

ESTABILIDAD DE SISTEMAS DE POTENCIA

1. Conceptos básicos y definiciones.

- ***Diferentes fenómenos dinámicos presentes en sistemas de potencia***
- ***El problema de Estabilidad en los sistemas de Potencia***

2. Evolución de los Sistemas de Potencia

3. Regulación del sistema de Potencia

4. Estados de Operación - Fenómenos Transitorios

5. Ordenamiento de los Fenómenos Transitorios

6. Estudios Típicos de Estabilidad en Sistemas de Potencia

- ***Estabilidad de Tensión***
 - ***Características del Sistema de Transmisión***
- ***Estudios de Estabilidad Estática***
- ***Estudios de Estabilidad Transitoria***
 - ***Estabilidad Transitoria de Corto Alcance (primer s)***
 - ***Estabilidad Transitoria de Mediano Alcance (desde el s hasta los 40 s)***
 - ***Estabilidad de largo alcance (hasta 20 minutos después de ocurrida la falla)***

7. Estabilidad de Angulo del Rotor: *Relación entre Potencia y ángulo*

8. Cupla Sincronizante y Cupla de Amortiguamiento

Conceptos básicos y definiciones

- **Diferentes fenómenos dinámicos presentes en sistemas de potencia**

- ☐ **Fenómenos Ondulatorios**
- ☐ **Fenómenos Electromagnéticos**
- ☐ **Fenómenos Electromecánicos**
- ☐ **Fenómenos Termodinámicos**

- **El problema de Estabilidad en los sistemas de Potencia**

Los sistemas de suministro de energía eléctrica deben satisfacer la demanda de los consumidores en todo instante en forma confiable y respetando las restricciones relativas a la constancia de tensión y frecuencia.

- **Requisito** **Mantener la operación de los generadores en paralelo con una capacidad de generación suficiente.**
Mantener la integridad del sistema, es decir, mantener las vinculaciones entre las centrales de generación y los centros de consumo.

- **Perturbaciones** **Fallas**

Con /Sin variaciones importantes en el balance de potencia

Maniobras

Se dice que un sistema es estable, si los procesos oscilatorios que se originan como consecuencia de las perturbaciones, son amortiguados y conducen a un nuevo estado de operación estacionario donde todas las variables de interés permanecen dentro de los límites especificados.

La condición de estabilidad de un sistema está siempre relacionada con:

- **La topología (red mallada o radial) (carga y generación cercanas o alejadas)..**
- **El estado de funcionamiento previo a la perturbación**
- **La perturbación propiamente dicha**

Evolución de los Sistemas de Potencia

Los sistemas eléctricos de potencia varían tanto en tamaño como en su estructura. Sin embargo todos ellos tienen las mismas características básicas comunes y que los hace similares en cuanto a sus comportamientos y forma de ser operados.

La potencia eléctrica se produce en estaciones generadoras denominadas **GS** y se transporta hasta los consumidores a través de una compleja red de componentes individuales que incluyen líneas de transmisión, transformadores y switching devices.

Así, todo sistema eléctrico tiene mas o menos la siguiente estructura:

- ***Están compuestos por un sistema trifásico de corriente alterna que opera a tensión constante.***
- ***La generación y transmisión emplean equipos trifásicos.***
- ***Las cargas industriales son invariablemente trifásicas. Las residenciales monofásicas y las comerciales están distribuidas efectivamente en las tres fases de manera tal de obtener un sistema equilibrado.***
- ***La generación se realiza a través de máquinas sincrónicas.***
- ***Transmiten la potencia generada a grandes distancias, lo cual hace necesario contar con un sistema de transmisión compuesto por varios subsistemas que operan a diferentes niveles de tensión.***

En la **Figura 1.1** se ilustran los elementos básicos de un moderno sistema de potencia.

En general las redes de transmisión suelen ser clasificadas en los siguientes subsistemas:

- 1. Sistema de Transmisión**
- 2. Sistema de Subtransmisión**
- 3. Sistema de Distribución**

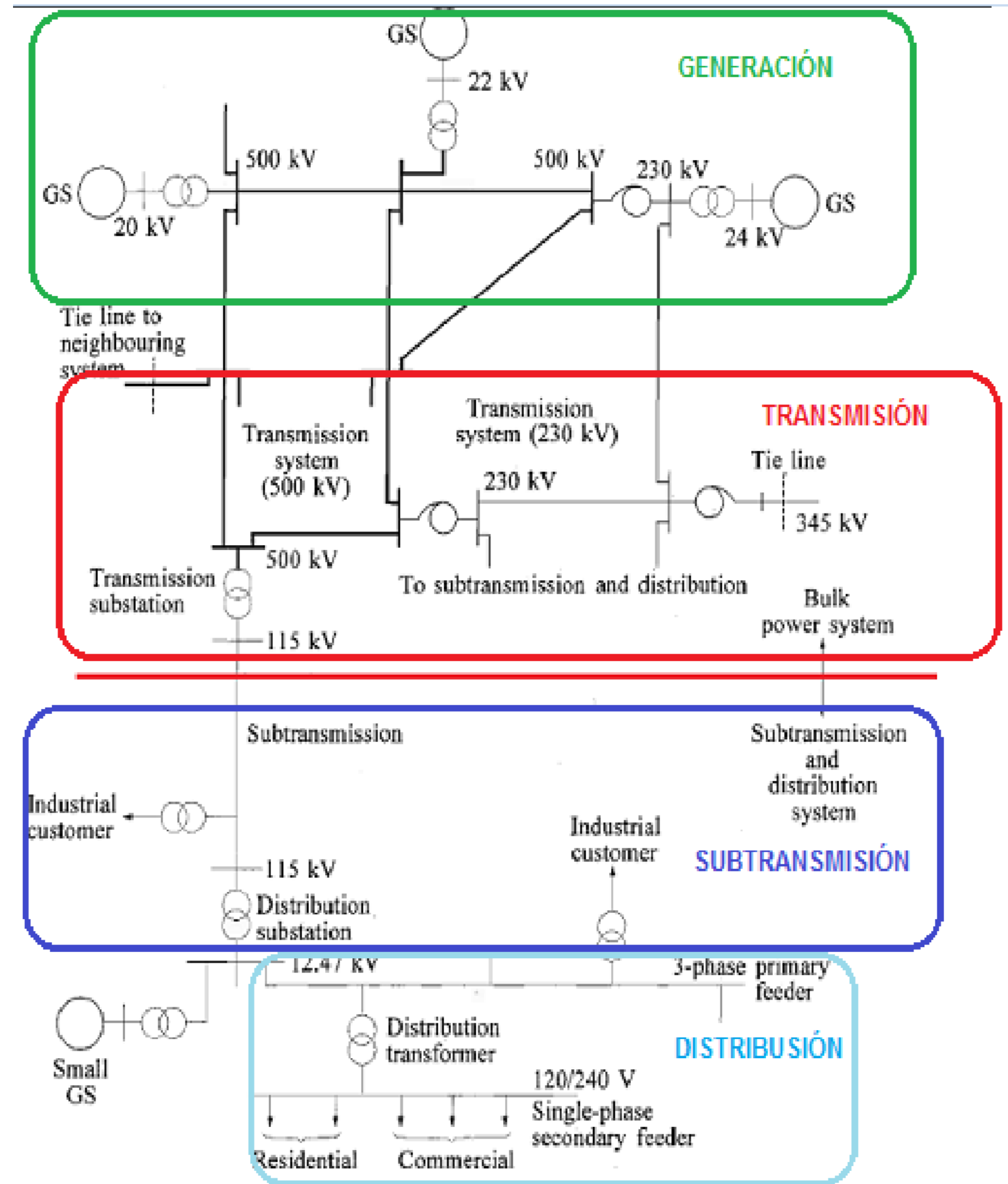


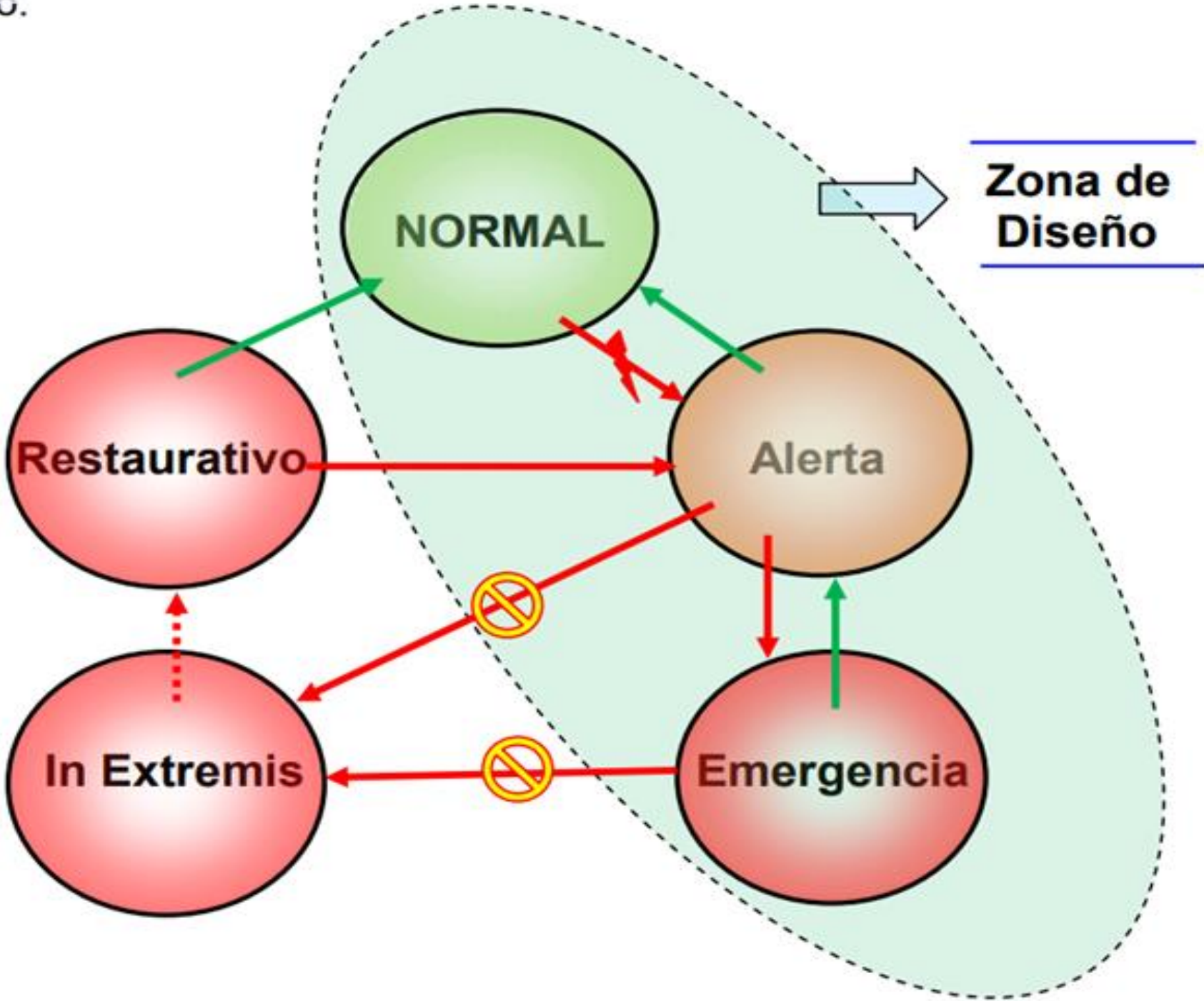
Figura 1: Estructura de los sistemas de Potencia

Regulación del sistema de Potencia

Los requerimientos fundamentales de los sistemas de potencia son *satisfacer la demanda de potencia activa y reactiva en forma:*

- permanente,
- confiable,
- al mínimo costo,
- con el mínimo impacto ambiental y
- cumpliendo con los requisitos de calidad especificados, es decir a
- un nivel de tensión constante y frecuencia nominal.

Figura 2: Estructura de los sistemas de Potencia



Estados de Operación - Fenómenos Transitorios

Es deseable que los sistemas de potencia se encuentren operando en estado Estacionario denominado estado de Operación Normal, pero debido a la ocurrencia de fallas o maniobrar suele ser sacado de ese estado y, en muchas ocasiones es llevado a un estado de operación riesgoso.

Estado	Característica
Normal	Se cumplen todas las condiciones de Red N y Red N-1
Alerta	Se cumplen las condiciones de red N NO se cumplen las condiciones de Red N-1
Emergencia	Existen violaciones de las condiciones de Red N El sistema está en peligro
In Extremis	Hay peligro de colapso Deben aplicarse medidas extremas (formación de Islas)
Restaurativo	Energía no suministrada Sistema desmembrado que debe ser recuperado

Ordenamiento de los Fenómenos Transitorios

Dependiendo del periodo de análisis y de las variables que se analizan, se pueden clasificar en: Electromagnéticos y Electromecánicos, así:

1 Electromagnéticos: son fenómenos muy rápidos y de muy alta frecuencia (MHz).

- **Origen:** descargas atmosféricas
- **Duración:** del orden del ms
- NO involucra a las máquinas sincrónicas, solo a la red de transmisión y por lo tanto no se modifican los enlaces de flujo

2 Electromecánicos: son fenómenos que van desde ms hasta algunos s

- **Origen:** fallas o maniobras que producen un desequilibrio en las potencias
- Involucran cambios importantes en las tensiones y flujos de las máquinas generadoras
- Es necesario representar a la máquina sincrónica a través de ecuaciones diferenciales.

Estudios Típicos de Estabilidad en Sistemas de Potencia

Estabilidad de Tensión

Cuando un sistema de potencia es afectado por una falla severa, es de fundamental importancia observar el comportamiento de la tensión en los nodos del mismo.

La estabilidad de tensión hace referencia a la capacidad que tiene un sistema de potencia de mantener las tensiones de estado estacionario en niveles aceptables en todas las barras del sistema de potencia tanto en condiciones de operación normal como después de ocurrida una perturbación.

Un sistema entra en un estado de inestabilidad de tensión cuando, frente a algún cambio en la condición del sistema, se produce una caída de tensión incontrolable.

No solo la inestabilidad de ángulo es seria, la inestabilidad de tensión, puede conducir rápidamente a un sistema al colapso y es por eso que los términos ***"Estabilidad de Tensión"*** y ***"Colapso de Tensión"*** se emplean indistintamente al referirse a este tipo de estudio.

Si bien los problemas d inestabilidad de ángulo (pérdida de paso de los generadores) trae asociada la caída de las tensiones, ***solo se considera que se produce inestabilidad de tensiones cuando la caída de tensiones se presenta primer es decir, cuando aún no hay inestabilidad de ángulo.***

- ***El factor principal que causa la progresiva e incontrolable caída de tensión en un sistema de potencia, es la incapacidad de este de abastecer la demanda de potencia Reactiva.***
- ***Los problemas de estabilidad de tensión generalmente se presentan en sistemas muy exigidos, es decir sobrecargados o trabajando en el límite.***

Punto de Origen:

La inestabilidad de tensión es esencialmente un fenómeno local, y puede ser causado, básicamente, por la incapacidad del sistema de potencia de satisfacer el balance de potencia reactiva generada y demandada o, por la imposibilidad del sistema de transmisión para llevar la potencia desde los puntos de generación a los puntos de consumo.

Sin embargo, pese a que el fenómeno se origina en forma "local", sus consecuencias tienen un impacto global en el sistema de potencia, conduciendo rápidamente a un "colapso de tensiones" como resultado de una secuencia de eventos encadenados que llevan a un perfil de bajas tensiones en una porción significativa del sistema de potencia.

Existen un gran número de factores en los sistemas de potencia reales que contribuyen al colapso de tensión, algunos de ellos son:

- **Balance de potencia reactiva (demanda excesiva, caída reactiva excesiva en líneas de transporte, generación insuficiente)**
- La incapacidad de transferencia de potencia del sistema de transmisión.
- Los límites de capacidad de potencia reactiva de los generadores.
- Las características de potencia reactiva de dispositivos de compensación.
- Acciones no coordinadas del sistema de protección y control.
- Fuentes de tensión alejadas de los centros de consumo.

- Características de las cargas: Variación de la carga con la tensión. Observar que la ley de variación de la carga con la tensión puede cambiar con el tiempo (ejemplo: motores de inducción que se frenan por baja tensión)
- Acción de cambiadores de tomas bajo carga de los transformadores (si restituyen la tensión del lado de la carga, pueden contribuir a aumentar la carga, de acuerdo con la ley de variación potencia-tensión) y otros controles lentos (termostatos, relés de calentamiento, etc.) en períodos de baja tensión.(es un caso particular de “variación de carga con la tensión”)
- Desempeño deficiente de los equipos de compensación de reactiva (condensadores, compensadores síncronos, etc.) cuando la tensión baja en el sistema.

En el listado anterior se puede apreciar que algunas causas de Inestabilidad de Tensión están relacionadas con las características del sistema de transmisión, otras con las características de las cargas y finalmente hay un grupo que depende de la calidad de las protecciones y controles incluidos en el sistema.

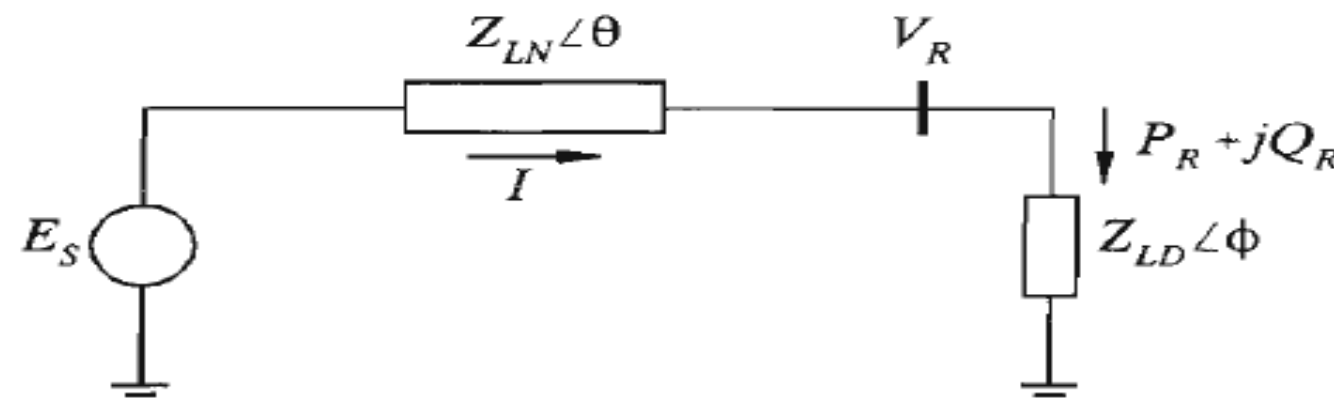
Se analizará en problema de estabilidad de tensión **considerando las características del sistema de transmisión.**

Características del Sistema de Transmisión

Las características de interés para entender el fenómeno de Estabilidad de Tensión son las relaciones entre la Potencia Transmitida "**P_R**", la tensión del nodo de carga "**V_R**" y la inyección de potencia reactiva "**Q_i**".

Se analizará el fenómeno, empleando el flujo de potencia de un sistema de transmisión radial muy simple, y sus curvas característica.

Sea el sistema Radial simple:



Donde:

La corriente "**I**", la tensión en el nodo de carga "**V_R**" y la potencia "**P_R**" resultan de las siguientes ecuaciones.

$$I = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{E_S}{Z_{LN}}$$

$$V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S$$

$$P_R = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi$$

$$F = 1 + \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right)^2 + 2 \left(\frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} \right) \cos(\theta - \phi)$$

$$V_R = Z_{LD} I \quad V_R = \frac{1}{\sqrt{F}} \frac{Z_{LD}}{Z_{LN}} E_S$$

- La tensión en el extremo receptor es

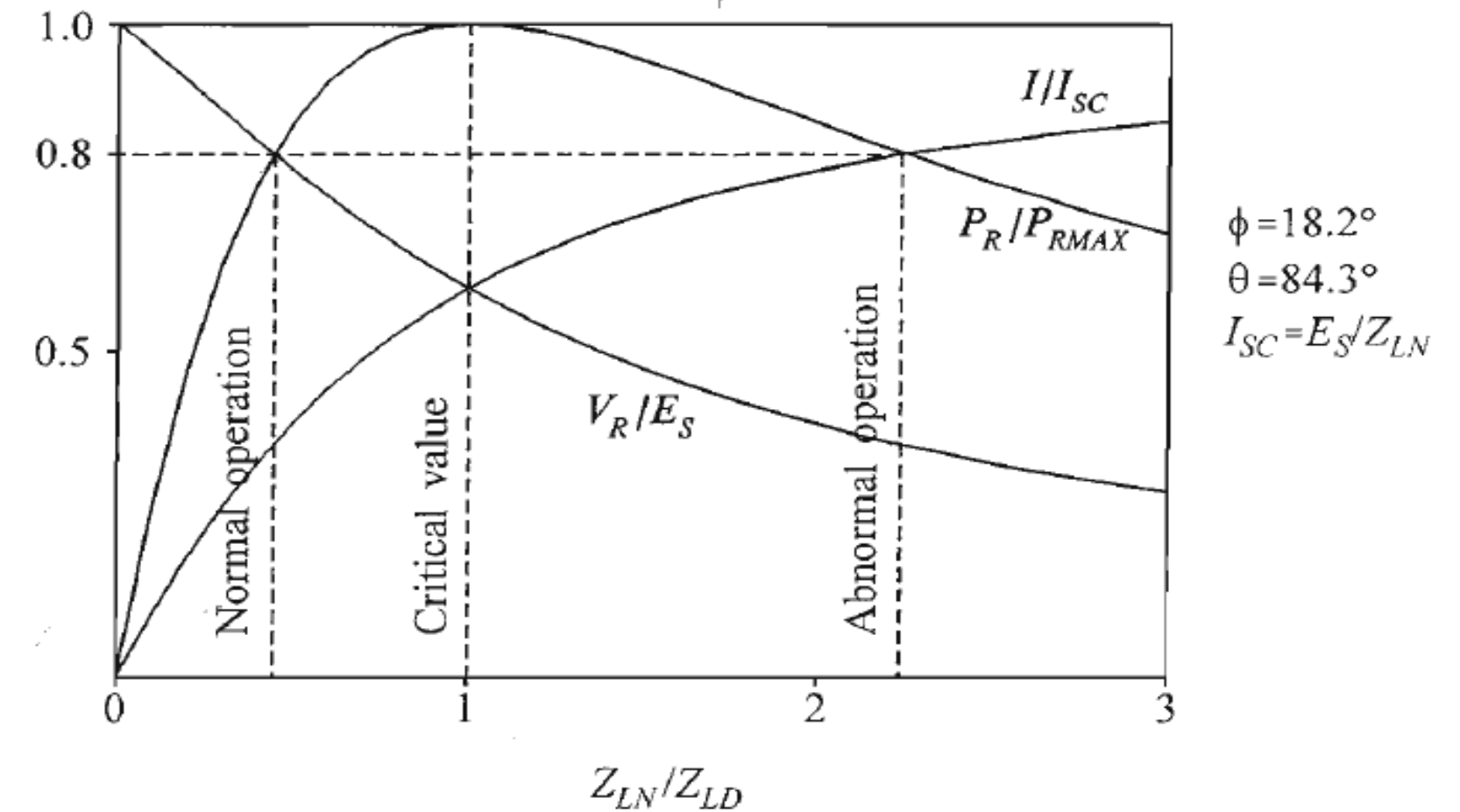
- La potencia suministrada a la carga es:

$$P_R = V_R I \cos \phi = \frac{Z_{LD}}{F} \left(\frac{E_S}{Z_{LN}} \right)^2 \cos \phi$$

A continuación, en la Figura 3, se han graficado dichas variables en función de la demanda, considerando variaciones en la relación (Z_{LN}/Z_{LD}), con la $\tan \theta=10$ y $\cos \phi=0.95$

Para que los resultados sean aplicables a cualquier Z_{LN} los valores de I , V y P_R deben estar normalizados, es decir divididos en sus valores nominales

Figura 3: Comportamiento con carga variable a factor de potencia constante



(b) Receiving end voltage, current and power as a function of load demand

- Mientras la demanda crece, Z_{LD} (**Z de carga**) disminuye, P_R aumenta primero en forma rápida y luego algo más lento hasta alcanzar el máximo valor para finalmente decrecer.
- Este es el máximo valor de potencia activa que se puede transmitir desde una fuente de tensión constante a través de una impedancia.
- La potencia transmitida es máxima cuando la caída de tensión en la línea es igual en magnitud a V_R , es decir cuando $Z_{LN}/Z_{LD} = 1$.

Este estado de potencia máxima es el **límite de operación satisfactoria** y las magnitudes de la corriente " I " y de " V_R " correspondientes a este punto, son denominados **valores críticos**.

- Para cualquier valor de $P_R < P_{RMAX}$, se pueden encontrar dos puntos de operación correspondientes a dos valores de Z_{LD} .

En la figura anterior, se observa que para $P_R = 0.8$ hay dos valores de Z_{LN}/Z_{LD} , uno en el área de operación normal y el otro en el área de operación anormal, donde I es mucho más grande que V_R .

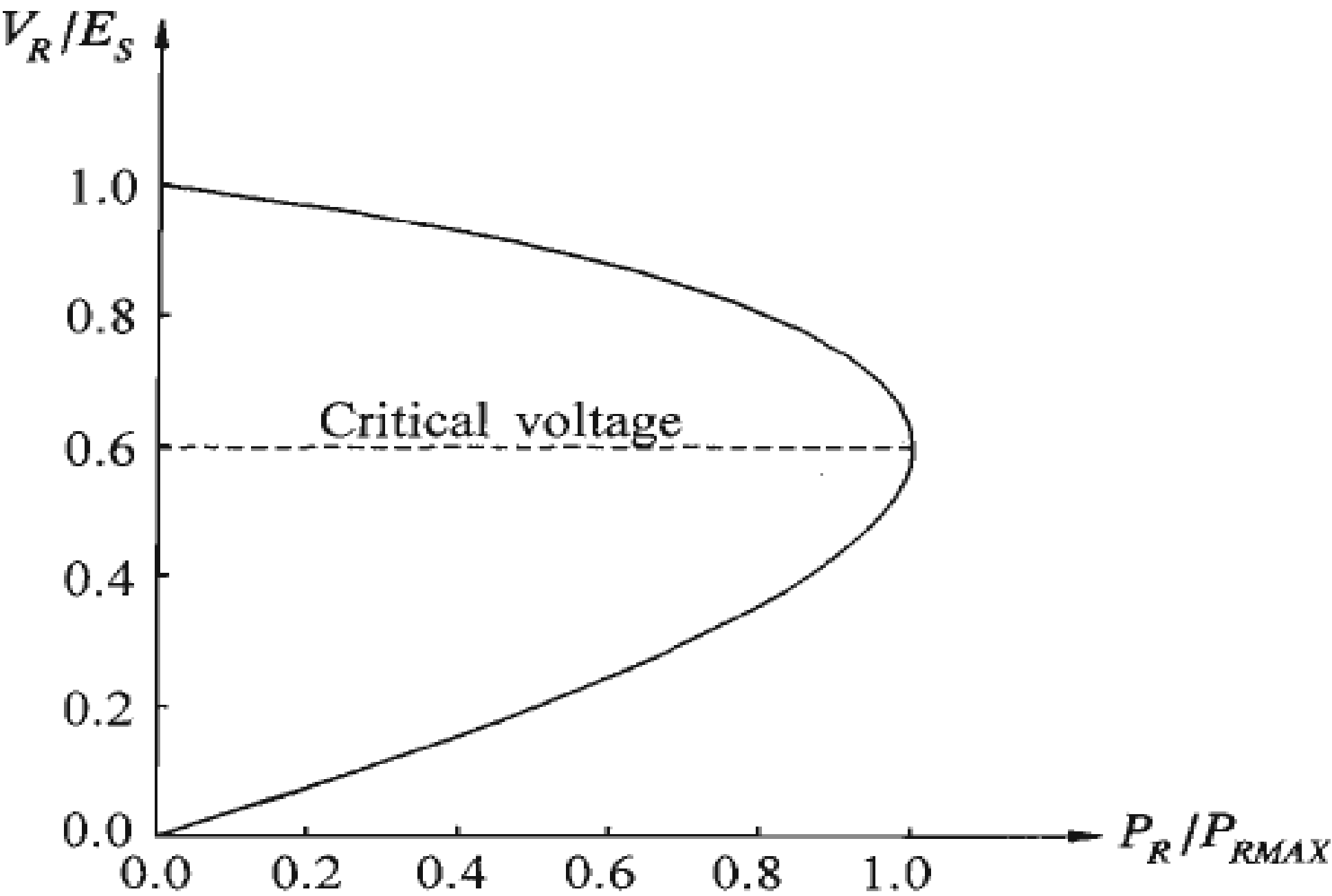
- Para una demanda mayor que P_{RMAX} , el control de potencia por variación de la carga resultaría inestable. Por ejemplo, un aumento en la admitancia de carga, produciría una disminución de la potencia. En esta región, la tensión puede o no decrecer progresivamente dependiendo de la característica de carga.

Desde el punto de vista de la estabilidad de tensiones es muy interesantes las relación entre P_R y V_R .

En la **Figura 4** se presenta la característica P_R-V_R considerando un factor de carga constante e igual a 0.95.

En las ecuaciones (1) y (2) se muestra la dependencia importante que tiene en factor de potencia, tanto en la tensión como en la potencia.

Figura 4: Característica V_R-P_R para un $\cos \phi = \text{constante}$



La **Figura 5** considera distintos estados de carga, esto es distintos **$\cos \phi$** , así:

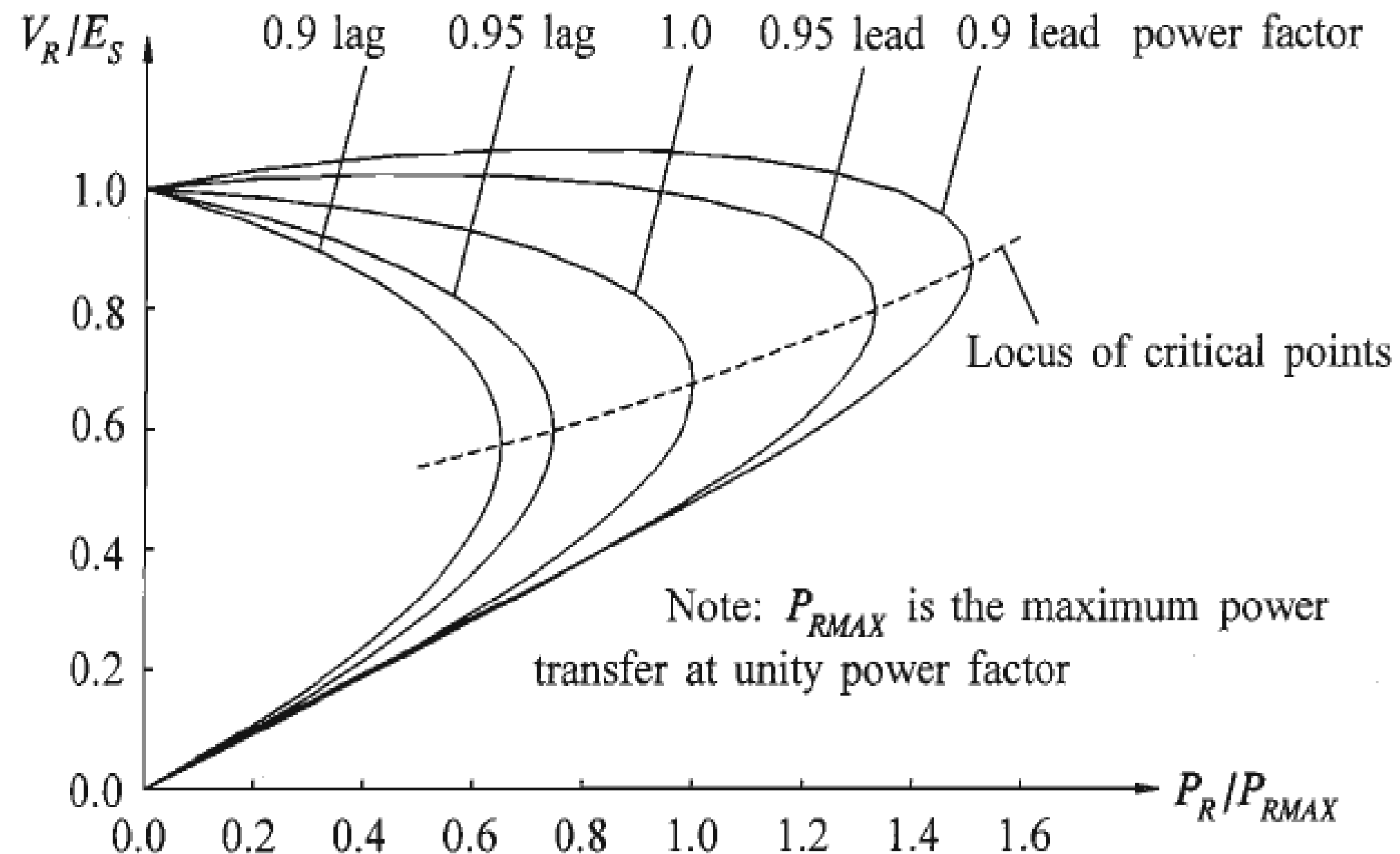


Figura 5: Característica V_R - P_R para distintos valores de $\cos \phi = \text{constante}$

Uniando los puntos de **$P_R = \text{máx}$** se obtiene un espacio denominado de **"operación crítica"**. Normalmente, el espacio que se encuentra por encima de esta línea contiene los puntos de operación satisfactoria.

