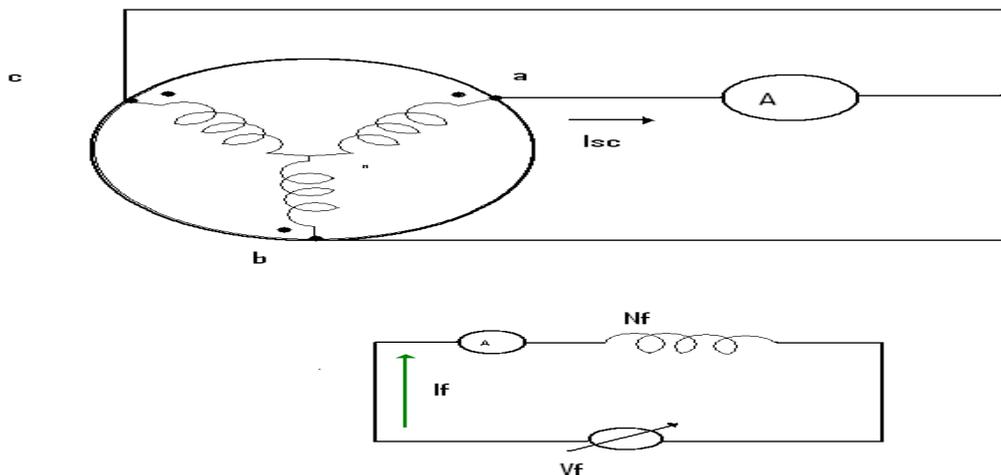
La prueba a circuito abierto, o prueba sin carga, se efectúa impulsando el generador a su velocidad nominal al tiempo que se deja abierto el devanado de la armadura. La corriente de campo se varia en pasos apropiados y se registran los valores correspondientes del voltaje a circuito abierto entre dos pares cualquiera de terminales de los devanados de la armadura, para un generador conectado en Y. La corriente de campo puede aumentarse hasta que el voltaje a circuito abierto sea el doble del valor especificado. De los datos registrados para el voltaje a circuito abierto es posible calcular el voltaje por fase (circuito abierto).



**Figura 1.14 Diagrama del circuito para realizar una prueba de circuito abierto.**

*Prueba en corto circuito.*

La prueba en corto circuito brinda información acerca de las potencialidades de corriente de un generador síncrono. Se lleva a cabo impulsando el generador a su velocidad nominal, con las terminales del devanado de la armadura en corto circuito para un generador conectado en Y. Se coloca un amperímetro en serie con una de las tres líneas en cortocircuito. Se incrementa gradualmente la corriente de campo y se registra el valor correspondiente de la corriente. La corriente máxima de armadura en corto circuito no debe exceder el doble de la corriente especificada del generador. Con base en los datos registrados se calcula la corriente por fase en cortocircuito.



**Figura 1.15 Diagrama del circuito para ejecutar una prueba de corto circuito.**

**1.8 FUNCIONAMIENTO EN PARALELO DE LOS GENERADORES DE C.A.**

En la actualidad es difícil encontrar un generador síncrono que alimente su propia carga independiente de otros generadores. Esta situación se encuentra solamente en aplicaciones muy especiales, tal como en generadores de emergencia.

Para todas las aplicaciones comunes, hay gran cantidad de generadores que trabajan en paralelo para proveer la potencia que demandan las cargas.

¿Por qué hacen funcionar en paralelo los generadores síncronos? Porque al hacerlo tiene muchas ventajas:

1. Varios generadores pueden alimentar más carga que uno solo.
2. Teniendo varios generadores se aumenta la confiabilidad del sistema de potencia, puesto que si alguno de ellos falla, no se suspende totalmente la potencia de carga.
3. El tener varios generadores funcionando en paralelo permite que se pueda desconectar uno o más de ellos, bien por paro o para mantenimiento preventivo.
4. Si se usa un solo generador y no está funcionando muy cerca de la plena carga, entonces su funcionamiento será relativamente ineficiente. Pero con varias máquinas pequeñas, es posible utilizar solo alguna o algunas de ellas; las que trabajen funcionarán muy cerca de su carga nominal y por lo tanto será un trabajo más eficiente.

### **1.9 REQUISITOS PARA LA CONEXIÓN EN PARALELO.**

En la siguiente figura se muestra un generador síncrono  $G_1$  que alimenta una carga, junto con otro generador  $G_2$  que se va a conectar en paralelo con el primero, accionando el interruptor  $S_1$ .

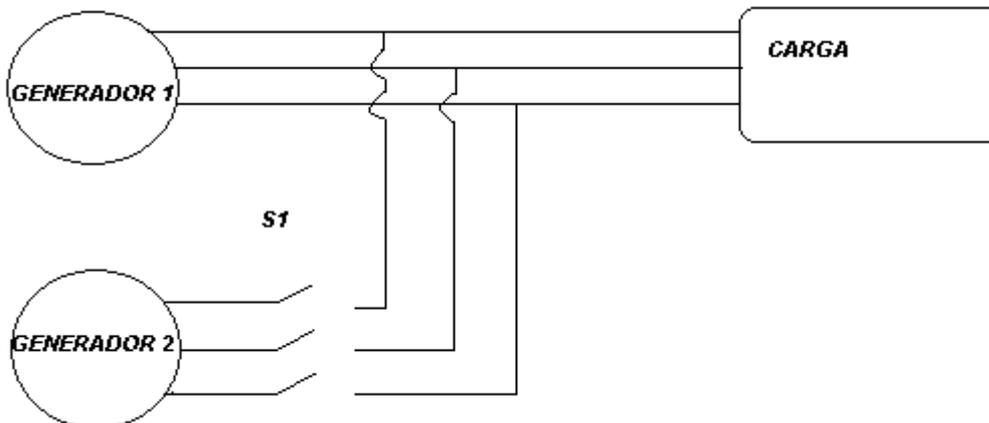
¿Qué condiciones deben de cumplirse antes de que se pueda cerrar el interruptor para conectar los dos generadores?

Si el interruptor se cierra arbitrariamente en cualquier momento, los generadores se expondrían a graves daños y la carga podría perder potencia. Si los voltajes no son exactamente los mismos en cada uno de los conductores que se conectan entre sí, se generara un flujo de corriente muy grande cuando el interruptor se cierre. Para evitar este problema, cada una de las tres fases

debe tener exactamente la misma magnitud de voltaje y el mismo ángulo de fase del conductor al cual sea conectada.

En otras palabras, el voltaje en la fase a debe ser exactamente el mismo que el voltaje en la fase a' y así sucesivamente para las fases by b' y cyc'. Lograndose esta semejanza, se deben cumplir las siguientes condiciones para la conexión en paralelo:

1. Los voltajes de línea efectivos de los dos generadores deben ser iguales.
2. Los dos generadores deben tener la misma secuencia de fase.
3. Los ángulos de fase de las dos fases a deben ser iguales.
4. La frecuencia del generador nuevo, llamado generador entrante, debe ser ligeramente más alta que la frecuencia del sistema de funcionamiento.



**Figura 1.16 Generador conectado en paralelo con un sistema de potencia en funcionamiento.**

### **1.10 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA CONECTAR GENERADORES EN PARALELO.**

Supóngase que el generador  $G_2$  se va a conectar en el sistema, para llevar a cabo la conexión en paralelo, se deberán seguir los siguientes pasos:

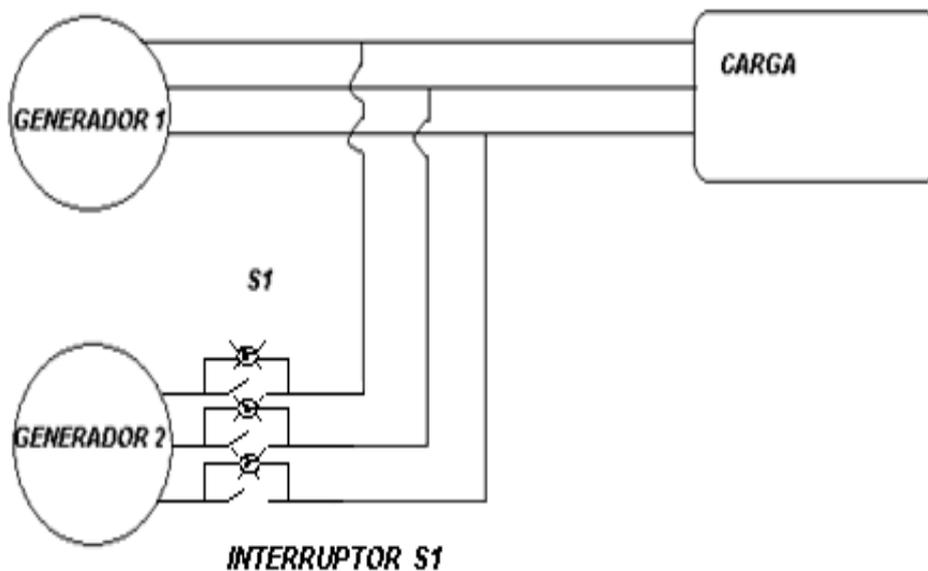
*Primero*, la corriente de campo del generador entrante se deberá graduar utilizando voltímetros, hasta lograr que la tensión de los bornes se iguale a la tensión de línea del sistema.

*Segundo*, la secuencia de fase del generador entrante se debe comparar con la secuencia de fase del sistema, lo cual es posible en varias formas. Una de ellas es conectar un motor de inducción pequeño a las terminales de cada uno de los generadores. Si el motor gira siempre en la misma dirección, entonces la secuencia de fase será la misma para ambos generadores. Si lo hace en sentido contrario, las secuencias de fase serán diferentes y deberán invertirse dos de los conductores del generador entrante.

Otra manera de comprobar la secuencia de fases es el método de los tres bombillos. Con este método se tienen tres bombillos entre las terminales abiertas del interruptor, conectando al generador al sistema, a medida que cambian las fases entre los dos sistemas, los bombillos brillan al comienzo (diferencia grande de fase) y luego se opacan (diferencia pequeña de fase). Si los tres bombillos se iluminan y apagan al mismo tiempo, entonces los sistemas tienen la secuencia de fase contraria y deberá invertirse alguna de ellas.

Enseguida se gradúa la frecuencia del generador entrante para que la frecuencia sea ligeramente mayor que la frecuencia del sistema en funcionamiento. Esto se hace, primero mirando un medidor de frecuencias, hasta que estas se acerquen, y luego observando los cambios de fase entre los sistemas. El generador entrante se gradúa en una frecuencia ligeramente mayor, de tal modo que cuando se conecte se ponga en línea entregando potencia como generador, en lugar de absorberla como lo haría un motor.

Una vez que casi se igualen las frecuencias, los voltajes en los dos sistemas cambiarán de fase entre sí muy lentamente, y podrá observar, entonces, los cambios de fase; cuando sus ángulos se igualen, el interruptor que conecta los dos sistemas se debe apagar. Finalmente una forma sencilla es observar los tres bombillos descritos atrás, relacionados con el estudio de la secuencia de fase. Cuando los tres bombillos se apagan, la diferencia de voltaje entre ellos es cero y por consiguiente, los sistemas se encuentran en fase. Este sistema funciona pero no es muy exacto, un mejor sistema es emplear un sincroscopio, instrumento que sirve para medir la diferencia de de ángulo de fase entre la fase a de los dos sistemas.



**Figura 1.17 Procedimiento para conectar un generador en paralelo.**

## **CAPÍTULO 2.**

### **MOTOR SÍNCRONO.**

El motor síncrono recibe este nombre debido a que el rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator, es decir, están sincronizados y principalmente este convierte potencia eléctrica en potencia mecánica.

#### **2.1 CONSTRUCCIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO.**

Los motores síncronos tienen las siguientes características:

- Tienen un estator trifásico similar al de un motor de inducción. Son usados por lo general en instalaciones de voltajes medianos (Ver fig. 2.1).
- Tienen un rotor bobinado (campo rotatorio) que tiene el mismo número de polos que el estator, el cual es excitado por medio de una fuente externa de corriente continua (Ver fig. 2.2). El rotor puede ser de polos lisos o polos salientes<sup>1</sup> (Ver fig. 2.3 y 2.4).
- Arranca como un motor de inducción. El motor síncrono tiene también un devanado tipo jaula de ardilla conocido como devanado amortiguador que sirve para producir la fuerza de torsión para el arranque del motor.
- Los motores síncronos funcionan como se menciona anteriormente a la velocidad de sincronismo de acuerdo con la fórmula:

$$\text{RPM} = (120 \times \text{frecuencia}) / \text{Número de polos.}$$



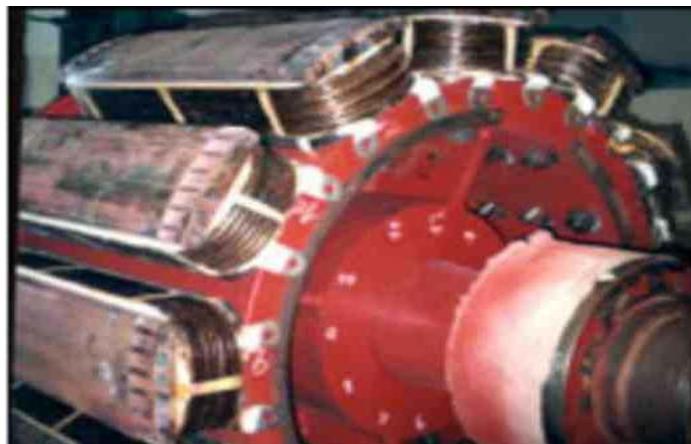
***Figura 2.1 Estator de un motor síncrono.***



**Figura 2.2 Anillos colectores de excitación al rotor.**



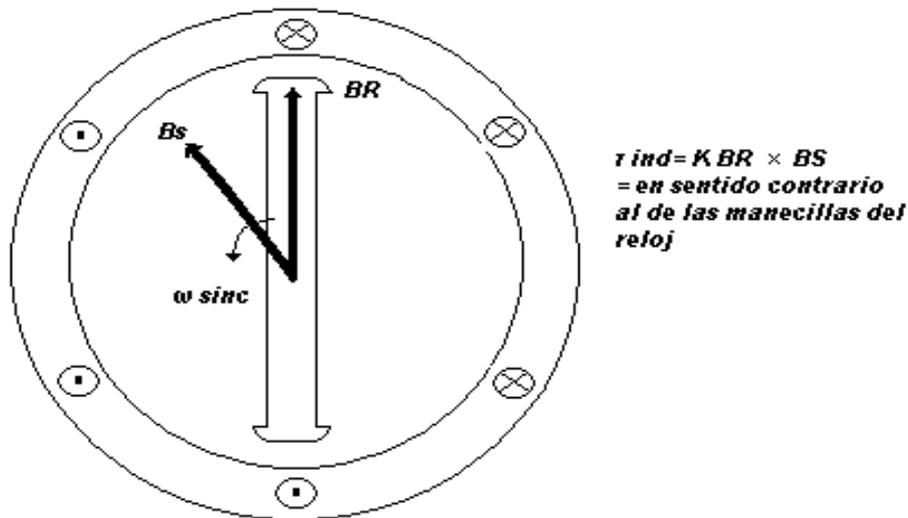
**Figura 2.3 Rotor de un motor síncrono.**



**Figura 2.4 Rotor de polos salientes de un motor síncrono.**

## 2.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS MOTORES SÍNCRONOS.

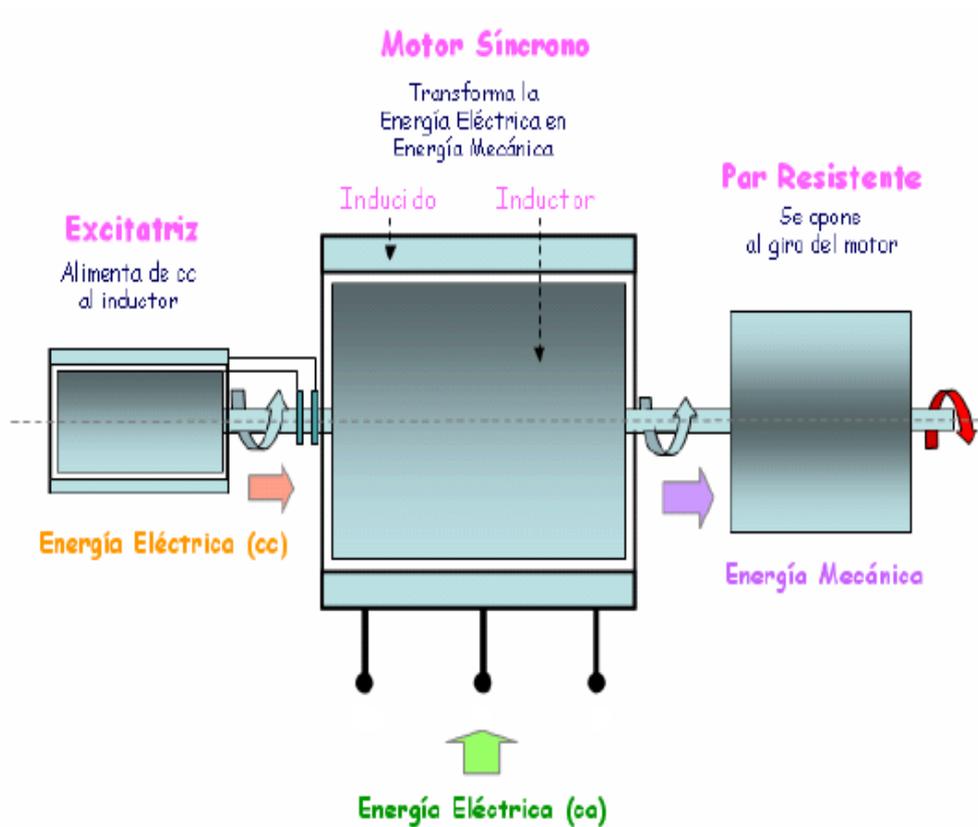
Ver la siguiente figura para poder entender el concepto básico de un motor síncrono, esta muestra un motor síncrono de dos polos. La corriente de campo  $I_F$  del motor produce un campo magnético de estado estacionario  $BR$ , Un conjunto trifásico de voltajes se aplica al estator de la máquina que produce un flujo de corriente trifásica en los devanados.



**Figura 2.5 motor síncrono de dos polos.**

El conjunto trifásico de corrientes en el devanado inducido produce un campo magnético uniforme rotacional  $B_s$ . Entonces, hay dos campos Magnéticos presentes en la máquina, y el campo del rotor tenderá a alinearse con el campo del estator así como dos barras magnéticas tenderán a alinearse si se colocan una cerca de la otra. Puesto que el campo magnético del estator es rotante, el campo magnético del estator y el rotor mismo tratará están enlazados. Cuanto mayor sea el ángulo entre los campos magnéticos hasta un cierto máximo, mayor es el par sobre el rotor de la máquina. El principio básico de operación del motor síncrono es que el rotor "persigue" el campo magnético rotante del estator alrededor de un círculo, sin emparejarse del todo con él.

La figura 2.6 muestra que el motor tiene dos fuentes de alimentación, una trifásica que establece el campo magnético giratorio y otra de c.c. para formar el campo magnético del rotor.