Una repentina reducción en el factor de potencia (**incremento en la potencia reactiva**) puede hacer que el sistema pase de un estado de operación satisfactorio a uno insatisfactorio o hasta inestable.

La **Figura 1.6** presenta las características Q_R-V_R para distintas relaciones P_R/P_{RMAX}

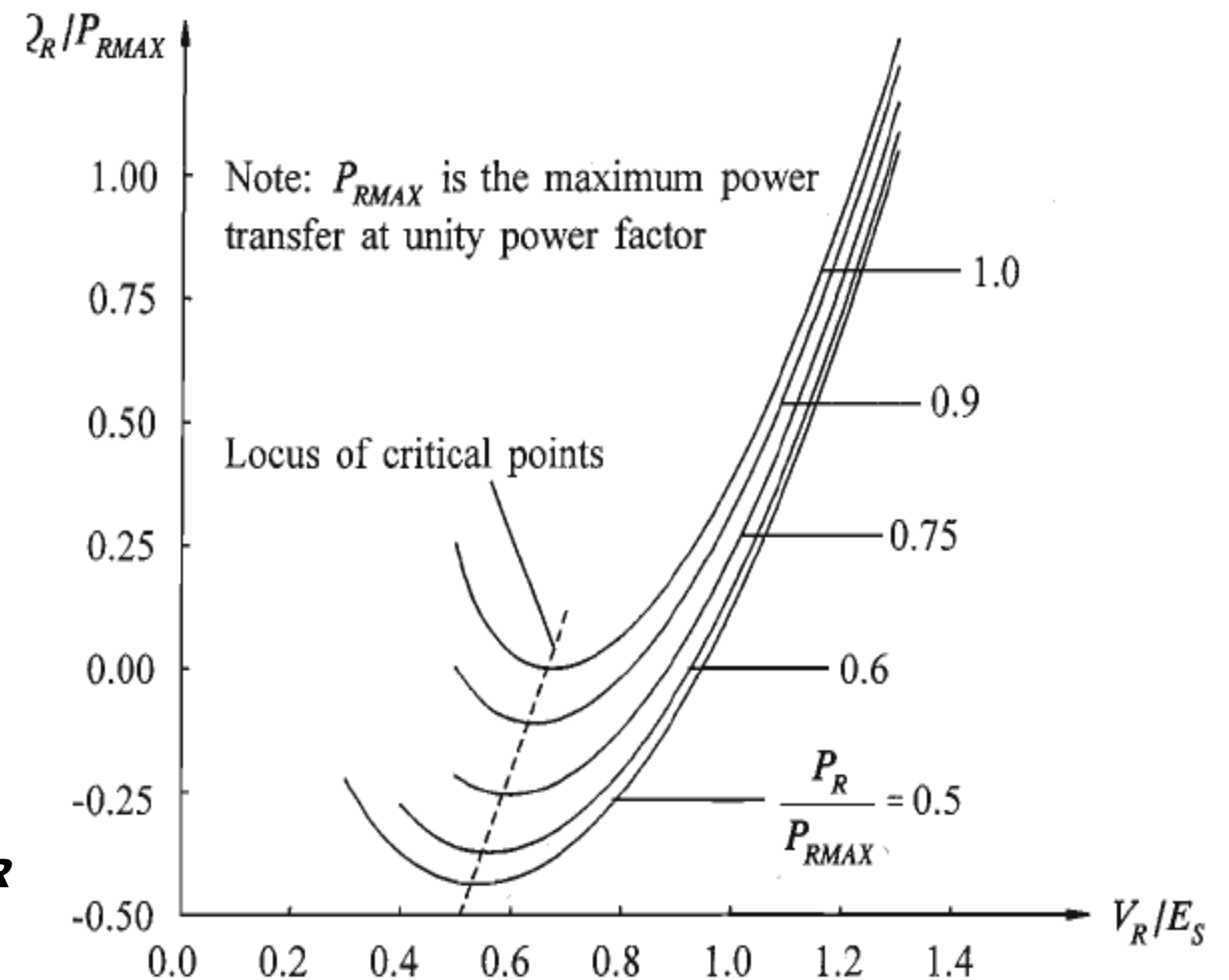
En estas curvas se han unido los puntos con Q_R/P_{RMAX} mínimos.

De esta manera quedan definidas dos regiones, una en la cual la derivada dQ_R/dV_R es positiva y la otra negativa.

- **Los puntos comprendidos del lado de las derivadas positivas son puntos de funcionamiento aceptable.**
- **Cuando el generador se encuentra operando sobre un punto del lado izquierdo, es decir un punto de derivada negativa, cualquier perturbación (manteniendo la P_R puede conducirlo hacia la inestabilidad, salvo que el sistema cuente con suficiente compensación.**

Figura 1.6: Característica V_R-Q_R

Importante recordar!!! para distintos valores de P_R/P_{RMAX}



1. **La inestabilidad de tensiones es un problema que se origina en forma local y es bastante frecuente.**
2. **El colapso de Tensiones es un fenómeno mucho menos frecuente pero muy complejo y de gran impacto en el sistema.**

Generalmente el colapso se produce por una serie de eventos encadenados que se van sucediendo y van acompañados por un problema de inestabilidad de tensiones que conduce al sistema a un perfil bajo de tensiones en una parte "extensa" del mismo.

Una secuencia típica de sucesos que pueden desembocar en un colapso de tensión es la siguiente:

- 1. El sistema se encuentra con varias unidades generadoras cercanas a los puntos de consumo fuera de funcionamiento. Como consecuencia, algunas líneas de transporte están muy cargadas y quedan pocas reservas de potencia reactiva.*
- 2. El desencadenante del colapso de tensión es la pérdida de una línea cargada, lo que provoca una carga adicional en las líneas adyacentes y un mayor consumo de reactiva.*
- 3. Inmediatamente desciende la tensión en los centros de consumo, y en consecuencia desciende también la carga. Esto tiene un efecto beneficioso sobre la estabilidad de tensión. Por otro lado, el control automático de tensión en los generadores incrementa la excitación y el aporte de potencia reactiva, para recuperar la tensión en sus terminales. Esto genera un flujo adicional de reactiva por los transformadores y líneas de los generadores, con la correspondiente caída de tensión. En este punto es probable que los generadores se encuentren cerca de su límite de funcionamiento térmico, tanto por la corriente en el devanado de campo como por la del inducido.*
- 4. Las líneas de distribución responden a la bajada de tensión cambiando las tomas de los transformadores reguladores, de forma que en 2-4 minutos se recupera la tensión y la carga. Esto provoca más flujo por las líneas, mayor caída de tensión en la red de transporte y más demanda de reactiva a los generadores. En un margen de tiempo más amplio, las cargas resistivas asociadas a termostatos comienzan a recuperarse al detectar un descenso de temperatura.*

- 5. Uno a uno, los generadores van alcanzando su límite de aporte de reactiva, establecido por la máxima corriente admisible en el devanado de campo. Cuando este límite se alcanza en un generador, la tensión en sus terminales desciende. Esto provoca un incremento de la corriente en el devanado inducido, y un límite adicional de la potencia reactiva para que no se caliente el devanado inducido. La parte de reactiva que deja de producir se trasfiere a otros generadores, agravando su situación. Además, conforme desciende la tensión, las baterías de condensadores en paralelo repartidas por el sistema son menos eficientes.*
- 6. El proceso puede provocar una caída amplia y generalizada de tensión. En esta situación puede perderse el sincronismo entre generadores, y llegar a un apagón más o menos extenso.*

Estudios de Estabilidad Estática

"Un sistema de suministro de energía eléctrica es estable desde el punto de vista de la Estabilidad Estática si, frente a un cambio lento y paulatino en la Potencia Mecánica de impulso o en la Demanda permanece inmutable o, adopta sin oscilar un nuevo estado de funcionamiento."

La Estabilidad Estática o Estabilidad de Pequeña señal, se define como la habilidad de un sistema de potencia de mantenerse en sincronismo cuando es sometido a una pequeña perturbación. En este contexto, se define una pequeña perturbación como aquella cuya respuesta puede ser linealizada para su análisis.

Para llevar a cabo estudios de este tipo, basta con realizar la modelación linealizada de la máquina sincrónica es decir, la máquina representada por una fem constante detrás de una reactancia sincrónica.

Estudios de Estabilidad Transitoria

Cuando se realiza un estudio de este tipo, es imposible dar una respuesta a priori de si el sistema es Estable o no lo es, ya que la evolución del mismo depende tanto del estado de funcionamiento prefalla como de la perturbación en si y de la velocidad con que se realice el despeje de la misma y la presencia o no de maniobras estabilizantes.

Si la perturbación que afecta al sistema involucra cambios topológicos o afecta el balance de potencia, el sistema adopta un estado en que las tensiones, frecuencia, potencias y velocidad de las máquinas muestran un comportamiento oscilatorio en función del tiempo.

La evolución temporal de esas variables de interés es la que permite concluir si el sistema es estable o no lo es desde el punto de vista de la estabilidad transitoria.

No se debe olvidar que siempre es posible encontrar una falla lo suficientemente severa, aunque improbable, capaz de provocar la pérdida de estabilidad transitoria y bajo esa premisa, todos los sistemas serían inestables.

El estudios de estabilidad Transitoria involucran, en general, la solución de grandes sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales de cuya resolución se obtiene la evolución temporal de las variables que caracterizan el estado de funcionamiento transitorio.

Entre las variables que se analizan y que mayor información da, está el “ángulo de carga”, “ángulo de par” o “ángulo δ ”.

Si la diferencia de ángulo entre los rotores de cualquier máquina y un sistema de referencia se incrementa indefinidamente o la oscilación no se amortigua en el tiempo, se dice que el sistema es incapaz de alcanzar un nuevo estado de funcionamiento aceptable y por lo tanto es inestable.

Según el periodo de tiempo que se analice, se encontraran presentes distintos fenómenos. Debido a esto, existe una clasificación de la estabilidad transitoria en:

- **Estabilidad de Corto Alcance**
- **Estabilidad de Mediano Alcance**
- **Estabilidad de Largo Alcance**

1. Estabilidad Transitoria de Corto Alcance (*primer s*)

Durante el corto alcance (primer s), existe un intercambio de Potencia entre las máquinas, pero la Potencia en el sistema es constante.

En este periodo que abarca desde el momento de falla hasta el s, se producen cambios de las tensiones, en el ángulo de carga de las máquinas sincrónicas y puede ocurrir también, dependiendo de la perturbación, que se produzcan cambios en las impedancias vistas desde los terminales de las máquinas en dirección a los puntos de demanda.

2. Estabilidad Transitoria de Mediano Alcance (*desde el s hasta los 40 s*)

Este estudio se realiza entre el s y los **40 s**, periodo en el cual interviene la regulación de Potencia Mecánica.

Esta regulación de potencia mecánica es necesaria cuando ante la ocurrencia de una falla el sistema demanda más potencia para compensar el desbalance que se origina. En ese momento las máquinas entregan la energía almacenada en las masas rotantes y comienzan a disminuir su velocidad ocasionando la caída de la frecuencia en el sistema y se envía la orden para restaurar la frecuencia a través de los reguladores de “frecuencia-potencia”.

3. Estabilidad de largo alcance (hasta 20 min después de ocurrida la falla)

Durante los ***20-30 minutos*** posteriores a la ocurrencia de una perturbación, y estando el sistema en estado (***N-1***) se observa el comportamiento del sistema.

Este nuevo estado de operación es denominado "***estado posfalla sin restitución***" y es diferente al estado inicial, lo que nos obliga a modificar el estado de funcionamiento inicial de manera de alcanzar un nuevo estado no oscilatorio y estable en el cual todas las variables de interés permanezcan dentro de los rangos de operación especificado por los organismos de control para cada sistema (***En nuestro sistema el órgano de control es CAMMESA***)

Aspectos Importante a destacar!!!!

Los sistemas deben contar con los recursos necesarios para mantener su estado de operación estable con tensiones y frecuencia dentro de los valores establecidos por el organismo de control aunque se presenten fallas que impliquen desbalances en las potencias presentes en el estado de operación normal.

Las fallas exigidas en los estudios de Diseño o Diagnóstico de Estabilidad Transitoria son tales que permitan verificar el cumplimiento de los criterios de desempeño dinámico y son simuladas con el sistema en dos estados de operación, estos son:

Estado N: ***todos sus componentes en operación***

Estado N-1: ***con algún componente fuera de servicio, puede ser una línea, un generador, un transformador, un conjunto de cargas, etc.***

Estabilidad de Angulo del Rotor: *Relación entre Potencia y ángulo*

El mecanismo mediante el cual un conjunto de máquinas síncronas interconectadas se mantiene en sincronismo es a través de la aparición de fuerzas restaurativas que actúan en sentido contrario a cualquier cambio que se presente.

Bajo condiciones de operación normal, existe un equilibrio *entre la cupla mecánica de entrada y la Potencia eléctrica de salida en cada máquina* permaneciendo la velocidad constante y en el caso de las máquinas síncronas igual a la velocidad síncrona.

Así, podemos decir que:

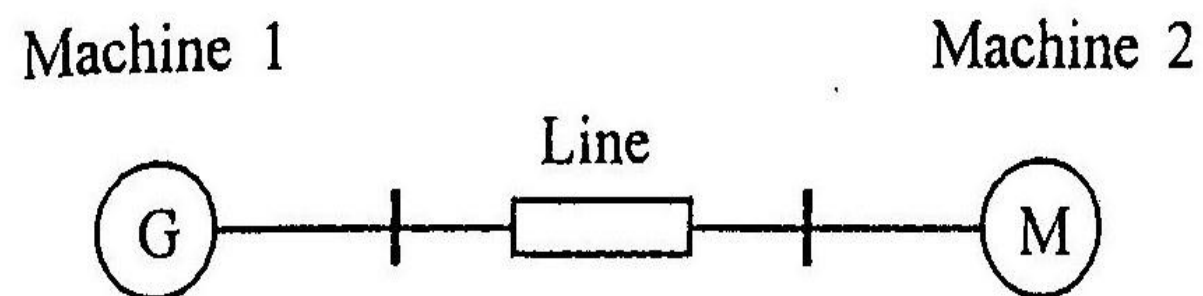
"La estabilidad es una condición de equilibrio entre diferentes fuerzas opuestas".



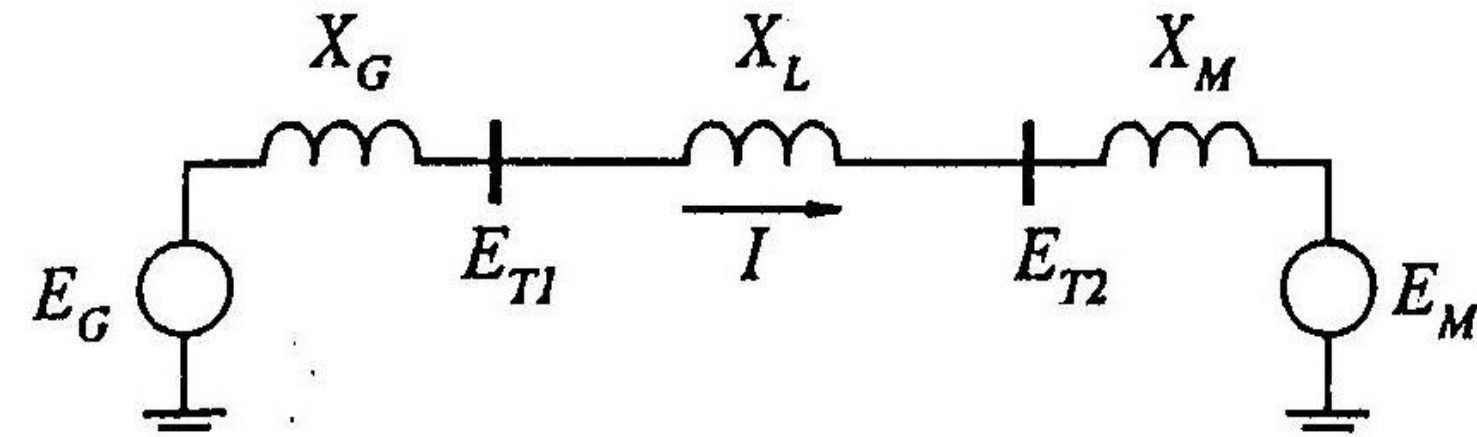
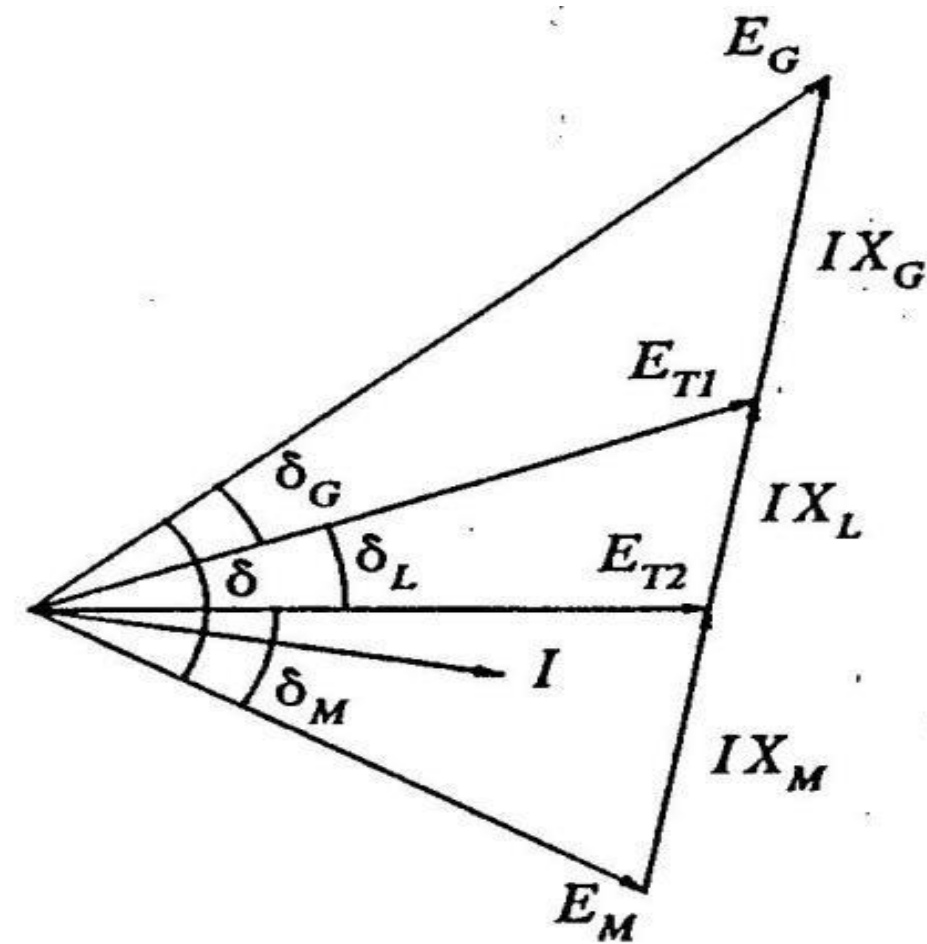
Para comprender los fenómenos que se presentan en la temática y la relación entre las distintas variables intervinientes, es conveniente relacionar dichas variables tomándolas de a pares y observar el comportamiento relativo entre ellas.

Para ello consideremos un sistema muy sencillo y analicemos la relación que existe entre el ángulo de carga (δ), la Potencia Eléctrica y la Potencia Mecánica.

a- Diagrama de una línea simple



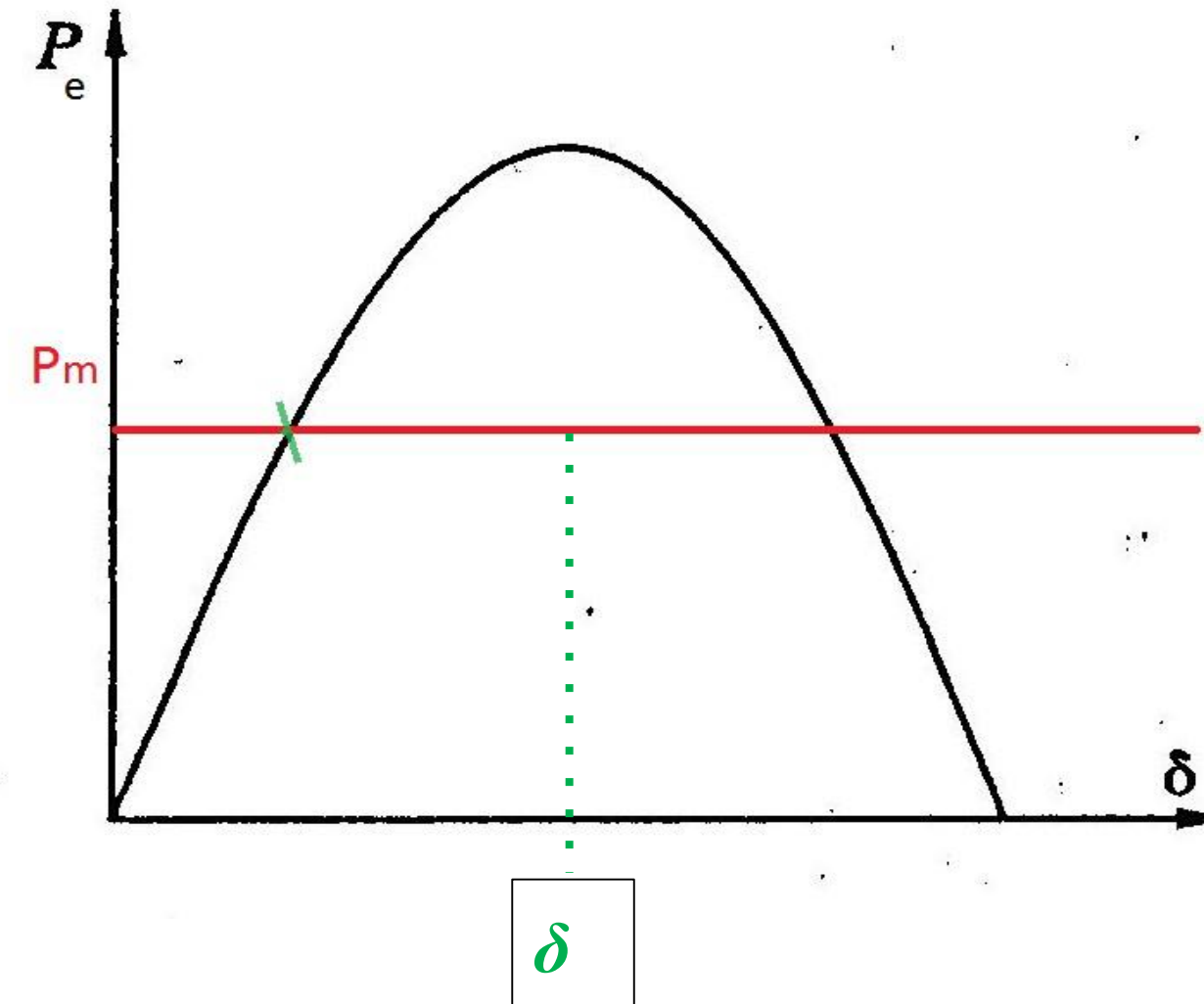
b- Modelo idealizado



c- Diagrama Fasorial

$$\delta = \delta_G + \delta_L + \delta_M$$

d- Característica Potencia Ángulo de un sistema de dos máquinas (motor- generador)



$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M$$

Donde:

X_T : Reactancia de transferencia o de acoplamiento entre el generador y la barra de potencia infinita.

En resumen:

- **La estabilidad es una condición de equilibrio entre diferentes fuerzas opuestas.**
- **El mecanismo mediante el cual, un conjunto de máquinas sincrónicas interconectadas se mantienen en sincronismo, es a través de fuerzas restaurativas que actúan en sentido contrario cuando aparecen fuerzas acelerantes o de frenado.**
- **Bajo condiciones de operación normal, existe un equilibrio entre la cupla mecánica de entrada y la Potencia eléctrica de salida en cada máquina permaneciendo la velocidad constante.**

Cupla Sincronizante y Cupla de Amortiguamiento

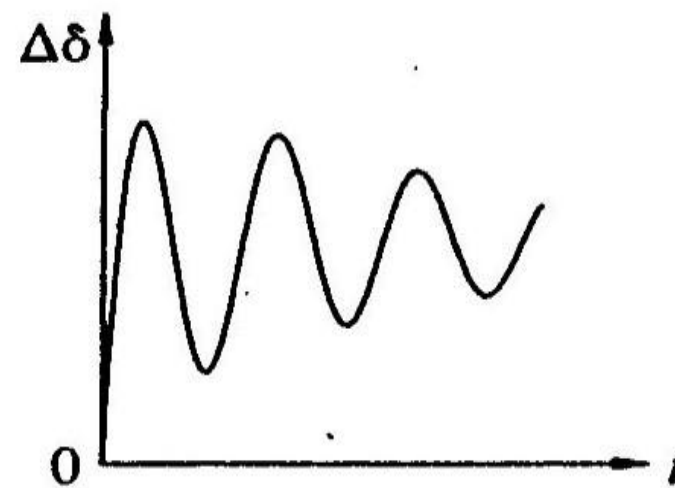
Perturbación = Desbalance entre las cuplas eléctrica y magnética

Cupla sincronizante

$$\Delta T_e = T_S \Delta \delta + T_D \Delta \omega$$

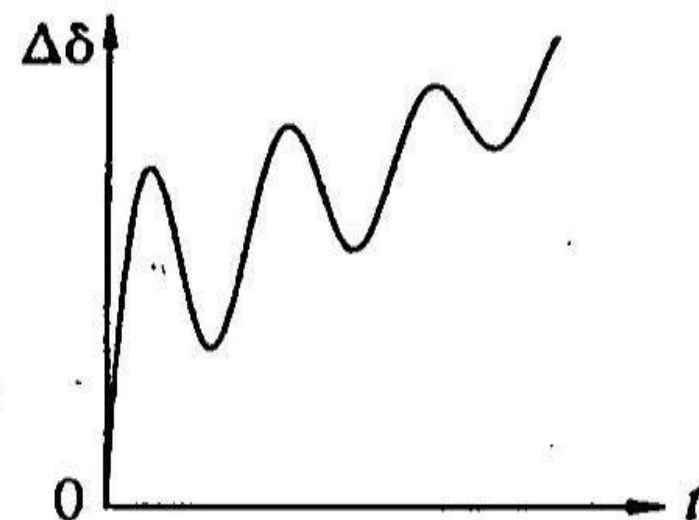
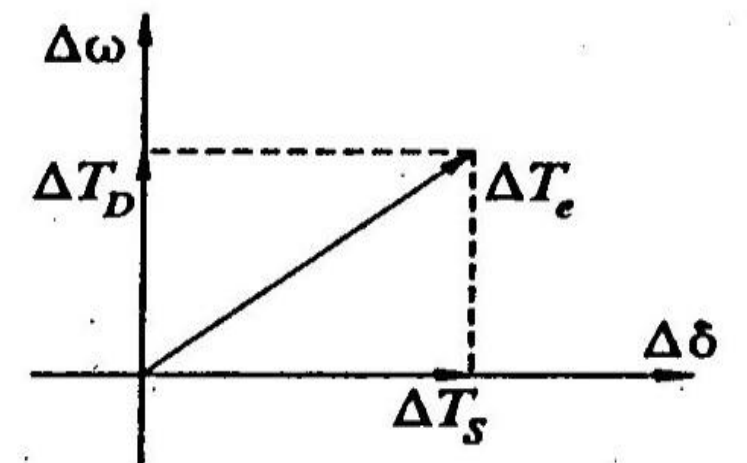
Cupla de amortiguamiento

Respuesta frente a pequeñas Señales



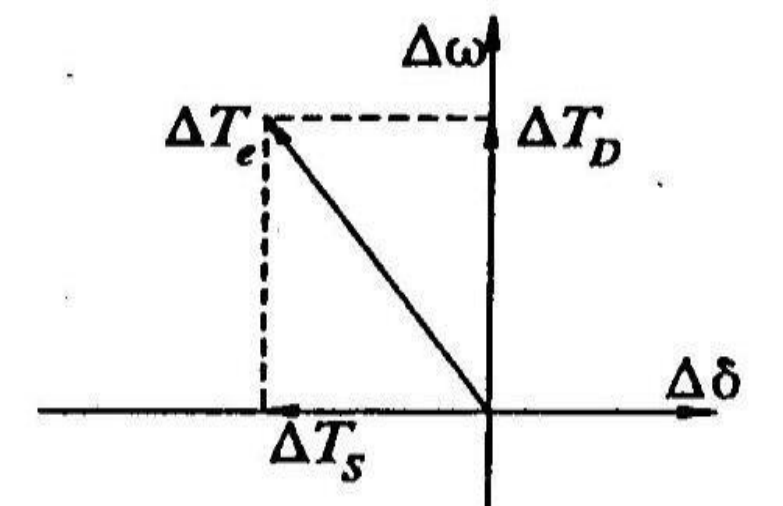
Stable

- Positive T_S
- Positive T_D

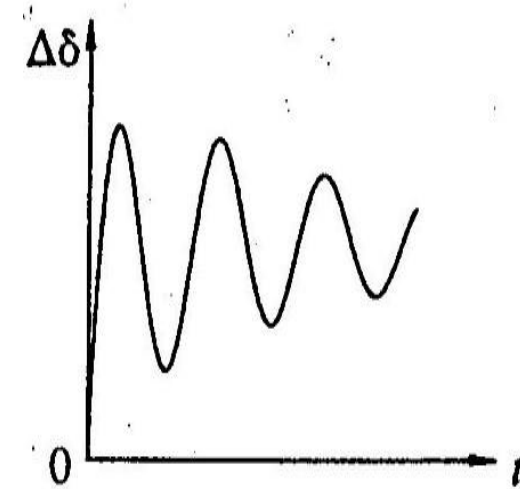


Non-oscillatory
Instability

- Negative T_S
- Positive T_D

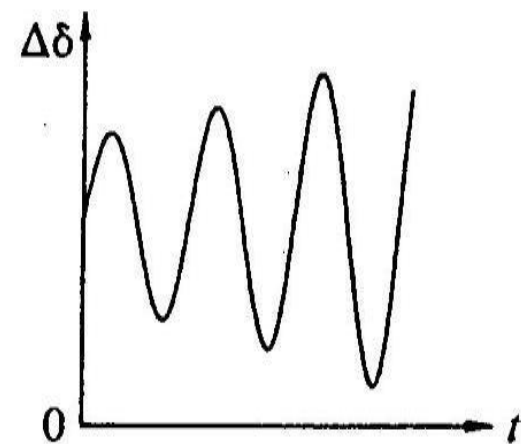
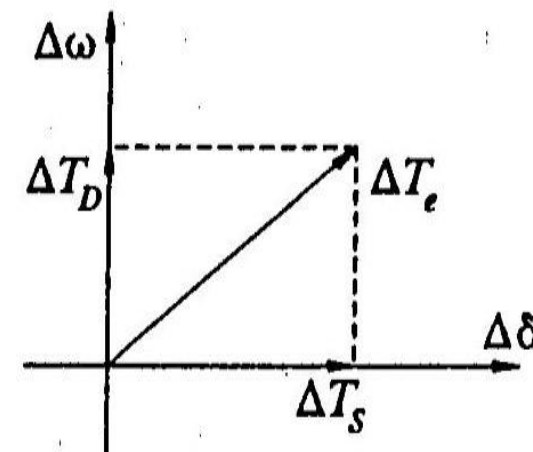