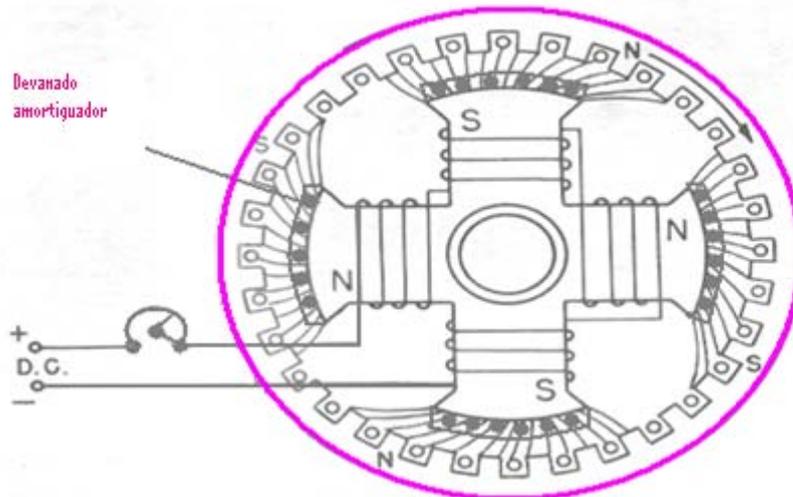


**Figura 2.6 Principio de funcionamiento de un motor síncrono.**

### **2.3 FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR SÍNCRONO CON DEVANADO AMORTIGUADOR.**

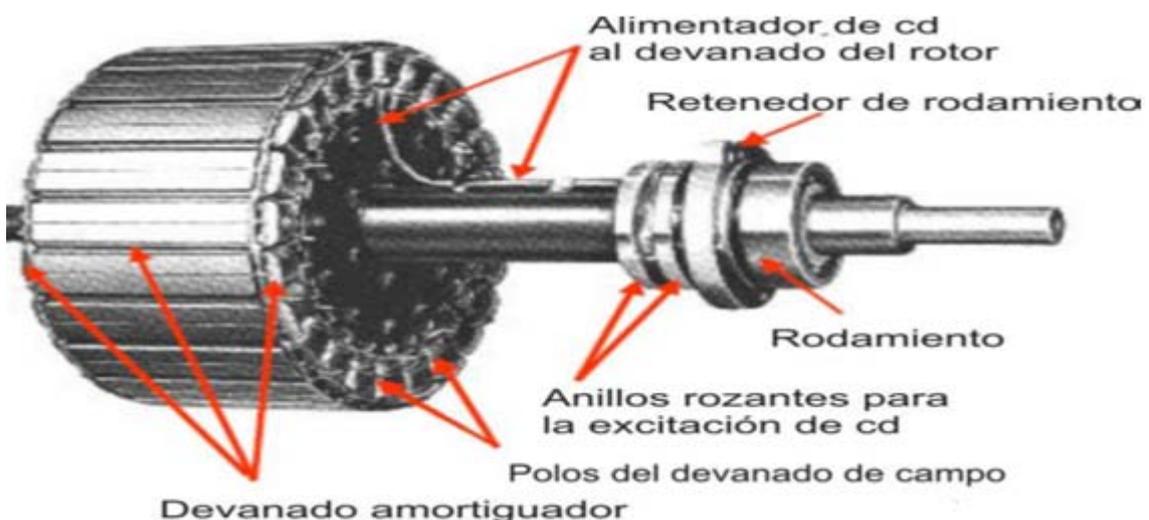
Cuando el voltaje trifásico de régimen se aplica a los devanados del estator, se establece un campo magnético giratorio que se mueve a velocidad sincrónica, establecida por los devanados del estator, la que depende de la frecuencia del voltaje trifásico y del número de polos de estator: La velocidad sincrónica del campo de un estator se calcula por medio de la fórmula:

$$\text{Velocidad síncrona} = \frac{120 \times F}{P}$$



**Figura 2.7 Esquema que muestra el principio de funcionamiento de un motor síncrono con devanado amortiguador**

El campo magnético, establecido por los devanados del estator, al girar a velocidad síncrona, corta a través del devanado en jaula de ardilla del rotor y hace que se induzcan voltaje corriente en las barras de este devanado. El campo magnético del devanado amortiguador o de jaula de ardilla así establecido reacciona con el campo del estator en tal forma que hace que el rotor gire.



**Figura 2.8 Rotor de un motor síncrono en el que se aprecian los anillos rozantes, rodamiento y devanado amortiguador**

El rotor aumentará su velocidad hasta un punto ligeramente por debajo de la velocidad sincrónica del estator. Dicho en otras palabras, hay un ligero resbalamiento del rotor que lo devuelve al campo magnético establecido por el estator. Por lo tanto, el motor se ha puesto en marcha igual que lo hace un motor con inducido en jaula de ardilla.

A continuación el circuito de campo se excita desde una fuente exterior de corriente continua y en los núcleos de campo del rotor se establecen polos magnéticos fijos. Los polos magnéticos del motor son atraídos a los polos magnéticos contrarios del campo magnético establecido por el estator.

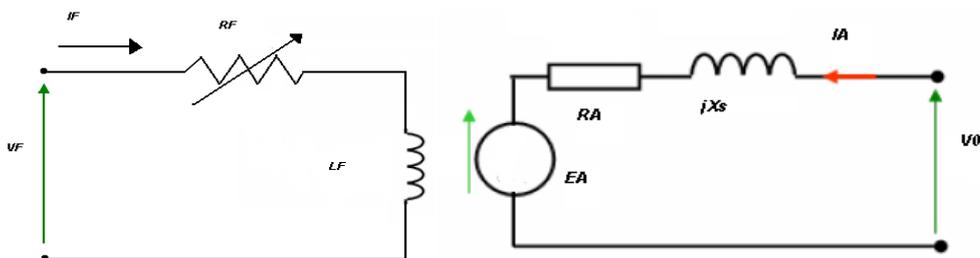
## 2.4 CIRCUITO EQUIVALENTE DEL MOTOR SÍNCRONO.

En base a su construcción el motor síncrono es igual al generador síncrono, con la diferencia que la dirección de flujo de potencia tiene sentido contrario, por lo tanto la corriente de flujo en el estator del motor también tendrá sentido contrario. Por consiguiente la dirección de  $I_A$  solo se invierte.

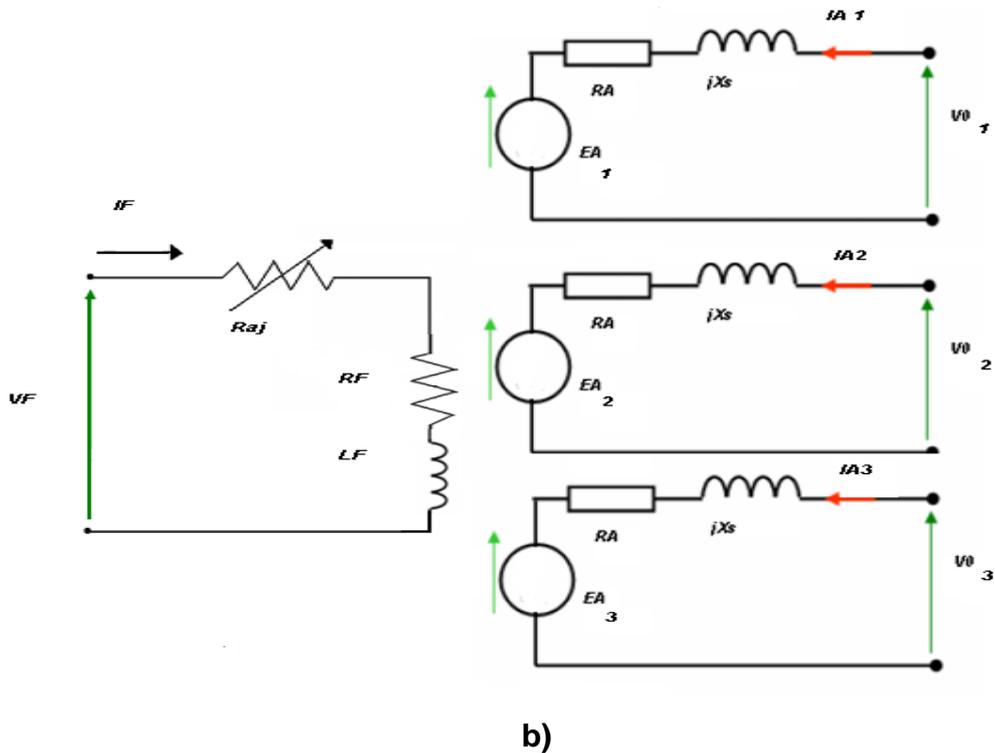
En las siguientes ecuaciones veremos la ecuación del generador, con la diferencia que el signo de la corriente se invierte.

$$V_\phi = E_A + jX_S I_A + R_A I_A$$

$$E_A = V_\phi - jX_S I_A - R_A I_A$$



a)



$R_A$  = Resistencia de inducido

$X_S$  = Reactancia sincrónica

$V_\phi$  = Voltaje de fase

$E_A$  = Voltaje auto inducido

Figura 2.9 a) Circuito equivalente de un motor síncrono por fase.

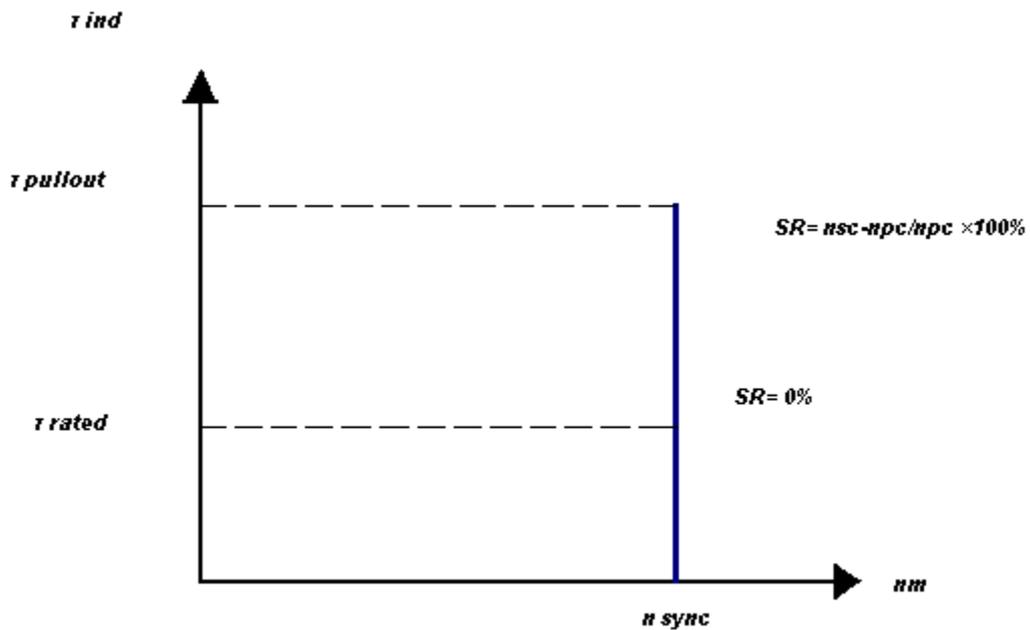
b) Circuito equivalente de un motor síncrono trifásico.

## 2.5 CURVA CARACTERÍSTICA DE LA VELOCIDAD-MOMENTO DE TORSIÓN DEL MOTOR SÍNCRONO.

Estos motores síncronos entregan potencia a cargas que son aparatos que tienen una velocidad constante, al estar conectados a sistemas de potencia mucho más grandes que los motores individuales, los sistemas de potencia aparecen como barrajes infinitos de los motores.

Esto tiene como significado que el voltaje en las terminales y la frecuencia del sistema serán constantes independientemente de la cantidad de potencia tomada por el motor. La velocidad de rotación del motor está asociada a la frecuencia eléctrica aplicada, de modo que la velocidad del motor será

constante, independientemente de la carga. La curva característica resultante par-velocidad se muestra en la siguiente figura.



**Figura 2.9 Curva característica velocidad-momento de torsión del motor síncrono.**

La velocidad de estado estacionario del motor es constante desde vacío hasta el par máximo que puede suministrar el motor, tal que la regulación de velocidad de este motor es 0%. La ecuación del par es:

$$T_{ind} = K B_R B_{net} \sin \delta$$

$$T_{ind} = \frac{3V \phi E_A \sin \delta}{W_m X_S}$$

El par máximo ocurre cuando  $\delta = 90^\circ$ . Sin embargo, los pares normales de plena carga son mucho menores que aquéllos. En efecto, el par máximo puede triplicar el par de plena carga de la máquina. Cuando el par aplicado en el eje de un motor sincrónico excede el par máximo, el rotor no puede permanecer más enlazado a los campos magnéticos del estator. En cambio, el rotor comienza a disminuir la velocidad frente a ellos.

Como el rotor disminuye la velocidad, el campo magnético del estator se entrelaza con él repetidamente, y la dirección del par inducido en el rotor se invierte con cada paso. El enorme par resultante oscila primero en una forma y luego en otra causando que el motor entero vibre con fuerza. La pérdida de sincronización después que se ha excedido el par máximo, se conoce como *deslizamiento de polos*. El par máximo del motor está dado por:

$$T_{max} = K B_R B_{net}$$

$$T_{max} = \frac{3V_\phi E_A}{W_M X_S}$$

$B_R$  = Densidad de campo en el rotor

$B_{net}$  = Densidad de campo resultante o neto

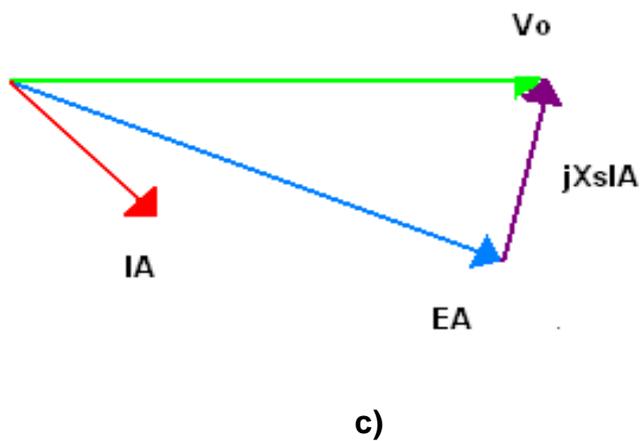
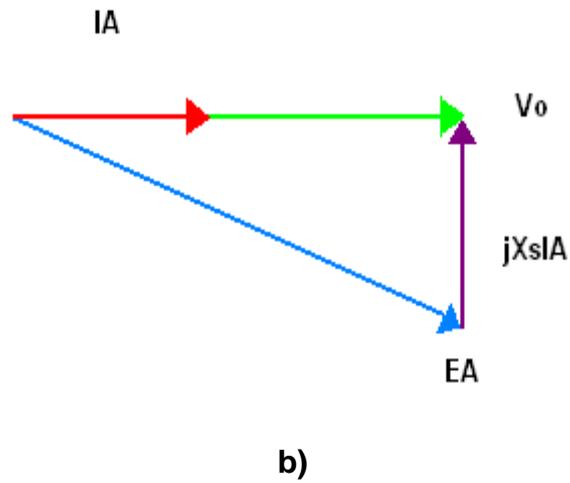
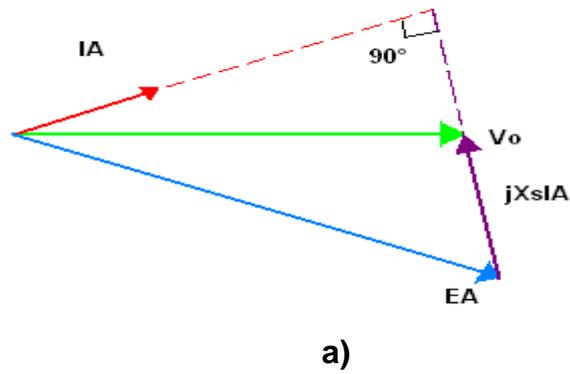
El campo magnético neto es el vector suma de los campos del rotor y el estator

$$B_{net} = B_R + B_S$$

Estas ecuaciones indican que cuanto mayor sea la corriente de campo (y por tanto  $E_A$ ), mayor será el máximo par del motor. Por tanto, hay una ventaja en la estabilidad, si se opera el motor con una gran corriente de campo o un gran  $E_A$ .

El motor sincrónico es la única maquina que puede trabajar con los tres factores de potencia; en adelanto, unitario y en atraso basados en la corriente de excitación.

Los diagramas fasoriales siguientes muestran esta condición:



**Figura 2.10 Diagrama fasorial de un motor síncrono con factor de potencia: (a) en adelanto, (b) unitario, (c) en atraso.**

## **2.6 CAMBIOS DE CARGA EN UN MOTOR SÍNCRONO.**

Si se fija una carga al eje de un motor sincrónico, éste desarrollará suficiente par para mantenerse girando a la velocidad sincrónica junto con su carga.

¿Qué ocurre en un motor sincrónico cuando la carga cambia?

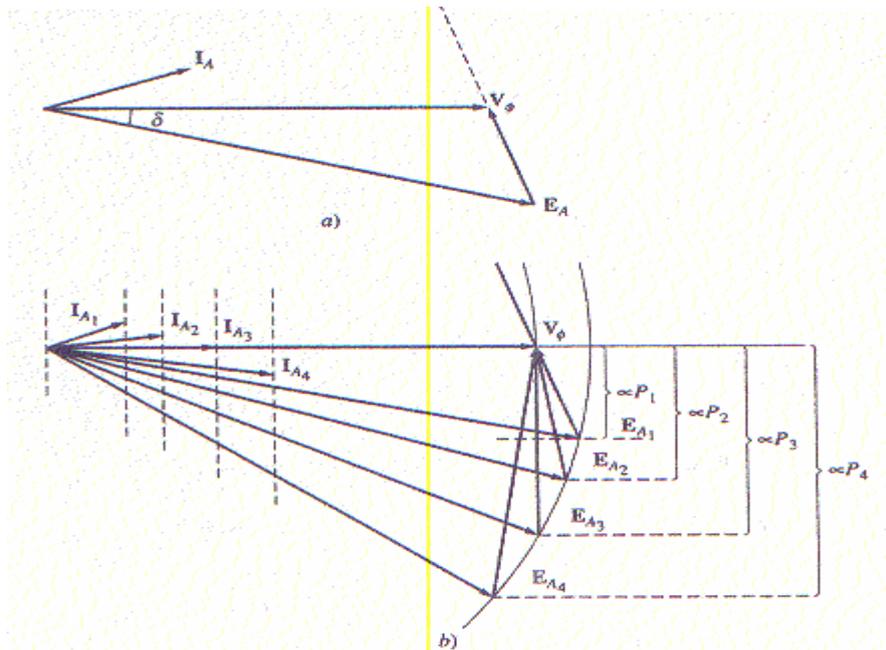
Para responder este interrogante es preciso examinar un motor sincrónico que opera inicialmente con un factor de potencia en adelanto, como se muestra en la siguiente figura 2.11. Si la carga sobre el eje del motor se incrementa, el rotor tenderá a desplazarse respecto a su posición original.

Cuando eso ocurre, el ángulo de par  $\delta$  llega a ser mayor, y aumenta el par inducido. Con el tiempo, el incremento del par inducido cambia de posición el rotor y el motor sigue girando a la velocidad sincrónica, pero con un ángulo de par  $\delta$  mayor. Anexar figura de desplazamiento B.

¿Qué apariencia toma el diagrama fasorial durante este proceso? Para responder esta interrogante es necesario examinar las restricciones sobre la máquina durante un cambio de carga. La figura 2.11 "a" muestra el diagrama fasorial del motor antes que se incrementen las cargas. El voltaje interno generado es  $E_A$  igual a  $K\phi\omega$  y por tanto, depende sólo de la corriente de campo y de la velocidad de la máquina. La velocidad está restringida a permanecer constante debido a la fuente de potencia de entrada y, puesto que no se ha tocado el circuito del campo, la corriente de campo también es constante.

Entonces  $E_A$  debe ser constante cuando cambia la carga. Las distancias proporcionales a la potencia ( $E_A \sin \delta$  y  $I_A \cos \theta$ ) se incrementarán, pero la magnitud de  $E_A$  debe permanecer constante. Cuando la carga se incrementa,  $E_A$  se mueve hacia abajo, como se observa en la figura 2.11 b.

Como  $E_A$  se mueve hacia abajo cada vez más, la cantidad  $jX_S I_A$  debe incrementarse para alcanzar desde la punta de  $E_A$  a  $V_\phi$ , y entonces la corriente del inducido  $I_A$  también se incrementa. Nótese que el ángulo  $\theta$  del factor de potencia también cambia, y es cada vez menor cuando está en adelanto y luego cada vez mayor cuando está en atraso.



**Figura 2.11 a) Diagrama fasorial de un motor que trabaja con un factor de potencia en adelanto. b) Efecto del aumento de carga durante el funcionamiento de un motor síncrono.**

## 2.7 TIPOS DE ARRANQUES DE UN MOTOR SÍNCRONO.

Existen tres métodos básicos para el arranque seguro de un motor síncrono.

*Arranque del motor reduciendo la frecuencia eléctrica.*

Reducir la velocidad del campo magnético del estator a un valor suficientemente bajo para que el rotor pueda acelerar y se enlace con él durante medio ciclo de rotación del campo magnético. Esto se puede llevar a cabo reduciendo la frecuencia de la potencia eléctrica aplicada.

*Arranque del motor mediante un motor primario externo.*

El segundo método para arrancar un motor sincrónico consiste en fijarle un motor externo de arranque y llevar la máquina sincrónica hasta su velocidad plena con ese motor. Entonces la máquina sincrónica puede ser conectada en paralelo con un sistema de potencia como un generador, y el motor de arranque puede desacoplarse del eje de la máquina. Desconectando el motor de arranque, el eje de la máquina se desacelera, el campo magnético del rotor  $B_R$  queda atrás de  $B_{net}$  y la máquina sincrónica comienza actuar como motor.

*Arranque de un motor utilizando devanado amortiguador.*

La técnica más popular para el arranque de motores sincrónicos es utilizar devanados amortiguadores: Estos devanados son barras especiales dispuestas en ranuras labradas en la cara del rotor de los motores sincrónicos y cortocircuitados en cada extremo por un anillo de cortocircuito.

Estos devanados tienen dos objetivos:

- a).- Hacer que el motor arranque como un motor de inducción.
- b).- Impedir la oscilación de velocidad o penduleo.

El penduleo es una fluctuación o variación periódica de la velocidad del rotor con respecto a la del campo magnético rotatorio del estator y puede ser producido por los siguientes aspectos:

- 1.- Un cambio brusco de carga mecánica.
- 2.- Un cambio brusco de la tensión de c.a.
- 3.- Un cambio brusco de la excitación o intensidad de c.c.

## **2.8 MOTOR SÍNCRONO TRIFÁSICO CON DEVANADO AMORTIGUADOR.**

Las funciones y partes principales de este motor son:

*El devanado de estator o inducido:* Produce un campo magnético rotatorio cuando circula por el corriente trifásica de una línea.

*El devanado de rotor o inductor:* Magnetiza en forma fija los polos del rotor cuando es alimentado por una fuente de c-c exterior.

*El devanado amortiguador:* Se utiliza para arrancar el motor y para evitar las oscilaciones de velocidad bajo carga.

*Escobillas:* La función de las escobillas es transmitir la tensión y corriente de la fuente de alimentación hacia el colector y por consiguiente al bobinado del rotor.

*Porta escobillas:* La función del porta escobillas es mantener a las escobillas en posición de contacto firme con los segmentos del colector.

### ***Dispositivos auxiliares para el arranque del motor.***

*Interruptor y resistencia de descarga.*

Son elementos utilizados para proteger el devanado polar contra las altas tensiones inducidas (Por transformación) por el devanado principal o de estator durante el arranque, así como de las autoinducidas en el devanado de campo cuando se desconecta la fuente de excitación.

*Reóstato de campo.*

Este dispositivo se utiliza para variar la corriente del circuito de campo. Los cambios de corriente de campo afectan la fuerza del campo magnético establecido por el rotor giratorio de campo.

Las variaciones de la fuerza del campo del motor no afecta la velocidad del motor, puesto que este último seguirá funcionando a velocidad constante: Sin embargo los cambios en la excitación del campo de c.c. cambiarán el factor de potencia del motor sincrónico.

***Ventajas del motor síncrono:***

1.- Velocidad constante

2.- Factor de potencia ajustable

El factor de potencia se controla variando la excitación del rotor y puede ser del 100% o unitaria con la excitación normal, de corriente atrasada con sobreexcitación y de corriente adelantada con sobreexcitación.

EL motor corrige el F.P de un sistema porque cuando se le sobreexcita su estator toma corriente adelantada que neutraliza o compensa la corriente atrasada que toman los aparatos inductivos conectados al mismo sistema.

**CAPÍTULO 3.**  
**GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA.**

La corriente directa presenta grandes ventajas, entre las cuales está su capacidad para ser almacenada de una forma relativamente sencilla. Esto, junto a una serie de características peculiares de los motores de corriente directa, y de aplicaciones de procesos electrolíticos, tracción eléctrica, entre otros, hacen que existen diversas instalaciones que trabajan basándose en la corriente directa.

Los generadores de corriente directa son las mismas máquinas que transforman la energía mecánica en eléctrica. No existe diferencia real entre un generador y un motor, a excepción del sentido de flujo de potencia. Los generadores se clasifican de acuerdo con la forma en que se provee el flujo de campo, y éstos son de excitación independiente, derivación, serie, excitación compuesta acumulativa y compuesta diferencial, y además difieren de sus características terminales (voltaje, corriente) y por lo tanto en el tipo de utilización.

Durante el desarrollo del presente informe, el enfoque se hará en relación con el principio de funcionamiento de las distintas versiones de máquinas eléctricas de corrientes directa que existen, dado el amplio campo para las cuales son utilizadas. El entendimiento de tales máquinas, permiten al ingeniero una eficaz elección además de la posibilidad de evitar situaciones en las que se produzcan accidentes a causa del uso u operación inadecuada de los equipos que trabajan con este tipo de energía. Los conocimientos previos de teoría básica de circuitos eléctricos, serán de gran ayuda para comprender las funciones de cada uno de los componentes de las máquinas de corriente directa.

### **3.1 FUNDAMENTOS DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE DIRECTA.**

Las máquinas de corriente directa son generadores que convierten energía mecánica en energía eléctrica de corriente directa, y motores que convierten energía eléctrica de corriente directa en energía mecánica. La mayoría las máquinas de corriente directa son semejantes a las máquinas de corriente alterna ya que en su interior tienen corrientes y voltajes de corriente alterna. Las máquinas de corriente directa tienen corriente directa sólo en su circuito exterior debido a la existencia de un mecanismo que convierte los voltajes internos de corriente alterna en voltajes corriente directa en los terminales. Este mecanismo se llama colector, y por ello las máquinas de corriente directa se conocen también como máquinas con colector.

### **3.2 PARTES BÁSICAS DE LAS MÁQUINAS DE CORRIENTE DIRECTA.**

La máquina de corriente directa consta básicamente de las siguientes partes:

#### ***Inductor.***

Es la parte de la máquina destinada a producir un campo magnético, necesario para que se produzcan corrientes inducidas, que se desarrollan en el inducido.

El inductor consta de las siguientes partes:

*Pieza polar:* es la parte del circuito magnético situada entre la culata y el entrehierro, incluyendo el núcleo y la expansión polar.

*Núcleo:* es la parte del circuito magnético rodeada por el devanado inductor.

*Devanado inductor:* es el conjunto de espiras destinado a producir el flujo magnético, al ser recorrido por la corriente eléctrica.

*Expansión polar:* es la parte de la pieza polar próxima al inducido y que bordea al entrehierro.

*Polo auxiliar o de conmutación:* es un polo magnético suplementario, provisto o no, de devanados y destinado a mejorar la conmutación. Suelen emplearse en las máquinas de mediana y gran potencia.

*Culata:* es una pieza de sustancia ferromagnética, no rodeada por devanados, y destinada a unir los polos de la máquina.

### ***Inducido.***

Es la parte giratoria de la máquina, también llamado rotor.

El inducido consta de las siguientes partes:

*Devanado inducido:* es el devanado conectado al circuito exterior de la máquina y en el que tiene lugar la conversión principal de la energía.

*Colector:* es el conjunto de láminas conductoras (delgas), aisladas unas de otras, pero conectadas a las secciones de corriente directa del devanado y sobre las cuales frotan las escobillas.

*Núcleo del inducido:* es una pieza cilíndrica montada sobre el cuerpo (o estrella) fijado al eje, formada por núcleo de chapas magnéticas. Las chapas disponen de unas ranuras para alojar el devanado inducido.

### ***Escobillas.***

Son piezas conductoras destinadas a asegurar, por contacto deslizante, la conexión eléctrica de un órgano móvil con un órgano fijo.

### ***Entrehierro.***

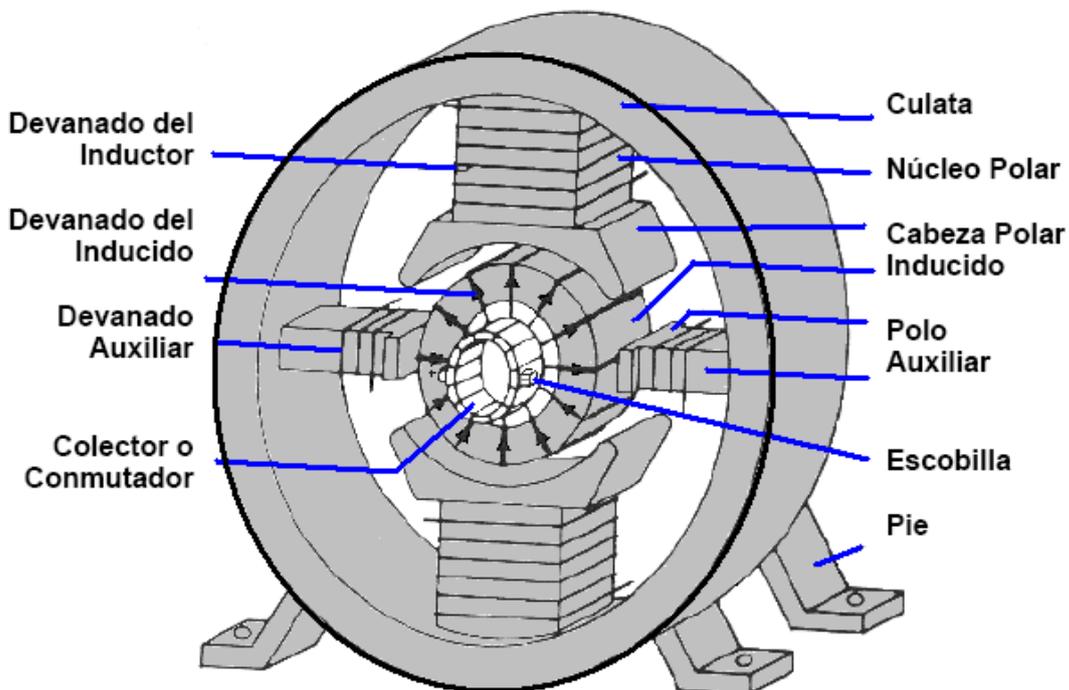
Es el espacio comprendido entre las expansiones polares y el inducido; suele ser normalmente de 1 a 3 mm, lo imprescindible para evitar el rozamiento entre la parte fija y la móvil.

**Cojinetes.**

Son las piezas que sirven de apoyo y fijación del eje del inducido.

**3.3 DIAGRAMA DE UNA MÁQUINA DE CORRIENTE DIRECTA.**

Los componentes de la máquina de corriente directa se pueden apreciar claramente en la figura 3.1.



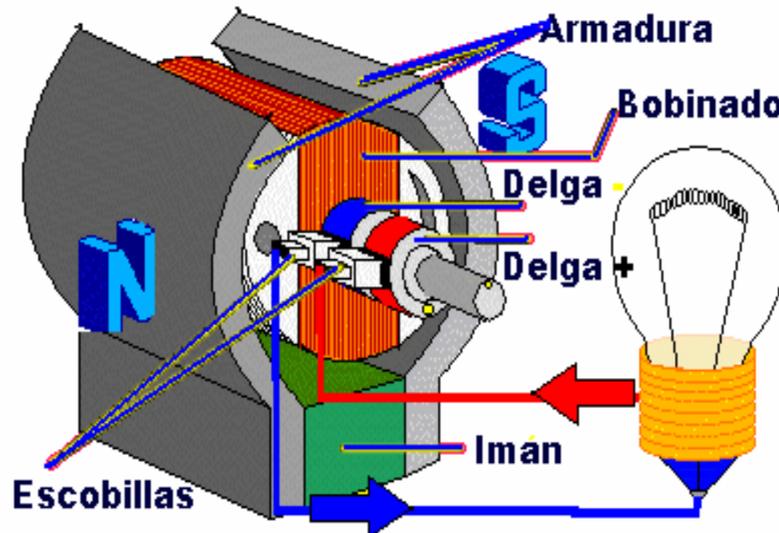
***Figura 3.1 Diagrama simplificado de una maquina de c.d.***

**3.4 GENERADORES DE CORRIENTE DIRECTA.**

Los generadores de corriente directa son las mismas máquinas de corriente directa cuando funcionan como motores. Son máquinas que producen energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.

A su vez los generadores se clasifican en dinamos y alternadores, según que produzcan corriente directa o alterna, respectivamente.

Posteriormente, cabe destacar otro tipo de generadores (no son máquinas) que transforman la energía química en la eléctrica como son pilas y acumuladores.



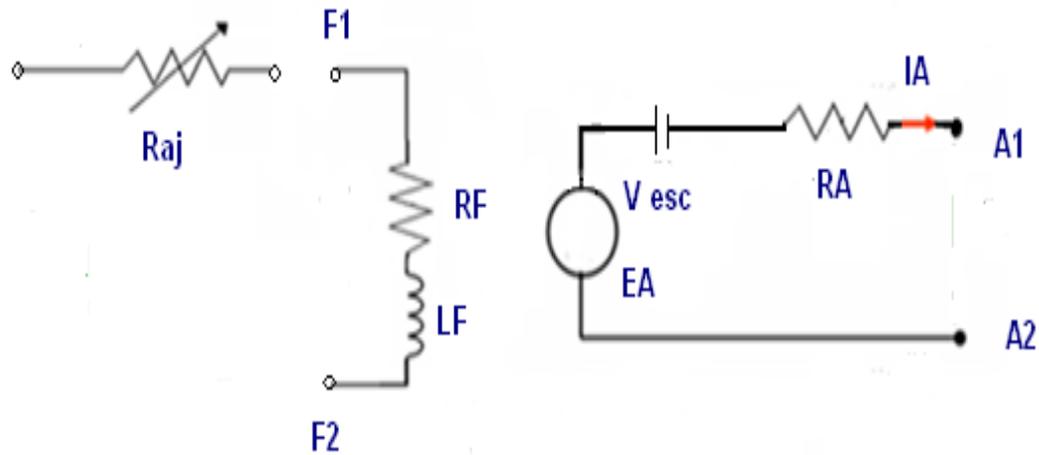
**Figura 3.2 Generador de c.d.**

### **3.5 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN GENERADOR DE C.D.**

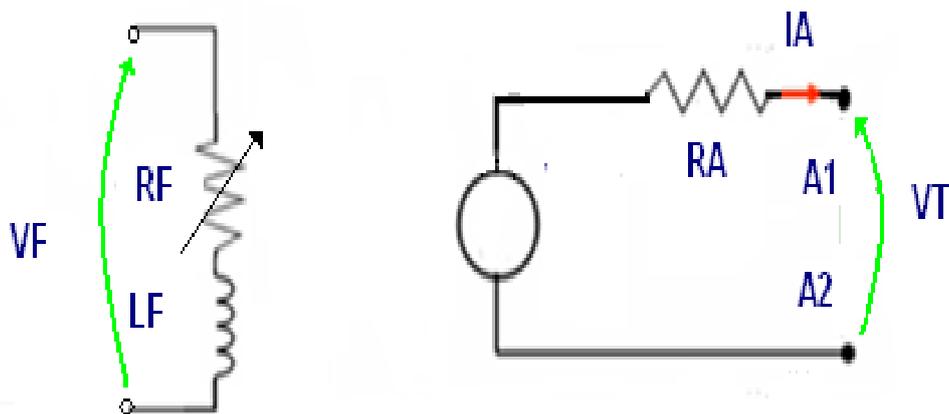
En la figura 3.3 se presenta el circuito equivalente de un generador de c.d. En ella el circuito de armadura ha sido representado por una fuente ideal de voltaje  $E_A$  y una resistencia  $R_A$ . En realidad la representación correspondiente al equivalente Thevenin de toda la estructura del rotor, incluyendo las bobinas, los polos auxiliares y los embobinados de compensación, si existen.

La caída de voltaje de las escobillas se representa por una batería pequeña  $V_{escobilla}$  cuya polaridad es contraria al sentido de la corriente de la máquina.

Las bobinas de campo, productoras del flujo magnético en el generador, se representan por el inductor  $L_F$  y la resistencia  $R_F$ . La resistencia  $R_{aj}$  es una resistencia externa variable utilizada para regular la corriente de campo.



**Figura 3.3 Circuito equivalente de un generador de c.d.**



**Figura 3.4 circuito equivalente simplificado de un generador de c.d. con  $R_F$  combinando las resistencias de las bobinas de campo y la resistencia variable para control.**

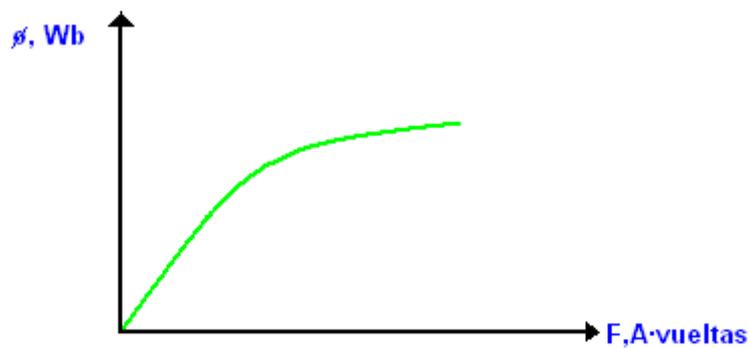
### 3.6 CURVA DE MAGNETIZACIÓN DE UN GENERADOR DE C.D.

El voltaje  $E_A$  generado en el interior de un generador de c.d. se expresa por medio de la ecuación:

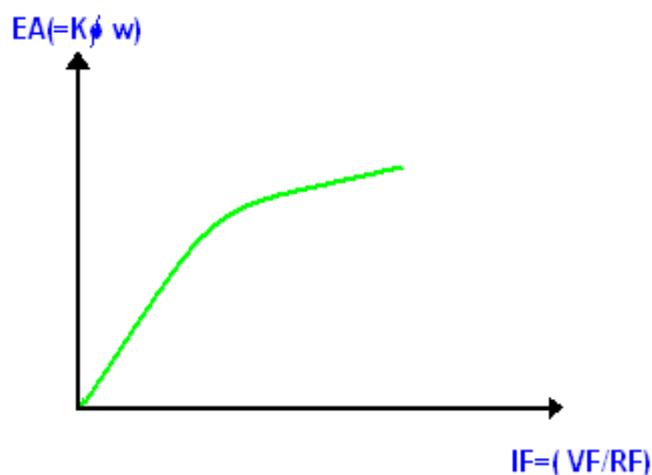
$$E_A = K\Phi\omega$$

Por lo que  $E_A$  es directamente proporcional al flujo del generador y a su velocidad de rotación. La relación que existe entre el voltaje generado y la corriente de campo de la maquina es que la corriente de campo en un generador produce una fuerza magnetomotriz de campo, dada por  $\mathfrak{F} = N_F I_F$ . Esta fuerza magnetomotriz origina un flujo en la maquina, de acuerdo con su curva de magnetización.

Puesto que la corriente de campo es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz y como  $E_A$  es directamente proporcional al flujo, se acostumbra a presentar la curva de magnetización de un generador con una grafica de  $E_A$  contra la corriente de campo para una velocidad dada  $\omega$ .



**Figura 3.5** Curva de magnetización del material ferromagnético  
(  $\phi$  versus  $\mathfrak{F}$  )



**Figura 3.6** Curva de magnetización de un generador de c.d. expresada como un grafico de  $E_A$  contra  $I_F$  para una velocidad constante  $\omega_0$ .

Para conseguir la potencia máxima posible por libra de peso de la maquina, la mayor parte de los generadores se diseñan para que funcionen cerca del punto de saturación de la curva de magnetización.

Esto implica que con frecuencia, se necesita un significativo aumento de la corriente para lograr un pequeño aumento en  $E_A$  cuando se está funcionando casi a plena carga.

### **3.7 GENERADOR DE C.D. CON EXCITACIÓN INDEPENDIENTE.**

Un generador con excitación independiente requiere una fuente externa de c.d. para el devanado del campo, por lo que se utiliza principalmente en:

- a) Pruebas de laboratorio y pruebas comerciales
- b) Conjuntos con regulación especial.

Tomando en cuenta que la fuente externa puede ser orto generador de c.d. o una batería.

En el generador con excitación externa el voltaje  $V_T$  representa el voltaje real medido en sus terminales y la corriente  $I_L$  representa la corriente que fluye por las líneas de que conectan dichas terminales.