Respuesta frente a Grandes Señales



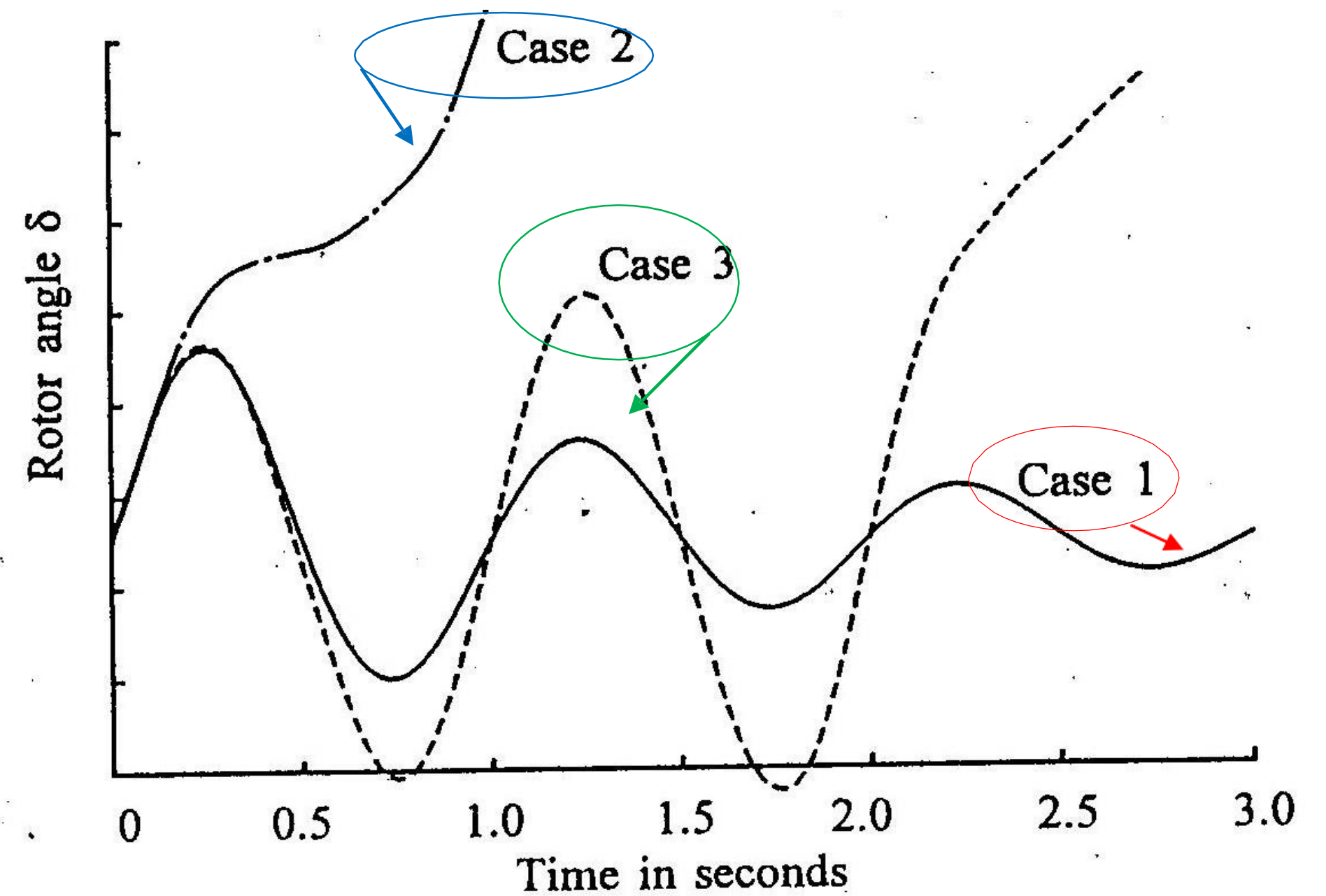
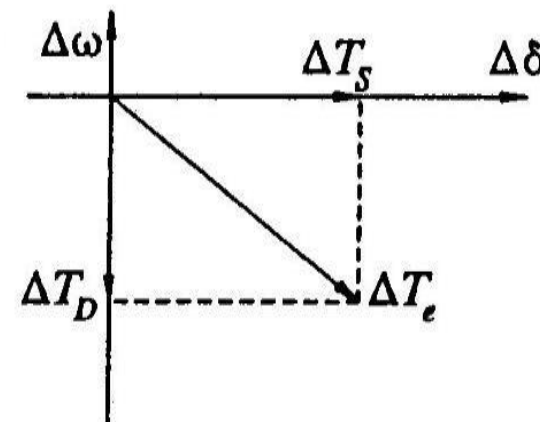
Stable

- Positive T_s
- Positive T_D



Oscillatory Instability

- Positive T_s
- Negative T_D



Caso 1: Estable

Caso 2: Inestabilidad de primera oscilación

Caso 3: Inestabilidad de segunda oscilación

GENERADOR SINCRÓNICO

1. Fundamento de Máquinas Eléctricas
2. Transformación Mutua de la Energía Mecánica y Eléctrica.
 1. *Principio Motor Generador*
 2. *Fuerza de Lorentz:*
 3. *Principio Generador Motor*
3. Descripción y Comportamiento Operativo de la Máquina Sincrónica.
 1. *Arrollamientos Amortiguadores*
 2. *Número de pares de Polos. Efecto en la forma de onda de Fmm*
 3. *Velocidad Sincrónica*
4. Forma de la Onda de la Fmm
5. Campo magnético Rotante.
6. Ecuación Diferencial de Movimiento de la Máquina Sincrónica. Constante de Inercia y Tiempo de Arranque Mecánico.
7. Teorema de la constancia de los enlaces de flujo magnético.
8. Descripción Matemática de la Máquina Sincrónica
 1. *Circuito con una sola excitación*
 2. *Circuitos Acoplados*
 3. *Enlaces de flujo en términos de inductancias propias y mutuas*

9. Ecuaciones Básicas de una Máquina Síncrona

- 1. Variación de la Permeancia***
- 2. Ecuación de las tensiones en las tres fases del Estator***
- 3. Enlaces de flujo de la fase "a"***
- 4. Autoinductancias del Estator***
- 5. Inductancias Mutuas del Estator***
- 6. Inductancias Mutuas entre Arrollamientos de Estator y Rotor***
- 7. Ecuación de los circuitos del rotor***
- 8. Enlaces de flujo de los circuitos del rotor***

10. La Transformación dq0

- 1. Enlaces de flujo del estator en componentes d q 0***
- 2. Enlaces de flujo del Rotor en componentes d q 0***
- 3. Ecuaciones de Tensión del Estator en componentes dq0***
- 4. Ecuaciones de la Potencia Eléctrica en componentes dq0***
- 5. Ecuaciones de la Cupla o Momento de Giro en componentes dq0***
- 6. Interpretación física de la transformación dq0***

11. Reactancias de eje directo y de eje en cuadratura del generador síncrono:

- 1. Reactancia Síncrona de Eje Directo " x_d ":***
- 2. Reactancia Síncrona de Eje en Cuadratura " x_q ":***
- 3. Reactancia Transitoria de Eje Directo " x'_d ":***

1. Reactancia Subtransitoria de Eje Directo " x_d ":

2. Reactancia Transitoria y Subtransitoria en Cuadratura " x'_q , x''_q ":

12. Reactancia de secuencia cero (x_0)

1. Reactancia de secuencia cero x_0

13. Circuito Equivalente de la Máquina Sincrónica en Estado Estacionario

1. Circuito Equivalente para el Estado Estacionario

2. Cálculo de Valores de Estado Estacionario. Procedimiento

14. Cupla Electromecánica en la Máquina sincrónica. Característica Cupla - Ángulo.

15. Funcionamiento del generador sincrónico. Formas de Conexión y Operación

1. Diagrama de Corrientes de la Máquina Sincrónica

1. Fundamento de Máquinas Eléctricas

Si, como se muestra en la **Figura 1**, se cierra un alambre que se encuentra colocado en un campo uniforme y se hace circular una corriente, aparecerá sobre él, una fuerza.

Esta fuerza es básica para la operación de motores eléctricos y se denomina “**fuerza motora o fuerza motriz**”

Si bien el campo no es uniforme en los bornes, por efecto de la distorsión, si la sección transversal del polo es grande en comparación con el espaciamiento del entrehierro, los efectos de esta deformación son despreciables.

Tal como se ve en la figura b, la corriente hacia adentro del alambre produce un campo magnético en sentido horario, reforzando de esta manera el campo del imán sobre el alambre y debilitándolo debajo como se aprecia en la **Figura 1c**.

Suponiendo que las líneas de campo son como bandas elásticas que se estiran puede concluirse que la fuerza sobre el alambre es hacia abajo.

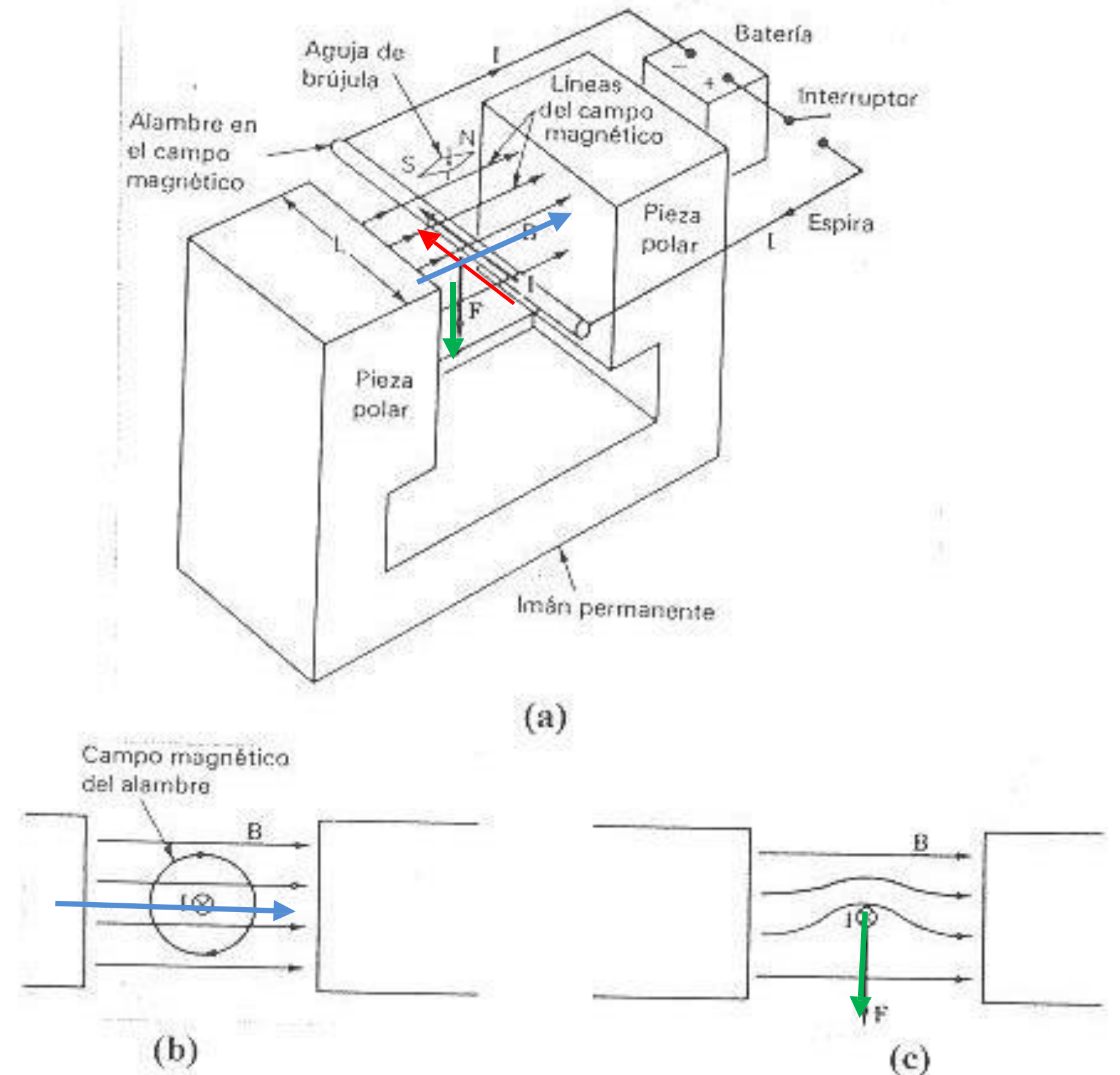


Figura 1: Interacción de la Corriente y el Campo Magnético. Fuerza

La fuerza "**F**" sobre un alambre por el cual circula una corriente y que se encuentra en presencia de un campo magnético está dada por:

$$F [N] = ILB$$

Si de la expresión anterior se despeja "**B**".

$$B [N/A.m] = F / (IL)$$

Donde:

L= longitud del alambre en el campo magnético [m]

I= corriente de un alambre [A]

Observando la **Figura 2** se ve, que cuando se cierra el interruptor y fluye corriente por la espira, existe una fuerza **(en este caso hacia abajo)** que actúa sobre el alambre en el campo magnético originado entre polos. Esta es la interacción básica entre el campo y la corriente para la operación de motores eléctricos.

Nótese que la aguja de la brújula indica la dirección del campo magnético. En las figuras se ve que "**I**", "**B**" y "**F**" son mutuamente perpendiculares.

Cuando "**I**" no es perpendicular a "**B**", la fuerza "**F**" resultante es función de un ángulo denominado ϕ , que es el ángulo formado entre la corriente y las líneas de campo magnético.

Al vector "**B**" se lo define como fuerza por momento de corriente y se lo denomina densidad de flujo magnético, sus unidades son Newton sobre Ampere por metro [N/A.m], o Weber por metro cuadrado [Wb/m²] o bien Tesla [T]

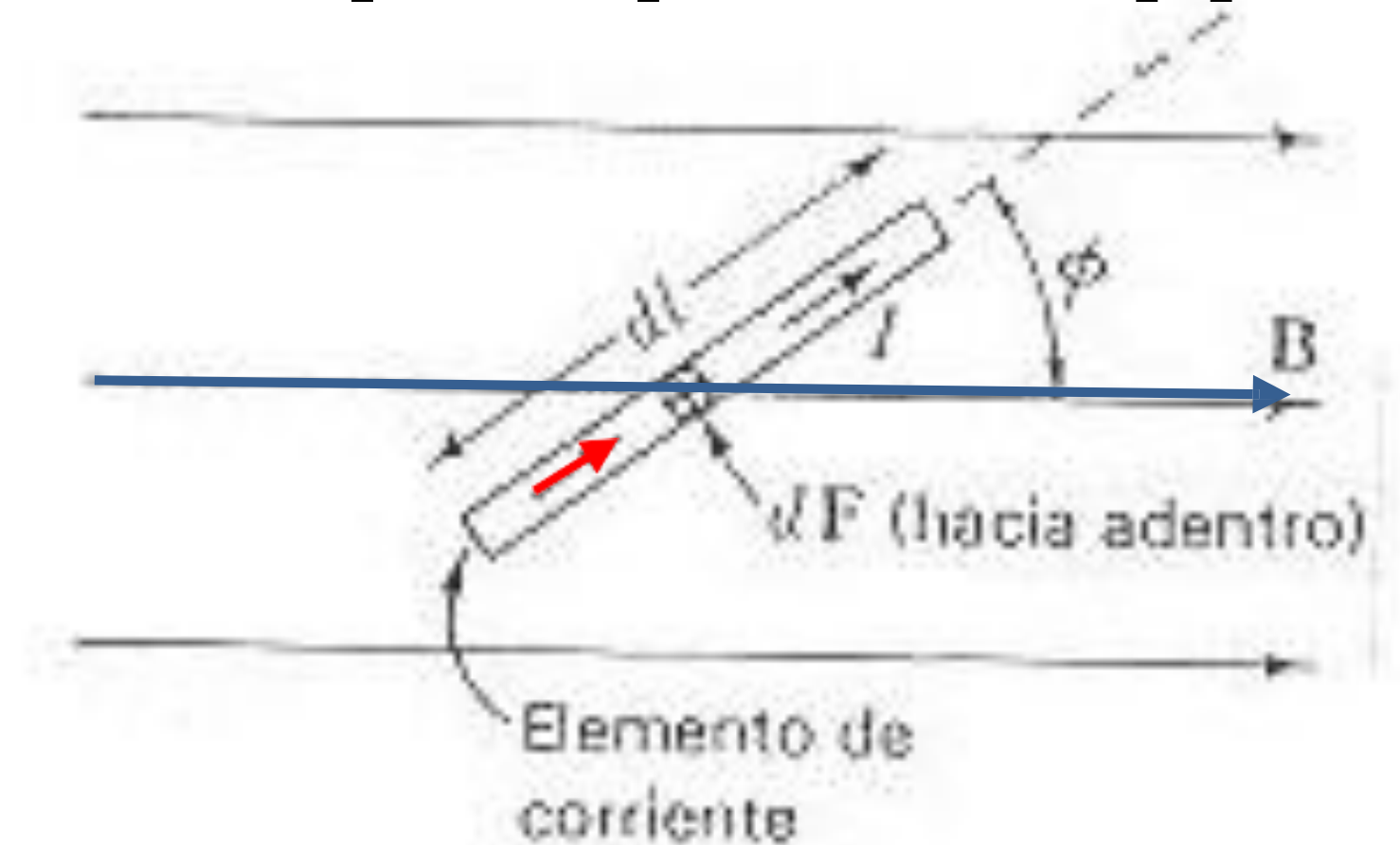


Figura 2: Elemento conductor portador de una corriente en presencia de un campo magnético

En general, para cualquier elemento infinitesimal "**dl**" portador de corriente, **Figura 2.2**, la fuerza viene dada por: $dF = B I dl \sin \phi$

$$F = I (L \times B)$$

Que es lo mismo a:

"Ecuación Básica de los Motores"

2. Transformación Mutua de la Energía Mecánica y Eléctrica.

La acción electromecánica del campo magnético y la inducción electromagnética es empleada para transformar la energía mecánica en eléctrica y viceversa.

Los dispositivos a través de los cuales se realizan estas transformaciones se llaman máquinas eléctricas.

La máquina para convertir la energía mecánica en eléctrica se llama Generador y la que transforma la energía eléctrica en mecánica (movimiento) se llama Motor

Principio Motor Generador

Examinemos el segmento **AB** de un conductor rectilíneo que se mueve en presencia de un campo magnético al cual corta formando un ángulo de 90°.

Figura 3

La figura muestra al conductor **AB**, que se desplaza en dirección a la fuerza “**F**” sobre dos barras metálicas conectadas entre sí por la resistencia “**r**”.

El conductor se desplaza una distancia “**b**” a una velocidad constante “**v**”, el flujo magnético concatenado por este circuito aumenta debido al incremento de la superficie limitada por el contorno.

El incremento de flujo magnético es:

$$\Delta\phi = B.\Delta S = B.b.l$$

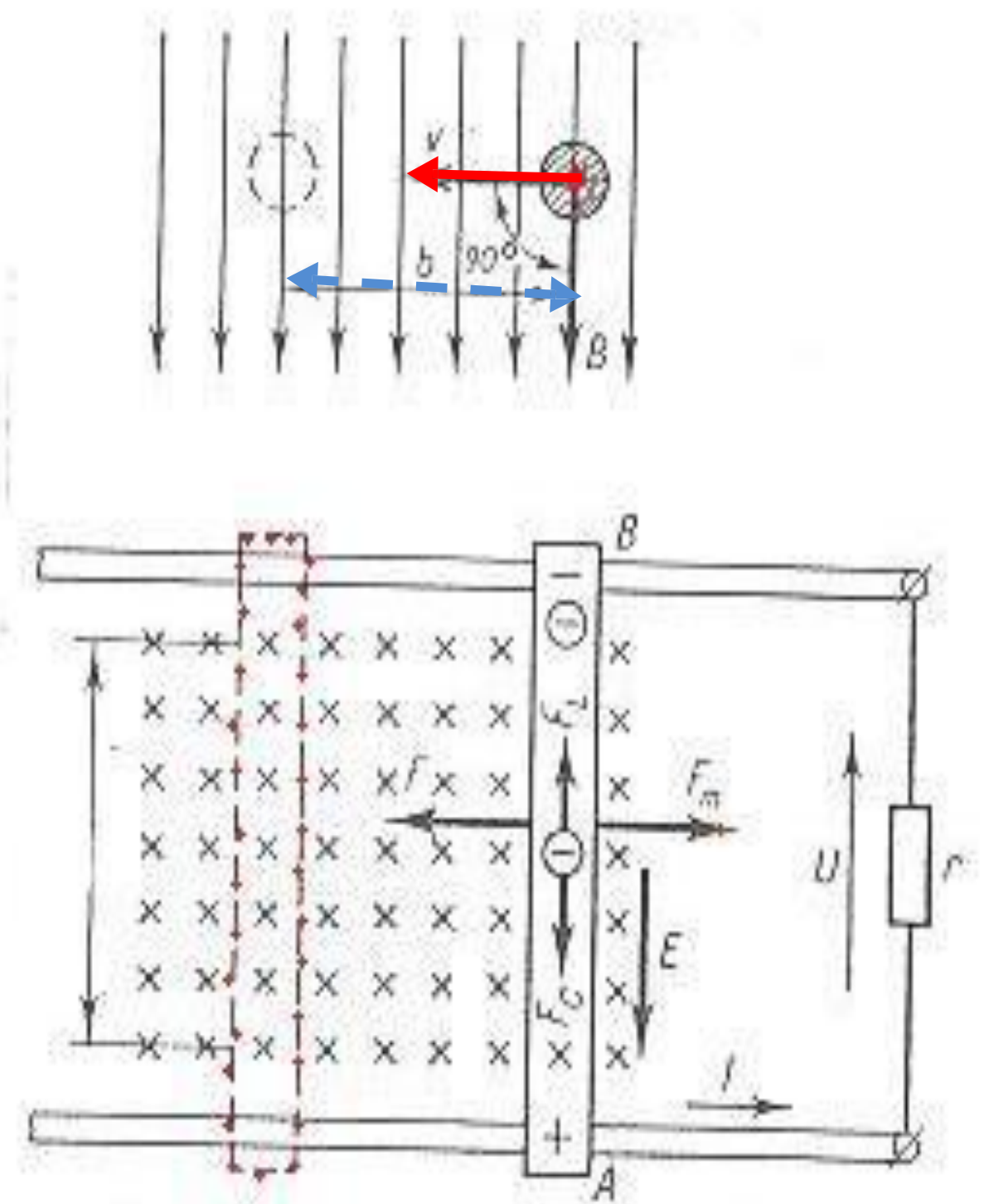


Figura 3: Circuito Eléctrico Básico para la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica

Donde "***l***" es la longitud de la parte del conductor ***AB*** que se encuentra en el campo magnético.

El valor absoluto de la f.e.m en el circuito es:

$$\varepsilon = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B b l}{\Delta t}$$

" **Δt** " es el tiempo durante el cual el conductor ***AB*** se desplaza la distancia "***b***", por lo tanto, " **$b/\Delta t$** " es una velocidad denominada por "***v***" que es la velocidad del movimiento de conductor, por eso.

$$c = B v l$$

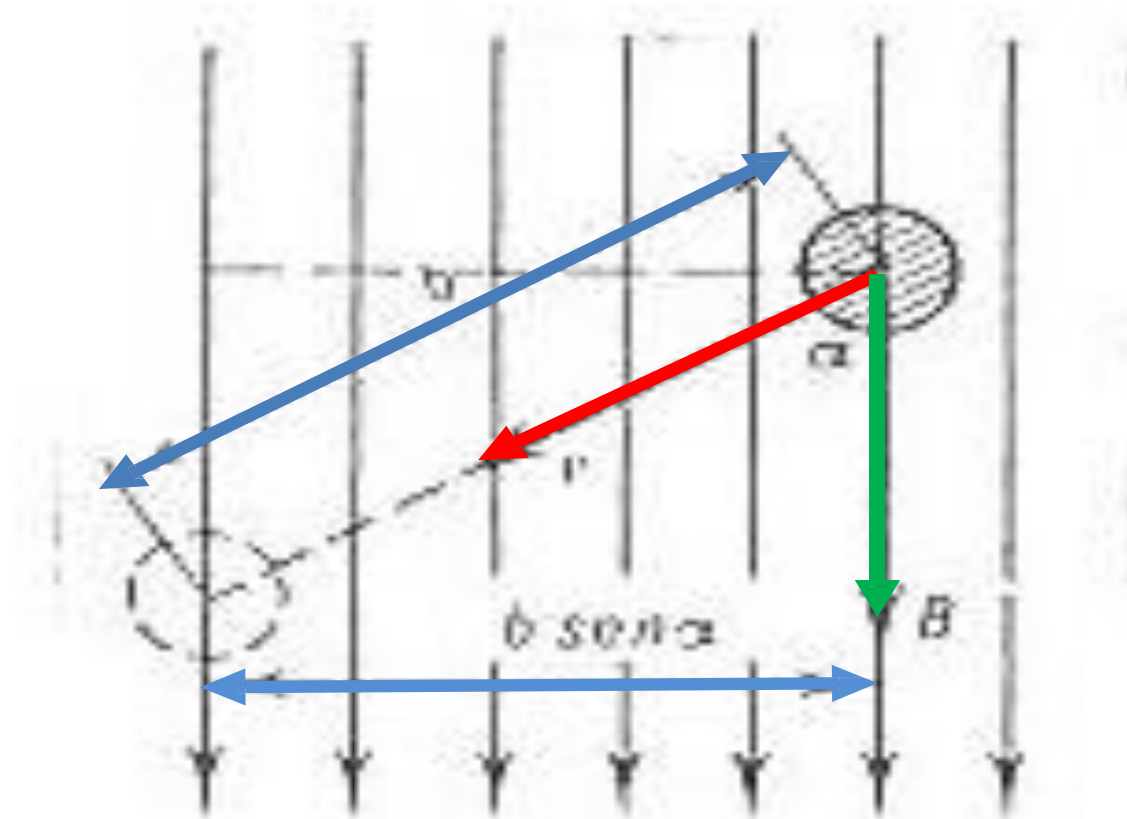


Figura 4: Fuerza Sobre un Elemento de Corriente

Si el conductor se desplaza formando un ángulo distinto a 90° (**Figura 4**) con la dirección de la inducción magnética del campo, el incremento del flujo magnético en el tiempo " **Δt** " a la velocidad "***v***" será:

$$\Delta\phi = B b l \sen a$$

Y la **f.e.m** en el circuito (espira) es:

$$c = B v l \operatorname{sen} a$$

“ Expresión general de la Ley de Faraday”

La expresión anterior caracteriza la inducción de una fem no solo en el circuito (espira) cerrado, sino también en cualquier trozo de conductor que corta un campo magnético.

Cuando $\alpha = 90^\circ$, se obtiene el valor máximo valor de f.e.m. Cuando $\alpha = 0^\circ$ la f.e.m inducida es nula.

Fuerza de Lorentz:

El campo magnético actúa sobre las partículas cargadas solo en el conductor **AB**, que se mueve en el campo magnético.

En otras partes del circuito conductor este no actúa (***barras + resistencias***), ya que se encuentran fuera del campo y son fijas.

Teniendo en cuenta esto, analicemos al conductor **AB** no conectado a las partes restantes del circuito.

Los electrones libres de la sustancia del conductor **AB**, que se encuentran en el campo magnético realizan un movimiento complejo ya que simultáneamente se desplazan con respecto al conductor (desplazamiento interior, por ejemplo térmico) y junto con el conductor a la velocidad “**v**” bajo la acción de la fuerza externa “**F**” aplicada al conductor.

En este caso interesa solamente la componente de la velocidad total de los electrones que está vinculada al movimiento del conductor.

La fuerza electromagnética que actúa sobre cada electrón (***F_1 es la fuerza de Lorentz***), de acuerdo con la regla de la mano derecha está dirigida a lo largo del conductor y su valor se determina por la expresión:

$$F_1 = B e_0 v$$

Al acumularse los electrones en un extremo del conductor, se origina una carga negativa excesiva, mientras que en el otro extremo se forma una carga positiva de igual magnitud.

La división de las cargas en el conductor da lugar a la aparición de un campo eléctrico por interacción de las partículas separadas. La fuerza que aparece es la debida a fuerzas en presencia de un campo eléctrico y son la conocidas como **Fuerzas de Coulomb “ F_c ”**.

Las ***Fuerzas de Coulomb*** son fuerzas de atracción de las partículas, por eso, ellas están dirigidas en sentido contrario a las fuerzas electromagnéticas “ **F_1** ”, que en este caso son exteriores.

Si el conductor se mueve con velocidad constante, las fuerzas electromagnéticas no cambian porque dependen de la velocidad, pero los electrones siguen migrando y las fuerzas del campo eléctrico aumentan a medida que se acumulan las cargas en los extremos del conductor.

La separación de las cargas se interrumpe cuando las fuerzas eléctricas y electromagnéticas se igualan, lo que denota la existencia entre los extremos del conductor de una diferencia de potencial o una tensión eléctrica estable.

La acción del campo magnético sobre los electrones libres del conductor durante su movimiento es la causa de la aparición de la fuerza electromotriz llamada f.e.m de inducción electromagnética.

El conductor **AB** de la figura se mueve a una velocidad constante gracias a la energía mecánica de un motor primario cualquiera, es decir, gracias a una fuente de energía mecánica.

La potencia mecánica del movimiento del conductor es:

$$P_{mec} = F v \quad ec. (1)$$

Donde:

“**F**” es la fuerza que actúa sobre el conductor y es ejercida por el motor primario.

“**v**” es la velocidad del movimiento.

Gracias a la inducción electromagnética en el conductor actúa una **f.e.m** y hay corrientes que se encuentran relacionadas a través de la siguiente expresión:

$$I = \frac{\varepsilon}{(r_0 + r)}$$

Donde:

- “**r₀**” es la resistencia del conductor **AB** (***resistencia de la fuente de energía eléctrica***),
- “**r**” es la resistencia de la parte externa del circuito, incluida la resistencia del receptor y partes de las barras que entran en el circuito.

En este caso, el conductor **AB** es la fuente de **f.e.m**, cuya potencia eléctrica es:

$$P = \varepsilon I$$

“Potencia Electromagnética”

Al aparecer la corriente en el conductor **AB** surge una **Fuerza Electromagnética “F_m”** que actúa en dirección perpendicular a la corriente.

Aplicando la regla de la mano derecha se puede comprobar que la fuerza electromagnética "**Fm**" tiene un sentido contrario al movimiento. Por lo que se dice que la fuerza exterior es una "**Fuerza Motora**" y la que se origina por el movimiento relativo (**Fm**) es llamada "**Fuerza Frenante**".