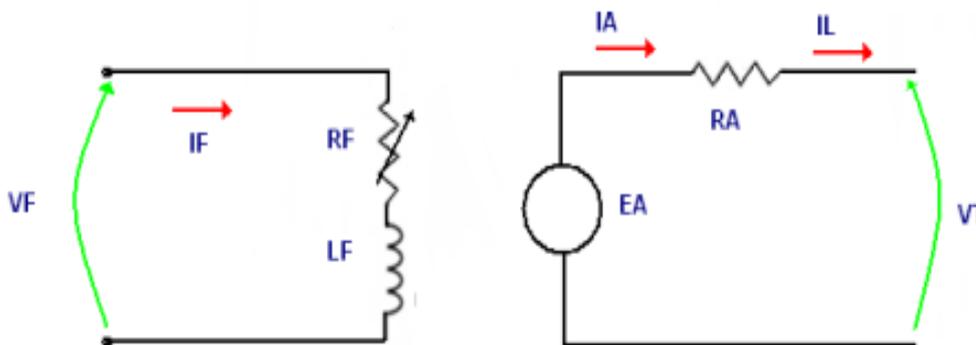
El voltaje generado intermitente es  $E_A$  y la corriente del inducido es  $I_A$ , por lo tanto se explica que la corriente del inducido es igual a la corriente que circula por la línea del generador con excitación externa:

$$I_A = I_L$$

### 3.8 CARACTERÍSTICA DEL TERMINAL DE UN GENERADOR DE C.D. CON EXCITACIÓN EXTERNA.

La característica de terminal de un aparato es un diagrama de las variables de salida, enfrentadas unas a otras. Para un generador de c.d. las variables son su tensión en los bornes y la corriente de línea. La característica terminal de un generador con excitación externa es, en este caso, un diagrama de  $V_T$  frente a  $I_L$  para una velocidad constante  $\omega$ . Según a la ley de Kirchoff de voltajes, la tensión en las terminales es:

$$V_T = E_A - I_A R_A$$



$$I_L = I_A$$

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

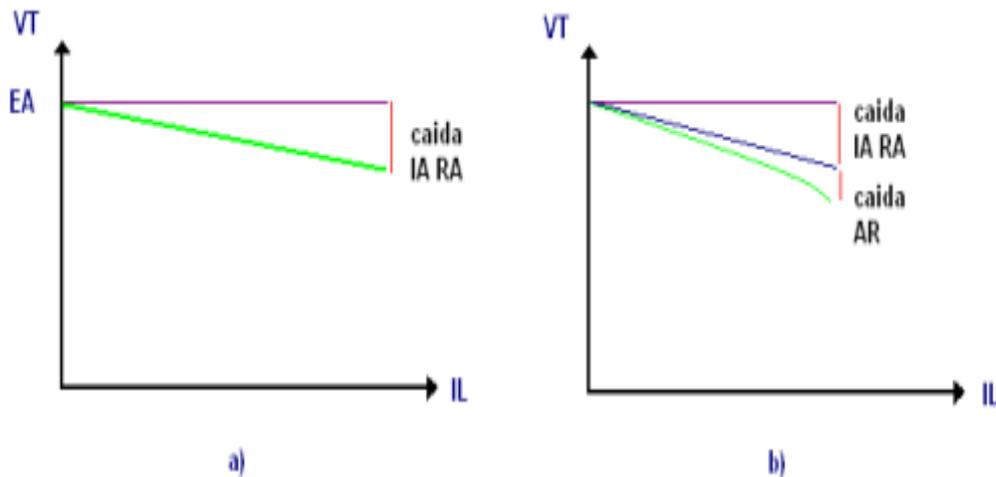
$$I_F = \frac{V_F}{R_F}$$

**Figura 3.7 Circuito equivalente de un generador con excitación externa.**

El voltaje generado interiormente es independiente de  $I_A$ , la característica terminal del generador con excitación externa es una línea recta.

Cuando la carga que suministra el generador se incrementa, aumenta  $I_L$  y por consiguiente  $I_A$ . Mientras la corriente del inducido va en aumento, la caída de  $I_A R_A$  también irá aumentando, por lo que el voltaje en los terminales del generador disminuye.

Esta característica terminal no siempre es completamente exacta. En los generadores sin embobinados de compensación, un incremento en  $I_A$  causa un aumento en la reacción del inducido y esta produce un debilitamiento del flujo, este origina una disminución en  $E_A = K\phi \downarrow \omega$ , lo que posteriormente reduce la tensión de los bornes del generador.



**Figura 3.8 Característica terminal de un generador de c.d. con excitación externa a) Con embobinado de compensación. b) Sin embobinado de compensación.**

### 3.9 CONTROL DE LA TENSIÓN EN LOS BORNES.

Esta se puede controlar en un generador de c.d. con excitación externa mediante el cambio de voltaje generado interno  $E_A$  de la maquina. Por la ley de kirchhoff de voltajes,  $V_T = E_A - I_A R_A$ , por lo cual, si  $E_A$  aumenta,  $V_T$  aumentará y si  $E_A$  disminuye,  $V_T$  disminuirá.

Como el voltaje generado internamente  $E_A$  se expresa por medio de la ecuación  $E_A = K\phi\omega$ , hay dos formas principales para controlar el voltaje en este generador, las cuales se mencionan a continuación:

1.- Cambio de la velocidad de rotación.

Si  $\omega$  aumenta, entonces  $E_A = K\phi\omega \uparrow$  se incrementa y  $V_T = E_A \uparrow - I_A R_A$  también se aumenta.

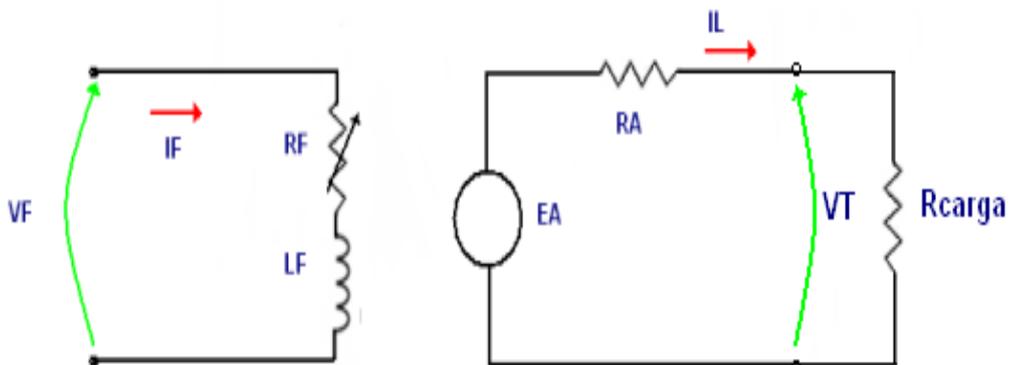
2.- Cambio de la corriente de campo.

Si  $R_F$  disminuye, entonces la corriente de campo aumenta  $I_F = V_F / R_F \downarrow$ . Por consiguiente, el flujo  $\phi$  en la maquina se incrementa. Mientras el flujo va en acenso,  $E_A = K\phi \uparrow$  también debe subir, así que  $V_T = E_A \uparrow - I_A R_A$  también se incrementa.

En varias aplicaciones, la velocidad del motor primario está muy limitada, por lo que la tensión en los bornes se controla con mayor frecuencia cambiando la corriente de campo.

### 3.10 ANÁLISIS GRAFICO DE UN GENERADOR DE C.D. CON EXCITACIÓN EXTERNA.

Teniendo presente que el voltaje de generación interna de un generador es una función no lineal de su fuerza magnetomotriz, no es posible predecir analíticamente el valor de  $E_A$  a partir de una corriente de campo. La curva de magnetización del generador debe usarse para calcular con precisión el voltaje de salida, para un voltaje de alimentación dado.



**Figura 3.9** Generador de c.d. con excitación externa con carga resistiva.

Si una maquina tiene reacción de inducido, su flujo se reducirá con cada incremento de la carga, haciendo que  $E_A$  disminuya, la única forma de determinar con precisión el voltaje de salida de una maquina con esta reacción de inducido es por medio del análisis grafico.

La fuerza magnetomotriz total en un generador con excitación externa, es la fuerza magnetomotriz del circuito de campo menos la fuerza magnetomotriz que produce la reacción del inducido **RI**.

$$I_F - \mathfrak{F}_{RI} \mathfrak{F}_{neta} = N_F$$

Las curvas de magnetización se expresan como graficas de  $E_A$  enfrentadas a corrientes de campo, se acostumbra a fijar una corriente equivalente de campo que produzca la misma tensión de salida que la combinación de todas las fuerzas magnetomotrices de la maquina. El voltaje resultante  $E_A$  puede determinarse entonces localizando dicha corriente de campo equivalente sobre la curva de magnetización. La corriente de campo equivalente de este tipo de generador se expresa por medio de:

$$I * _F = I_F - \frac{\mathfrak{F}_{RI}}{N_F}$$

Debemos estudiar otro efecto cuando se usa el análisis grafico para determinar el voltaje de salida de un generador de c.d. Las curvas de magnetización de un generador se dibujan para una velocidad determinada, que suele ser su velocidad nominal. ¿Cómo se puede determinar los efectos de una corriente de campo, si el generador está girando a una velocidad diferente de su velocidad nominal? La ecuación para el voltaje inducido en un generador de c.d. cuando la velocidad se expresa en revoluciones por minuto es:

$$E_A = K \phi n$$

Para una corriente de campo efectiva dada, el flujo en una maquina es fijo, por tanto el voltaje que se genera en ella se relaciona con la velocidad por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{E_A}{E_{A0}} = \frac{n}{n_0}$$

Donde  $E_{A0}$  y  $n_0$  representan los valores de referencia del voltaje y la velocidad respectivamente. Si la condición de referencia se toma como la velocidad del generador cuando se hizo la curva de magnetización y si la otra condición se toma como si fuera la velocidad real del generador, entonces es posible determinar el voltaje real que produce, aun si no está girando a la velocidad nominal.

### **3.11 EL GENERADOR DE C.D. EN DERIVACIÓN.**

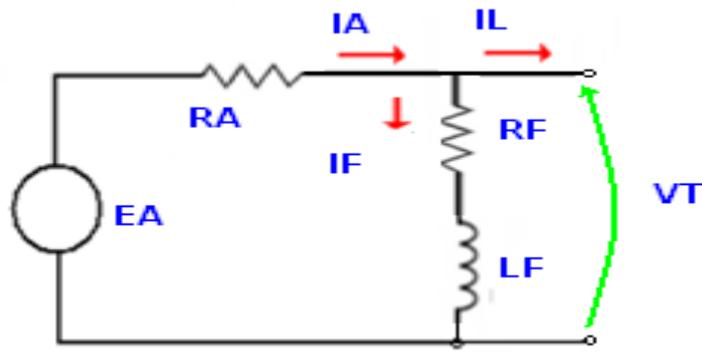
Es un generador de c.d. que proporciona su propia corriente de campo, conectando al campo directamente a sus terminales. En este circuito, la corriente del inducido suministra tanto el circuito de campo como la carga conectada a la maquina:

$$I_A = I_F + I_L$$

Aplicando la ley de Kirchhoff de voltajes, para el circuito del inducido de la maquina tenemos:

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

El generador de c.d. en derivación tiene ventaja sobre el generador de c.d. con excitación externa, ya que el generador de c.d. en derivación no necesita una fuente de poder externa, para alimentar su circuito de campo.



$$I_A = I_F - I_L$$

$$V_T = E_A - I_A R_A$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

**Figura 3.10 Circuito equivalente de un generador de c.d. en derivación.**

### 3.12 CREACIÓN DE VOLTAJE PARA UN GENERADOR DE C.D. EN DERIVACIÓN.

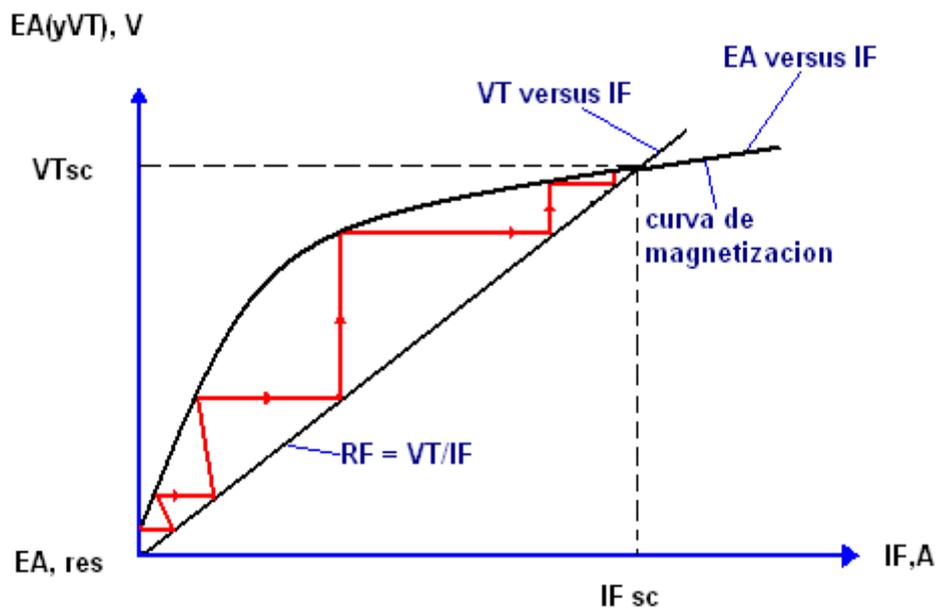
Esta creación de voltaje en un generador de c.d. depende de presencia de un flujo residual en los polos, cuando el generador da sus primeros giros, se inducirá un voltaje interno que se expresa con la siguiente ecuación:

$$E_A = K\phi_{residual}\omega$$

El voltaje se presentara en los terminales del generador, tomando en cuenta que es muy poco solo uno o dos volts. Pero cuando este voltaje se presenta en los terminales, se produce una corriente que fluye en la bobina del campo del generador. ( $I_F = V_T \uparrow / R_F$ ). Esta corriente de campo origina una fuerza magnetomotriz en los polos, que les incrementa el flujo, lo cual, a su vez, causa un aumento en  $E_A = K\phi \uparrow \omega$ , que alza el voltaje terminal  $V_T$ . Cuando  $V_T$  se eleva,  $I_F$  lo hace aún más, acercando mas el flujo  $\phi$ , que incrementa  $E_A$ .

La siguiente grafica muestra la formación de voltaje que el efecto de la saturación magnética en las caras de los polos es lo que momentáneamente limita la tensión de los bornes del generador, también nos muestra la formación de voltaje como si este ocurriera en diferentes etapas, estas se destacan manifestando la retroalimentación positiva entre el voltaje interno del generador y la corriente de campo.

El voltaje en un generador real no se forma en diferentes etapas,  $E_A$  y  $I_F$  se incrementan simultáneamente hasta que alcanzan una condición estable.



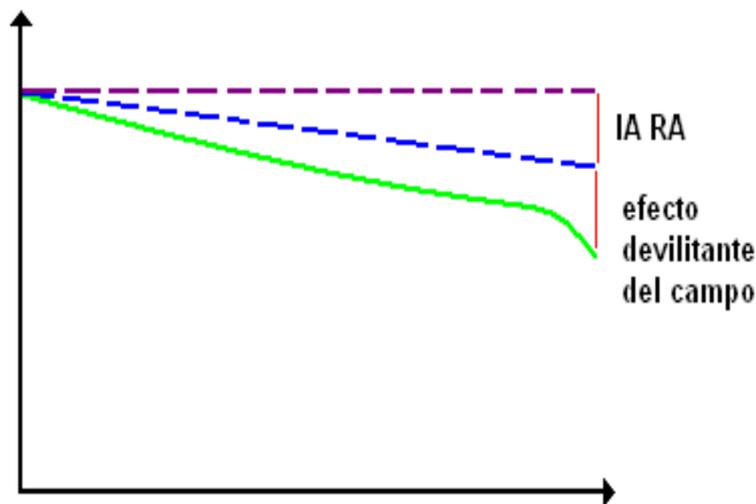
**Figura 3.11 Creación del voltaje en un generador de c.d. en derivación al ponerlo en funcionamiento.**

### **3.13 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN GENERADOR DE C.D. EN DERIVACIÓN.**

Esta característica terminal de un generador de c.d. en derivación se diferencia con uno de excitación externa en la cantidad de corriente de campo en la máquina depende de su tensión de los bornes, para comprender esta característica terminal se deberá poner a funcionar en vacío el generador de

c.c. en derivación, e ir incrementando las cargas y verificar lo que sucede. Mientras se va elevando la carga del generador,  $I_L$  aumenta así como  $I_A = I_L \uparrow + I_F$  que también crece. Un aumento en  $I_A$  incrementa la caída de voltaje de la resistencia del inducido  $I_A R_A$ , haciendo que  $V_T = E_A - I_A \uparrow R_A$  disminuya, este es el mismo comportamiento que se observa en el generador de c.d. con excitación externa.

Sin embargo, cuando  $V_T$  disminuye, la corriente de campo de la maquina también decrece con él. Esto ocasiona que el flujo del generador se reduzca, aminorando  $E_A$ , esto origina una disminución adicional de la tensión de los bornes  $V_T = E_A \downarrow - I_A R_A$ .



**Figura 3.12 Característica terminal de un generador de c.d. en derivación.**

### **3.14 CONTROL DEL VOLTAJE EN EL GENERADOR DE C.D. EN DERIVACIÓN.**

Principalmente hay dos sencillas formas para controlar el voltaje de un generador de c.d. en derivación las cuales son las siguientes:

- Modificar la velocidad de  $\omega_m$  del eje del generador.

- Modificar la resistencia de campo del generador para, cambiar la corriente de campo.

### **3.15 ANÁLISIS GRAFICO DE LOS GENERADORES DE C.D. EN DERIVACIÓN.**

Principalmente la corriente de campo del generador depende directamente de su propio voltaje de salida y el análisis grafico de los generadores de c.d. en derivación se hace para maquinas sin reacción de inducido y posteriormente se incluyen los efectos de la reacción del inducido.

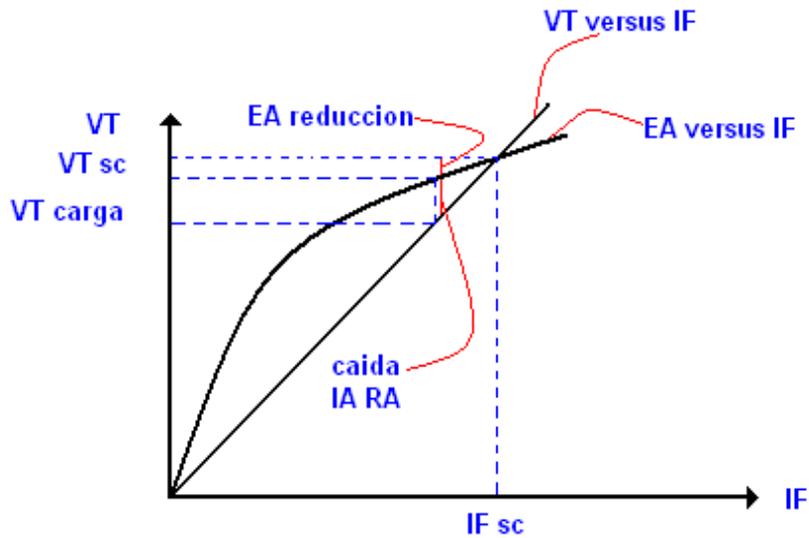
En la siguiente grafica se muestra una curva de magnetización para un generador en derivación a velocidad real de funcionamiento, la resistencia de campo  $R_F$  que es igual a  $V_T / I_F$ , se muestra con una línea recta puesta sobre la curva de magnetización.

En vacio  $V_T = E_A$  y el generador funciona con el voltaje donde la curva de magnetización intersecta la línea de la resistencia de campo.

La diferencia entre el voltaje generado interiormente en los bornes es justamente la caída de  $I_A R_A$ .

La línea de todos los valores posibles de  $E_A$  es la curva de magnetización y la línea de todas las tensiones posibles en los bornes es la línea de resistencia  $I_F = V_T / R_F$ .

Por consiguiente para encontrar la tensión en los bornes, para una carga dada, solo se determina la caída de  $I_A R_A$  encajara exactamente, si hay dos posiciones posibles, la que este más cercana al voltaje sin carga representara un punto de funcionamiento nominal.



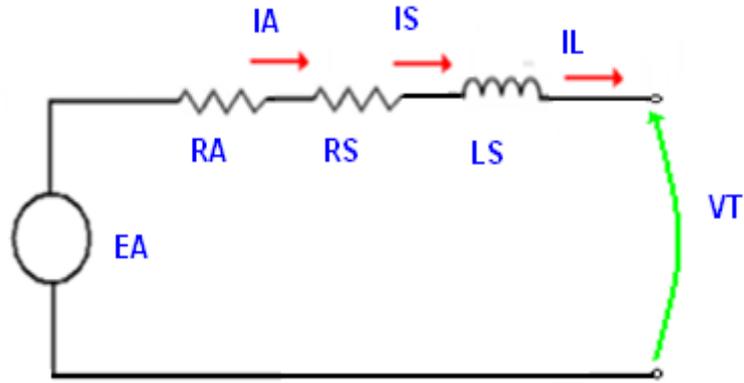
**Figura 3.13 Análisis grafico de un generador de c.d. en derivación con embobinados de compensación.**

### **3.16 GENERADOR DE C.D. EN SERIE.**

El generador de c.d. en serie es aquel cuyo campo está conectado en serie con su inducido. Teniendo en cuenta que el inducido tiene una corriente más alta que la de un campo en derivación, el campo en serie solo tendrá unas pocas espiras de alambre y este alambre que se utilizara será de un calibre más grueso que el campo en derivación.