Cuando la velocidad "**v**" **es constante** (***estado estacionario***) las fuerzas motora y frenante son iguales entre si, entonces se puede asegurar que:

$$F = F_m = B I l$$

Sustituyendo la expresión de la fuerza en la fórmula de potencia mecánica ***ecuación (1)***, se obtiene:

$$P_{mec} = F v = B v I l$$

Dado que:

$$B v l = c$$

Entonces:

$$P_{mec} = c I = P$$

Por consiguiente la potencia mecánica del motor es igual a la potencia eléctrica de la fuente.

La última expresión

$$P_{mec} = c I = P$$

demuestra que al moverse el conductor en un campo magnético en dirección de la fuerza mecánica tiene lugar la transformación total de la energía mecánica en eléctrica. La tensión en los extremos del conductor $\mathbf{U}_{AB}$ es la tensión de la parte exterior del circuito. Esta tensión es menor que la **f.e.m** debido a la caída de tensión en la resistencia del conductor. Así:

$$U_{AB} = c - I r_o = I r$$

Principio Generador Motor

El proceso inverso de transformación se realiza sobre el mismo conductor **AB**, modificando levemente el circuito anterior.

En la **Figura 5** se muestra el circuito adecuado para el análisis.

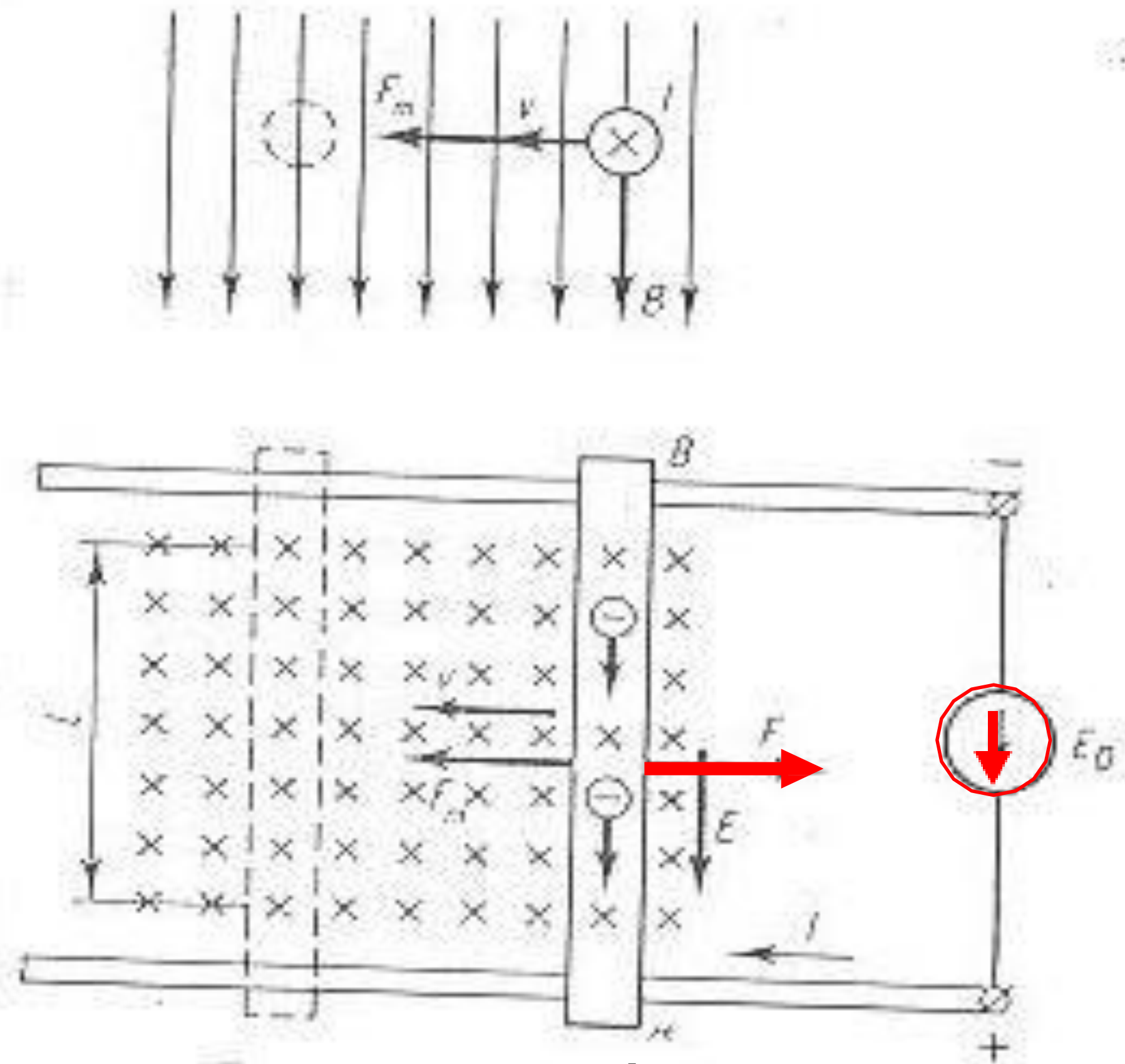


Figura 5: Circuito Básico para la Transformación de Energía Eléctrica en Mecánica

En lugar del receptor de energía eléctrica, se conecta al circuito una fuente de **f.e.m "Eo"**

Si en los extremos del conductor **AB** se suministra y mantiene una tensión constante **U_{AB}** mayor que la **f.e.m "Eo"**, la corriente en el conductor cambia el sentido de circulación de acuerdo con la expresión

$$U_{AB} = E_o - I r_o = I r$$

Considerando positivo el sentido de la corriente en la **Figura 2.5**, se calcula su magnitud según la segunda Ley de Kirchhoff:

$$U_{AB} - E_o = I r_o$$

En este caso, la f.e.m de inducción en el conductor **AB** está dirigida contra la corriente y es una "**fuerza contra electromotriz**".

El sentido contrario de la f.e.m y de la corriente es un síntoma de consumo de energía eléctrica por el dispositivo dado y por su transformación en otro tipo de energía.

En efecto, al cambiar el sentido de la corriente, cambia también el sentido de la fuerza electromagnética "**Fm**". Esta, toma el sentido de la velocidad del movimiento del conductor **AB**, es decir la "**Fm**" **se hace motora**.

El conductor **AB** es un receptor de energía eléctrica y su potencia eléctrica es:

$$P = U_{AB} I$$

$$P = U_{AB} I$$

Puesto que:

$$U_{AB} = \varepsilon + I r_0$$

Entonces:

$$P = \varepsilon I + I^2 r_0$$

Reemplazando la expresión de:

$$B v l = \varepsilon$$

$$P = B v l I + I^2 r_0$$

$$P = F_m v + I^2 r_0$$

El primer sumando de esta expresión es la potencia mecánica del conductor móvil y el segundo, la potencia de pérdida en el mismo conductor de acuerdo a la Ley de Joule.

Debido a que la energía mecánica surge por acción de las fuerzas del campo magnético, puede tenerse la impresión de que el conductor se mueve gracias a la energía del campo magnético, ***pero en realidad es la energía eléctrica de la fuente la que se transforma en energía mecánica*** (ver la última ecuación).

Este mismo análisis se puede hacer en el proceso de transformación inversa de energía mecánica en eléctrica.

3. Descripción y Comportamiento Operativo de la Máquina Síncrona.

La Máquina Síncrona es un dispositivo que opera como un generador de corriente alterna impulsada por una turbina, transformando la energía mecánica en energía eléctrica o al revés.

Cuando opera como motor, la máquina convierte la energía eléctrica en mecánica. Es la principal fuente de generación de potencia eléctrica en el mundo.

Los devanados de las máquinas síncronas polifásicas, constituyen un grupo de circuitos eléctricos acoplados inductivamente, algunos de los cuales se encuentran en rotación relativa con respecto a otros, por lo que las inductancias mutuas son variables.

Importante!!!

- ***Las ecuaciones desarrolladas para los enlaces de flujo de los diversos devanados son aplicables tanto para el análisis del estado de funcionamiento estacionario como para el transitorio.***
- Por simplicidad, solo se considerarán los circuitos magnéticos lineales, sin tener en cuenta la saturación lo cual, permite referirse por separado al flujo y a los enlaces de flujo producidos por una componente de la fuerza magnetomotriz (**Fmm**), aunque en realidad **en cualquier máquina eléctrica, solo se presenta el flujo físico total debido a la Fmm resultante de todas las fuentes magnetizantes.**

Las máquinas síncronas se encuentran fundamentalmente constituidas por dos estructuras ferromagnéticas principales:

- a. El estator o armadura:** como su nombre lo indica, carece de movimiento. Es esencialmente un cilindro hueco con ranuras dispuestas longitudinalmente en las cuales se encuentran alojadas las bobinas del devanado de armadura; estos devanados llevan la corriente alterna en el caso de funcionamiento como motor.
- b. El rotor:** es la parte de la máquina que se encuentra montada sobre un eje y que rota dentro del hueco del estator. El devanado que se encuentra sobre el rotor, se denomina, devanado de campo y es alimentado por corriente continua.

En ellas se destaca:

1. La **Fmm** producida por la corriente del arrollamiento de campo, se combina con la **Fmm** producida por las corrientes de los devanados de armadura.
2. El flujo resultante en los espacios de aire que hay entre el rotor y el estator, denominado **entrehierro**, genera tensiones en las bobinas de los devanados de la armadura y produce el par electromagnético entre estator y rotor.
3. El **devanado de campo** es alimentado con corriente continua a través de un excitador que bien puede ser un generador montado sobre el mismo eje o una fuente de corriente continua independiente, conectada a los devanados de campo por medio de escobillas sobre anillos rozantes.
4. Por lo general, los grandes generadores de corriente alterna tienen excitadores que consisten en una fuente de corriente alterna con rectificadores de estado sólido.

5. Si la máquina es un generador, el eje es impulsado por una fuente de energía mecánica, que por lo general es una turbina de vapor o hidráulica.
6. El par electromagnético desarrollado en el generador cuando entrega potencia se opone al par de la fuente de energía mecánica. La diferencia entre esos dos pares se debe a las pérdidas en el núcleo y el rozamiento.
7. En un motor el par electromagnético que se desarrolla, despreciando las pérdidas por fricción y en el núcleo, se convierte en el momento de giro del eje que impulsa la carga mecánica.
8. En las máquinas reales, los devanados tienen un gran número de vueltas distribuidas en las ranuras alrededor de la circunferencia del rotor, el intenso campo magnético enlaza las bobinas del estator para inducir una tensión en los devanados de la armadura en la medida que el eje es impulsado por la fuente de energía mecánica.

En la **Figura 6** se muestra un generador trifásico elemental de dos polos.

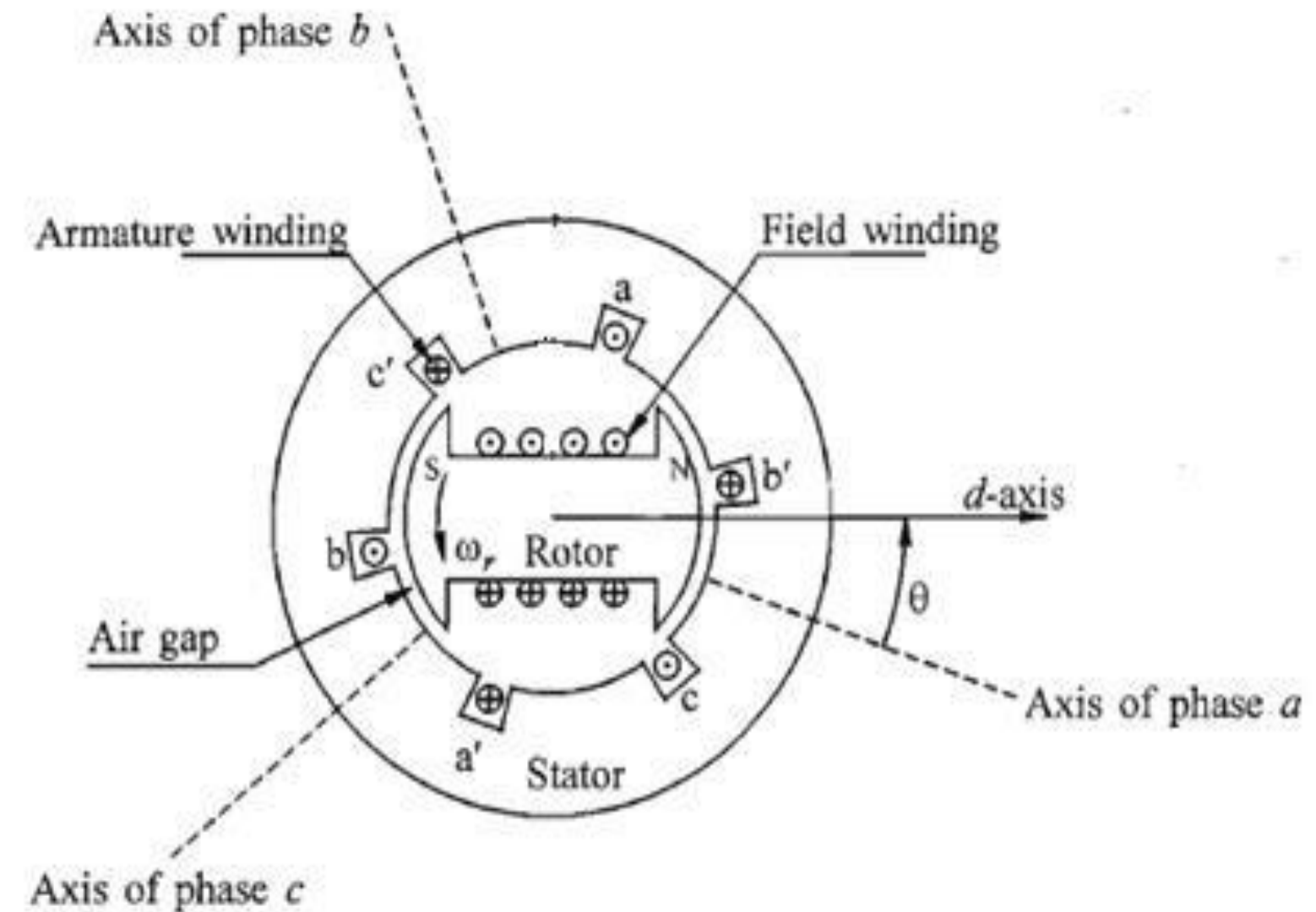


Figura 6: Corte esquemático de la máquina sincrónica trifásica convencional

- Los lados opuestos de una bobina, que es prácticamente rectangular, están en la ranura **a** y **a'** separadas 180° . Bobinas similares están en las ranuras **b-b'** y **c-c'**.
- Los lados de las bobinas en las ranuras a, b y c están separadas 120° entre sí.

En la **Figura 7** se muestra un generador sincrónico de polos salientes con cuatro polos, es decir dos pares de polos.

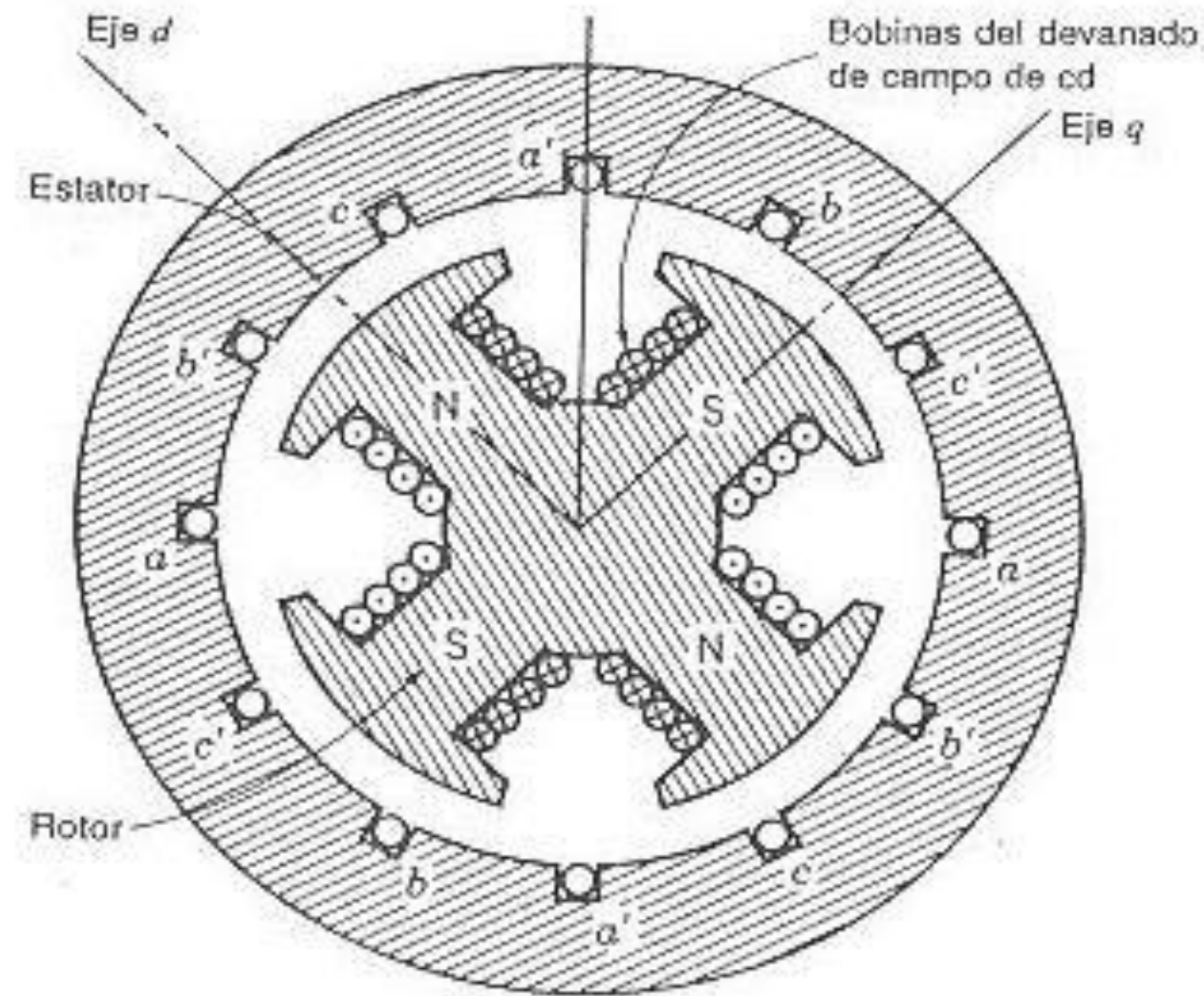


Figura 7: Esquema de la Máquina Sincrónica de 4 Polos.

- Ejes Directo "d" y en Cuadratura "q"

Puede apreciarse que tanto los circuitos magnéticos como los arrollamientos del rotor son siempre simétricos a dos ejes.

Con el propósito de simplificar o identificar mas sencillamente las características de la máquina sincrónica, se definen dos eje.

1. Eje Directo "d", centrado con el eje del Polo Norte Magnético.

2. Eje en Cuadratura "q" ubicado a 90° del anterior y en posición de retraso considerando como positiva a la dirección anti horaria.

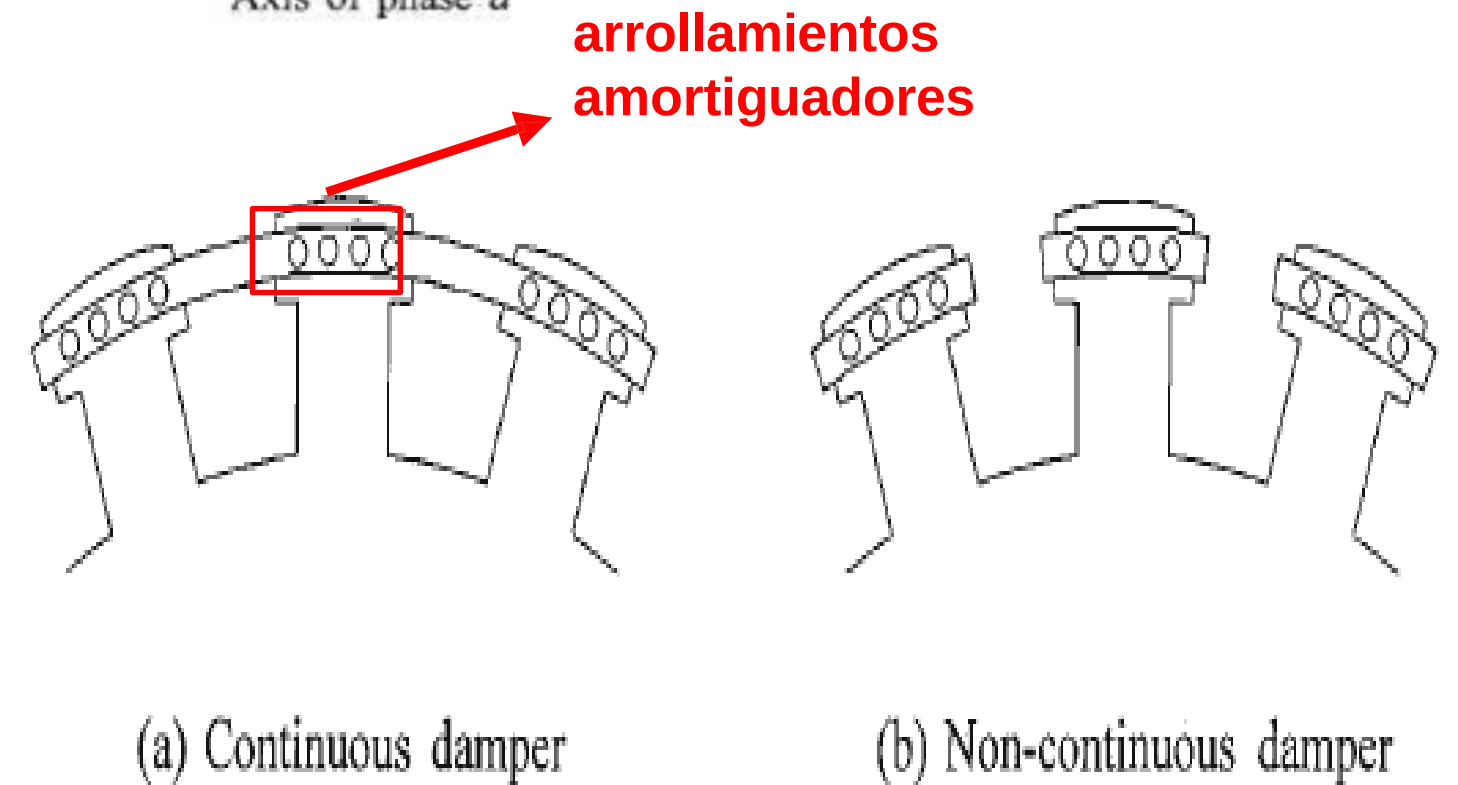
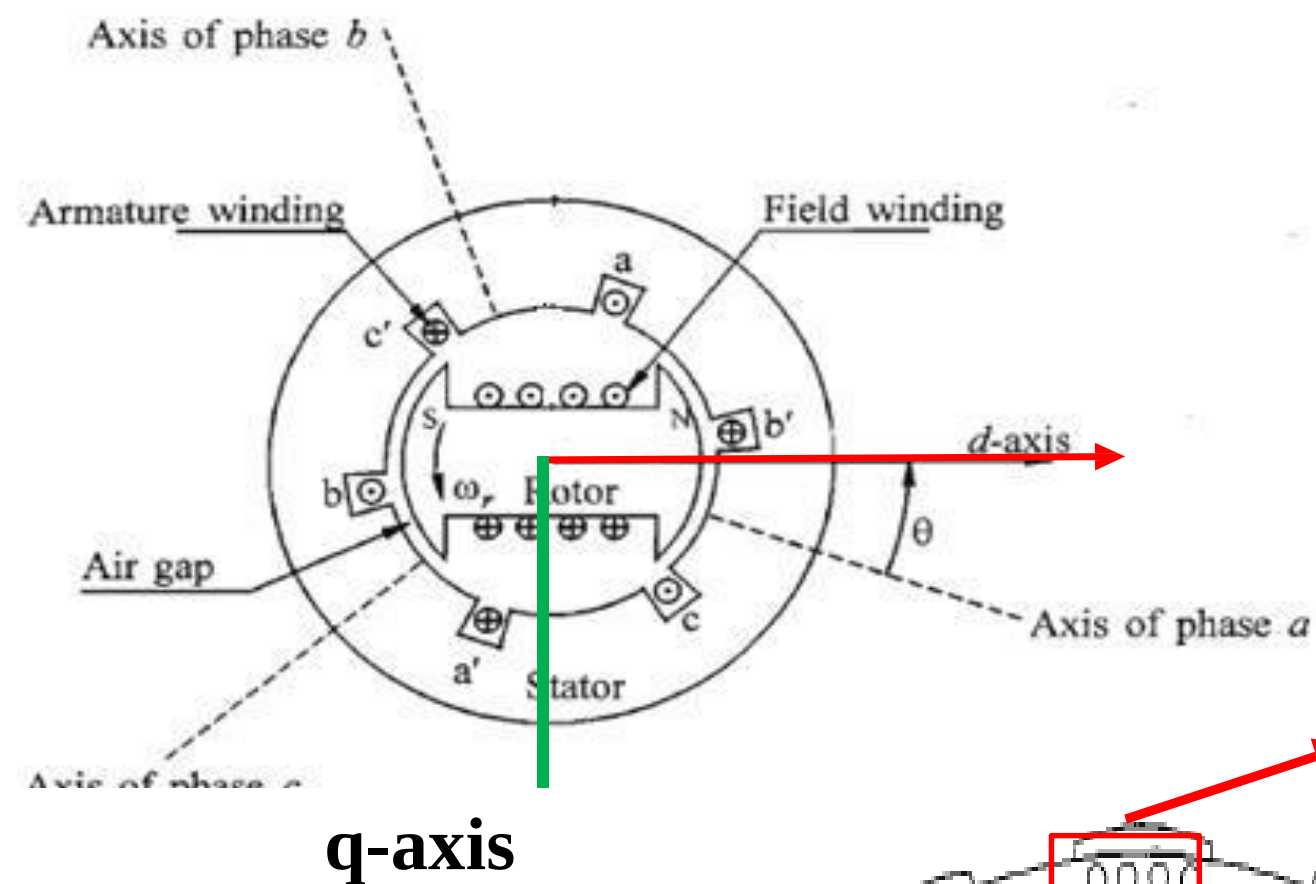


Figura 8: Corte esquemático de la máquina síncrona trifásica convencional

Aunque no se puede apreciar en el dibujo, generalmente, las máquinas de polos salientes tienen Arrollamientos Amortiguadores.

Arrollamientos Amortiguadores

Consisten en barras de cobre cortocircuitadas **Figura 2.8**, y su función es la de reducir las oscilaciones mecánicas del rotor hasta la velocidad síncrona que es la determinada por el número de polos de la máquina y la frecuencia del sistema de alimentación al que está conectada.

Cuando existen barras amortiguadoras las cabezas de los polos deben ser construidas con chapas aisladas para que las corrientes amortiguadoras se establezcan en las barras y no en las expansiones polares.

Figura 9: Arrollamientos Amortiguadores

En la **Figura 2.10**, se presenta el corte de una máquina síncrona de Rotor Cilíndrico, las corrientes asociadas y los caminos de circulación de dichas corrientes

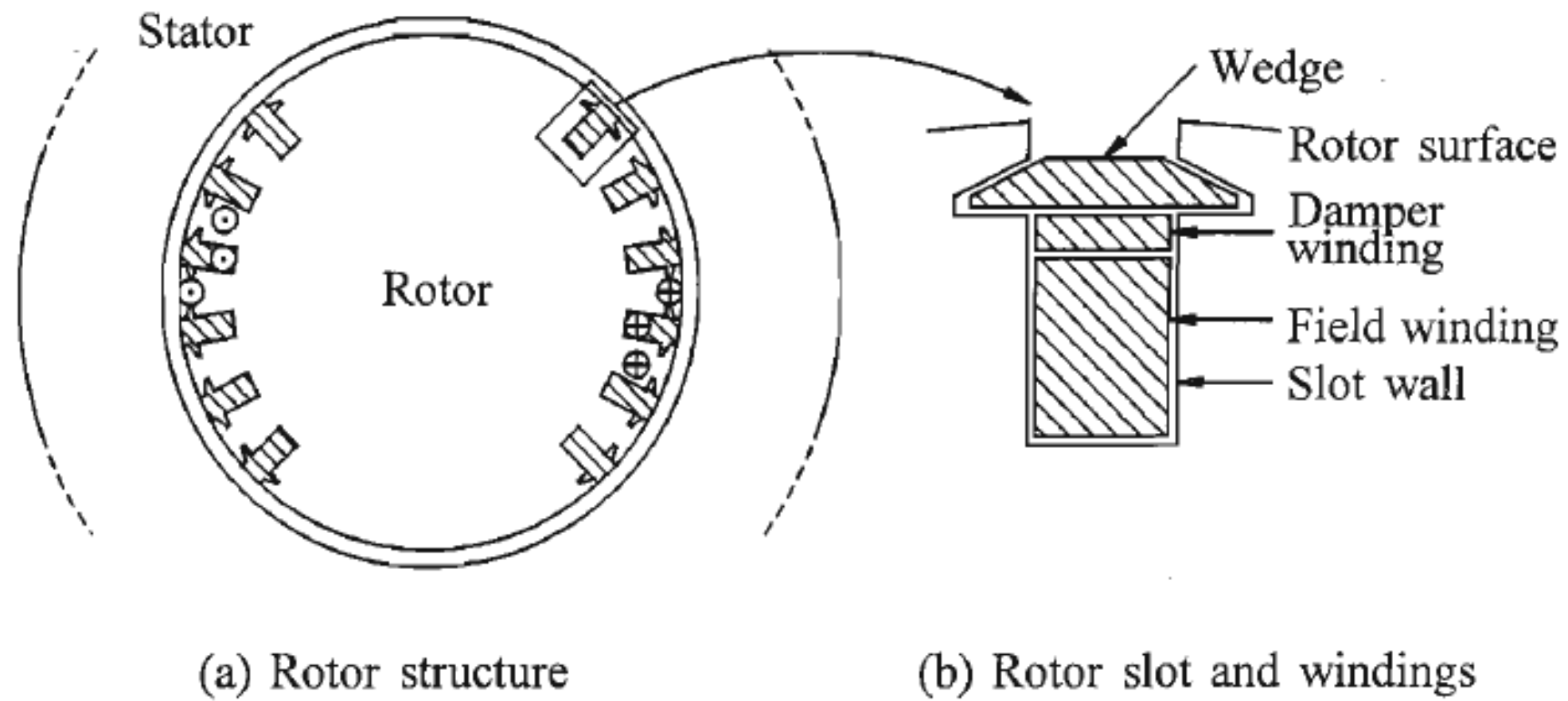


Figura 10: Corte Transversal de una Máquina Síncrona de Rotor Cilíndrico

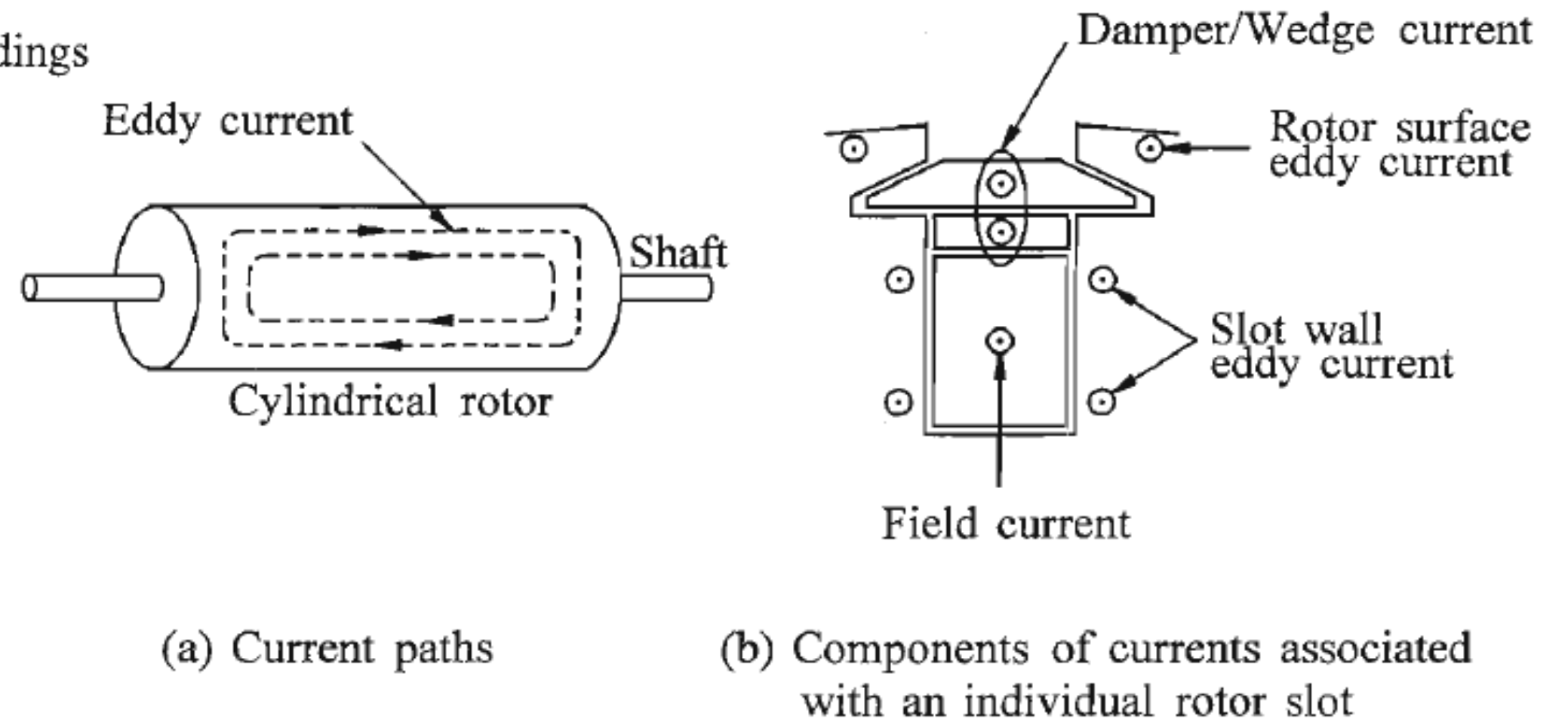


Figura 11: a- Corte Longitudinal de una Máquina Síncrona de Rotor Cilíndrico. b- Detalle de una Ranura y sus Arrollamientos

Número de pares de Polos. Efecto en la forma de onda de Fmm

Por lo general, los turbogeneradores que queman combustible fósil, son máquinas de dos polos, mientras que los generadores hidraulicos, son máquinas mas lentas constituidas por varios pares de polo.

Veamos cómo influye y en que el número de pares de polos de la máquina sincrónica.

Cada vez que una bobina recorre un par de polos se genera un ciclo de la onda de tensión, es decir, ***360° de la onda de tensión.***

Una pregunta que debería surgir es:

- ***Que relación existe entre los grados eléctricos usados para expresar la tensión y la corriente y los grados mecánicos empleados para describir la posición del rotor?***

Para poder responderla se considera primeramente, una máquina de dos polos (**Np=1**).

- Si se alimenta el estator con una corriente trifásica alterna, se origina en el entrehierro una Fmm que gira a la misma velocidad que la rueda polar.
- Al girar el Rotor una vuelta completa (360°) se completa un ciclo completo de la onda de Fmm.
- Por tal motivo 360° eléctricos coinciden con 360° mecánicos. **Figura 12a**

Máquina de DOS POLOS

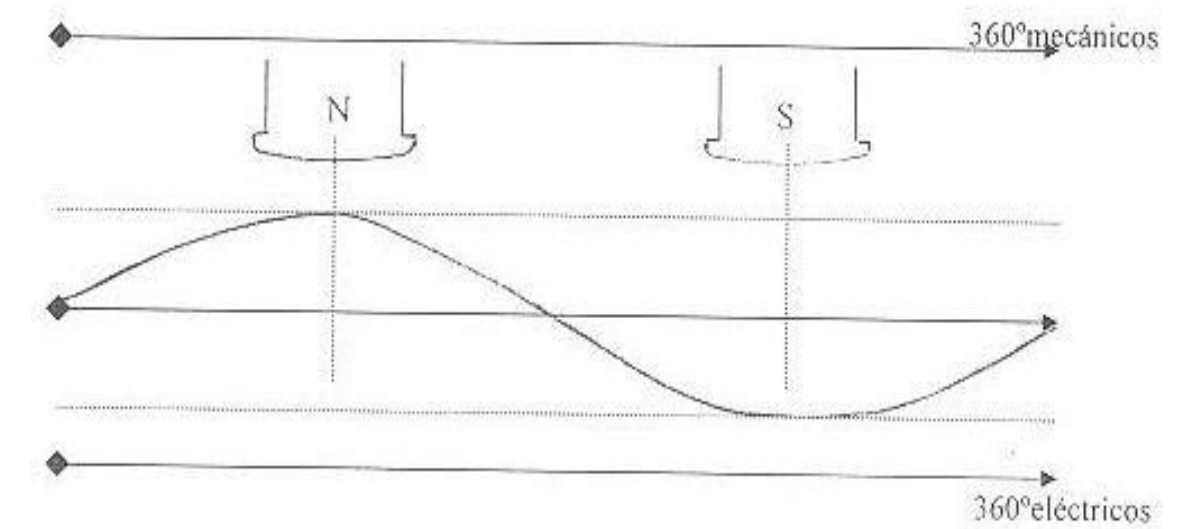


Figura 12a: Fmm en el Entrehierro. Estator alimentado con I trifásica alterna, Np=1

En una máquina de dos polos, los grados eléctricos y los grados mecánicos coinciden. Y se tiene:

$$\theta_e = \theta_m$$

$$N_p = 1$$

En una máquina es de 4 polos (**$N_p=2$**),

- Si se alimenta el estator con una corriente trifásica alterna, se origina en el entrehierro una Fmm que gira a la misma velocidad que la rueda polar.
- Al girar el Rotor una vuelta completa (360°) se completan dos ciclos completos de la onda de Fmm.
- Por lo tanto para 360° mecánicos, corresponden 720° eléctricos. Ver **Figura 12b**

Máquina de CUATRO POLOS

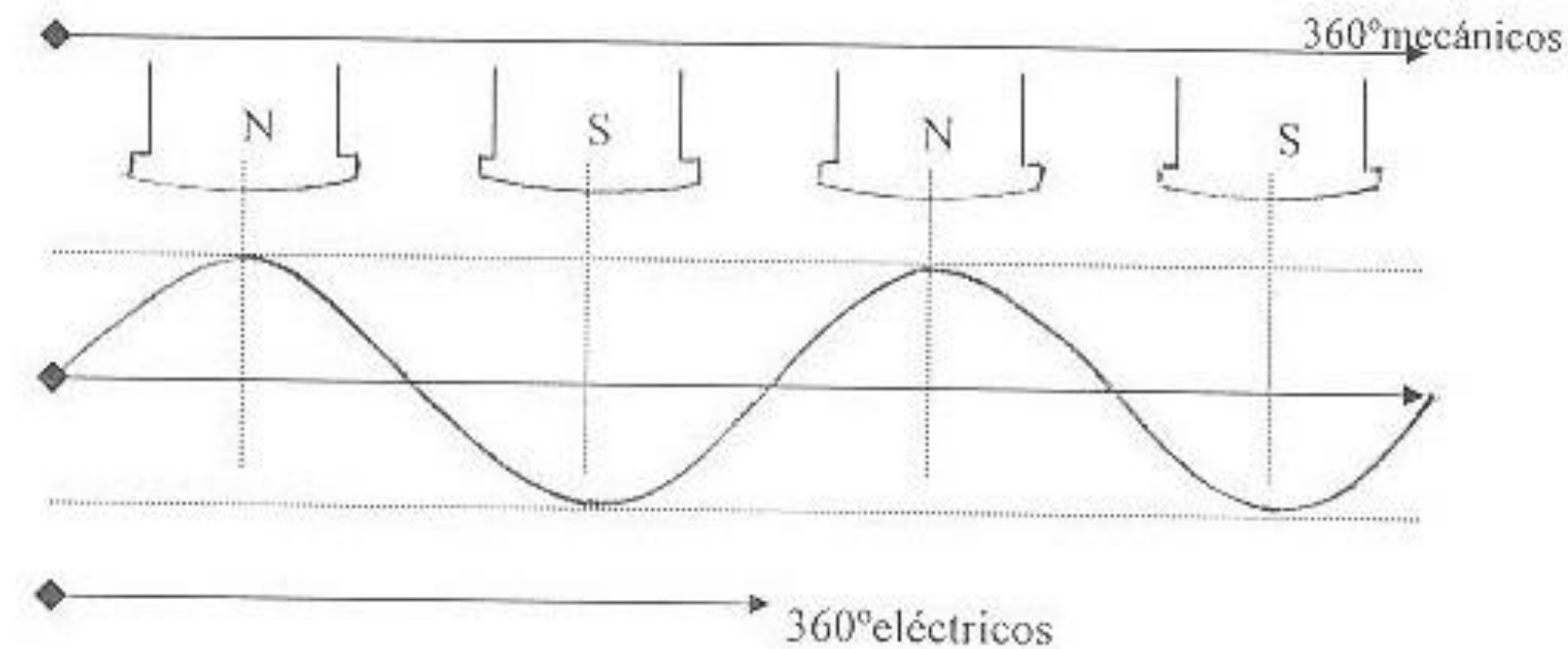


Figura 12b: Fmm en el Entrehierro. Estator alimentado con I trifásica alterna, $N_p=2$

De lo visto, la relación existente entre los grados eléctricos y grados mecánicos es:

$$\theta_e = 2 \theta_m$$

$$N_p = 2$$

Observar!!!

- 1. En una máquina de dos polos, se genera un ciclo de tensión (*voltaje*) por cada revolución del rotor.**
- 2. En una de 4 polos (*dos pares de polos*) se generan dos ciclos completos por cada revolución del rotor.**

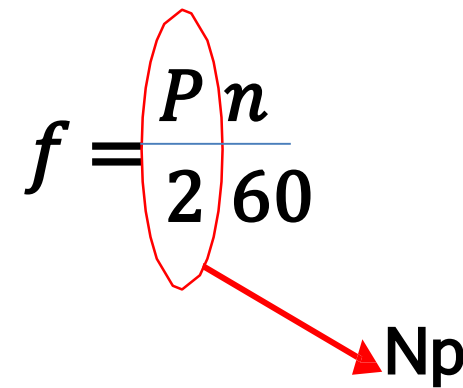
Finalmente, la expresión general que relaciona los grados eléctricos y los grados mecánicos es:

$$\theta_e = N_p \theta_m$$

donde **Np**= número de pares de polos

Velocidad Sincrónica

Como el número de ciclos por cada revolución es igual al número de pares de polos, la frecuencia está dada por la siguiente relación:

$$f = \frac{P n}{2 \cdot 60}$$


Siendo “**n**” la velocidad del eje dada en revoluciones por minuto.

La velocidad de la máquina, denominada, velocidad sincrónica es función del número de pares de polos “**Np**” y de “**f**”, la frecuencia de la red.

Despejando la Velocidad Sincrónica de la expresión anterior y considerando 50 Hz de frecuencia queda:

$$n_s = \frac{60f}{N_p} = 1500 [rev/min]$$

4. Forma de la Onda de la Fmm

En la práctica, tanto los arrollamientos de armadura y como los arrollamientos de campo ubicados en el rotor de la maquina están distribuidos en ranuras de forma tal, que la Fmm y los flujos resultantes tienen una distribución muy parecida o cercana a una distribución sinusoidal.

Partiremos de considerar la **onda de Fmm** producida por el arrollamiento de armadura solamente. (arrollamiento ubicado en el estator de la máquina)

En la **Figura 13 a** se muestra la Fmm producida por la corriente que circula **por una sola espira** de la bobina de la **fase "a"**.

En la figura se muestrala onda de Fmm montada sobre un corte del estator, el cual se ha cortado y desarrollado según el eje x.

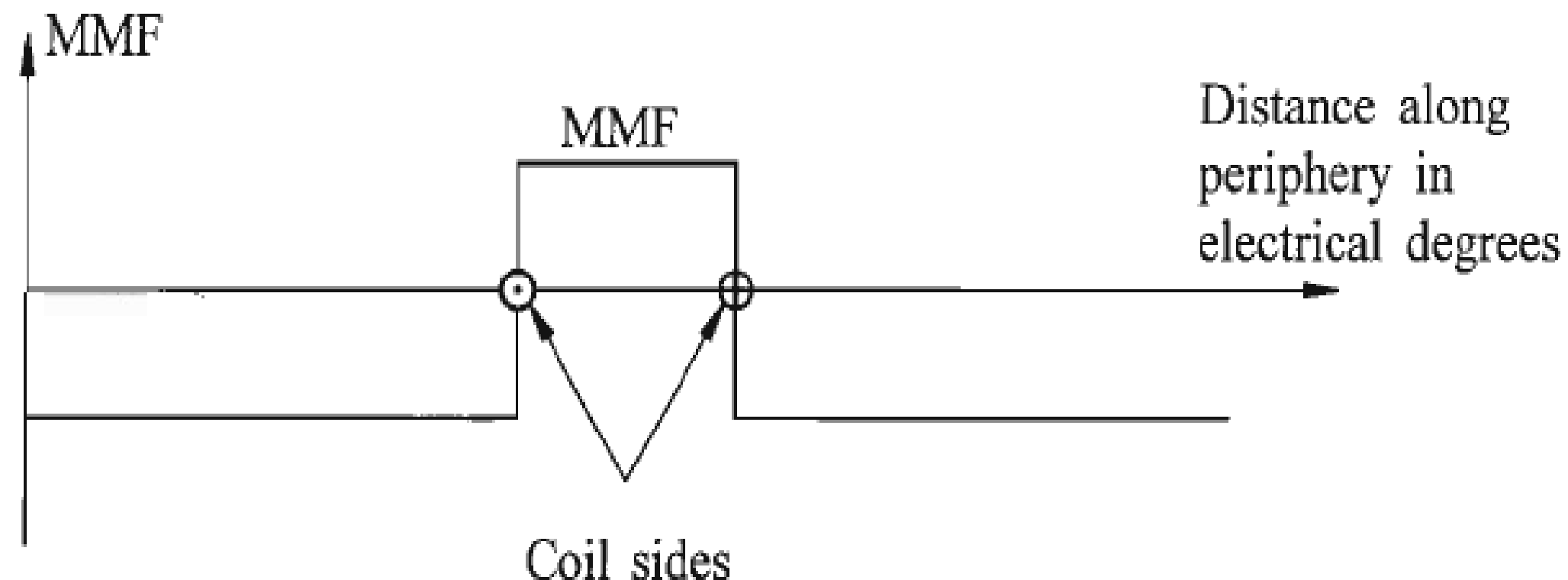


Figura 13a: Fmm Producida por una Espira de la Fase a del Estator.

Como se aprecia, al tener en cuenta una sola espira, la onda de Fmm tiene forma rectangular. Considerando la presencia de las otras espiras, se obtiene la onda de **Fmm** de la **Figura 13b**.

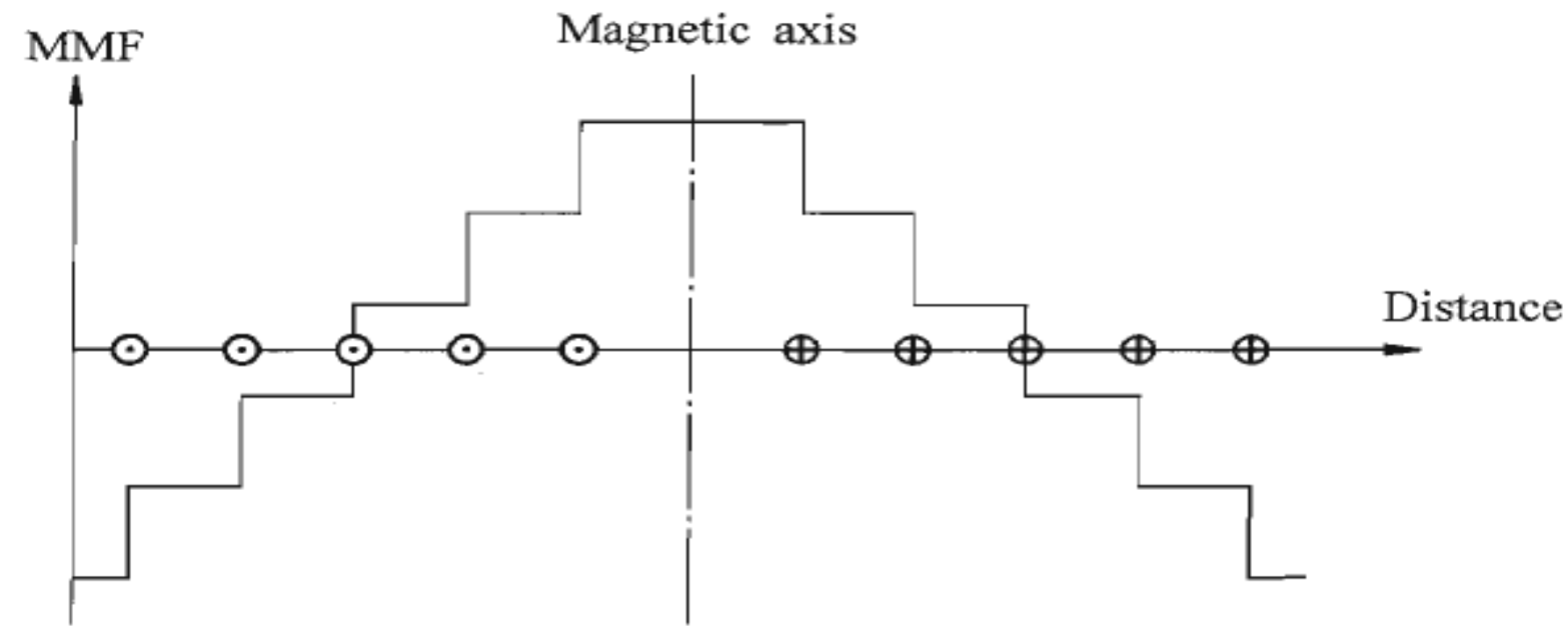


Figura 13b: Fmm Producida por un Número de espiras de la Fase a del Estator.

En la **Figura 13b** se ve que a medida que se va considerando la bobina completa, la **onda de Fmm** tiende de una distribución rectangular, a una sinusoidal.

Importante!!!

En el diseño de máquinas se intenta minimizar las armónicas, para ello se recurre a la construcción de devanados de paso fraccionado; con esto las armónicas espaciales son reducidas hasta eliminarlas. En la modelación de la máquina es absolutamente razonable considerar que cada fase produce una onda de Fmm de forma sinusoidal.

Normalmente se dice que los arrollamientos tienen una "distribución sinusoidal"

5. Campo magnético Rotante

La Fmm total debida a las tres fases de los arrollamientos del estator tiene forma senoidal, así, si consideramos una espira y media de cada una de las tres fases a, b y c:

Figura 14: Fmm Producida por el total de las espiras de la Fase a del Estator.

Definiendo γ como el ángulo a lo largo de la periferia del estator con respecto al centro de la Fase considerada, la Fmm debida a las tres fase puede ser escrita:

Donde:

i_a, i_b e i_c son valores instantáneos de corrientes de fase

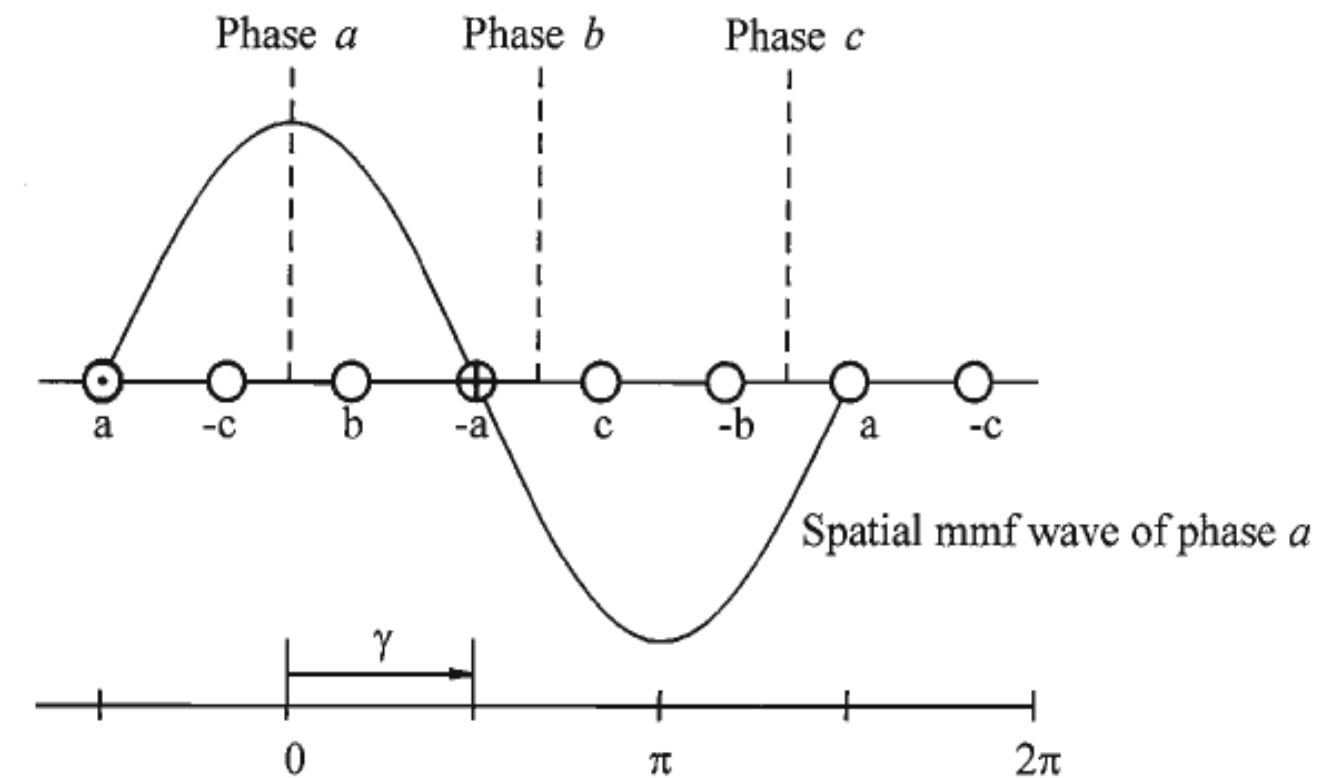
K es una constante

Cada arrollamiento produce un Fmm cuyos valores cambian con los valores instantáneos de las corrientes en los arrollamientos.

Como las tres Fmm debidas a las tres fase, se encuentran desplazadas 120° eléctricos separados en el espacio, si se considera un sistema de corrientes balanceadas y se considera el instante justo en que la corriente de la Fase "a", es máxima (**i_a máxima**) se tiene.

Donde: $\omega_s = 2\pi f$

es la frecuencia angular de las corrientes del estator en radianes eléctricos / segundos.



$$MMF_a = Ki_a \cos \gamma$$

$$MMF_b = Ki_b \cos(\gamma - \frac{2\pi}{3})$$

$$MMF_c = Ki_c \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3})$$

$$i_a = I_m \cos(\omega_s t)$$

$$i_b = I_m \cos(\omega_s t - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_c = I_m \cos(\omega_s t + \frac{2\pi}{3})$$

La **Fmm total** debida a las tres fases está dada por la suma de las tres Fmm correspondientes a las tres fases:

$$MMF_{total} = MMF_a + MMF_b + MMF_c$$

$$= KI_m \left[\cos(\omega_s t) \cos \gamma + \cos\left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$MMF_{total} = \frac{3}{2} KI_m \cos(\gamma - \omega_s t)$$

Fmm Total

Al observar la última expresión se ve que corresponde a la ecuación de propagación de una onda donde:

- En cada instante, el total de la Fmm tiene una distribución espacial senoidal.
- Tiene una amplitud constante y su fase es $(\omega_s t)$ que es función del tiempo.
- La Fmm Total, se desplaza con una velocidad angular constante ω_s [rad/s].
- En una máquina de “Np” pares de polos, la velocidad de rotación del campo del estator es:

$$\omega_{sm} = \frac{2}{N_p} \omega_s \quad \text{rad/s}$$

$$n_s = \frac{60 \omega_{sm}}{2 \pi} = \frac{60 f}{N_p} \text{ r/min}$$

"ns" es la velocidad sincrónica del rotor, por ello en estado estacionario, la Fmm debida a las corrientes del estator es estacionaria con respecto al rotor.

- La cupla electromagnética en el rotor actúa en el sentido de alinear ambos campos magnéticos. La **Figura 15** muestra ambas **Fmm** producidas por Rotor y Estator.

Nuevamente se ha desplegado el rotor, con el propósito de mostrarlas situadas físicamente.

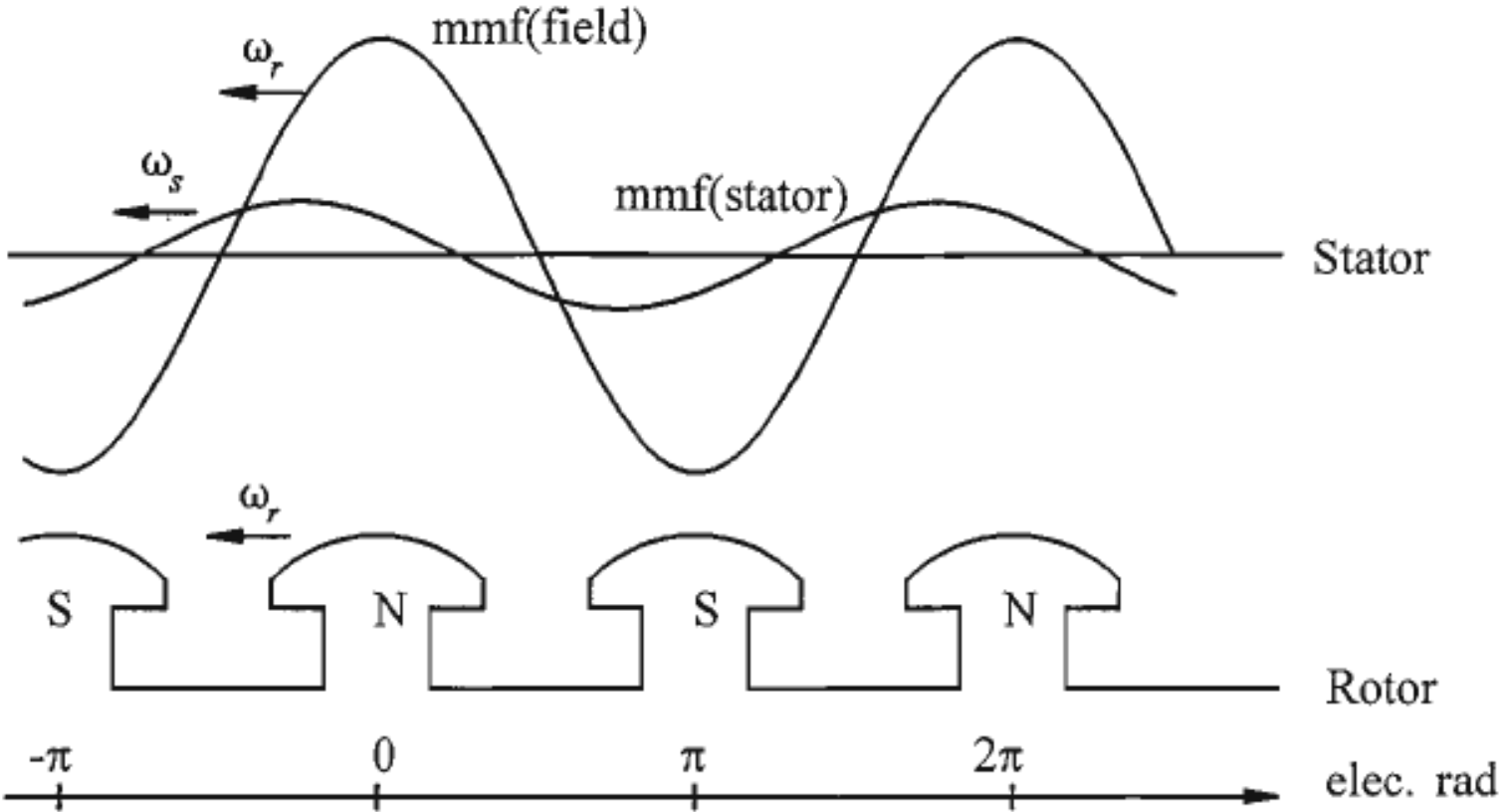


Figura 15: Ondas de Fmm Producidas en por el Rotor y Estator

Importante!!!!



- Si el campo del rotor adelanta al campo inducido en el estator, la cupla actúa en oposición a la rotación y la máquina actúa como un generador.
- Por otro lado, si el campo del rotor se retrasa al campo inducido, la cupla actúa en la misma dirección de rotación y la máquina actúa como un motor.

Resumiendo, para operación como generador: el campo del rotor adelanta al campo del estator y viceversa.

6. Ecuación Diferencial de Movimiento de la Máquina Sincrónica. Constante de Inercia y Tiempo de Arranque Mecánico.

Cuando se produce una perturbación, se presenta en la máquina sincrónica un desbalance entre la "**P_m**" con la cual está siendo impulsada y la "**P_e**" que se encuentra entregando a la red (o, dicho de otra manera: que la red le demanda).

Este desbalance de Potencia puede ser en dos sentidos, es decir puede significar un aumento de la potencia de carga o una disminución de la misma.

Por este motivo la potencia de desbalance puede ser acelerante o desacelerante según sea el caso, pero siempre recibe el nombre de **Potencia Acelerante**

Potencia Acelerante. Cupla.

Siendo la Potencia Acelerante la diferencia entre la P_m y la P_e , escrita en función de las cuplas puede decirse que es:

$$T_a = T_m - T_e$$

T_a = accelerating torque in N·m

T_m = mechanical torque in N·m

T_e = electromagnetic torque in N·m

Donde

En esta ecuación, “ T_e ” y “ T_m ” son positivas en el caso en que la máquina se encuentra operando como generador y negativas en los casos motores.

Debido a la inercia del rotor, un desbalance en la cupla, produce siempre “en un primer momento”, la aceleración de la máquina y la ecuación anterior puede reescribirse en función de la **inercia “ J ” y de la velocidad angular del rotor:**

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e$$

J = combined moment of inertia of generator and turbine, kg·m²

ω_m = angular velocity of the rotor, mech. rad/s

t = time, s

Donde:

Siendo la constante de inercia **H** =>

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_{0m}^2}{VA_{base}} \rightarrow J = \frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base}$$

VA_{base} es la Potencia Aparente Base del sistema (**S_{base} [VA]**).

Reemplazando **J** en $J \frac{d\omega_m}{dt} = T_a = T_m - T_e$

$$\frac{2H}{\omega_{0m}^2} VA_{base} \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e$$

$$2H \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega_m}{\omega_{0m}} \right) = \frac{T_m - T_e}{VA_{base} / \omega_{0m}}$$

Donde:

ω_r = velocidad angular del rotor en grados eléctricos/s

ω_0 = velocidad angular nominal

p_f = número de pares de polos

Definiendo una velocidad angular media como la relación entre la velocidad angular y la nominal del rotor y relacionándola con Np, se tiene:

$$\bar{\omega}_r = \frac{\omega_m}{\omega_{0m}} = \frac{\omega_r / p_f}{\omega_0 / p_f} = \frac{\omega_r}{\omega_0}$$

Entonces:

$$2H \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e$$

Definiendo como " **δ** " el ángulo del rotor del generador con respecto a un sistema que gira con velocidad sincrónica y " **δ_0** " el valor de dicho ángulo en el instante **$t=0$** ,

$$\delta = \omega_r t - \omega_0 t + \delta_0$$

Derivando dos veces respecto del tiempo

Primer derivada $\longrightarrow$ $\frac{d\delta}{dt} = \omega_r - \omega_0 = \Delta\omega_r$

Segunda derivada $\longrightarrow$ $\frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{d(\Delta\omega_r)}{dt}$

$$= \omega_0 \frac{d\bar{\omega}_r}{dt} = \omega_0 \frac{d(\Delta\bar{\omega}_r)}{dt}$$

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e$$

Siempre es deseable incluir la componente de amortiguamiento que no se tuvo en cuenta en el cálculo de la cupla eléctrica.