Se puede producir la misma fuerza magnetomotriz con pocas espiras de alta corriente, que con muchas espiras de baja corriente debido a la ecuación  $\mathcal{F} = NI$ . El campo del generador en serie es diseñado para tener la resistencia más baja posible, ya que la corriente a plena carga circula por este. La corriente del inducido, la corriente de campo y la de línea tienen el mismo valor. La ecuación de Kirchhoff de voltajes este generador es:

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$



$$I_A = I_S = I_L$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

**Figura 3.14 circuito equivalente de un generador de c.d. en serie.**

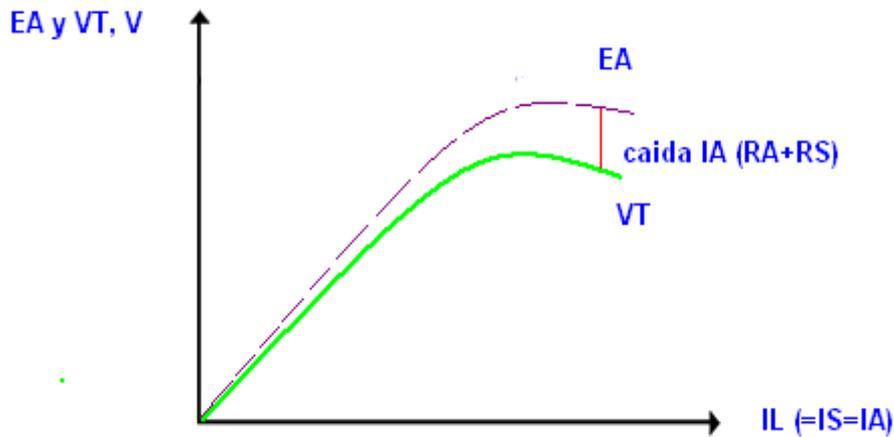
### **3.17 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN GENERADOR C.D. EN SERIE.**

Esta curva de magnetización del generador de c.d. en serie es parecida a cualquier otra de los generadores de c.d. en vacío, sin embargo no hay corriente de campo, por lo que  $V_T$  disminuye a un nivel muy pequeño dado por el flujo residual del generador. Como la carga aumenta, la corriente de campo sube y por consiguiente  $E_A$  se eleva rápidamente. La caída de  $I_A (R_A + R_S)$  también se incrementa, pero al comienzo el aumento en  $E_A$  se produce más rápidamente que lo que sube la caída de  $I_A (R_A + R_S)$ , por consiguiente  $V_T$  se incrementa.

Después se aproxima a la saturación y  $E_A$  se vuelve casi constante, en este punto la caída de la resistencia es el efecto predominante y  $V_T$  comienza a disminuir.

En la siguiente figura se muestra este tipo de característica, tomando en cuenta que esta máquina no es una buena fuente de voltaje constante.

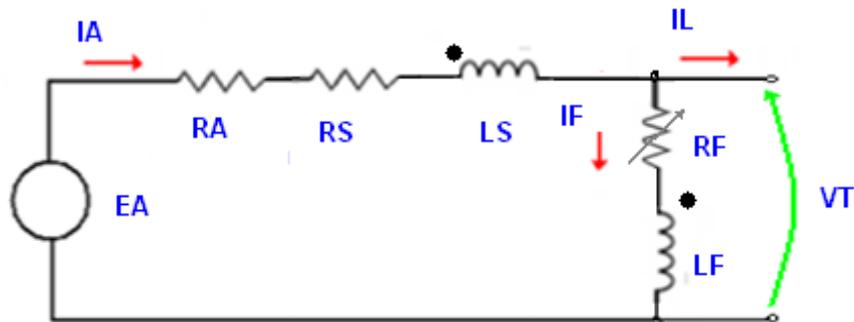
Este tipo de generadores en serie se utilizarse en pocas aplicaciones especializadas, donde la característica de voltaje excesivo del aparato puede explotarse.



**Figura 3.15 Característica terminal de un generador de c.d. en serie.**

### **3.18 GENERADOR DE C.D. COMPUESTO ACUMULATIVO.**

Este generador cuenta con ambos campos, tanto en serie como en derivación, conectados en tal forma que las fuerzas magnetomotrices de los dos campos se suman. En la siguiente figura se muestra el circuito equivalente de un generador de c.d. compuesto acumulativo con conexión derivación larga.



$$I_A = I_L + I_F$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$\mathfrak{F}_{net} = N_F I_F + N_{SE} I_A - \mathfrak{F}_{RI}$$

**Figura 3.16 Circuito equivalente de un generador de c.d. acumulativo con conexión derivación larga.**

Los puntos que aparecen sobre las dos bobinas de campo, tienen el mismo significado que los puntos sobre un transformador. La corriente que fluye hacia un punto produce una fuerza magnetomotriz positiva.

Obsérvese que la corriente del inducido fluye hacia el extremo punteado de la bobina de campo en serie y que la corriente  $I_F$  en derivación fluye hacia el extremo punteado de la bobina de campo en derivación.

En consecuencia el total de la fuerza magnetomotriz de esta máquina se formula:

$$\mathfrak{F}_{net} = \mathfrak{F}_{SH} + \mathfrak{F}_{SE} - \mathfrak{F}_{RI}$$

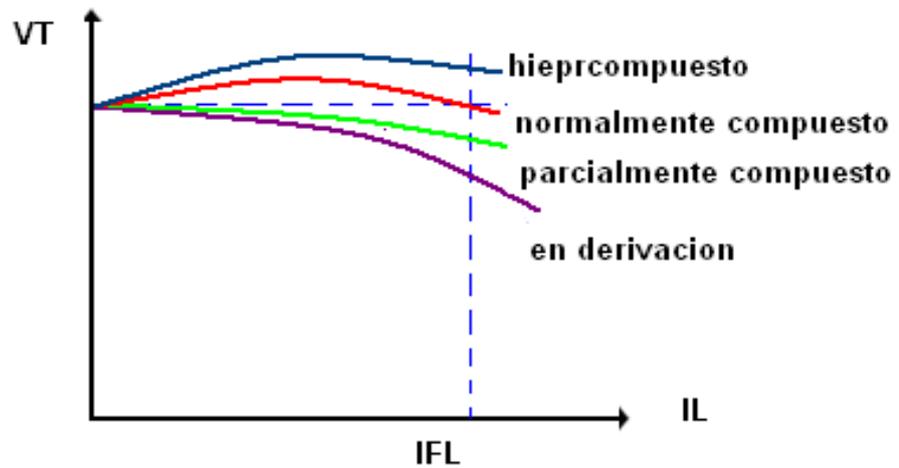
### **3.19 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN GENERADOR DE C.D. COMPUESTO ACUMULATIVO.**

Es necesario entender los efectos que suceden dentro de la maquina, para entender la característica terminal de un generador de c.d. compuesto acumulativo. Como ejemplo tenemos que la carga sobre el generador aumenta, entonces la corriente de carga  $I_L$  se incrementa. Puesto que  $I_A = I_F + I_L$  ↓, la corriente del inducido  $I_A$  también aumenta.

En este momento ocurren dos fenómenos en el generador.

1.- Cuando  $I_A$  aumenta, la caída de voltaje  $I_A (R_A + R_S)$  también aumenta, esto crea una disminución en el voltaje de los bornes  $V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$ .

2.- Cuando  $I_A$  se eleva, la fuerza magnetomotriz del campo en serie, se eleva también. Esto incrementa el flujo del generador lo que aumenta  $E_A$ , que a su vez tiende hacer que  $V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$  aumente.



**Figura 3.17 Característica terminal de los generadores de c.d. compuesto acumulativo.**

### **3.20 CONTROL DE VOLTAJE EN UN GENERADOR DE C.D. COMPUESTO ACUMULATIVO.**

Para controlar el voltaje de los bornes de un generador de c.d. compuesto acumulativo se deben utilizar las mismas técnicas que se usa para un generador en derivación.

1.- Cambio de la velocidad de rotación.

Un aumento en  $\omega$  produce un aumento en  $E_A = K\phi\omega \uparrow$ , incrementando la tensión terminal  $V_T = E_A \uparrow - I_A (R_A + R_S)$ .

2.- Cambio de la corriente de campo.

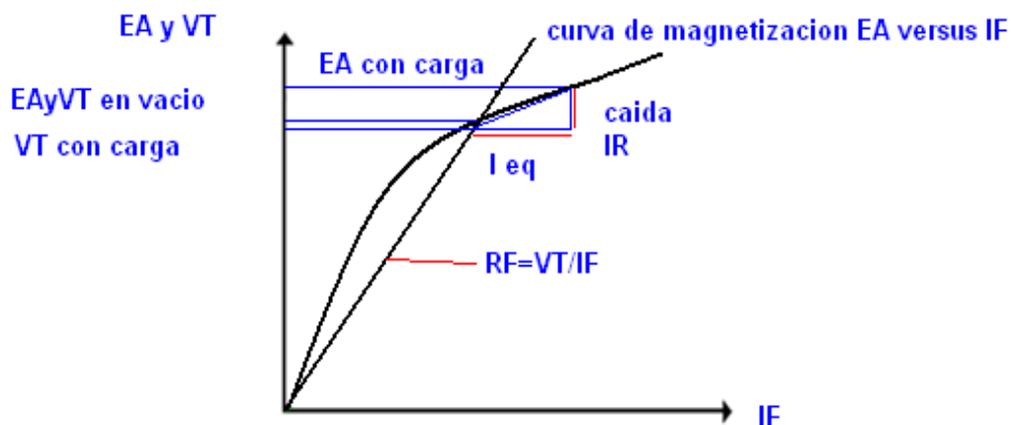
Una disminución de  $R_F$  produce un aumento en  $I_F = V_T / R_F \downarrow$ , lo cual eleva toda la fuerza magnetomotriz del generador. Como  $\mathfrak{F}_{tot}$  se incrementa, el flujo de  $\phi$  la maquina también aumenta y  $E_A = K\phi \uparrow$   $\omega$  a su vez sube., finalmente un aumento en  $E_A$  eleva a  $V_T$ .

### 3.21 ANÁLISIS GRAFICO DE UN GENERADOR DE C.D. COMPUESTO ACUMULATIVO.

Para describir gráficamente la característica terminal de un generador compuesto acumulativo. Tendremos que saber que la corriente de campo en derivación equivalente  $I_{eq}$  causada por los efectos de campo en serie y la reacción del inducido se expresa con la siguiente ecuación:

$$I_{eq} = \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathfrak{F}_{RI}}{N_F}$$

Donde  $I^*_F = I_F + I_{eq}$  es la corriente de campo efectiva en derivación del generador. Esta corriente representa una distancia horizontal a la izquierda o a la derecha de la línea de la resistencia de campo  $R_F = V_T/I_F$ , a lo largo de los ejes de la curva de magnetización. La caída resistiva se expresa por  $I_A (R_A + R_S)$ , que es la longitud a lo largo del eje vertical de la curva de magnetización. Tanto la corriente equivalente  $I_{eq}$  como la caída de tensión resistiva  $I_A (R_A + R_S)$ , depende de la magnitud de la corriente del inducido  $I_A$ . Para encontrar el voltaje de salida para una carga dada, hay que determinar el tamaño del triangulo y encontrar el punto donde encaja perfectamente entre la línea de corriente de campo y la curva de magnetización. En la siguiente figura 3.18 se muestra el análisis grafico.

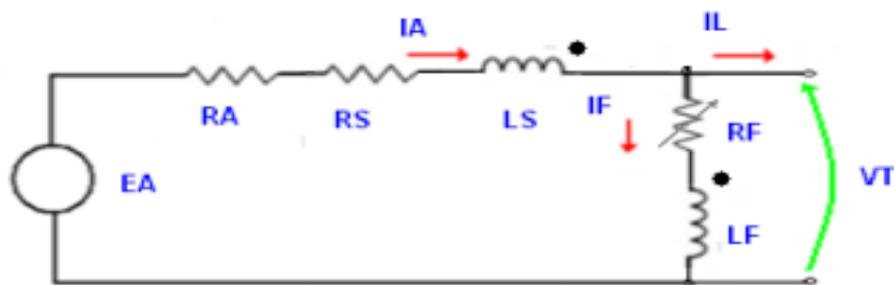


**Figura 3.18 Análisis grafico de un generador de c.d. compuesto acumulativo.**

### 3.22 GENERADOR DE C.D. COMPUESTO DIFERENCIAL.

Este generador cuenta con ambos campos, en derivación y serie, pero tiene como particularidad que sus fuerzas magnetomotrices se restan entre sí. En este generador la corriente del inducido ahora fluye hacia fuera por el extremo punteado de una bobina, mientras la corriente de campo en derivación fluye hacia dentro por el otro extremo punteado de la otra bobina.

Este circuito equivalente se muestra en la siguiente figura.



$$I_A = I_L + I_F$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

$$V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$$

$$\mathfrak{F}_{net} = N_F I_F - N_{SE} I_A - \mathfrak{F}_{RI}$$

**Figura 3.19 Circuito equivalente de un generador de c.d. compuesto diferencial conexión derivación larga.**

En este generador la fuerza magnetomotriz neta es:

$$\mathfrak{F}_{net} = \mathfrak{F}_{SH} - \mathfrak{F}_{SE} - \mathfrak{F}_{RI}$$

$$= N_F I_F - N_{SE} I_A - \mathfrak{F}_{RI}$$

y la corriente de campo en derivación producida por el campo en serie y la reacción del inducido se expresa:

$$I_{eq} = \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathfrak{F}_{RI}}{N_F}$$

Donde toda la corriente de campo efectiva, en derivación es:

$$I * _F = I_F + I_{eq}$$

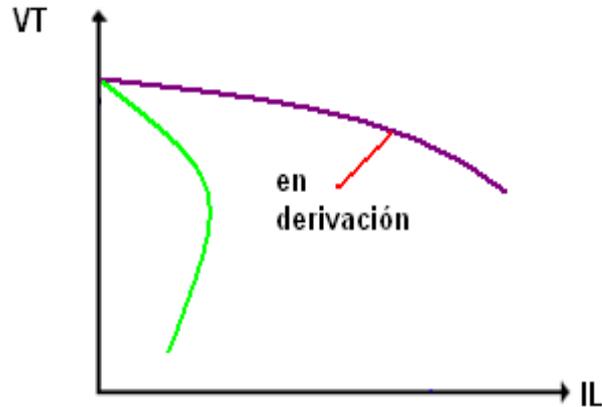
$$I * _F = I_F - \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathfrak{F}_{RI}}{N_F}$$

### **3.23 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN GENERADOR DE C.D. COMPUESTO DIFERENCIAL.**

1.- La corriente  $I_A$  cuando aumenta, la caída  $I_A (R_A + R_S)$  aumenta también. El incremento causa que la tensión de las terminales disminuya  $V_T = E_A - I_A (R_A + R_S)$ .

2.- La corriente  $I_A$  cuando aumenta, la fuerza magnetomotriz de campo en serie aumenta  $N_{SE} I_A \uparrow$ . Este incremento en dicha fuerza disminuye la fuerza magnetomotriz neta del generador, la que a su vez reduce el flujo neto en el generador, una disminución de flujo, disminuye  $E_A = K\phi \downarrow \omega$ , la que, a su turno, disminuye  $V_T$ .

Ya que los dos efectos tienden a disminuir  $V_T$ , por lo que el voltaje desciende drásticamente, mientras la carga se aumenta en el generador, esto lo podemos observar en la siguiente figura.



**Figura 3.20 característica terminal de un generador de c.d. compuesto diferencial.**

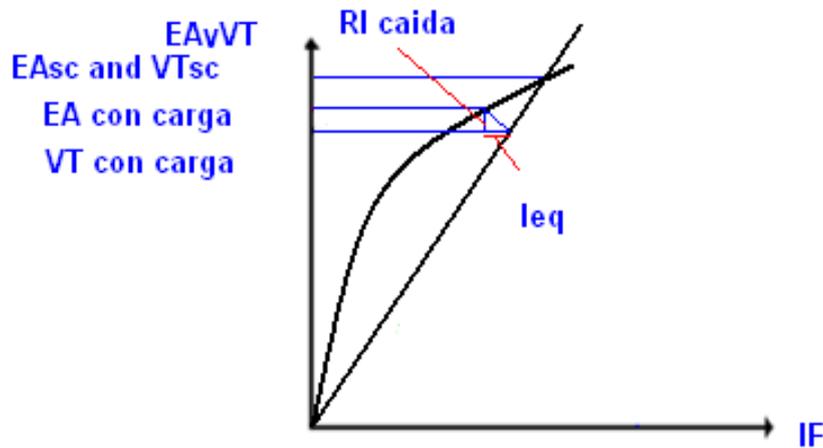
### **3.24 ANÁLISIS GRAFICO DE UN GENERADOR DE C.D. COMPUESTO DIFERENCIAL.**

En el generador de c.d. compuesto diferencial, la característica de voltaje puede determinarse gráficamente, de igual manera que en un generador compuesto acumulativo. En la siguiente figura observaremos la proporción de la corriente de campo efectiva en derivación producida por el campo en derivación real siempre es igual a  $V_T / R_F$ , puesto que mucha corriente está presente en dicho campo.

La corriente de campo efectiva es  $I_{eq}$  y es la sumatoria de los efectos del campo serie y de reacción del inducido, esta representa una distancia horizontal negativa a lo largo de los ejes de la curva de magnetización, puesto que ambos, tanto el campo serie como la reacción del inducido, se restan.

En el generador la caída resistiva se expresa por  $I_A (R_A + R_S)$ , lo cual es una medida a lo largo de el eje vertical de la curva de magnetización.

Para encontrar el voltaje de salida de una carga determinada, encuentre el tamaño del triángulo formado por la caída resistiva del voltaje e  $I_{eq}$  y encuentre el punto donde encaja perfectamente entre la línea de corriente de campo y la curva de magnetización.



**Figura 3.21 Análisis gráfico de un generador de c.d. compuesto acumulativo.**

### **3.25. ACOPLAMIENTO EN PARALELO DE LOS GENERADORES DE C.D.**

En las centrales generadoras de energía eléctrica, resulta conveniente disponer siempre varios generadores de corriente directa. Si se trata de una central autónoma de corriente directa, porque un solo generador habría de trabajar durante largos periodos de tiempo a media carga, por lo tanto a bajo rendimiento, disponiendo de dos o más generadores, en las horas de pequeña carga solo funcionan una o dos unidades, acoplando en paralelo las restantes a medida que lo exigen las condiciones del servicio.

Además, periódicamente se han de parar las máquinas de la central para su revisión, limpieza y si fuera necesario, su reparación, si solamente se dispone de un generador durante las operaciones de revisión y limpieza, la central no podría suministrar energía eléctrica, por el contrario si están instalados varios generadores, éstos pueden inspeccionarse y limpiarse uno a uno y entretanto los demás generadores pueden suministrar energía eléctrica a los usuarios.

En el caso de centrales de corriente alterna, donde es necesaria la corriente directa para la excitación de los generadores de corriente alterna y en muchas ocasiones para la carga de baterías de acumuladores de reserva cabe hacer análogas consideraciones sobre todo en los casos en que la central dispone de barras de excitación comunes para todos los generadores.

Un solo generador de corriente directa, si se avería puede significar el paro total de la central, mientras que si se dispone de varios generadores la avería de uno de ellos significará cuanto más el paro de un solo generador principal de corriente alterna. De acuerdo con esto, resulta fácil comprender que además de los generadores de corriente directa que se consideren necesarios, conviene instalar también uno o más generadores de reserva pues, de esta forma se facilita la inspección y limpieza de los generadores sin necesidad de que la central deje de funcionar a una parte de su carga.

El acoplamiento de los generadores eléctricos de corriente directa, puede realizarse en serie o en derivación o paralelo. Pero excepto en casos muy especiales el acoplamiento se realiza siempre en paralelo por lo que estudiaremos solamente este tipo de conexión.

Las condiciones necesarias para que dos o más generadores de corriente directa puedan acoplarse en paralelo son:

- 1.- Las máquinas han de tener la misma tensión nominal.
- 2.- Las máquinas y las barras colectoras han de tener la misma polaridad. La conexión a las barras colectoras con diferentes polaridades, provocaría un cortocircuito.

Además de estas condiciones necesarias, es muy conveniente que los generadores en paralelo tengan las mismas (o por lo menos, parecidas) características de funcionamiento.

Sólo si se cumplen las condiciones indicadas, puede conseguirse que la carga de la red se reparta automáticamente entre las máquinas acopladas proporcionalmente a la potencia de las mismas. Si por el contrario las

características de funcionamiento difieren mucho entre sí, se ha de tener mucho cuidado en que la máquina con excitación más fuerte no resulte sobrecargada, lo que se evitará en lo posible, accionando el regulador de tensión como veremos más adelante.

En el caso de varias máquinas acopladas en paralelo, las maniobras que deben efectuarse para conectar o desconectar una máquina sobre la red mientras las restantes unidades están paradas, son idénticas a las que ya hemos estudiado para el caso de una sola unidad. Pero las maniobras son diferentes cuando se trata de conectar o desconectar un generador a las barras, cuando están conectadas a ellas otras unidades.

Veamos ahora cuales son las operaciones generales para acoplar en paralelo dos o más generadores de corriente directa, supondremos que el generador 1 está trabajando sobre las barras colectoras y que para atender al aumento de carga es necesario acoplar en paralelo el generador 2. Realizaremos las siguientes operaciones:

1.- Se pone en marcha el generador 2 con su interruptor general abierto y se le excita, haciéndolo funcionar en vacío. Se comprueba la polaridad de los conductores que se corresponden en las dos máquinas para lo que se instala un hilo Fusible provisional entre los bornes a y c del interruptor general y un voltímetro entre los bornes b y d del mismo interruptor. Si las uniones están bien hechas, el voltímetro marcará cero, de lo contrario, el aparato indicará la suma de las tensiones en bornes de ambos generadores. Esta comprobación se hace siempre, cuando se realiza el primer acoplamiento en paralelo.