El amortiguamiento es considerado adicionando un término proporcional a la desviación de la velocidad angular respecto de la velocidad nominal.

Así, la ecuación anterior queda:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - K_D \Delta \bar{\omega}_r$$

$$\Delta \bar{\omega}_r = \frac{\Delta \omega_r}{\omega_0} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt}$$

Donde:

Kp = coeficiente de amortiguamiento. Definido como el cociente entre la cupla y la variación de la velocidad en pu.

Reemplazando:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt}$$

(Ecuación de Movimiento de la Máquina Síncrona No lineal, con Coeficientes Constantes)

7. Teorema de la constancia de los enlaces de flujo magnético

Sea el circuito de la **Figura 16**, el cual en cada una de sus ramas tiene una resistencia y una fuente de fem de valores finitos

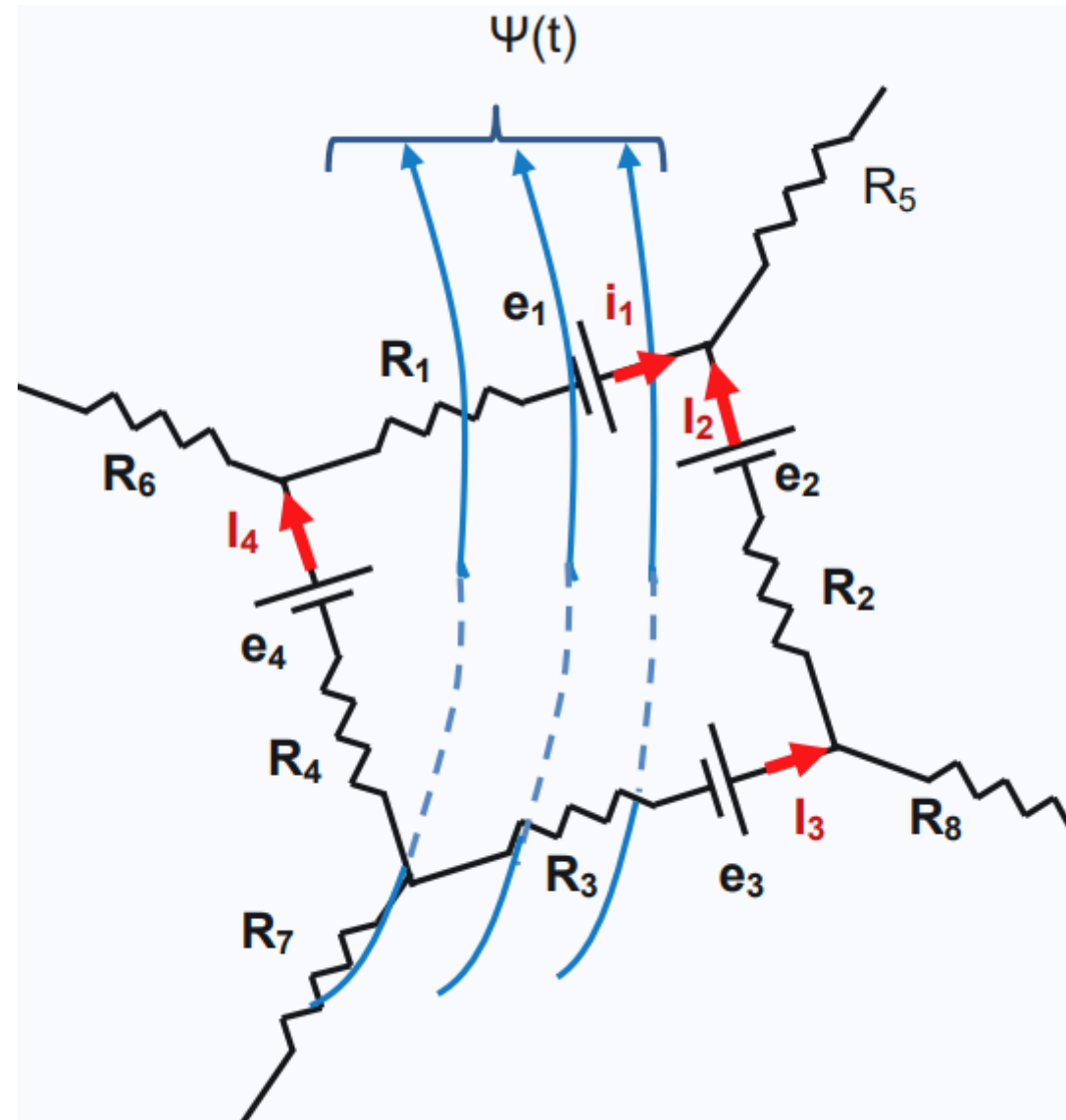


Figura 16: Malla de un Circuito Eléctrico con Resistencias y Fems

Teniendo en cuenta que las “**fems e_i** ” dibujadas no se originan por

$$\frac{\partial f(t)}{\partial t}$$

En ella se cumple que

$$\Sigma R_i \cdot i_i(t) + \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} = \Sigma e_i(t)$$

Integrando respecto del tiempo entre 0 (cero) y Δt

$$\Sigma R_i \int_0^{\Delta t} i_i(t) dt + \Delta \psi = \Sigma \int_0^{\Delta t} e_i(t) dt$$

Haciendo $\Delta t \longrightarrow 0$

$$R_i \int i_i(t) dt \longrightarrow 0 \quad \text{y} \quad \int e_i(t) dt \longrightarrow 0$$

Entonces, **$\Delta \psi$ también tiende a cero**

Los enlaces de flujo magnético de cualquier circuito cerrado que tenga valores finitos de resistencia y de fem *"no pueden cambiar instantáneamente"*

1 En el caso especial en que las resistencias y las fems sean cero, la derivada del flujo (ψ) respecto del tiempo también será cero, lo que implica que el flujo es constante. Así, podemos afirmar que:

Importante!!!

Los enlaces de flujo magnético de cualquier c circuito cerrado que no tenga ni resistencias ni fems permanecen constantes.

2 En la realidad, todo circuito tiene resistencias y por lo tanto en la práctica, los enlaces de flujo en los circuitos cambian de acuerdo con:

$$\frac{df(t)}{dt} = \mathbf{Z} [e_i(t) - R_i \cdot i_i(t)]$$

En redes lineales que no tengan fems el cambio de los enlaces de flujo se puede expresar en función de las constantes de tiempo de la red.

Importante!!!! Este teorema es útil cuando

- 1. Cambian las autoinductancias de un circuito por efecto de la presencia de un movimiento relativo entre sus partes.**
- 2. Cambian las inductancias mutuas entre dos circuitos por movimiento relativo entre ellos.**
- 3. Si estos cambios ocurren en un tiempo que es corto comparado con las constantes de tiempo del circuito, entonces, los enlaces de flujo se mantienen constantes durante el cambio.**

Este hecho puede ser usado para el cálculo de las corrientes finales, en función de las corrientes antes del cambio.

EJEMPLO: Relé electromagnético

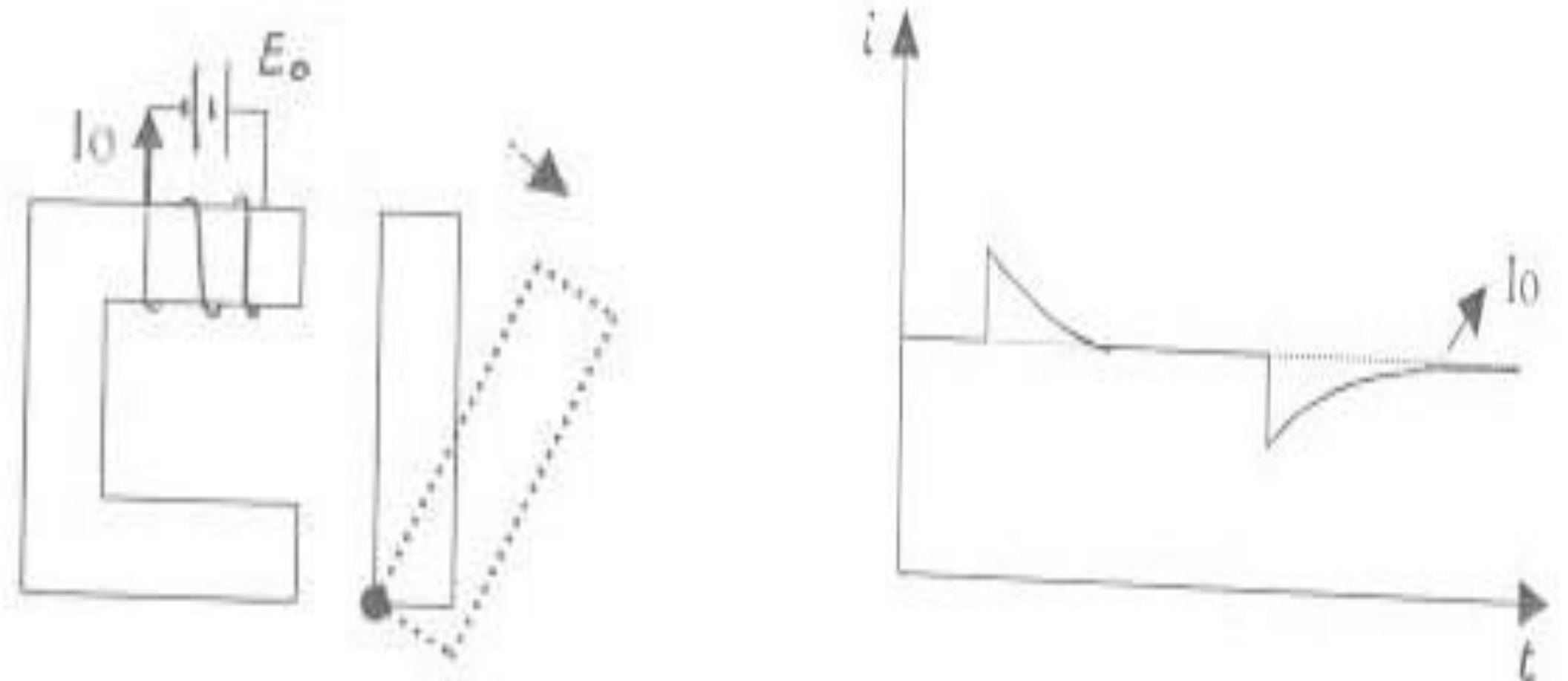
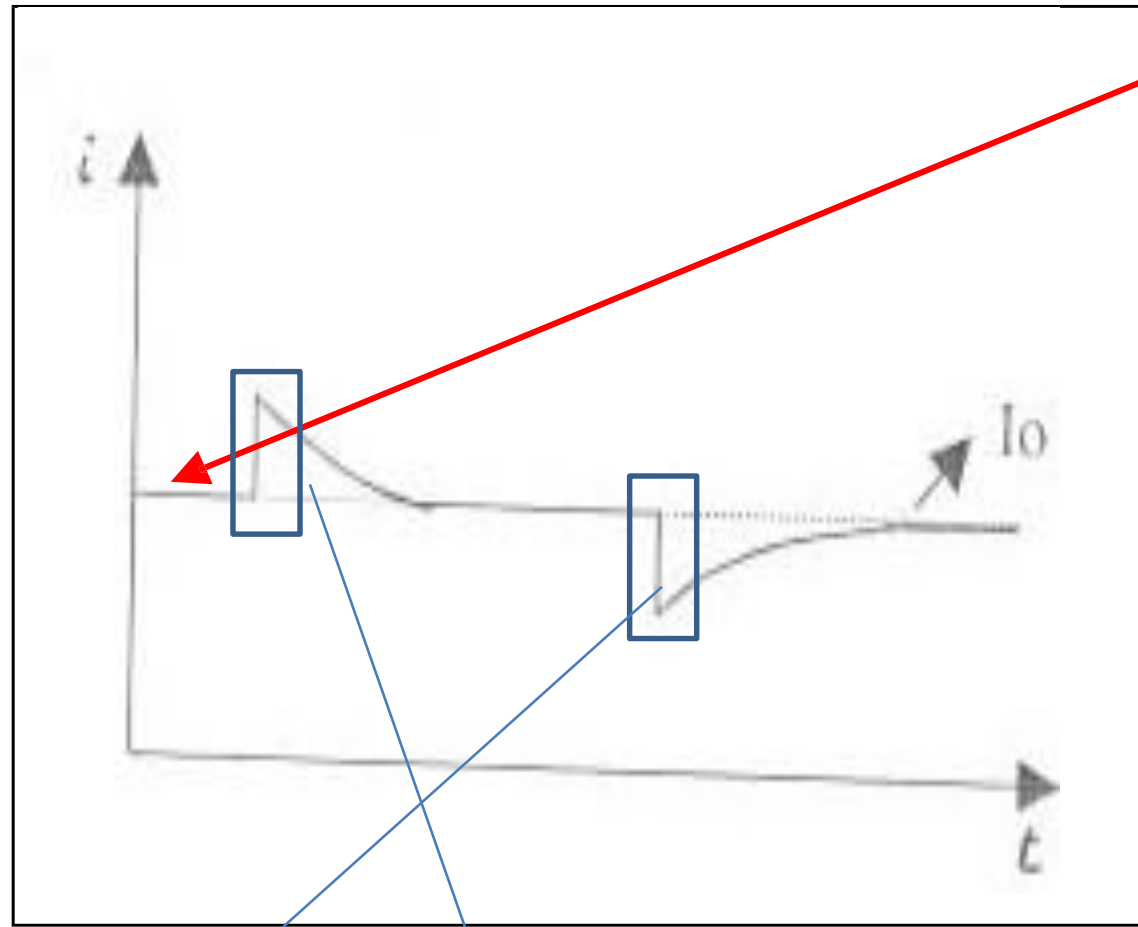


Figura 17: Relé electromagnético. Característica de $i=f(t)$

Situación del Relé:

Se aparta bruscamente la armadura del electroimán y se la mantiene separada un tiempo y luego se la lleva nuevamente a la posición inicial. *(en contacto con el electroimán)*

- En la posición inicial, existe una corriente de estado estacionario (I_0).



- Al apartar la armadura, la **corriente aumenta** bruscamente, oponiéndose al cambio y con la intención de mantener el flujo constante, pero inmediatamente después comienza a decaer por efecto de las resistencias.
- Cuando se cierra el relé, sucede exactamente lo contrario ya que al aumentar la resistencia magnética y el flujo, la **corriente disminuye** bruscamente, nuevamente oponiéndose al cambio e intentando mantener el flujo constante.

8. Descripción Matemática de la Máquina Síncrona

Sea la máquina síncrona representada a través de sus bobinados de campo y armadura:

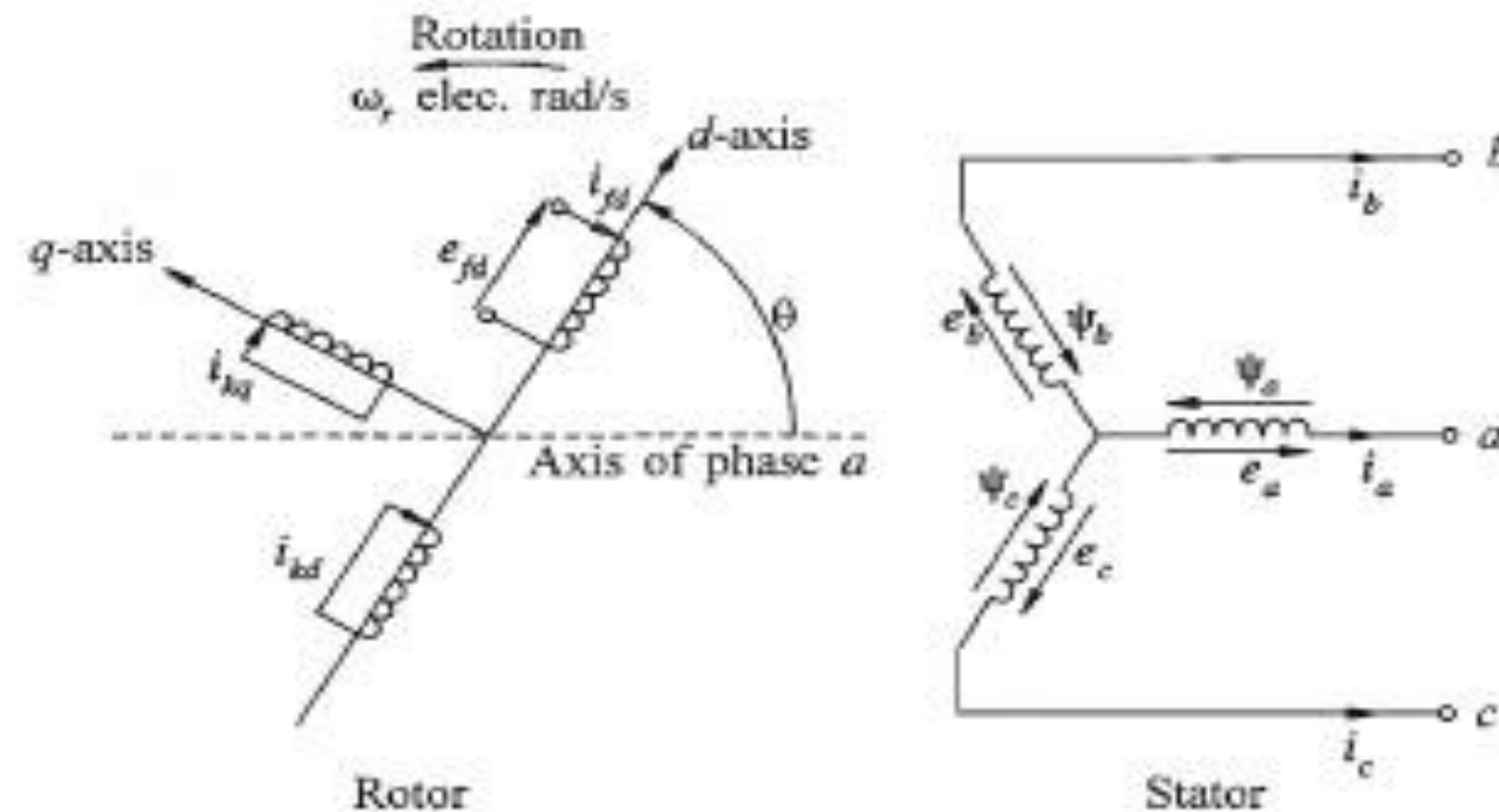


Figura 18: Circuitos Rotórico y Estatórico de una Máquina Síncrona.

a, b, c : Stator phase windings

fd : Field winding

kd : d -axis amortisseur circuit

kq : q -axis amortisseur circuit

$k = 1, 2, \dots, n$; n = no. of amortisseur circuits

θ = Angle by which d -axis leads the magnetic axis of phase a winding, electrical rad

ω_r = Rotor angular velocity, electrical rad/s

donde:

En la **Figura 18**, se puede ver que θ es el ángulo que forma el **eje "d"** del rotor con el eje del arrollamiento de la **fase "a"** del estator.

En estado de operación θ cambia *(crece)* continuamente y está relacionado a la velocidad angular del rotor a través de la siguiente expresión.

$$\theta = \omega_r t$$

Las ecuaciones de operación de la máquina sincrónica pueden ser escritas a través de las relaciones de acoplamiento entre los dos circuitos *(estático y rotórico)* que se mueven relativamente uno respecto del otro.

Repaso de las relaciones [1]

Circuito con una sola excitación

En la **Figura 19a** se presenta un circuito con un arrollamiento de "**N**" vueltas y resistencia "**r**".

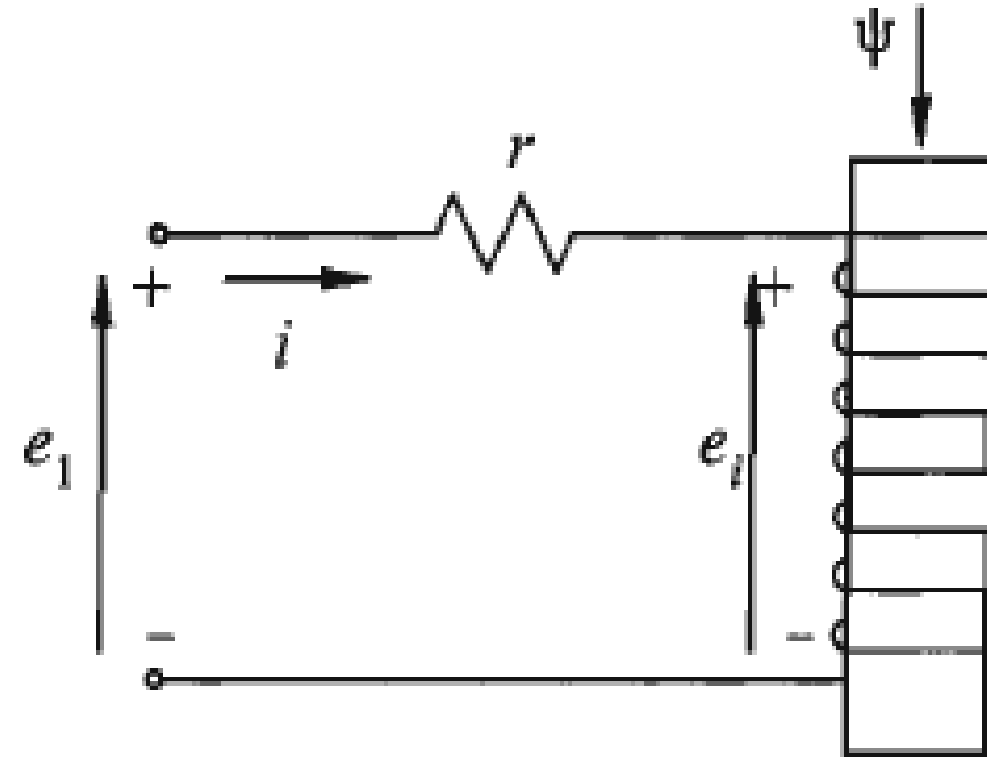


Figura 19a: Circuito con excitación única

En estos circuitos se asume que a la relación entre el flujo y la Fmm es constante. De acuerdo a la Ley de Faraday, la tensión inducida "**ei**" es

$$e_i = \frac{d\psi}{dt}$$

Donde ψ es el valor instantáneo del flujo concatenado en el tiempo "t". En este caso, la tensión en los terminales está dada por la siguiente expresión:

$$e_1 = \frac{d\psi}{dt} + r i$$

El flujo concatenado puede ser expresado en función de la inductancia “**L**” del circuito

$$\Psi = Li$$

Por definición, la inductancia es igual al flujo concatenado en por unidad de corriente, así:

$$L = N \frac{\Phi}{i}$$
$$= N^2 P$$

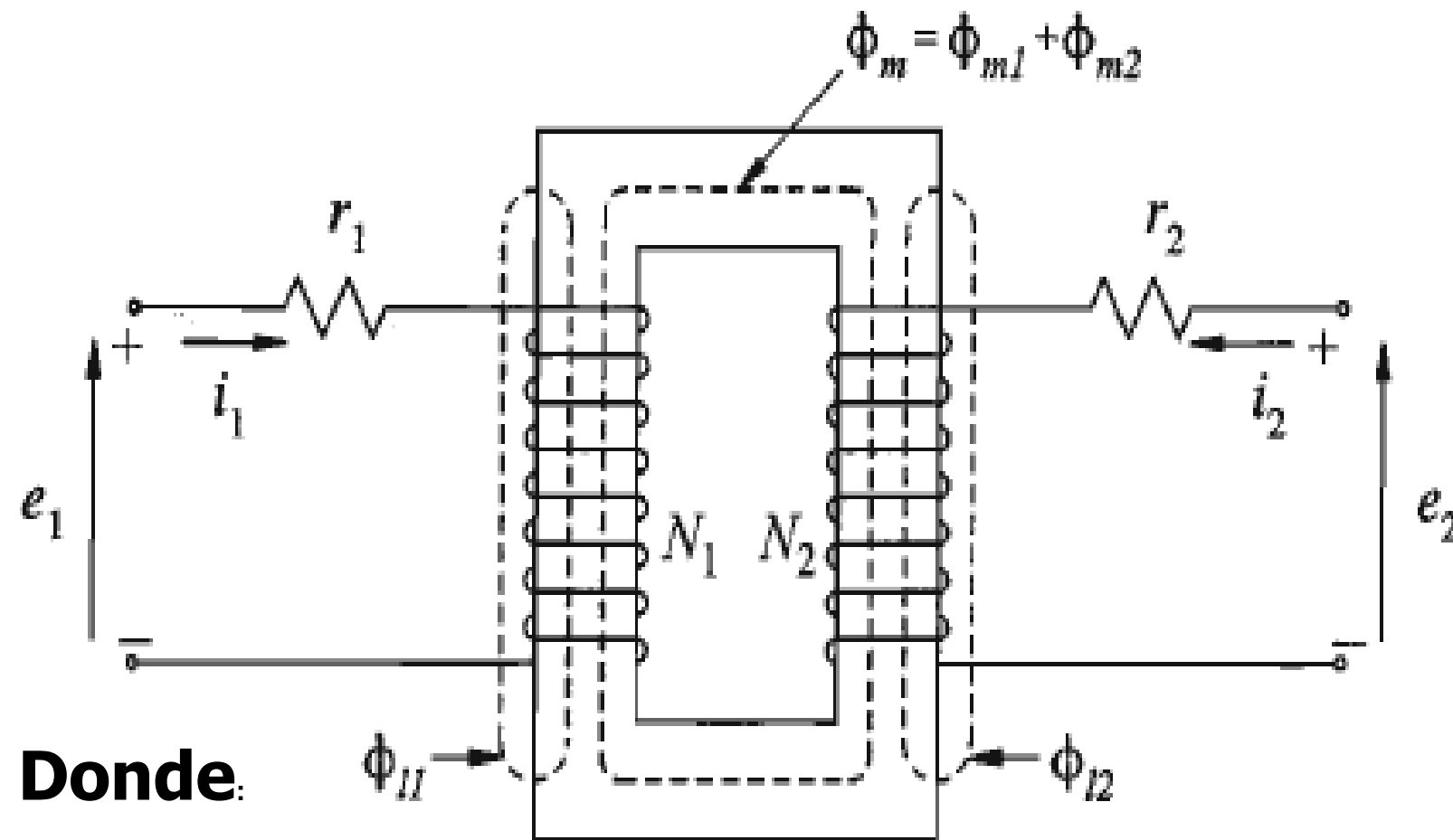
Donde

P = permeance of magnetic path

Φ = flux = $(MMF)P = NiP$

Circuitos Acoplados

Figura 2.19b: Circuito con doble excitación



Ecuaciones de Tensión

$$e_1 = \frac{d\psi_1}{dt} + r_1 i_1$$

$$e_2 = \frac{d\psi_2}{dt} + r_2 i_2$$

Inductancias Propias

$$L_{11} = N_1(\Phi_{m1} + \Phi_{l1}) / i_1$$

$$L_{22} = N_2(\Phi_{m2} + \Phi_{l2}) / i_2$$

$$L_{11} = L_{m1} + L_{l1}$$

$$L_{22} = L_{m2} + L_{l2}$$

$$\Phi_{m1} = N_1 i_1 P$$

$$\Phi_{m2} = N_2 i_2 P$$

Donde:

Φ_{m1} = mutual flux linking both windings due to current in winding 1 acting alone

Φ_{l1} = leakage flux linking winding 1 only

Φ_{m2} = mutual flux linking both windings due to current in winding 2 acting alone

Φ_{l2} = leakage flux linking winding 2 only

Enlaces de flujo en términos de inductancias propias y mutuas

$$\psi_1 = L_{11} i_1 + L_{12} i_2$$

$$\psi_2 = L_{21} i_1 + L_{22} i_2$$

Ecuaciones de Enlaces de Flujo

$$\psi_1 = N_1(\Phi_{m1} + \Phi_{l1}) + N_1 \Phi_{m2}$$

$$\psi_2 = N_2(\Phi_{m2} + \Phi_{l2}) + N_2 \Phi_{m1}$$

Inductancias Mutuas

$$L_{12} = N_1 \Phi_{m2} / i_2$$

$$L_{21} = N_2 \Phi_{m1} / i_1$$

$$L_{12} = L_{21} = N_1 N_2 P$$

9. Ecuaciones Básicas de una Máquina Síncrona

- ***Variación de la Permeancia***

La Permeancia puede ser graficada en función de la posición del rotor teniendo en cuenta que tiene el mismo valor absoluto en el Polo Norte y en el Polo Sur.

Así, para una máquina de $N_p=1$;

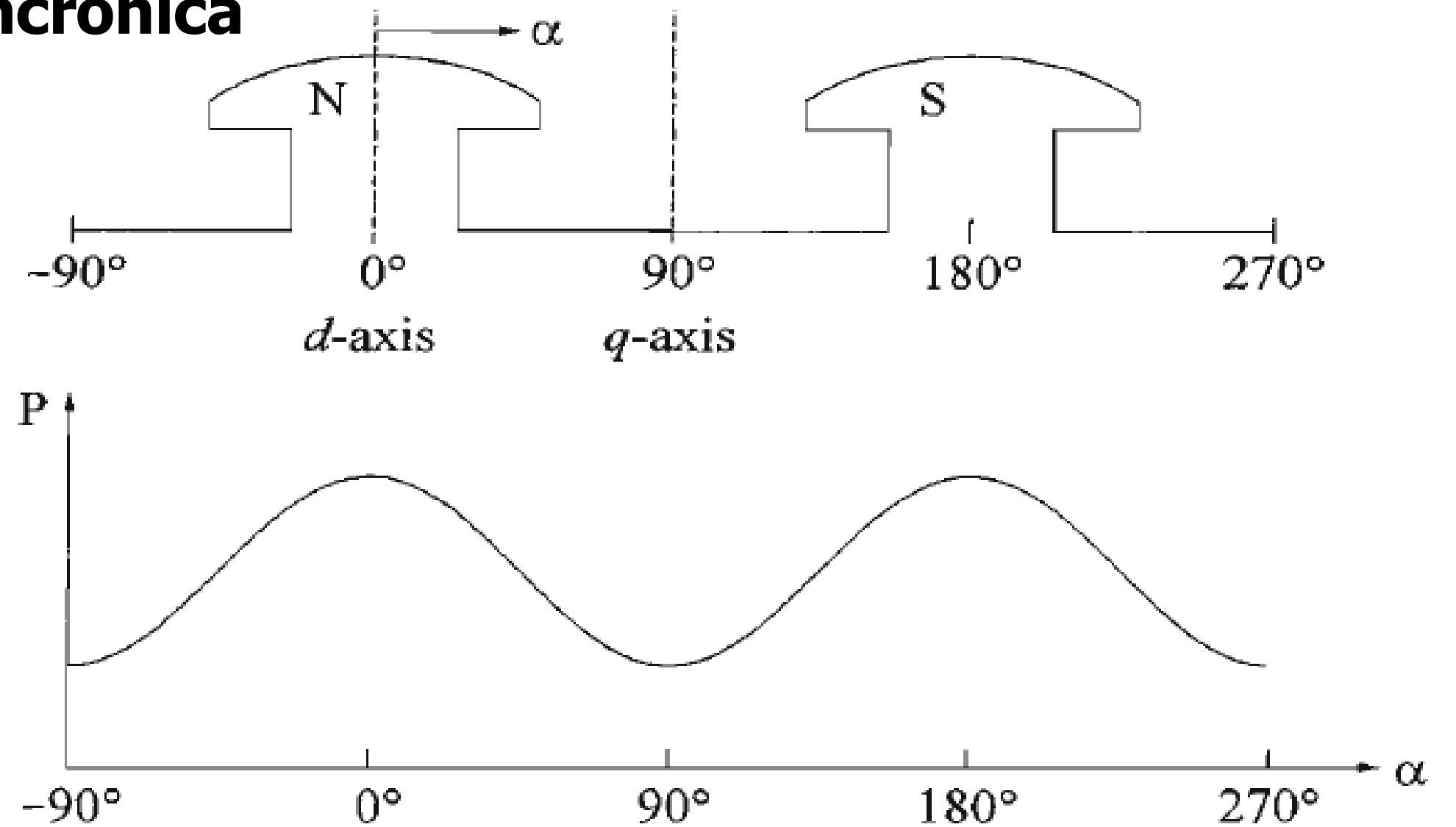


Figura 20: Variación de la Permeancia con la posición del Rotor. $N_p=1$

Sumado a la gran cantidad de circuitos involucrados, el hecho de que las inductancias mutuas y autoinductancias del estator sean dependientes de la posición del rotor, obviamente es un factor que complica la formulación de las ecuaciones de la máquina síncrona.

La variación de las inductancias está causada por la variación de la permeancia de los caminos del flujo magnético debido a la **no uniformidad** en los espacios de aire entre bobinas denominados entrehierro.

Este efecto (**diferencia**) es mayor en las máquinas de polos salientes en la cuales la permeancia en los dos ejes es notablemente diferente.

El flujo producido por el arrollamiento del estator tiene un camino a través de hierro del estator, atraviesa el entrehierro, circula en el hierro del rotor y regresa al estator a través del entrehierro.

Las variaciones de la permeancia en este camino en función de la posición del rotor puede ser descripta como:

$$P = P_0 + P_2 \cos 2\alpha$$

En la ecuación anterior, **α** es la distancia angular desde el **eje “d”** medida a lo largo de la perisferia tal como se ve en la **Figura 2.20**.

La variación doble de la frecuencia (***observar ecuación y figura***) es debida a la mínima permeancia del **eje “q”**.

Ecuación de las tensiones en las tres fases del Estator

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a = p\psi_a - R_a i_a$$

$$e_b = p\psi_b - R_a i_b$$

$$e_c = p\psi_c - R_a i_c$$

Donde

Enlaces de flujo de la fase “a”

$$\psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq}$$

- e_a, e_b, e_c = instantaneous stator phase to neutral voltages
- i_a, i_b, i_c = instantaneous stator currents in phases *a, b, c*
- e_{fd} = field voltage
- i_{fd}, i_{kd}, i_{kq} = field and amortisseur circuit currents
- R_{fd}, R_{kd}, R_{kq} = rotor circuit resistances
- l_{aa}, l_{bb}, l_{cc} = self-inductances of stator windings
- l_{ab}, l_{bc}, l_{ca} = mutual inductances between stator windings
- $l_{afd}, l_{akd}, l_{akq}$ = mutual inductances between stator and rotor windings
- $l_{ffd}, l_{kkd}, l_{kkq}$ = self-inductances of rotor circuits
- R_a = armature resistance per phase
- p = differential operator *d/dt*

Autoinductancias del Estator

La autoinductancia " L_{aa} " es igual a la relación (proporción) entre el flujo que enlaza el **devanado "a"** y la corriente " i_a " por el devanado, suponiendo las otras dos corrientes igual a cero.

La inductancia es directamente proporcional a la permeancia antes vista. Esta inductancia " L_{aa} " tiene:

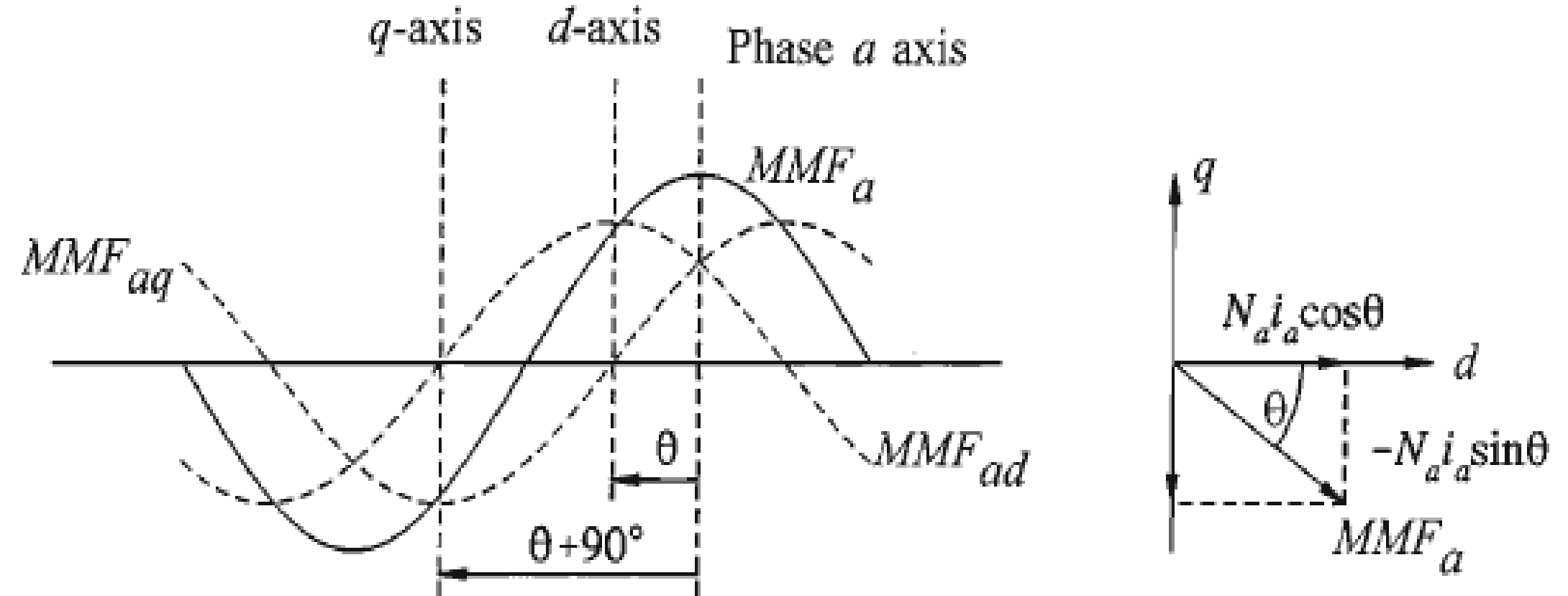
- un **máximo** para $\theta = 0^\circ$,
- un **mínimo** para $\theta = 90^\circ$,
- otro **máximo** para $\theta = 180^\circ$ y así sucesivamente.

Despreciando la presencia de segundas armónicas, la **fmm** de la **fase "a"** tiene forma sinusoidal con su máximo centrado en el eje de dicha fase (**fase "a"**).

El máximo de la **fmm** para la **fase "a"** es " **$N_a i_a$** ", donde " **N_a** " es el número de vueltas del bobinado por fase, en este caso del bobinado de la **fase "a"**.

En la **Figura 21** se ha graficado la onda de **fmm** descompuesta en dos **fmm sinusoidales**, una centrada con el eje “d” y la otra con el eje “q”.

Figura 21: Evolución de la Fmm Principal de una Fase y sus dos Componentes Centradas según los Dos Ejes (d y q)



$$\text{peak } MMF_{ad} = N_a i_a \cos\theta$$

El valor máximo de cada una de las componentes es:

$$\text{peak } MMF_{aq} = N_a i_a \cos(\theta + 90^\circ) = -N_a i_a \sin\theta$$

La razón por la cual se descompone la **Fmm** principal en componentes según los dos ejes, es debido a que cada una de ellas se encuentra en un espacio específico del entrehierro.

El flujo en el entrehierro por polo según componentes “d y q” es:

$$\Phi_{gad} = (N_a i_a \cos\theta) P_d$$

Donde:

$$\Phi_{gaq} = (-N_a i_a \sin\theta) P_q$$

P_d y **P_q** son los coeficientes de permeabilidad de los ejes “d” y “q” respectivamente.

El flujo total en el entrehierro debido a la **fase "a"** es:

$$\begin{aligned}\Phi_{gaa} &= \Phi_{gad} \cos\theta - \Phi_{gaq} \sin\theta \\ &= N_a i_a (P_d \cos^2\theta + P_q \sin^2\theta) \\ &= N_a i_a \left(\frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right)\end{aligned}\quad \text{ec. (2)}$$

La autoinductancia de la **fase "a"** debido al flujo en el entrehierro es

$$\begin{aligned}l_{gaa} &= \frac{N_a \Phi_{gaa}}{i_a} \\ &= N_a^2 \left(\frac{P_d + P_q}{2} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos 2\theta \right) \\ &\longrightarrow = L_{g0} + L_{aa2} \cos 2\theta\end{aligned}$$

La autoinductancia total "l_{aa}" se obtiene adicionando a la anterior la inductancia "**L_{al}**" que representa el flujo de dispersión que no cruza el entrehierro, así:

$$\begin{aligned}l_{aa} &= L_{al} + l_{gaa} \\ &= L_{al} + L_{g0} + L_{aa2} \cos 2\theta \\ &= L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\theta\end{aligned}$$

Los arrollamientos de las **fases "b"** y **"c"** son idénticos al de la **fase "a"**, pero se encuentran, físicamente, desfasados 120° y 240° respectivamente esto, expresado matemáticamente, queda:

$$l_{bb} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$l_{cc} = L_{aa0} + L_{aa2} \cos 2\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

La variación de " l_{aa} ", " l_{bb} " y " l_{cc} " con la posición " θ " es la siguiente

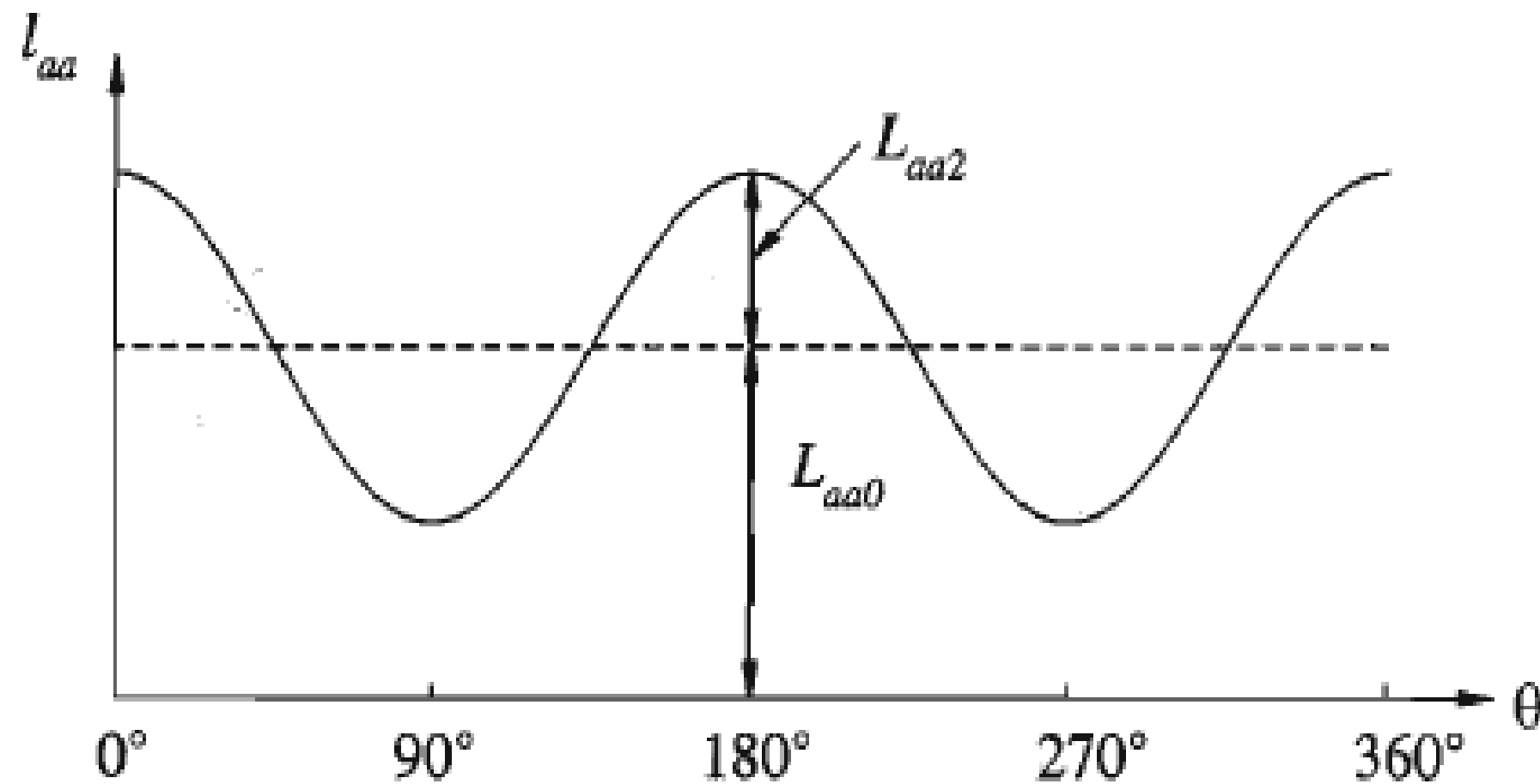


Figura 22: Variación de la Autoinductancia de una Fase de Estator (fase a)

Inductancias Mutuas del Estator

Las inductancias mutuas entre dos arrollamientos del estator también presentan una segunda armónica debido a la forma del rotor.

La inductancia mutua siempre es negativa y tienen su valor máximo absoluto cuando los polos Norte y Sur se encuentran equidistantes de los centros de los dos devanados en cuestión.

Así, por ejemplo, "***lab***" tiene su máximo absoluto cuando $\theta = -30^\circ$ o $\theta = 150^\circ$.

La inductancia mutua "***lab***" se calcula evaluando el flujo en el entrehierro " Φ_{gba} " enlazado por **la fase "b"** cuando se encuentra excitada solamente la **fase "a"**,

Para calcular el flujo concatenado por la **fase "b"** a partir de la expresión del flujo de la **fase "a"**, se debe reemplazar " θ " en la **ecuaciones (2)**, por " $(\theta - 2\pi/3)$ ", con lo que queda:

$$\begin{aligned}\Phi_{gba} &= \Phi_{gad} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) - \Phi_{gaq} \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ &= N_a i_a \left[P_d \cos\theta \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + P_q \sin\theta \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ &= N_a i_a \left[-\frac{P_d + P_q}{4} + \frac{P_d - P_q}{2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \right]\end{aligned}$$

La inductancia mutua entre las **fases "a"** y "**b"**" debido al flujo en el entrehierro, es:

$$\begin{aligned}l_{gba} &= \frac{N_a \Phi_{gba}}{i_a} \\ &\rightarrow = -\frac{1}{2} L_{g0} + L_{ab2} \cos\left(2\theta - \frac{2\pi}{3}\right)\end{aligned}$$

La inductancia mutua entre las **fases "a"** y **"b"** debido al flujo en el entrehierro considerando el flujo de dispersión es:

$$l_{ab} = l_{ba} = -L_{ab0} + L_{ab2} \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$\longrightarrow = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\theta + \frac{\pi}{3})$$

Haciendo el mismo análisis para las **fases "b"** y **"c"**

$$l_{bc} = l_{cb} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\theta - \pi)$$

$$l_{ca} = l_{ac} = -L_{ab0} - L_{ab2} \cos(2\theta - \frac{\pi}{3})$$

En la **Figura 23** se grafica la variación de la inductancia mutua entre arrollamientos del estator.

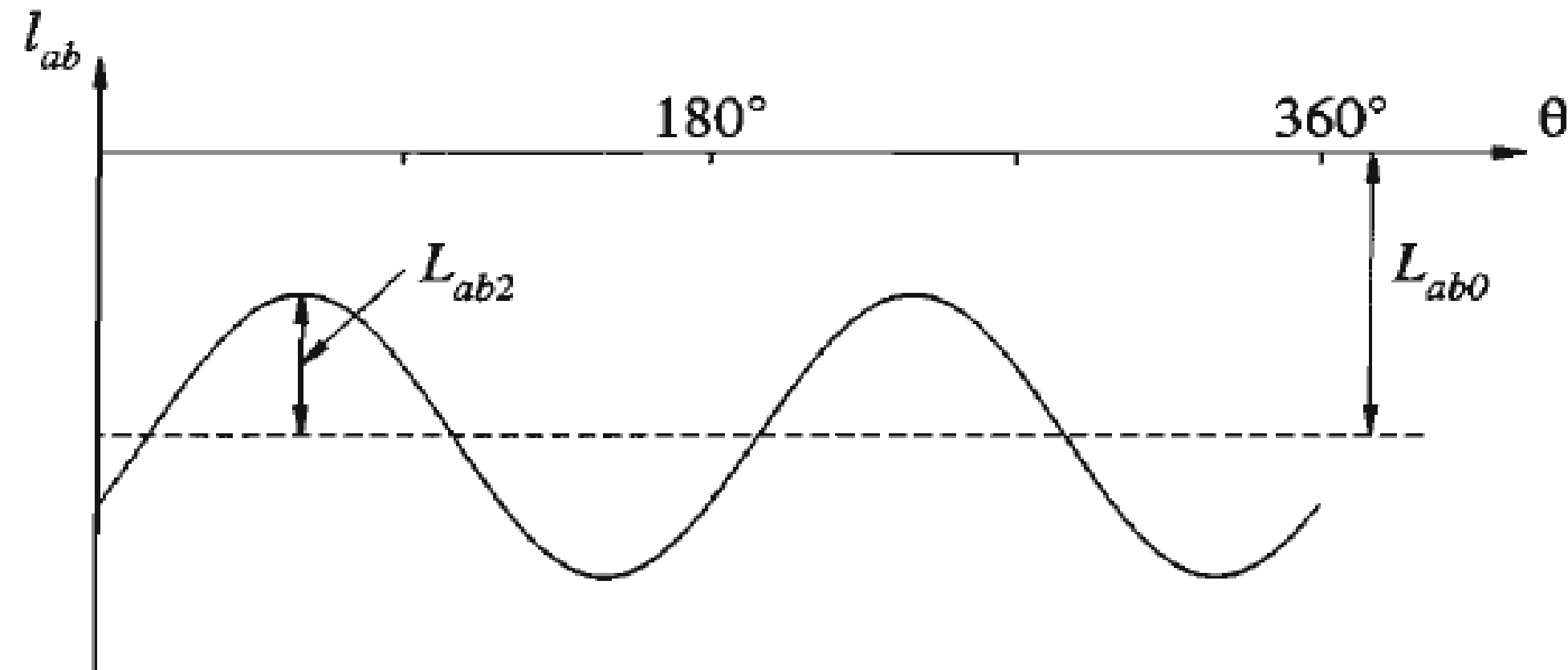


Figura 23: Variación de la Inductancia Mutua entre dos Arrollamientos del Estator (fase a y b)

Inductancias Mutuas entre Arrollamientos de Estator y Rotor

Despreciando las variaciones en el entrehierro debidas a las ranuras del estator, el circuito rotórico ve una permeancia constante. Por lo tanto, las variaciones en las inductancias mutuas son debidas al movimiento relativo entre los arrollamientos.

Cuando el devanado del estator se encuentra alineado con el arrollamiento del rotor, el flujo concatenado por ambos arrollamientos es máximo.

Cuando los dos arrollamientos se encuentran desplazados 90° el flujo concatenado por los dos arrollamientos es cero y la inductancia mutua también es cero.

Tomando en cuenta la distribución sinusoidal de la **Fmm** y la onda de flujo, se pueden escribir las ecuaciones de inductancia mutua entre la **fase "a"** y el **circuito rotórico**:

$$l_{afd} = L_{afd} \cos \theta$$

$$l_{akd} = L_{akd} \cos \theta$$

$$\begin{aligned} l_{akq} &= L_{akq} \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2}\right) \\ &= -L_{akq} \sin \theta \end{aligned}$$

Considerando la inductancia mutua entre la **fase "b"** y el **circuito rotórico**, "**θ**" es reemplazado por (**θ - 2π/3**). Y en el caso de la **fase "c"**, "**θ**" es reemplazado por (**θ + 2π/3**)

Hasta acá se han obtenido todas las expresiones correspondientes a las inductancias que aparecen en la ecuación de la tensión de estator

Recordar la ecuación de flujo: $\Psi_a = -l_{aa}i_a - l_{ab}i_b - l_{ac}i_c + l_{afd}i_{fd} + l_{akd}i_{kd} + l_{akq}i_{kq}$

Sustituyendo las expresiones encontradas en la anterior se obtiene: $\Psi_a = -i_a[L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2\theta] + i_b[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta + \frac{\pi}{3})]$

Y extendiendo sobre las otras fases, se tiene

$$\begin{aligned}\Psi_b = & i_a[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta + \frac{\pi}{3})] - i_b[L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2(\theta - \frac{2\pi}{3})] \\ & + i_c[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta - \pi)] + i_{fd}L_{afd}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ & + i_{kd}L_{akd}\cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) - i_{kq}L_{akq}\sin(\theta - \frac{2\pi}{3})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}& + i_c[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta - \frac{\pi}{3})] + i_{fd}L_{afd}\cos\theta \\ & + i_{kd}L_{akd}\cos\theta - i_{kq}L_{akq}\sin\theta\end{aligned}$$

Ec. (3)

y

$$\begin{aligned}\Psi_c = & i_a[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta - \frac{\pi}{3})] + i_b[L_{ab0} + L_{aa2}\cos(2\theta - \pi)] \\ & - i_c[L_{aa0} + L_{aa2}\cos 2(\theta + \frac{2\pi}{3})] + i_{fd}L_{afd}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ & + i_{kd}L_{akd}\cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) - i_{kq}L_{akq}\sin(\theta + \frac{2\pi}{3})\end{aligned}$$

Ecuación de los circuitos del rotor

$$e_{fd} = p\psi_{fd} + R_{fd}i_{fd}$$

$$0 = p\psi_{kd} + R_{kd}i_{kd}$$

$$0 = p\psi_{kq} + R_{kq}i_{kq}$$

Enlaces de flujo de los circuitos del rotor

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd}\left[i_a \cos\theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd}\left[i_a \cos\theta + i_b \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

Ec. (4)

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} + L_{akq}\left[i_a \sin\theta + i_b \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_c \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)\right]$$

10 La Transformación dq0

En las **ecuaciones (3) y (4)** las corrientes de estator se combinan y presentan en los distintos **ejes "d" y "q"**. Esto sugiere la posibilidad de una nueva transformación de las corrientes de estator en nuevas variables

Ecuaciones (5)

$$i_d = k_d \left[i_a \cos \theta + i_b \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$i_q = -k_q \left[i_a \sin \theta + i_b \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

Las constante **k_d** y **k_q** son arbitrarias y sus valores son elegidos de manera que simplifiquen los coeficientes numéricos de las ecuaciones.

En algunas literaturas de teoría de máquinas sincrónicas [1], **k_d** y **k_q** son tomadas igual a "2/3".

¿¿¿Porque, k_d = k_q = 2/3???

Veamos:

- En condiciones de equilibrio, el máximo de **"i_d"** e **"i_q"** son iguales al máximo valor de la corriente del estator **"I_m"**, así:

Para condiciones de equilibrio:

$$i_a = I_m \sin \omega_s t$$

$$i_b = I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right)$$

$$i_c = I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right)$$

Sustituyendo en la ecuación de “ i_d ”

$$i_d = k_d \left[I_m \sin \omega_s t \cos \theta + I_m \sin \left(\omega_s t - \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + I_m \sin \left(\omega_s t + \frac{2\pi}{3} \right) \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$

$$i_d = k_d \frac{3}{2} I_m \sin(\omega_s t - \theta)$$

- Para que el valor pico de “ i_d ” sea igual a la corriente del estator “ I_m ”, **k_d debe ser igual a 2/3.**
- Procediendo de igual forma con la expresión de “ i_q ” se observa que **k_d debe ser igual a 2/3**

$$i_q = -k_q \frac{3}{2} I_m \cos(\omega_s t - \theta)$$

Para darle un completo grado de libertad, la tercer componente empleada para la transformación, debe ser tal que las corrientes de las tres fases se transformen en tres variables.

Mientras las dos componentes de la corriente “ i_d ” e “ i_q ” producen en mismo campo al producido por “ I_m ”, la tercera componente no debe producir campo en el entrehierro. Por lo tanto, una tercera variable conveniente es la **corriente de secuencia cero “ i_0 ” asociada con las componentes simétricas.**

$$i_0 = \frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c)$$

En condiciones de equilibrio $i_a + i_b + i_c = 0$, por lo tanto $i_0 = 0$.

La transformación desde las variables de fases "abc" hacia las variables dq0 se pueden expresar matricialmente de la siguiente manera:

Transformación dq0 Directa:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

La transformación dq0 Inversa se realiza a través de:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

Las transformaciones anteriores son aplicables a los flujos concatenados del estator, del rotor y a las tensiones.

Enlaces de flujo del estator en componentes d q 0

Partiendo de las expresiones de flujo dadas por las **ecuaciones (4)**, aplicando la transformación dq0 y empleando una adecuada reducción sobre los términos trigonométricos, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\psi_d = -(L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2})i_d + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd}$$

$$\psi_q = -(L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2}L_{aa2})i_q + L_{akq}i_{kq}$$

$$\psi_0 = -(L_{aa0} - 2L_{ab0})i_0$$

Definiendo nuevas inductancias

$$L_d = L_{aa0} + L_{ab0} + \frac{3}{2}L_{aa2}$$

$$L_q = L_{aa0} + L_{ab0} - \frac{3}{2}L_{aa2}$$

$$L_0 = L_{aa0} - 2L_{ab0}$$

Las primeras expresiones se reducen a:

$$\psi_d = -L_d i_d + L_{afd}i_{fd} + L_{akd}i_{kd}$$

$$\psi_q = -L_q i_q + L_{akq}i_{kq}$$

$$\psi_0 = -L_0 i_0$$

Enlaces de flujo del Rotor en componentes d q 0

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - L_{afd}[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - L_{akd}[i_a \cos\theta + i_b \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \cos(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} + L_{akq}[i_a \sin\theta + i_b \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) + i_c \sin(\theta + \frac{2\pi}{3})]$$

Sustituyendo en esta expresión los valores de “**i_d**” e “**i_q**”

$$\psi_{fd} = L_{ffd}i_{fd} + L_{fkd}i_{kd} - \frac{3}{2}L_{afd}i_d$$

$$\psi_{kd} = L_{fkd}i_{fd} + L_{kkd}i_{kd} - \frac{3}{2}L_{akd}i_d$$

$$\psi_{kq} = L_{kkq}i_{kq} - \frac{3}{2}L_{akq}i_q$$

Ecuaciones de Tensión del Estator en componentes dq0

The voltage equations of the three phases are

$$e_a = \frac{d\psi_a}{dt} - R_a i_a = p\psi_a - R_a i_a$$

$$e_b = p\psi_b - R_a i_b$$

$$e_c = p\psi_c - R_a i_c$$

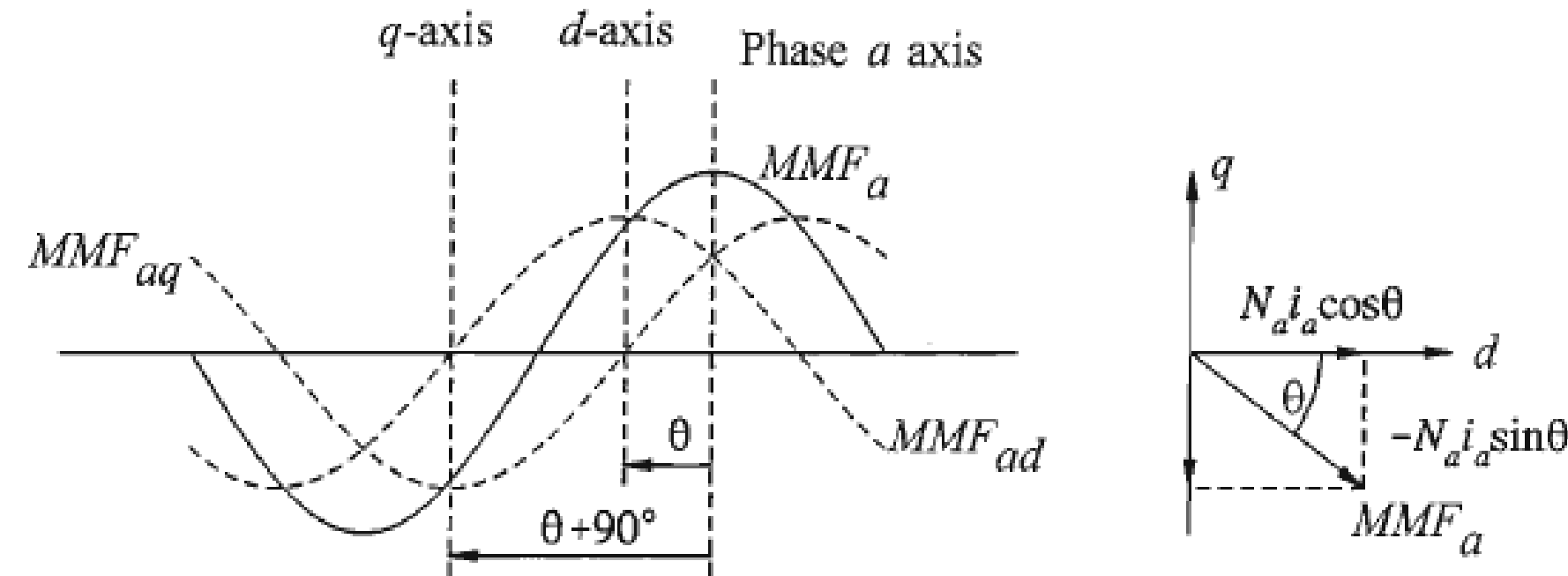
$$e_d = p\psi_d - \psi_q p\theta - R_a i_d$$

$$e_q = p\psi_q + \psi_d p\theta - R_a i_q$$

$$e_0 = p\psi_0 - R_a i_0$$

Aplicando la transformada dq0:

El ángulo “ **θ** ” como se definió anteriormente y se ilustró en la **Figura 2.21**, es el ángulo entre el eje de la **fase “a”** y el **eje “d”**.



El término “ **$p.\theta$** ” representa la velocidad angular del rotor “ **ω_r** ”.

En un sistema de **50 Hz**, en estado estacionario $\longrightarrow$ **$p\theta = \omega_r = \omega_s = 2\pi 50 = 314.16 \text{ rad/s}$** .

- 1- Los términos $\psi_q p\theta$ y $\psi_d p\theta$ resultan de la transformación a una referencia rotante y reflejan el hecho de que la onda de flujo que rota en sincronismo con el rotor crea tensiones en los arrollamientos de armadura.
- 2- Los términos $\psi_q p\theta$ y $\psi_d p\theta$ se denominan “velocidad de tensión” (debido a que el flujo cambia en el espacio) y los términos $p\psi_d$ y $p\psi_q$ “tensiones transformadas” (debido a que el flujo cambia en el tiempo).
- 3- La Velocidad de Tensión es la componente dominante de la tensión del estator.
- 4- En estado estacionario, $p\psi_d$ y $p\psi_q$ obviamente son cero.