2.- Se regula la excitación del generador 2 de forma que su tensión en bornes sea igual o casi igual a la del generador 1.

3.- Se cierra el interruptor principal. Si las tensiones de las dos máquinas no son exactamente iguales circula entre la parte de las barras que unen ambas máquinas una corriente compensadora es decir, que el generador que tiene la tensión más elevada suministra corriente al otro generador, el cual funcionará cierto tiempo como motor, ayudando a su máquina motriz y como

consecuencia aumentará su tensión dando después corriente a las barras. Ya veremos más adelante que esta corriente compensadora provoca dificultades para el accionamiento en paralelo de generadores compound y la forma de solucionar este inconveniente.

4.- Se reparte la carga total entre los dos generadores. Si ambos son iguales se buscará repartir la carga por igual, para ello se aumentará la excitación del generador 2 para cargarlo y simultáneamente se reducirá la excitación del generador 1 para descargarlo.

La máquina motriz del generador 2 cuando éste se vaya cargando disminuirá su velocidad y su regulador que tiende a mantener constante o casi constante esta velocidad aumentará de forma automática la entrada de fluido motor. En la máquina motriz del generador 2 ocurrirá lo contrario, es decir que este generador aumentará su velocidad hasta que el regulador haya graduado de forma conveniente la admisión de fluido motor. Si es necesario puede aumentarse gradualmente la excitación del generador 2 hasta trasladar toda la carga del generador 1 al generador 2 y entonces, cuando el generador 1 funcione en vacío es decir descargado se le podrá desconectar de la red abriendo su interruptor general.

De la forma descrita podemos también conseguir repartir a voluntad la carga de la red entre varios generadores con sólo variar la resistencia de su circuito de excitación, el generador con mayor tensión en bornes cederá intensidad de corriente a la red y viceversa. En el lenguaje de los electricistas, esta operación se denomina pasar 1 carga entre los generadores acoplados. Para pasar la carga entre varios generadores se procede de la misma manera que para el caso de dos generadores.

Conviene emplear siempre que sea posible generadores con polos de conmutación, porque con dichos generadores no se producen chispas en el colector cuando varía la carga, aunque no varíe la posición de las escobillas.

**CAPÍTULO 4.**  
**MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA.**

Los motores de corriente directa se usan en una amplia variedad de aplicaciones industriales en virtud de la facilidad con la que se puede controlar la velocidad.

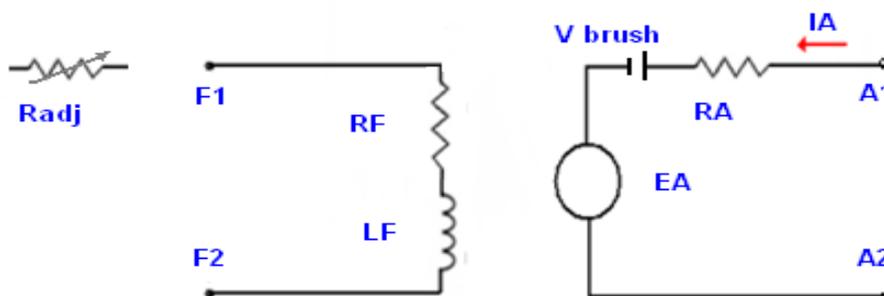
La característica velocidad-par se puede hacer variar para casi cualquier forma útil. Es posible la operación continua sobre un rango de velocidades de 8:1. En tanto que los motores de corriente alterna tienden a pararse, los motores de corriente directa pueden entregar más de cinco veces el par nominal (si lo permite la alimentación de energía eléctrica). Se puede realizar la operación en reversa sin conmutar la energía eléctrica.

Hay cinco clases principales de motores de c.d. de uso general:

- a) Motor con excitación externa.
- b) Motor en derivación.
- c) Motor imán permanente.
- d) Motor en serie.
- e) Motor de excitación compuesta.

**4.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN MOTOR DE C.D.**

Este circuito equivalente es exactamente igual al de un generador ya que la maquina es la misma, excepto por la dirección del flujo de corriente. En la siguiente figura veremos el circuito equivalente de un motor de c.d.

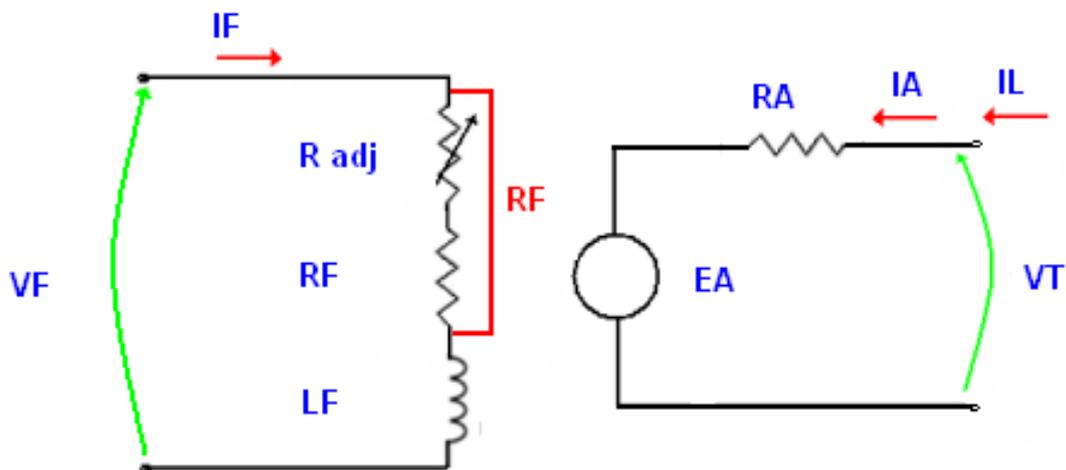


**Figura 4.1 Circuito equivalente de un motor de c.d.**

En donde el voltaje generado en el interior de esta máquina está dado por la ecuación  $E_A = K\phi\omega$  y el momento de torsión inducido desarrollado por la máquina está dado por  $\tau_{ind} = K\phi I_A$ . Con estas dos ecuaciones, la ley de Kirchhoff de voltajes y la curva de magnetización son todas las herramientas necesarias para analizar el comportamiento de un motor de c.d.

#### 4.2 MOTOR DE C.D. CON EXCITACIÓN EXTERNA Y EN DERIVACIÓN.

El motor con excitación externa es el que abastece a su circuito de campo una fuente de voltaje constante, mientras un motor de c.d. en derivación es aquel cuyo circuito de campo obtiene su potencia a través de los terminales del inducido del motor. Cuando la tensión de suministro a un motor se supone constante, no hay diferencia práctica en el comportamiento de estas dos máquinas. A menos que se especifique otra cosa, cada vez que se describa el comportamiento de un motor en derivación se incluirá también el motor con excitación externa. En la figura 4.2 a) se muestra el circuito equivalente de un motor con excitación externa y en la figura 4.2 b) se muestra el circuito equivalente de un motor de c.d. en derivación.

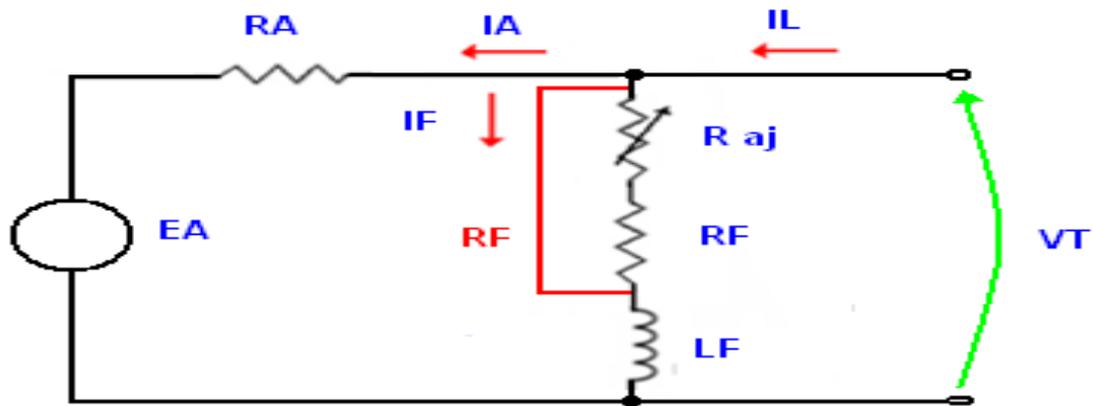


$$I_F = \frac{V_F}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A$$

a)



$$I_F = \frac{V_F}{R_F}$$

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

$$I_L = I_A = I_F$$

b)

**Figura 4.2 a) Circuito equivalente de un motor de c.d. con excitación externa. b) Circuito equivalente de un motor de c.d. en derivación.**

La ecuación de Kirchhoff de voltajes para el circuito del inducido de estos motores es la siguiente:

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

En comparación con la ecuación de la ley de voltajes de Kirchhoff para un generador de c.d. el signo de la caída de voltaje a través de la resistencia  $R_A$  se ha invertido puesto que se ha invertido la dirección del flujo de corriente en la maquina.

### 4.3 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN MOTOR DE C.D. EN DERIVACIÓN.

La característica terminal de un motor es una grafica de las cantidades de salida del motor contra cada una de las demás.

Para un motor, las cantidades de salida son el momento de torsión sobre el eje y velocidad.

Su respuesta de un motor de c.d. en derivación al aumentarle una carga sobre su eje, este en el momento de torsión de la carga  $\tau_{carga}$  excederá el momento de torsión inducido  $\tau_{ind}$  en la maquina y el motor comenzara a disminuir la marcha. Cuando disminuye la marcha del motor, su voltaje generado disminuye ( $E_A = K\phi\omega \downarrow$ ), y en consecuencia la corriente del inducido en el motor  $I_A = (V_T - E_A \downarrow)/R_A$  aumenta. A medida que se eleva la corriente de inducido, el momento de torsión inducido igualara al momento de torsión de la carga a una menor velocidad mecánica de rotación  $\omega$ .

En un motor de c.d. en derivación la característica de salida puede derivarse del voltaje inducido y las ecuaciones de momento de torsión del motor y la ley de Kirchhoff de voltajes.

Para un motor de c.c. en derivación la ecuación de LKV es:

$$V_T = E_A + I_A R_A$$

El voltaje inducido  $E_A = K\phi\omega$ , por tanto

$$V_T = K\phi\omega + I_A R_A$$

Ya que  $\tau_{ind} = k\phi\omega I_A$ , la corriente puede expresarse como

$$I_A = \frac{\tau_{ind}}{K\phi}$$

Por lo tanto se obtiene

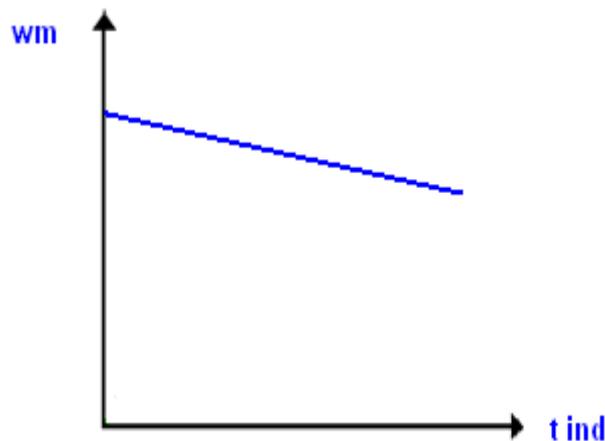
$$V_T = K\phi\omega + \frac{\tau_{ind}}{K\phi} R_A$$

Finalmente, al resolver para la velocidad del motor se produce

$$\omega = \frac{V_T}{K\phi} - \frac{R_A}{(K\phi)^2} \tau_{ind}$$

Esta ecuación es precisamente una línea recta con una pendiente negativa, es importante tener en cuenta que para que la velocidad del motor varíe linealmente con el momento de torsión, los demás términos de esta expresión deben ser constantes mientras la carga varía.

La característica momento de torsión –velocidad resultante de un motor de c.d. en derivación aparece en la siguiente figura.



**Figura 4.3 Característica momento de torsión-velocidad de un motor de c.d. en derivación o con excitación externa con embobinado de descompensación para eliminar la reacción del inducido.**

#### **4.4 CONTROL DE VELOCIDAD DE LOS MOTORES DE C.D. EN DERIVACIÓN.**

Para el control de velocidad de estos motores hay dos métodos comunes que son:

- 1.- Ajustando la resistencia de campo  $R_F$  y con ello el flujo de campo.

Para comprender lo que ocurre cuando se cambia la resistencia de campo de un motor de c.d. suponga que aumenta el valor de la resistencia de campo y observe la respuesta. Si aumenta la resistencia de campo, entonces la corriente de campo disminuye ( $I_F \downarrow = V_T/R_F$ ) y a medida que decrece la corriente de campo, el flujo  $\phi$  también se reduce.

Una disminución en el flujo ocasiona una reducción instantánea del voltaje interno generado  $E_A = K\phi \downarrow \omega$  la cual ocasiona un gran incremento de la corriente de inducido de la maquina, ya que:

$$I_A \uparrow = \frac{V_T - E_A \downarrow}{R_A}$$

2.- Ajustando el voltaje terminal aplicado al inducido.

Esta forma de control de velocidad tiene que ver con el cambio del voltaje aplicado al inducido del motor sin cambiar el voltaje aplicado al campo. El motor debe ser excitado externamente para utilizar el control de voltaje de inducido.

Si se aumenta el voltaje  $V_A$ , entonces la corriente de inducido en el motor debe elevarse  $I_A = V_A \uparrow - E_A / R_A$ . A medida que crece  $I_A$ , el momento inducido  $\tau_{ind} = K\phi I_A \uparrow$  aumenta, haciendo  $\tau_{ind} > \tau_{carga}$  y se incrementa la velocidad  $\omega$  del motor. Pero a medida que aumenta la velocidad  $\omega$ , el voltaje interno generado  $E_A = K\phi\omega \uparrow$  se eleva ocasionando que disminuya la corriente de inducido. Esta disminución de  $I_A$  rebaja el momento inducido haciendo que  $\tau_{ind}$  iguale a  $\tau_{carga}$  a una mayor velocidad de rotación  $\omega$ .

#### **4.5 EL MOTOR DE C.D. CON IMÁN PERMANENTE.**

Existen motores de imán permanente (PM, permanent magnet), en tamaños de fracciones de caballo y de números pequeños enteros de caballos.

Tienen varias ventajas respecto a los del tipo de campo devanado. No se necesitan las alimentaciones de energía eléctrica para excitación ni el devanado asociado.

Se mejora la confiabilidad, ya que no existen bobinas excitadoras del campo que fallen y no hay probabilidad de que se presente una sobre velocidad debida a pérdida del campo. Se mejoran la eficiencia y el enfriamiento por la eliminación de pérdida de potencia en un campo excitador.

Así mismo, la característica par contra corriente se aproxima más a lo lineal. Un motor de imán permanente (PM) se puede usar en donde se requiere un motor completamente encerrado para un ciclo de servicio de excitación continua.

Los efectos de la temperatura dependen de la clase de material que se use en el imán. Los motores de número entero de caballos de potencia con imanes del tipo Alnico resultan menos afectados por la temperatura que los que tienen imanes de cerámica, porque el flujo magnético es constante.

Por lo común los imanes de cerámica que se utilizan en los motores de fracción de caballo tienen características que varían con la temperatura muy aproximadamente como varían los campos en derivación de las máquinas excitadas.

Las desventajas son la falta de control del campo y de características especiales velocidad-par.

Las sobrecargas pueden causar desmagnetización parcial que cambia las características de velocidad y de par del motor, hasta que se restablece por completo la magnetización. En general, un motor PM de número entero de caballos es un poco más grande y más caro que un motor equivalente con devanado en derivación, pero el costo total del sistema puede ser menor.

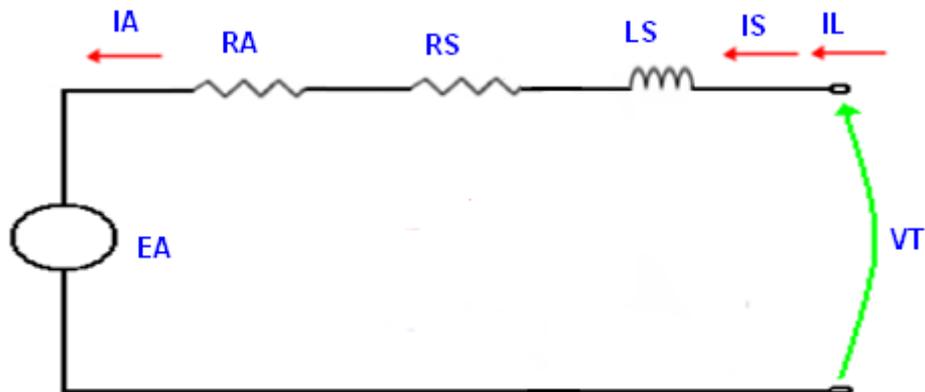
Un motor PM es un término medio entre los motores de devanado compuesto y los devanados en serie.

#### 4.6 MOTOR DE C.D. SERIE.

Este tipo de motores de c.d. serie se distingue por sus embobinados de campo que están formados por pocas vueltas conectadas en serie con el circuito del inducido. En un motor de c.d. serie, la corriente inducida, la corriente de campo y la corriente en línea son lo mismo. La ecuación de la ley de Kirchhoff de voltajes para este motor es:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

El circuito equivalente de un motor de c.c. serie se muestra en la siguiente figura.



**Figura 4.4 Circuito equivalente de un motor de c.d. serie.**

#### 4.7 MOMENTO DE TORSIÓN INDUCIDO EN UN MOTOR DE C.D. SERIE.

En un motor c.d. serie la característica terminal es muy diferente a la de un motor en derivación. El comportamiento básico de un motor de c.d. serie se debe al hecho de que el flujo es directamente proporcional a la corriente inducida, al menos hasta cuando se alcanza la saturación.

A medida que aumenta la carga en el motor, su flujo aumenta también. Como se vio anteriormente un aumento del flujo en el motor ocasiona una disminución de su velocidad.

El resultado es que el motor de c.d. serie tiene una característica momento de torsión-velocidad con caída brusca.

El momento inducido en esta máquina está dado por la ecuación:

$$\tau_{ind} = K\phi I_A$$

El flujo aquí es directamente proporcional a la corriente del inducido (al menos hasta que se satura el metal).

Por tanto, el flujo en la máquina puede determinarse por donde  $c$  es una constante de proporcionalidad. Así, en esta máquina el momento inducido está dado por:

$$\phi = cI_A$$

donde  $c$  es una constante de proporcionalidad. Así, en esta máquina el momento inducido está dado por:

$$\tau_{ind} = K\phi I_A = KcI_A^2$$

En otras palabras el momento de torsión en el motor es proporcional al cuadrado de su corriente en el inducido.

Como resultado de esta relación, es fácil ver que un motor serie de mayor momento de torsión por amperio que cualquier otro motor de c.d.

Por ello se utiliza en aplicaciones que requieren momentos de torsión muy altos, como ejemplo tenemos los motores de arranque de los automóviles, los motores de ascensores y los motores de tracción de las locomotoras.

#### **4.8 CARACTERÍSTICA TERMINAL DE UN MOTOR DE C.D. SERIE.**

Para determinar esta característica terminal del motor de c.d. serie, se debe hacer un análisis basado en el supuesto de una curva de magnetización lineal y después considerar los efectos de saturación en un análisis gráfico.

El supuesto de una curva de magnetización lineal implica que el flujo en el motor estará dado por la ecuación:

$$\phi = cI_A$$

Esta ecuación se usará para derivar la curva de la característica momento de torsión –velocidad de los motores de c.d. serie.

La derivación de la característica momento de torsión-velocidad de un motor serie comienza con la ley de Kirchhoff de voltajes:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

A partir de la ecuación  $\tau_{ind} = K\phi I_A = KcI_A^2$ , la corriente inducida puede expresarse como:

$$I_A = \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}}$$

Igualmente,  $E_A = K\phi\omega$ . Al sustituir estas expresiones en la ecuación

$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$ , tenemos:

$$V_T = K\phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S)$$

Si el flujo puede eliminarse en esta expresión, esto relacionara directamente el momento de un motor con su velocidad. Para eliminar el flujo en la expresión, observamos que:

$$I_A = \frac{\phi}{\omega}$$

Y la ecuación de momento de inducido puede recibirse como:

$$\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}}$$

Al sustituir la ecuación  $\phi = \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}}$  por la ecuación  $V_T = K\phi\omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S)$  y despejar la velocidad resulta:

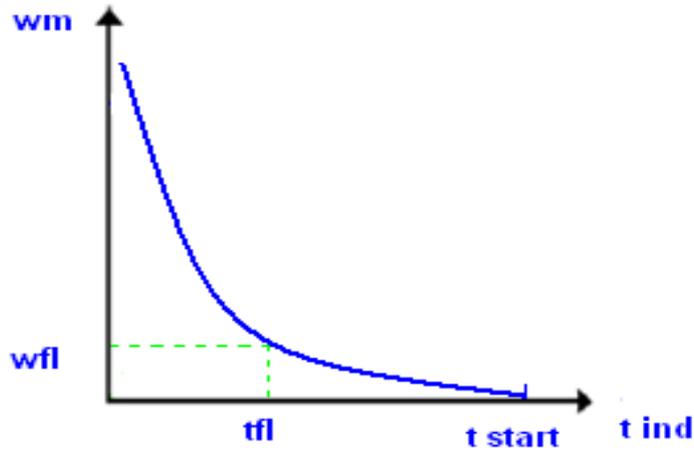
$$V_T = K \sqrt{\frac{c}{K}} \sqrt{\tau_{ind}} \omega + \sqrt{\frac{\tau_{ind}}{Kc}} (R_A + R_S)$$

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc\sqrt{\tau_{ind}}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc}$$

La relación momento de torsión-velocidad resultante es:

$$\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{\tau_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc}$$

Obsérvese que en un motor serie no saturado la velocidad varia como el reciproco de la raíz cuadrada del momento. Esta es una relación inusual. Esta característica ideal momento de torsión-velocidad aparece en forma de grafica en la figura 4.5.



**Figura 4.5 Característica momento de torsión-velocidad de un motor de c.c. serie.**

La desventaja de los motores de c.d. serie puede verse inmediatamente a partir de esta ecuación. Cuando el momento en este motor tiende a cero, su velocidad tiende a infinito.

En la práctica, el momento nunca tiende completamente a cero debido a las pérdidas mecánicas del núcleo y adicionales que debe vencer. No obstante, si no se conecta al motor ninguna otra carga, este puede marchar tan velozmente que llega a dañarse seriamente.

Nunca debe descargarse completamente un motor de c.d. serie y nunca debe conectarse a una carga mediante una correa u otro mecanismo que pudiera romperse. Si eso pasara y el motor llegara a descargarse estando en marcha, los resultados podrían ser graves.

#### **4.9 CONTROL DE VELOCIDAD EN LOS MOTORES DE C.D. SERIE.**

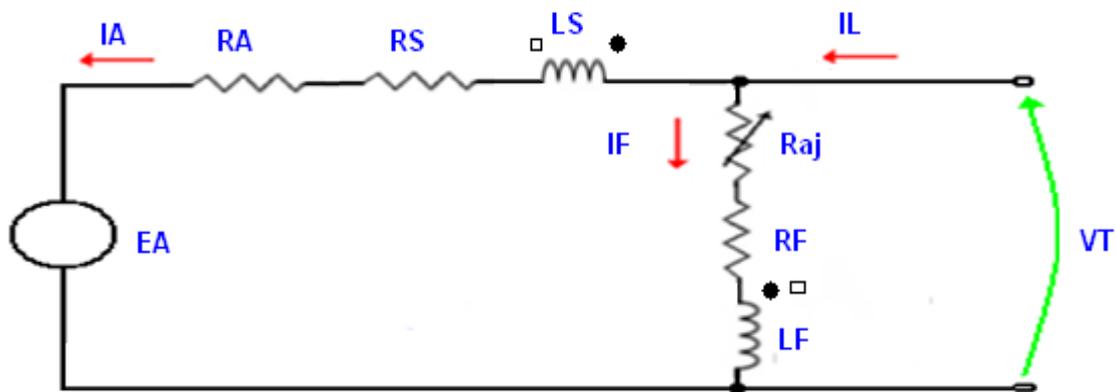
En los motores de c.d. serie, hay una sola manera eficiente de cambiar la velocidad, este método consiste en cambiar el voltaje terminal del motor. Si se aumenta este voltaje, el primer término de la ecuación  $\omega = \frac{V_T}{\sqrt{Kc}} \frac{1}{\sqrt{t_{ind}}} - \frac{R_A + R_S}{Kc}$  aumenta, de lo cual resulta una mayor velocidad para cualquier momento de torsión dado.

Esta velocidad de los motores de c.d. serie puede controlarse también mediante la inserción de una resistencia en serie dentro del circuito del motor pero esta técnica ocasiona un gran desperdicio de potencia y solo se usa para periodos intermitentes durante el arranque de algunos motores.

#### **4.10 MOTOR DE C.D. COMPUESTO.**

Este tipo de motor tiene un campo en serie y uno en derivación. También en este motor se utilizara la convención del punto: Una corriente que fluye hacia un punto correspondiente a una fuerza magnetomotriz positiva y la corriente que fluye hacia fuera del punto corresponde a una fuerza magnetomotriz negativa.

En la siguiente figura se observa ese tipo de motor donde los puntos redondos corresponden a la composición acumulativa del motor y los cuadrados corresponden a la composición diferencial.



**Figura 4.6 Circuito equivalente de los motores de c.d. con excitación compuesta.**

La ecuación de la ley Kirchhoff de voltajes para un motor de c.d. de composición acumulativa es:

$$V_T = E_A + I_A(R_A + R_S)$$

En este motor las corrientes están relacionadas por:

$$I_A = I_L - I_F$$

$$I_F = \frac{V_T}{R_F}$$

La fuerza magnetomotriz neta y la corriente efectiva de campo en derivación en el motor de composición acumulativa están dadas por:

$$\mathfrak{F}_{net} = \mathfrak{F}_{SH} \pm \mathfrak{F}_{SE} - \mathfrak{F}_{RI}$$

$$I_F^* = I_F \pm \frac{N_{SE}}{N_F} I_A - \frac{\mathfrak{F}_{RI}}{N_F}$$

donde el signo positivo de las ecuaciones está asociado con un motor de composición acumulativa y el signo negativo se refiere a una motor de composición diferencial.

Es importante observar lo que ocurre en un motor de composición acumulativa cuando se invierte el flujo de potencia. Si el motor se convierte en un generador, la dirección de su flujo de corriente en el inducido se invierte, mientras la dirección de su corriente de campo permanece igual que antes.

Así, un motor de composición acumulativa se convertirá en un generador de composición diferencial, y un motor de composición diferencial se convertirá en un generador de composición acumulativa.

Esto puede influir en la elección de maquinas de c.d. en los sistemas, especialmente en los equipos de motores generadores en que la potencia deba estar en capacidad de fluir en las dos direcciones.

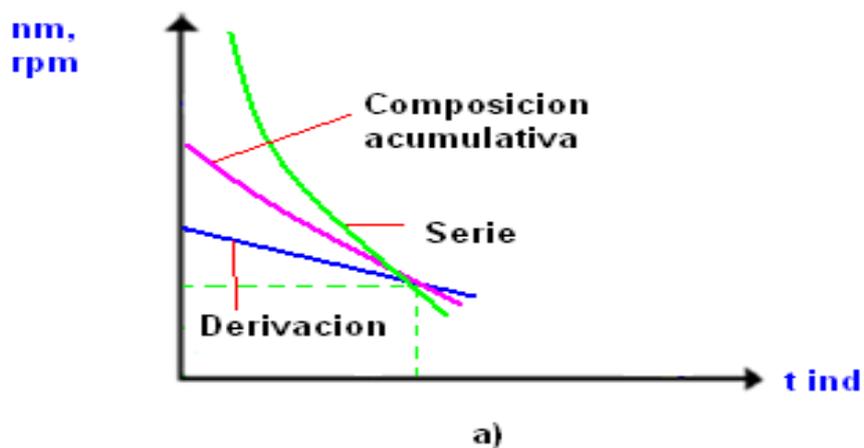
#### 4.11 LA CARACTERÍSTICA MOMENTO DE TORSIÓN-VELOCIDAD DE UN MOTOR DE C.D. COMPOSICIÓN ACUMULATIVA.

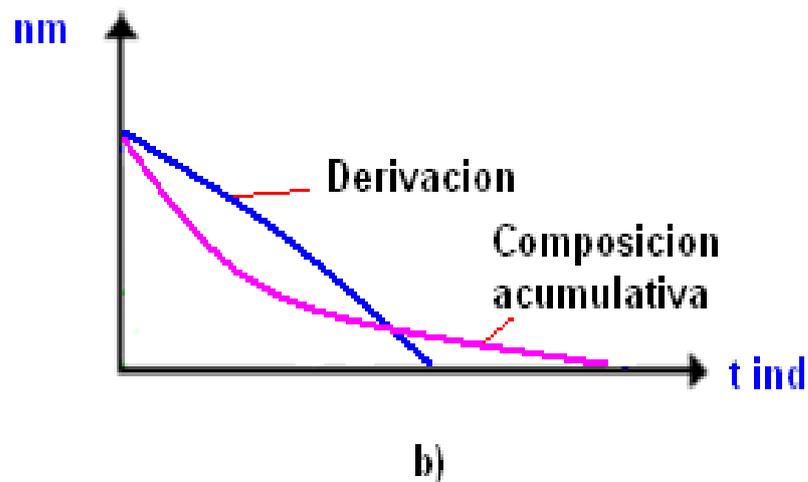
En este motor de c.d. composición acumulativa hay un componente de flujo que es constante y otro componente que es proporcional a su corriente de inducido y por tanto, a su carga.

En consecuencia, el motor de composición acumulativa tiene un mayor momento de arranque que un motor en derivación cuyo flujo es constante pero un menor momento de arranque que un motor serie, cuyo flujo es proporcional a la corriente del inducido.

En cierto sentido, el motor de c.d. de composición acumulativa combina las mejores propiedades del motor en derivación y del motor serie. Como motor serie tiene momento de torsión extra para arranque, como motor en derivación no presenta desbocamiento en ausencia de carga.

Con cargas pequeñas, el campo en serie tiene un efecto muy pequeño y por ello el motor se comporta aproximadamente como un motor en derivación. A medida que crece la carga y se hace muy grande, el flujo en serie se hace del todo importante y la curva momento de torsión-velocidad comienza a verse como una característica de motor en serie. En la siguiente figura se muestra una comparación de las características momento de torsión-velocidad de cada uno de estos tipos de máquina.





**Figura 4.7 a) Característica momento torsión-velocidad de un motor de composición acumulativa comparado con motores serie y en derivación con la misma proporción de carga total. b) Característica momento torsión-velocidad de un motor de composición acumulativa comparado con un motor en derivación con la misma velocidad sin carga.**

#### **4.12 LA CARACTERÍSTICA MOMENTO DE TORSIÓN-VELOCIDAD DE UN MOTOR DE C.D. DE COMPOSICIÓN DIFERENCIAL.**

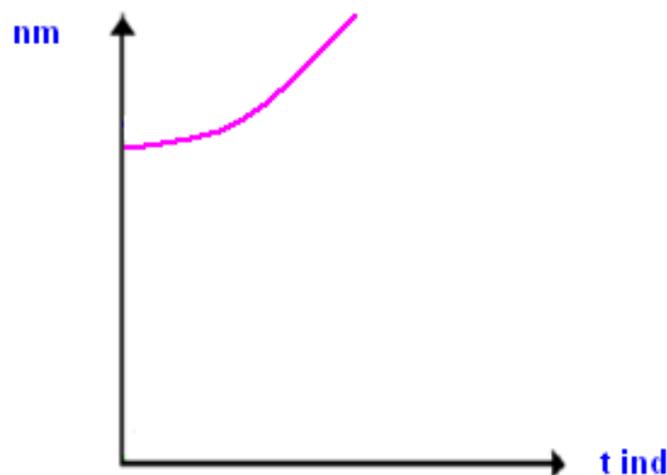
En este motor la fuerza magnetomotriz en derivación y la fuerza magnetomotriz en serie se sustraen una de la otra. Esto significa que a medida que aumenta la carga en el motor,  $I_A$  crece y el flujo en el motor disminuye. Pero a medida que disminuye el flujo, la velocidad del motor aumente.

Este incremento de velocidad ocasiona otro aumento otro aumento de la carga, que además eleva  $I_A$ , disminuyendo luego el flujo y aumentando nuevamente la velocidad.

El resultado es que un motor de composición diferencial es inestable y tiende a desbocarse. Esta inestabilidad es mucho peor que la de un motor en derivación con reacción de inducido. Resulta lamentable que un motor de composición diferencial sea inapropiado para casi todo tipo de aplicaciones.

En este motor también, es imposible dar arranque. En condiciones de arranque la corriente del inducido y la corriente de campo en serie son muy altas. Puesto que el flujo en serie se sature del flujo en derivación, el campo en serie puede realmente invertir la polaridad magnética de los polos de la máquina.

De manera típica el motor se cambiara lentamente a la dirección errónea o permanecerá en ella mientras se quema, debido a la excesiva corriente en el inducido. Cuando va a ponerse en operación este tipo de motor, su campo en serie debe estar en corto circuito, de tal manera que se comporta como un motor en derivación durante el periodo de arranque. En razón de los problemas de estabilidad del motor de compensación diferencial, este casi nunca se usa intencionalmente. No obstante, un motor de compensación diferencial puede producirse si la dirección de flujo de potencia se invierte en un generador de composición acumulativa. Por esa razón, si se usan generadores de c.d. de compensación acumulativa para suministrar potencia a un sistema, estos tendrán un circuito de disparo de potencia invertida para desconectarlos de la línea si se invierte el flujo de potencia. Ningún equipo moto-generador en el cual se espera que la potencia fluya en las dos direcciones, puede utilizar un motor de composición diferencial y por tanto no puede usar un generador de composición acumulativa. En la siguiente figura puede observarse una característica terminal típica para un motor de c.d. de composición diferencial.



**Figura 4.8 Característica momento de torsión-velocidad de un motor de c.d. composición diferencial.**

**CAPÍTULO 5.**  
**PROBLEMAS.**

**5.1 SERIE DE EJERCICIOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS.**

1) Un generador síncrono trifásico de 2 polos tiene una densidad de campo magnético  $0.2 \text{ Wb/m}^2$ , y la velocidad de la maquina es de 3600 R.P.M. El diámetro del estator de la maquina es de  $0.5 \text{ m}$ , cada bobina tiene 15 espiras y la longitud de cada lado es de  $0.3 \text{ m}$ . La maquina se encuentra conectada en estrella calcular:

- a) Los voltajes en función del tiempo de cada fase.
- b) El voltaje eficaz o R. M. S. de una fase.
- c) El voltaje eficaz o R. M. S. en las terminales de la maquina.

SOLUCION:

$$a) \ell a a'(t) = N Q W_s \text{ Sen } (W_e t)$$

$$Q = BA = B(2r\ell) = B(d\ell)$$

$$Q = (0.2 \text{ wb/m}^2)(0.5 \text{ m})(0.3 \text{ m})$$

$$Q = 0.03 \text{ wb}$$

$$W_{SINC} = W_{mec} = \frac{2\pi Ns}{60}$$

$$W_{SINC} = \frac{2\pi (3600 \text{ R.P.M.})}{60}$$

$$W_{SINC} = 377 \text{ rad/seg}$$

$$W_s = \frac{W_e}{n}$$

$$\therefore W_e = n W_s$$

$$W_e = (1)(377 \text{ rad/seg})$$

$$W_e = 377 \text{ rad/seg}$$

$$W_s = W_e \text{ pero solo para maquina de dos polos}$$

SUSTITUYENDO

$$\ell a - a'(t) = (15)(0.03 \text{ wb})(377 \text{ rad/seg}) \text{ Sen } 377 t$$

$$\ell a - a'(t) = (169.65) \text{ Sen } 377 t$$

Donde  $169.65 = E_{MAX} = N\Phi W_s$

$$\therefore \ell a - a' = 169 \text{ sen } t \quad \ell b - b' = 169 \text{ sen } (377^\circ - 120^\circ)$$

$$\ell c - c' = 169 \text{ sen } (377^\circ - 240^\circ)$$

$$b) E_A = \frac{E_{MAX}}{\sqrt{2}} = \frac{169}{\sqrt{2}} \approx 120 \text{ Volts}$$

$$c) V_{linea} = \sqrt{3} E_A \text{ Fase}$$

$$V_{linea} = \sqrt{3} 120$$

$$V_{linea} = 208 \text{ Volts}$$

2) Un generador síncrono trifásico conectado en  $\Delta$  de 480V, 60Hz, 4 polos. Tiene  $R_A$  de  $0.015\Omega$  y una reactancia síncrona de  $0.1\Omega$ . A plena carga la maquina entrega 1200Amp con un  $F.P. = 0.8$  atrasado. Las perdidas por fricción de ventilación son de  $40K_W$  y por núcleo de  $30K_W$ . Calcular:

- Voltaje generado internamente.
- La potencia recibida y suministrada por el generador.
- La eficiencia de la maquina.

*SOLUCION:*

$$a) E_A = ?$$

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

$$V_L = V_\phi = 480v$$

$$I_L = \sqrt{3} I_A$$

$$\therefore I_A = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{1200}{\sqrt{3}} = 692.82 \text{ Amp.}$$

$$F.P. = \cos \theta = \cos(0.8)^{-1} = 36.86$$

$$E_A = 480 \angle 0^\circ + (0.015 + j0.1) (692.82 \angle -36.86^\circ)$$

$$E_A = 529.87 + j49.15$$

$$E_A = 532.15 \angle 5.30$$

$$b) P_{recibida} = ? = P_{entrada}$$

$$P_{suministrada} = ? = P_{salida}$$

$$\begin{aligned} P_{sal} &= P_{elect} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3} (480V)(1200Amp)(0.8) \\ &= 798.12 K_W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Ó } P_{sal} &= 3V_{\theta} I_A \cos \theta \\ &= 3 (480V)(692.82Amp)(0.8) \\ &= 798.12 K_W \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_{perd} &= 3 R_A I_A^2 = 3 (0.015\Omega) (692.82Amp)^2 \\ &= 21.59 K_W \end{aligned}$$

$$Perd_{total} = 21.59K_W + 70K_W = 91.59 k_w$$

$$\begin{aligned} \therefore P_{ent} &= P_{sal} + Perdidas \\ &= 798.12 K_W + 91.59 K_W = 889.71 K_W \end{aligned}$$

$$c) \eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \times 100$$

$$\eta = \frac{798.12 \times 10^3}{889.71 \times 10^3} \times 100$$

$$\eta = 89.70\%$$

3) Un generador trifásico tiene una conexión en estrella, una tensión entre terminales de  $450V$  y suministra una intensidad nominal de  $300Amp$  por cada terminal, con un factor de potencia de  $0.75$  en atraso. Calcular:

- a) La tensión por fase.
- b) La intensidad por fase.
- c) Los  $KVA$  nominales.
- d) Los  $K_W$  nominales.

*RESULTADOS:*

- a)  $260 Volts$ .
- b)  $300 Amp$ .
- c)  $233.55 KVA$ .
- d)  $175.16 K_W$ .

4) Un generador síncrono de  $480V$ ,  $200KVA$ , con un factor de potencia de  $0.8$  en atraso,  $60Hz$ , dos polos, conectado en  $Y$ , tiene una reactancia síncrona de  $0.25\Omega$  y una reactancia del inducido de  $0.04\Omega$ , a  $60Hz$ , sus pérdidas por fricción propia y por el aire son de  $6K_W$  y sus pérdidas en el núcleo son de  $4K_W$ . Calcular:

- a) ¿Cuánta corriente de campo se requiere para que  $V_T$  sea igual a  $480V$  cuando el generador opera en vacío?
- b) ¿Cuál es el voltaje interno generado en esta máquina en condiciones nominales?
- c) ¿Cuánta corriente de campo se requiere para que  $V_T$  sea igual a  $480V$  cuando el generador está operando en condiciones nominales?
- d) ¿Cuánta potencia y par debe ser capaz de suministrar el motor primario del generador?

*RESULTADOS:*

- a)  $4.25 Amp$ .
- b)  $1537\angle 7.4^\circ V$
- c)  $5.9 Amp$ .
- d)  $870.4 K_W$  y  $695 N \cdot m$

5) Un motor síncrono trifásico de 208V, 60Hz, 45KVA, un factor de potencia adelantado de 0.8 conectado en Δ. Y tiene una reactancia síncrona de 2.5Ω y una resistencia de armadura despreciable, sus pérdidas por fricción y ventilación son de 1.5KW y las del núcleo de 1KW. Inicialmente está alimentando una carga de 15Hp y el factor de potencia del motor es de 0.8 adelantado. Calcular:

- a) Las corrientes  $I_A, I_L$  y  $E_A$  (voltaje inducido)  
 b) Si la carga aumenta a 30Hp calcular  $I_A, I_L$  y  $E_A$

SOLUCION:

a)  $P_{sal} = 15 \text{ Hp}$

$1 \text{ Hp} = 746 \text{ watts}$

$P_{sal} = 11190 \text{ watts}$

$\therefore P_{ent} = P_{sal} + \text{perdidas}$

SUSTITUYENDO.

$P_{ent} = 11190 \text{w} + 1500 \text{w} + 1000 \text{w} = 13690 \text{ watts}$

$P_{ent} = P_{elect}$

Donde  $P_{elect} = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta$

DESPEJANDO

$$I_L = \frac{P_{ent}}{V_L (\cos \theta) \sqrt{3}} = \frac{13690 \text{w}}{(208 \text{V})(0.8)\sqrt{3}} = 47.5 \text{ Amp}$$

$I_L = \sqrt{3} I_{A \text{ FASE}}$

$\therefore I_{A \text{ FASE}} = \frac{I_L}{\sqrt{3}} = \frac{47.5 \text{ Amp}}{\sqrt{3}} = 27.42 \text{ Amp}$

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

$E_A = V_\phi - jX_S I_A$

$E_A = 208 \angle 0^\circ - j(2.5)(27.42) \angle 36.86^\circ$

$E_A = 249.12 - j 54.84$

$E_A = 255.086 \angle - 12.41^\circ \dots\dots\dots \delta = \text{angulo de potencia o carga}$

b) Para 30Hp

$I_L = ?$

$I_A = ? \quad \delta = ?$

$$E_A = ?$$

$$P_{trans} = \frac{3V_\theta E_A}{X_S} \text{sen } \delta$$

$$P_{trans} = P_{ent}$$

$$P_{ent} = P_{sal} + \text{perdidas}$$

$$P_{ent} = (30 \times 746) + 1500 + 1000$$

$$P_{ent} = 24880 \text{ watts}$$

$$24880 = \frac{3(208)(255.086)}{(2.5)} \text{sen } \delta$$

$$\therefore \text{sen} \delta = \left( \frac{(24880)(2.5)}{3(208)(255.086)} \right) - 1$$

$$\therefore \delta = \text{sen}^{-1} \left( \frac{(24880)(2.5)}{3(208)(255.086)} \right)$$

$\delta = -23 \dots \dots \dots$  Es negativo por que es un consumo

$$\therefore E_A = 255.086 \angle -23^\circ$$

De la expresion:

$$E_A = V_\theta + jX_S I_A$$

$$\therefore I_{A \text{ FASE}} = \frac{V_\theta - E_A}{jX_S}$$

SUST.

$$I_{A \text{ FASE}} = \frac{208 \angle 0^\circ - 255.086 \angle -23^\circ}{j2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A \text{ FASE}} = \frac{208 - (255.086 \cos -23 + j 255.086 \text{sen} -23)}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A \text{ FASE}} = \frac{208 - 234.807 + j 99.67}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A \text{ FASE}} = \frac{-26.807 + j 99.67}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A\text{FASE}} = \frac{103.212 \angle 105.05^\circ}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A\text{FASE}} = 41.2848 \angle 15.05^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3} I_{A\text{FASE}} \quad \therefore \quad I_L = \sqrt{3} (41.2848) = 71.5 \text{ Amp}$$

6) Un motor síncrono de 480v, de 100K<sub>W</sub>, 50Hz, un F.P. de 0.85 en adelanto, de 6 polos conectado en Y. Tiene una reactancia síncrona de 1.5Ω y una resistencia de armadura despreciable, las pérdidas de rotación son también despreciadas.

Este motor va a ser operado en un rango continuo de velocidades de 300 a 1000 r/min, donde los cambios de velocidad se logran mediante el control de la frecuencia del sistema. Calcular:

- ¿A qué rango de frecuencia debe ser variada para proporcionar este nivel de control de velocidad?
- ¿Cuánto vale  $E_A$  en condiciones nominales del motor?
- ¿Cuál es la potencia máxima que el motor puede producir en condiciones nominales? considerando el  $E_A$  calculado en el punto anterior.

*SOLUCION:*

a) Para 300 r/min

$$f_e = \frac{nmp}{120} = \frac{300r/\text{min} (6)}{120} = 15 \text{ Hz}$$

Para 1000r/min

$$f_e = \frac{nmp}{120} = \frac{1000r/\text{min} (6)}{120} = 50 \text{ Hz}$$

$$b) I_A = I_L = \frac{P_{ent}}{V_L(\cos \theta) \sqrt{3}} = \frac{100KW}{(480)(0.85)\sqrt{3}} = 141.5 \text{ Amp}$$

$$I_A = 141.5 \angle 31.8^\circ$$

Por estar conectado en Y

$$V_\theta = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277v \Rightarrow E_A = V_\theta - (R_A + jX_S)I_A$$

$$\therefore E_A = 227 \angle 0^\circ - j(1.5)(141.5 \angle 31.8^\circ)$$

$$E_A = 429 \angle -24.9^\circ$$

$$c) P_{max} = \frac{3V_\theta E_A}{X_S}$$

$$P_{max} = \frac{3(227)(429)}{1.5} = 238 \text{ KW}$$

7) Un motor síncrono a 480V, 60Hz, con un factor de potencia de 0.8 adelantado, de 6 polos, conectado en  $\Delta$ , tiene una reactancia síncrona de 1.1 $\Omega$  y la resistencia de la armadura es despreciable, las demás pérdidas también se desprecian. Calcular:

a) Si este motor subministra inicialmente 400Hp con un factor de potencia de 0.8 en atraso. Cuáles serán las magnitudes y los ángulos de  $E_A$  y de  $I_A$ , si las pérdidas son despreciadas.

b) ¿Cuál es el par producido por este motor? si su velocidad de rotación es de 1200r/min.

c) Si  $E_A$  se incrementa en un 15% ¿Cual es el valor de la nueva  $I_A$  y el nuevo factor de potencia?

RESULTADOS:

a)  $259 \angle -36.87^\circ A$

$384 \angle 36.4^\circ \text{ Amp.}$

b)  $2375 \text{ N} \cdot \text{m}$

c)  $227 \angle -24.1^\circ \text{ Amp.}$  con un factor de potencia de 0.91 en atraso.

8) Un motor síncrono, trifásico, de polos salientes, de  $208V$ ,  $60Hz$  y conectado en Y funciona a plena carga y toma una corriente de  $40A$  con un factor de potencia de  $0.8$  en atraso. Las reactancias en ejes son de  $2.7\Omega/\text{fase}$  y  $1.7\Omega/\text{fase}$ . La resistencia del devanado puede despreciarse y la pérdida por rotación es de  $5\%$  de la potencia desarrollada por el motor. Determine:

- a) El voltaje de excitación.
- b) La potencia desarrollada debido a la excitación del campo.
- c) La potencia desarrollada debido a la estructura de polos salientes del motor.
- d) La potencia total desarrollada.
- e) La eficiencia del motor.
- f) La potencia máxima desarrollada por el motor.

*RESULTADOS:*

- a)  $94.415\angle -34.48^\circ V$
- b)  $7126.68 W$ .
- c)  $4392.14 W$ .
- d)  $\approx 11520 W$ .
- e)  $95\%$
- f)  $\approx 15024 W$ .

## 5.2 SERIE DE EJERCICIOS DE MÁQUINAS DE CORRIENTE DIRECTA.

1) Un generador de c.d. shunt o paralelo de  $10K_W$ , 250v, tiene una resistencia de armadura de  $0.1\Omega$  y una de campo de  $250\Omega$ . Trabajando a plena carga con una velocidad de 1800r.p.m. La maquina pasa a trabajar como motor tomando una carga de  $10K_W$  a 250v. ¿Cuál será ahora la velocidad como motor?

*SOLUCION:*

$$\text{GENERADOR: } E_A = V_T + R_A I_A$$

$$\text{MOTOR: } E_A = V_T - R_A I_A$$

*GENERADOR*

$$I_A = I_F + I_L$$

$$\begin{aligned} \text{donde } I_F &= \frac{V_T}{R_F} \\ &= \frac{250v}{250\Omega} = 1 \text{ Amp} \end{aligned}$$

$$I_L = \frac{P}{V_T} = \frac{10000w}{250v} = 40 \text{ Amp.}$$

$$\therefore I_A = 1\text{Amp} + 40\text{Amp} = 41 \text{ Amp.}$$

$$\text{SUSTITIYENDO } E_A = V_T + R_A I_A$$

$$E_{Ag} = 250v + (0.1\Omega)(41\text{Amp}) = 254.1 \text{ volts}$$

*MOTOR*

$$\text{MOTOR: } E_A = V_T - R_A I_A$$

$$\text{donde } I_L = I_F + I_A$$

$$I_F = \frac{250v}{250\Omega} = 1 \text{ Amp.}$$

$$I_L = \frac{10000w}{250v} = 40 \text{ Amp.}$$

$$\therefore I_A = I_L - I_F = 40\text{Amp} - 1\text{Amp} = 39 \text{ Amp.}$$

SUSTITUYENDO

$$E_A = 250v - (0.1\Omega)(39\text{Amp}) = 246.1 \text{ volts}$$

$$\begin{aligned} \therefore N_{RPM \text{ MOTOR}} &= \frac{E_{AM} N_{RPMg}}{E_{Ag}} \\ &= \frac{(246.1v)(1800RPM)}{254.1V} = 1743.32 \text{ R. P. M.} \end{aligned}$$

2) Un generador en derivación o paralelo de  $100K_W$  DE 230v, con una resistencia en la armadura de  $0.0\Omega$  y una de campo de  $57.5\Omega$ . La maquina tiene un devanado de armadura sencillo inbricado. Calcular:

- El voltaje que se induce en la armadura con la carga total.
- El voltaje que se induce en la armadura con la mitad de su carga.
- El flujo magnético producido por la armadura con 326 conductores en la armadura, girando a una velocidad de 650RPM.

SOLUCION:

$$a) E_{ind} = ?$$

$$E_{ind} = V_T + R_A I_A$$

$$V_T = R_F I_F$$

$$\therefore I_F = \frac{230v}{57.5\Omega} = 4 \text{ Amp.}$$

$$P = V_T I_L$$

$$\therefore I_L = \frac{P}{V_T} = \frac{100000w}{230v} = 434.7 \text{ Amp}$$

$$\therefore I_A = I_F + I_L$$

$$I_A = 4\text{Amp} + 434.7\text{Amp} = 438.7 \text{ Amp}$$

SUSTITUYENDO

$$E_{ind \text{ plena carga}} = 230v + (0.05\Omega)(438.7Amp) = 251.93 \text{ volts}$$

b)  $E_{ind \text{ mitad de carga}} ?$

$$I_L = \frac{P}{V_T} = \frac{50000w}{230v} = 217.39 \text{ Amp.}$$

$$\therefore I_A = 4Amp + 217.39Amp = 221.39 \text{ Amp}$$

SUSTITUYENDO

$$E_{ind \text{ mitad de carga}} = 230v + (0.05\Omega)(221.39Amp) = 241.06 \text{ volts}$$

c)  $\phi = ?$

$$E = K' \phi N_{RPM}$$

$$\text{donde } K' = \frac{326}{60} = 5.4$$

$$\therefore \phi = \frac{E}{K' N_{RPM}} = \frac{251.93v}{(5.4)(650)} = 0.071 \text{ wb}$$

3) Un generador en derivación autoexcitado, alimenta una carga de  $12.5K_W$  a  $125V$ , la resistencia de campo es de  $25\Omega$  y la de armadura es de  $0.1\Omega$ . La caída total de voltaje en las escobillas, debido a la reacción de armadura es de  $3.5V$ . Si la maquina gira a  $1200r/min$ . Calcular:

- El voltaje inducido en la armadura.
- La eficiencia de la máquina.
- El par mecánico desarrollado.

RESULTADOS:

- $139 \text{ Volts.}$
- $85.64 \%$
- $99.47 \text{ N} \cdot \text{m}$

4) Un generador de c.d. con una fuente de alimentación externa, tiene los siguientes valores nominales  $172K_W$ ,  $430V$ ,  $400A$  y  $1800r/min$ . Los datos siguientes pertenecen a esta máquina:  $R_A = 0.05\Omega$ ,  $R_F = 20\Omega$ ,  $R_{adj} = 0$  a  $300\Omega$ ,  $V_F = 430V$  y  $N_F = 1000$  vueltas por polo. Calcular:

- Si  $R_{adj}$  en el circuito de campo de este generador se ajusta a  $63\Omega$  y el motor primario del generador gira a  $1600r/min$ . Cuál es el voltaje en los terminales del generador en vacío.
- ¿Cuál sería su voltaje si se conectara una carga de  $360A$  a sus terminales? Suponga que el generador tiene devanados de compensación.
- ¿Cuál sería su voltaje si se conectara una carga de  $360A$  a sus terminales? pero el generador no tiene devanados de compensación. Suponga que la reacción del inducido a esta carga es de  $450A \cdot vuelta$ .

RESULTADOS:

- $382$  Volts.
- $\approx 364$  Volts.
- $346$  Volts.

5) Un motor de c.d. serie de  $1200RPM$ , tiene una constante de diseño de  $40$ . La resistencia de su armadura es de  $0.05\Omega$  y la de su campo serie de  $0.025\Omega$  y se induce en la armadura un voltaje de  $200v$ . Calcular:

- El flujo magnético.
- Si la maquina opera con  $200v$ , mientras consume  $325Amp$ . Calcular el par electromagnético.
- La nueva velocidad del motor.
- Si las perdidas en el núcleo son de  $220w$  y las de fricción y ventilación son de  $40w$ . Calcular la eficiencia de la maquina.

SOLUCION:

a)  $\Phi_{mag} = ?$

$$E_A = K\Phi W$$

$$\text{donde } W = \frac{2\pi N_{RPM}}{60}$$

$$W = \frac{2\pi(1200rpm)}{60} = 125.66 \text{ rad/seg}$$

$$\therefore \phi = \frac{E_A}{KW} = \frac{200v}{(40)\left(125.66\frac{r}{s}\right)} = 0.039 \text{ wb}$$

b)  $\zeta_{elec\ mag} = ?$

$$\zeta_{elec\ mag} = k \phi I_A$$

$$\zeta_{elec\ mag} = (40)(0.039wb)(325Amp) = 507 \text{ New} - m$$

c)  $w = ?$

$$V_T = E + R_A I_A + R_S I_S$$

$$V_T = E + (R_A + R_S) I_A$$

$$\therefore E = V_T - (R_A + R_S) I_A$$

de la ecuacion anterior

$$w = \frac{E_A}{K\phi}$$

sustituimos  $E_A$

$$w = \frac{V_T - (R_A + R_S) I_A}{K\phi}$$

$$w = \frac{200 - (0.05\Omega + 0.025\Omega)325Amp}{(40)(0.039wb)} = 112.58 \text{ rad/seg}$$

$$N_{RPM} = \frac{60 w}{2\pi}$$

$$N_{RPM} = \frac{60 \left( \frac{112.58 rad}{seg} \right)}{2\pi} = 1075 \text{ R.P.M.}$$

d)  $P_{salida} = P_{mec} = ?$

$$P_{mec} = \zeta_{elec} w$$

$$P_{mec} = (507 \text{ N}\cdot\text{m})(112.58 \text{ rad/seg})$$

$$P_{mec} = 57078.06 \text{ watts}$$

e)  $\eta = ?$

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \times 100$$

$$P_{ent} = P_{sal} + \text{perdidas}$$

*perdidas*

$$P_{nucleo} = 200 \text{ w}$$

$$P_{\text{friccion y ventilacion}} = 40 \text{ w}$$

$$P_{armadura} = R_A I_A^2 = (0.05\Omega) (325\text{Amp})^2$$

$$P_{armadura} = 5281.25 \text{ w}$$

$$P_{\text{campo serie}} = R_s I_s^2 = (0.025\Omega) (325\text{Amp})^2$$

$$P_{\text{campo serie}} = 2640.625 \text{ w}$$

$$P_{totales} = 8161.875 \text{ watts}$$

$$P_{ent} = 57078.06 \text{ w} + 8161.875 \text{ w} = 65239.935 \text{ watts}$$

$$\therefore \eta = \frac{57078.06 \text{ w}}{65239.935 \text{ w}} \times 100 = 87.46 \%$$

6) Un motor en derivación con 250V, 50Hp, 1200r/min, con devanados de compensación, cuenta con una resistencia del inducido (incluidas las escobillas, los devanados de compensación y los interpolos) de 0.06Ω. Su circuito de campo tiene una resistencia  $R_{adj} + R_F$  de 50Ω con lo cual produce una velocidad en vacío de 1200r/min. Hay 1200 vueltas por polo en el devanado de campo en derivación. Calcular:

- La velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es 100Amp.
- La velocidad de este motor cuando su corriente de entrada es de 200Amp.
- ¿Cuál es el par inducido de este motor cuando  $I_L = 200\text{Amp}$ ?

*SOLUCION:*

$$\text{a) } n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = ?$$

$$I_A = I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F}$$

$$I_A = 100A - \frac{250V}{50\Omega} = 95 \text{ Amp.}$$

Entonces  $E_A = V_T - I_A R_A$

$$E_A = 250V - (95A)(0.06\Omega) = 244.3 \text{ V}$$

$$\therefore n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{244.3V}{250V} 1200r/min = 1173r/min.$$

b)  $n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = ?$

$$I_A = I_L - I_F = I_L - \frac{V_T}{R_F}$$

$$I_A = 200A - \frac{250V}{50\Omega} = 195 \text{ Amp.}$$

Entonces  $E_A = V_T - I_A R_A$

$$E_A = 250V - (195A)(0.06\Omega) = 238.3 \text{ V}$$

$$\therefore n_2 = \frac{E_{A2}}{E_{A1}} n_1 = \frac{238.3V}{250V} 1200r/min = 1144r/min.$$

c) 3) De la ecuación  $P_{conv} = E_A I_A = \tau_{ind} \omega$

$$\tau_{ind} = \frac{E_A I_A}{\omega} = \frac{(238.3V)(95A)}{\left(\frac{1144r}{min}\right) \left(\frac{1min}{60s}\right) \left(\frac{2\pi rad}{r}\right)} = 388 \text{ N} \cdot \text{m}$$

7) Un motor compuesto, de 100Hp, 250V, con devanados de compensación, tiene una resistencia interna (incluidos los devanados serie) de ~~0.04~~ Hay 1000 vueltas por polo en el campo en derivación y 3 vueltas por polo en el devanado serie. En vacío, la resistencia de campo ha sido ajustada para hacer girar el motor a 1200r/min. Las pérdidas en el núcleo, mecánicas y misceláneas se pueden despreciar. Calcular:

- ¿Cuál es la corriente de campo en derivación de esta máquina, en vacío?
- Si el motor es compuesto acumulativo, encuentre su velocidad cuando  $I_A = 200Amp$ .

c) Si el motor es compuesto diferencial, halle su velocidad cuando

$$I_A = 200 \text{ Amp.}$$

RESULTADOS:

- a) 5 Amp.
- b) 1108 r/min.
- c) 1230 r/min.

8) Un motor en derivación 250V, 50Hp, 1200r/min, tiene una corriente nominal del inducido de 170A y una corriente nominal de campo de 5A. Cuando se bloquea su rotor un voltaje del inducido de 10.2V (excluidas las escobillas) producen 170A de flujo de corriente y un voltaje de campo de 250V produce un flujo de corriente de campo de 5A. Se supone que el voltaje de caída en las escobillas es de 2V. En vacío con un voltaje en los terminales de 240V, la corriente del inducido es igual a 13.2A, la corriente de campo es de 4.8A y la velocidad del motor es 1150r/min. Calcular:

- a) ¿Cuánta es la potencia de salida de este motor en condiciones nominales?
- b) ¿Cuál es la eficiencia del motor?

RESULTADOS:

- a) 36820 watts.
- b) 84.2 %

## **CONCLUSIONES.**

Al realizar este trabajo se reconoce que las máquinas eléctricas son de suma importancia en la actualidad, debido a las diferentes aplicaciones industriales a las que son sometidas, por ello es de gran prioridad para el estudiante contar con un conocimiento detallado de los principios de funcionamiento y comportamiento de este tipo de máquinas eléctricas.

Por lo cual fue de gran necesidad crear información concreta y determinante como una opción que permita al estudiante complementar estos apuntes con lo expuesto en materia de máquinas síncronas y de corriente directa.

En beneficio de una mejor comprensión de cada uno de los temas que conforman al presente trabajo.

Por último se espera contribuir con información que refuerce el conocimiento adquirido en la asignatura de máquinas eléctricas. Sin embargo se debe enfatizar que los temas expuestos en los capítulos anteriores no conllevan por sí solos a resolver un problema práctico.

**BIBLIOGRAFIA.**

**Máquinas eléctricas y transformadores.**

Bhag S. Guru

Huseyin R. Hiziroglu

Tercera edición

OXFORD UNIVERSITY PRESS

**Problemas de máquinas síncronas.**

(CONVERSION DE ENERGIA II)

Pablo Vargas Prudente

Cuarta edición

**Máquinas eléctricas y transformadores**

Irving L. Kosoww Ph. D.

Segunda edición

PEARSON Educación.

**Máquinas eléctricas.**

Stephen J. Chapman

Tercera edición

Mc. Graw Hill