Ecuaciones de la Potencia Eléctrica en componentes dq0

La potencia trifásica instantánea del estator es:

$$P_t = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c$$

En términos de las componentes dq0:

$$P_t = \frac{3}{2}(e_d i_d + e_q i_q + 2e_0 i_0)$$

Reemplazando los valores de e_d , e_q y e_0 encontradas anteriormente:

$$P_t = \frac{3}{2}[(i_d p\psi_d + i_q p\psi_q + 2i_0 p\psi_0) + (\psi_d i_q - \psi_q i_d)\omega_r - (i_d^2 + i_q^2 + 2i_0^2)R_a]$$

“velocidad de cambio de la energía magnética de armadura”

+ “potencia transferida a través del entrehierro”

- “pérdidas en la resistencia de armadura”

Ecuaciones de la Cupla o Momento de Giro en componentes dq0

La cupla o momento de giro en el entrehierro es obtenida dividiendo la potencia transferida a través del entrehierro (esto es la potencia correspondiente a las tensiones por efecto de la velocidad) por la velocidad del rotor en radianes mecánicos por segundo.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{\omega_r}{\omega_{mech}} \\ &= \frac{3}{2}(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \frac{p_f}{2} \end{aligned}$$

Interpretación física de la transformación dq0

La onda de fmm combinada debida a i_a , i_b e i_c recorre la periferia del estator a una velocidad ω_s rad/s. **Esta es también la velocidad del rotor.**

Por esta razón en operación sincrónica balanceada, la onda de fmm de armadura se muestra en una posición con respecto al rotor y tiene una distribución sinusoidal.

Dado que una función seno puede ser expresada como una suma de dos funciones seno, la fmm debida a los arrollamientos del estator puede ser descompuesta en dos ondas de fmm sinusoidalmente distribuidas y estacionarias con respecto al rotor, tal que una tiene su valor de pico sobre el **eje "d"** y la otra tiene su valor de pico sobre el **eje "q"**

Por esta razón **i_d** puede ser interpretada como la corriente instantánea en un arrollamiento de armadura ficticio que rota a la misma velocidad que el rotor, y que se mantiene en una posición tal que su eje coincide siempre con el **eje "d"**.

El valor de la corriente en este arrollamiento es tal que él da por resultado la misma fmm sobre el **eje "d"** que la que producen las verdaderas corrientes de fase que fluyen en los arrollamientos de armadura.

Una interpretación similar se aplica a **" i_q "**, excepto que ella actúa sobre el **eje "q"** en lugar del **eje "d"**.

Las fuerzas magnetomotrices debidas a **" i_d "** e **" i_q "** son estacionarias con respecto al rotor y actúan sobre caminos de permeancia constate. Por eso las inductancias **L_d** y **L_q** son constantes.

Para condiciones de estado estacionario balanceado, las corrientes de fase pueden ser escritas como:

$$i_a = I_m \sin(\omega_s t + \phi)$$

$$i_b = \bar{I}_m \sin(\omega_s t + \phi - \frac{2\pi}{3})$$

$$i_c = I_m \sin(\omega_s t + \phi + \frac{2\pi}{3})$$

Donde **$\omega_s = 2\pi f$** [rad/s] es la frecuencia angular de las Corrientes de estator.

Usando la transformación dq0

$$i_d = I_m \sin(\omega_s t + \phi - \theta)$$

$$i_q = -I_m \cos(\omega_s t + \phi - \theta)$$

$$i_0 = 0$$

En operación sincrónica la velocidad del rotor es igual a la frecuencia angular de las corrientes de estator. De esto:

$$\theta = \omega_r t = \omega_s t$$

Por esta razón

$$i_d = I_m \sin\phi = \text{constant}$$

$$i_q = -I_m \cos\phi = \text{constant}$$

En operación de estado estacionario balanceada “**i_d**” e “**i_q**” son constantes. En otras palabras, corrientes alternas de ase en el sistema de **referencia “abc”** aparecen como corrientes continuas en el sistema de referencia “**dq0**”.

La **transformación dq0**, puede ser vista como un medio de referir las magnitudes físicas del estator al lado del rotor. Esto es análogo a referir magnitudes físicas del lado secundario en un transformador al lado primario por medio de la relación de vueltas.

La transformación inversa, puede ser similarmente vista como el medio para referir las magnitudes físicas del rotor al lado de estator.

El análisis de las ecuaciones de la máquina síncrona en términos de las variables **dq0** es considerablemente más simple que en términos de las magnitudes físicas de fase por las siguientes razones:

- 1. Las ecuaciones del comportamiento dinámico tienen inductancias constantes.**
- 2. Para condiciones balanceadas, las magnitudes físicas de secuencia cero desaparecen.**
- 3. Para operación de estado estacionario balanceada, las magnitudes físicas del estator tienen valores constantes. Para otros modos de operación, ellas varían con el tiempo. Los estudios de estabilidad involucran variaciones lentas que tienen frecuencias por debajo de 2 a 3 Hz.**
- 4. Los parámetros asociados con los ejes "d" y "q" pueden ser directamente medidos por medio de ensayos de los bornes.**

Bajo condiciones de estado estacionario balanceadas, la **transformación dq0** equivale al uso de fasores para representar magnitudes físicas alternas de fase del estator.

Las ventajas de emplear variables dq0 son similares a las de usar fasores para el análisis de estado estacionario de circuitos de corriente alterna, en lugar de trabajar directamente con magnitudes sinusoidales variables en el tiempo.

11. Reactancias de eje directo y de eje en cuadratura del generador sincrónico: sincrónicas (x_d , x_q), transitorias (x'_d , x'_q) y subtransitorias (x''_d , x''_q)

La máquina sincrónica está construida por varios circuitos acoplados inductivamente que se mueven unos respecto de otros. Debido al movimiento relativo entre los campos originados, los valores de inductancias propias y mutuas varían periódicamente con la posición del rotor.

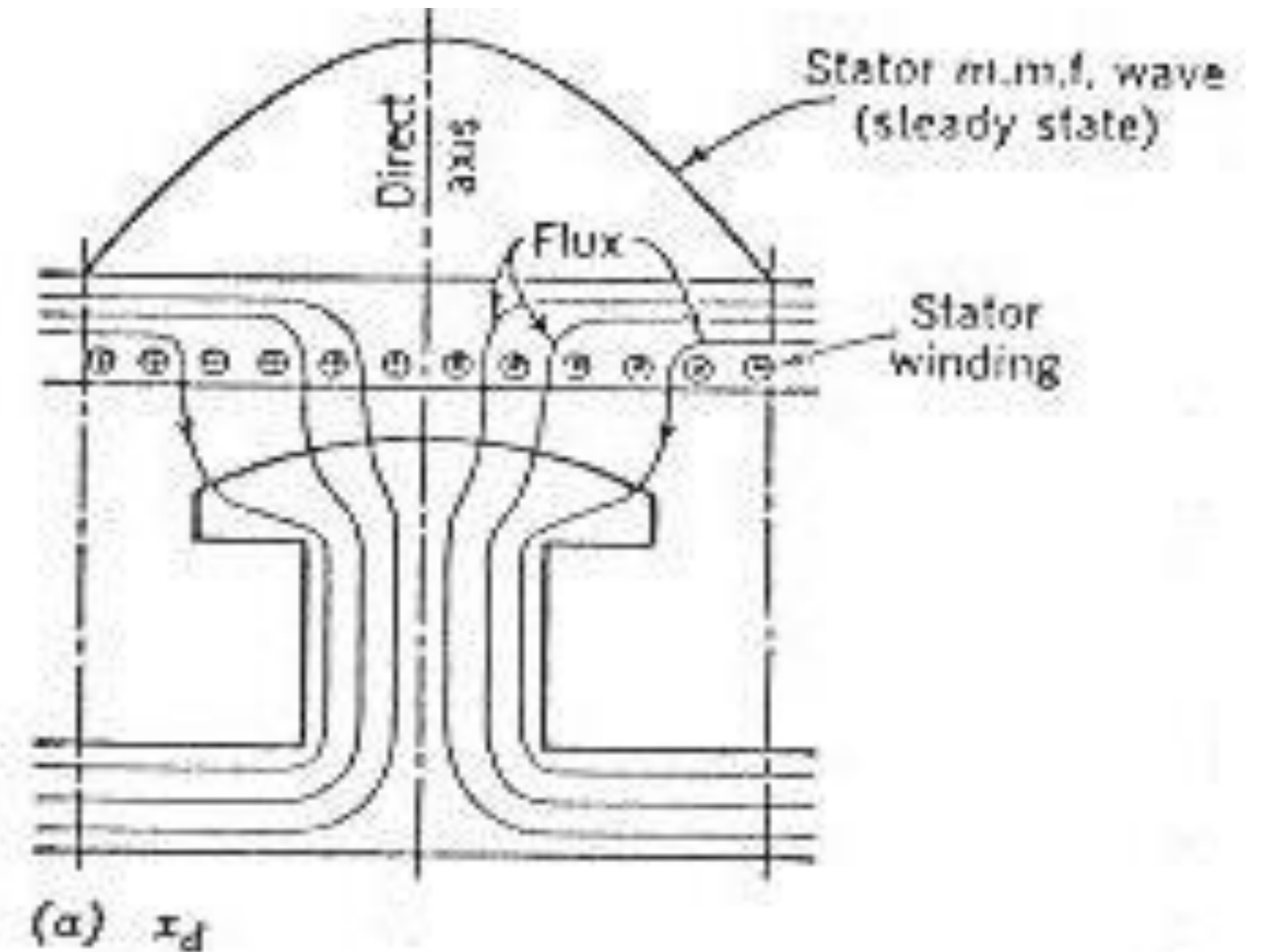
Para realizar este análisis se considera una máquina trifásica de polos salientes ideal, en la cual se desprecia todo tipo de pérdidas, es decir: saturación y las pérdidas en el hierro.

Reactancia Sincrónica de Eje Directo " x_d ":

Se considera el circuito rotórico cerrado pero no excitado.

Supóngase que se alimenta al estator con un sistema de secuencia positiva, que produce un campo rotante con velocidad sincrónica.

Simultáneamente se hace girar el rotor con velocidad sincrónica, de modo que el campo rotante del estator es estacionario respecto del otro que gira a la misma velocidad que el.



En estas condiciones, el flujo será máximo cuando se enfrenta al máximo de FMM del estator con el polo del rotor.

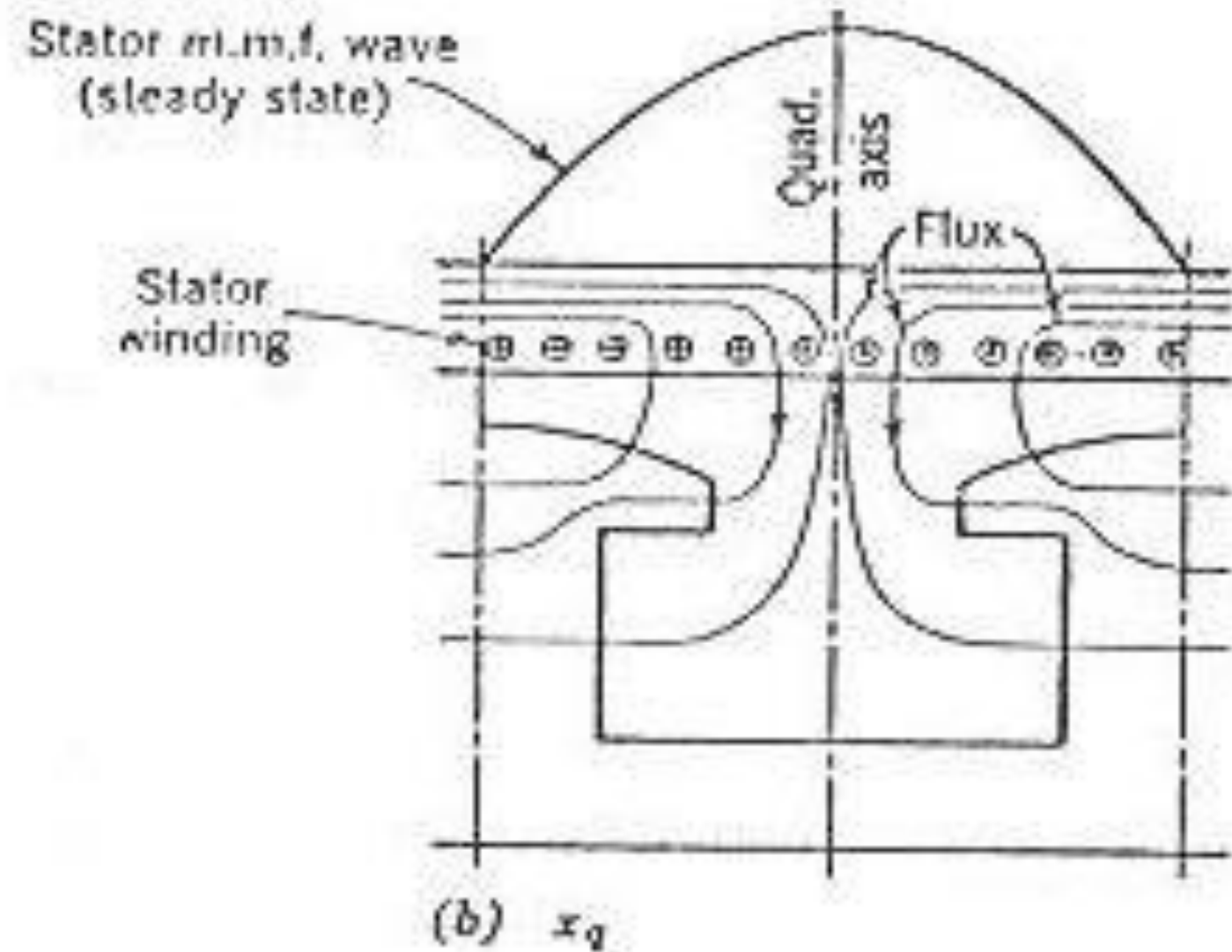
En estas condiciones, se presenta el camino con máxima permeancia. **Así, el valor de flujo concatenado por la fase del bobinado de armadura en por unidad de la corriente de armadura es el valor de la inductancia de eje directo “ L_d ”.**

La reactancia de eje directo es “ $x_d = \omega L_d$ ”

Reactancia Sincrónica de Eje en Directo "xd":

Se considera el circuito rotórico cerrado pero no excitado.

En las mismas condiciones del caso anterior, y ***enfrentando el máximo de la FMM con el espacio interpolar, se obtiene el camino de máxima reluctancia y se obtiene el valor máximo de Inductancia.***



Así, el valor de flujo concatenado por la fase del bobinado de armadura en por unidad de la corriente de armadura es el valor de la inductancia de eje directo "**Ld**".

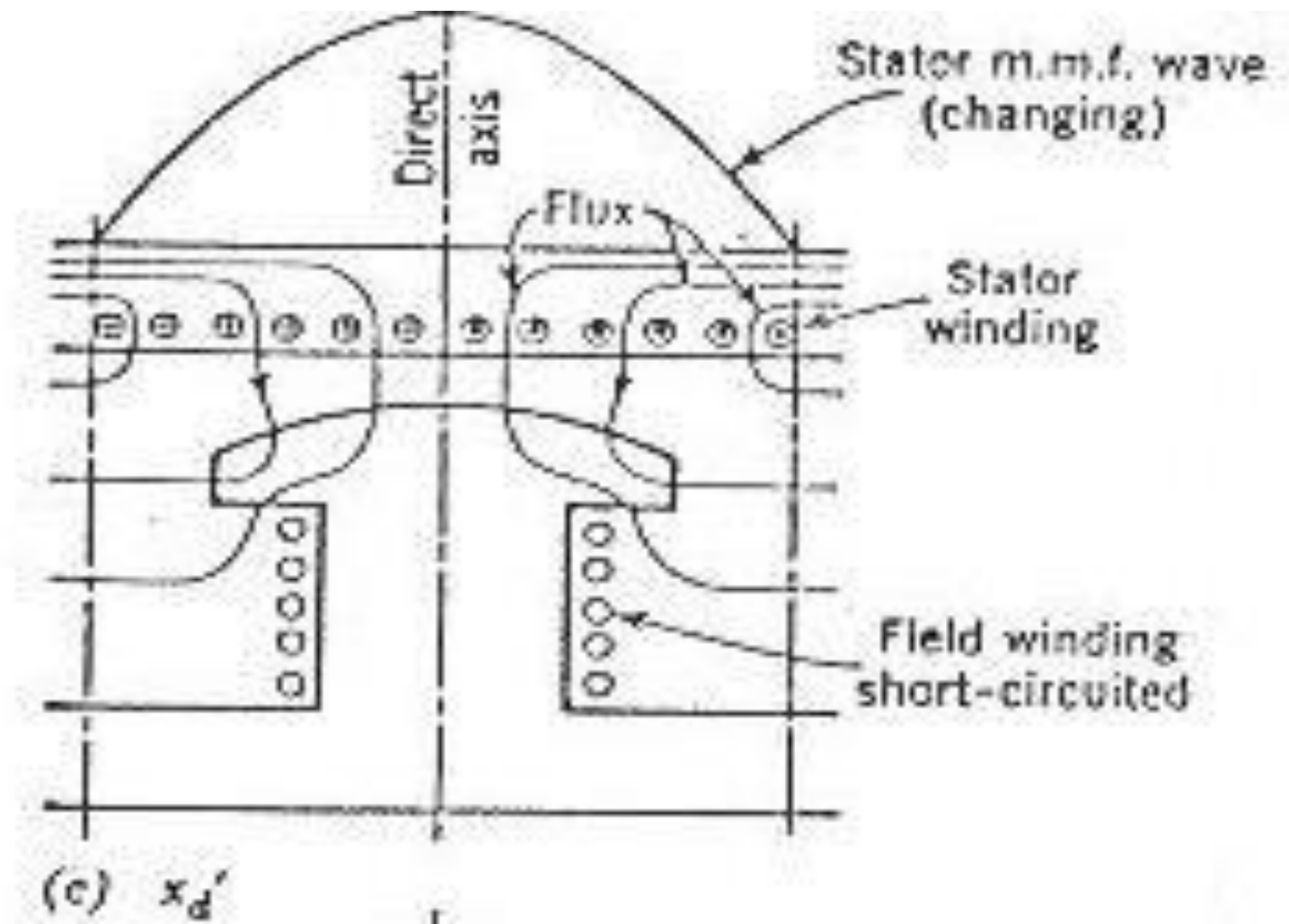
La reactancia de eje en cuadratura es " $x_q = \omega L_q$ "

Reactancia Transitoria de Eje Directo "x'd":

Se considera el circuito rotórico cerrado pero no excitado.

En las mismas condiciones anteriormente vistas, ***se supone la aplicación "súbita" de alimentación al estator.***

En los dos casos anteriores se supuso estado estacionario, en este caso al aparecer súbitamente la corriente en el estator, trata de establecerse un flujo que contrarreste el efecto (alimentación del estator).



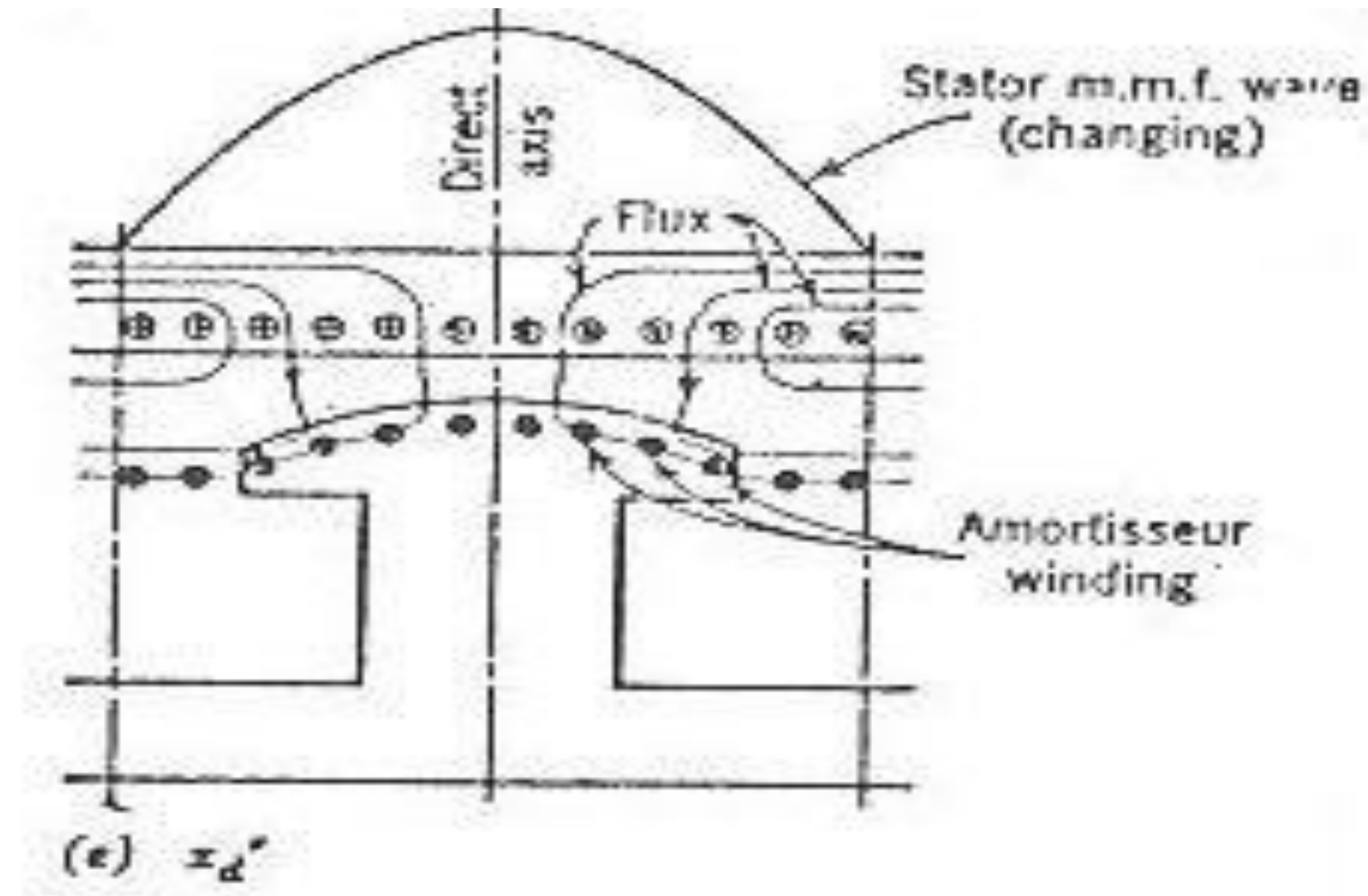
En principio el flujo se puede establecer por caminos de muy baja permeancia, por esta razón el flujo es pequeño y en consecuencia también lo es la Inductancia transitoria de eje directo " **$L'd$** "

La reactancia transitoria de eje directo es " $x'd = \omega L'd$ " << " x_d "

Reactancia Subtransitoria de Eje Directo " x_d'' ":

Se considera el circuito rotórico cerrado pero no excitado.

Considerando la aplicación súbita de alimentación en el estator, ***se tiene en cuenta la presencia del arrollamiento amortiguador.***



En estos arrollamientos se inducirán corrientes que se oponen al establecimiento del flujo, que de este modo es obligado a caminos de muy baja permeancia.

Nota 1 i!!!! Este efecto, aunque con menor intensidad, se presenta también en máquinas sin arrollamiento amortiguador debido a las corrientes inducidas en el hierro del núcleo del rotor.

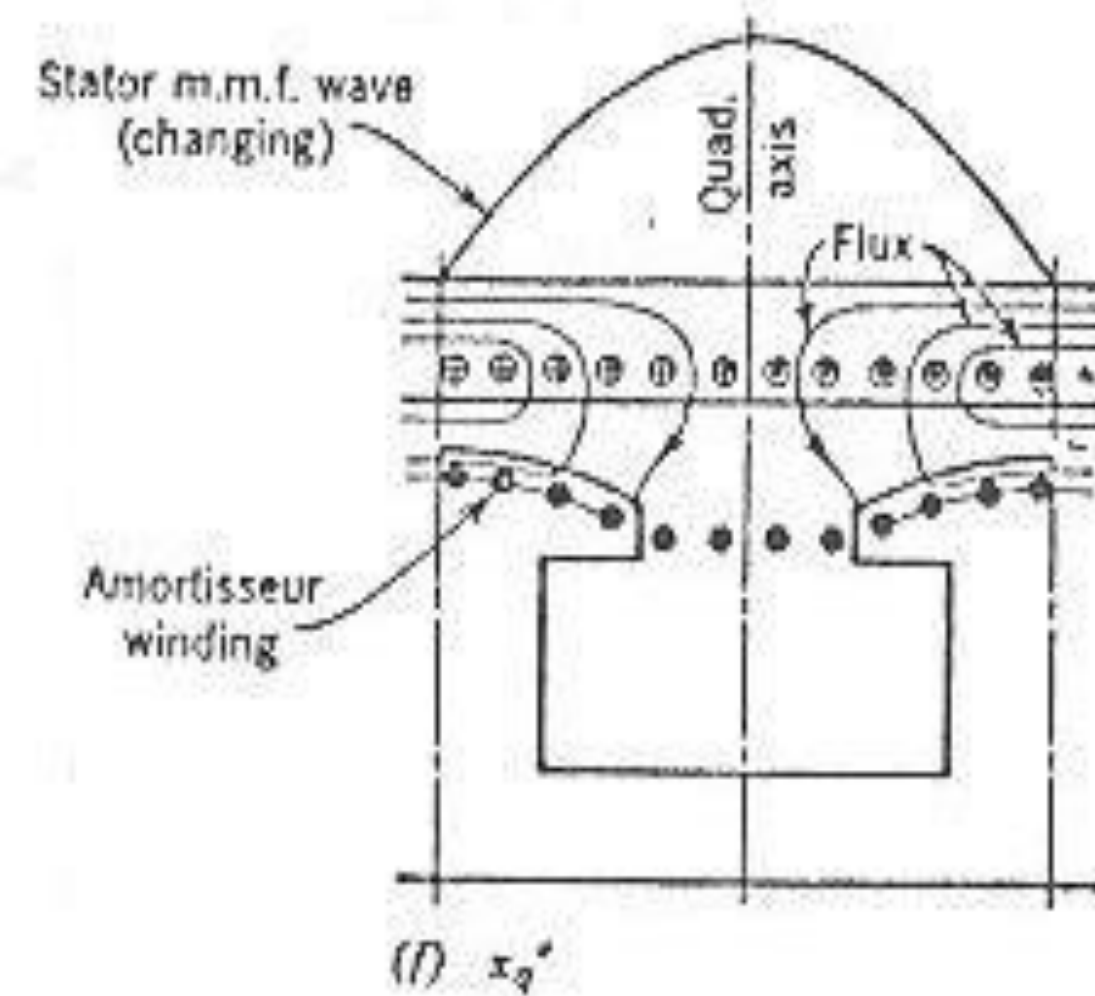
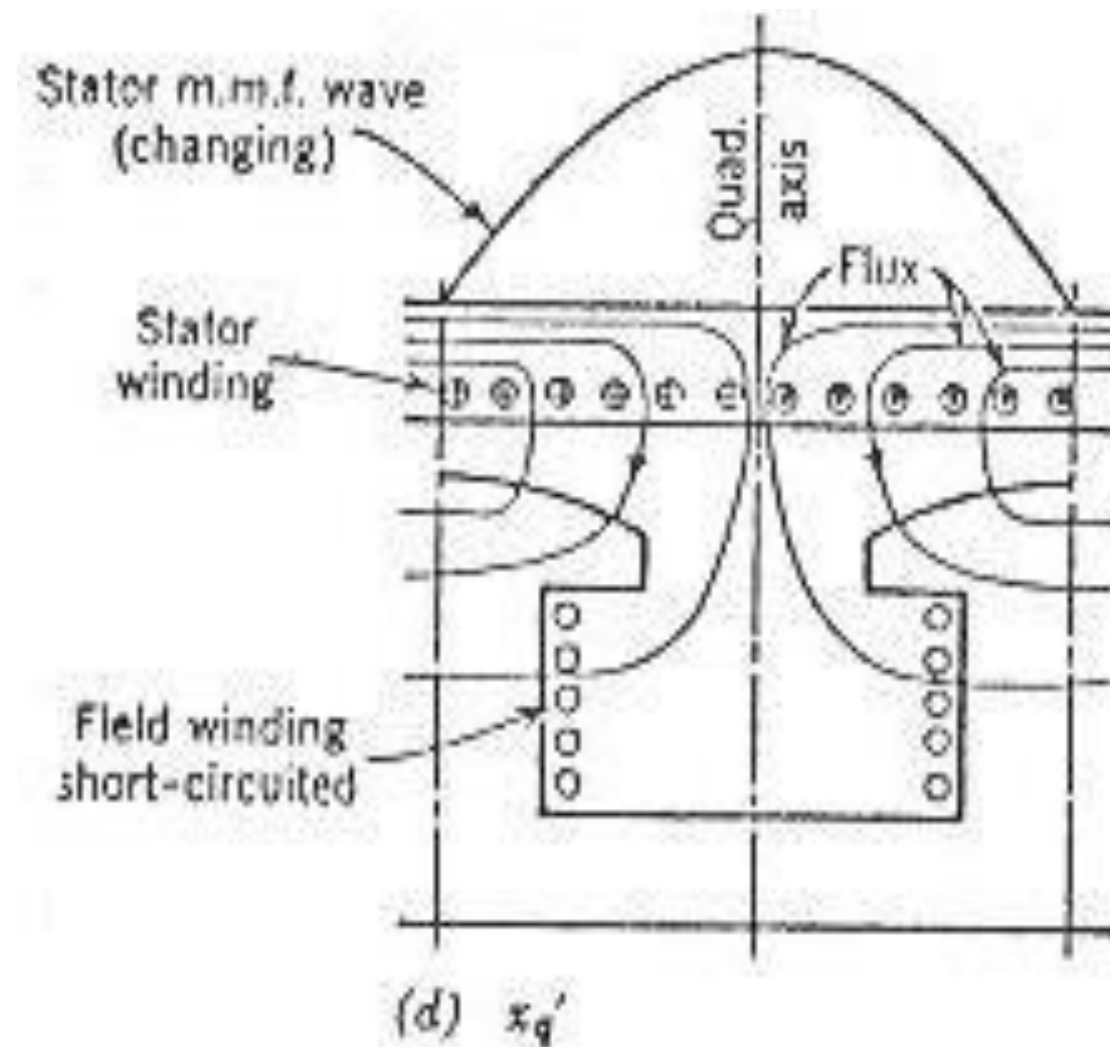
Nota 2 i!!!! La inductancia subtransitoria " L_d'' " resulta aún menor que la inductancia transitoria. " L_d'' " << " L_d' "

Reactancia Transitoria y Subtransitoria en Cuadratura " x'_q , x''_q "

Se considera el circuito rotórico cerrado pero no excitado.

Súbitamente se aplica en el estator un sistema de corrientes y se considera el momento en que la onda fundamental de la Fmm coincide con el espacio interpolar.

En estas condiciones, los caminos para el flujo son los mismos se tenga o no en cuenta el arrollamiento amortiguador, porque en esa posición, no hay arrollamiento amortiguador, de modo que: **$x'_q = x_q$**



Usualmente x''_q es levemente mayor que x''_d

Las corriente y reactancias subtransitorias, NO EJERCEN gran influencia en los fenómenos transitorios.

A continuación se adjunta una Tabla con valores típicos de las reactancias y constantes de tiempo asociadas a la máquina síncrona térmica e hidráulica.

Parameter		Hydraulic Units	Thermal Units
Synchronous Reactance	X_d	0.6 - 1.5	1.0 - 2.3
	X_q	0.4 - 1.0	1.0 - 2.3
Transient Reactance	X'_d	0.2 - 0.5	0.15 - 0.4
	X'_q	-	0.3 - 1.0
Subtransient Reactance	X''_d	0.15 - 0.35	0.12 - 0.25
	X''_q	0.2 - 0.45	0.12 - 0.25
Transient OC Time Constant	T'_{d0}	1.5 - 9.0 s	3.0 - 10.0 s
	T'_{q0}	-	0.5 - 2.0 s
Subtransient OC Time Constant	T''_{d0}	0.01 - 0.05 s	0.02 - 0.05 s
	T''_{q0}	0.01 - 0.09 s	0.02 - 0.05 s
Stator Leakage Inductance	X_l	0.1 - 0.2	0.1 - 0.2
Stator Resistance	R_a	0.002 - 0.02	0.0015 - 0.005

Notes:

1. Reactance values are in per unit with stator base values equal to the corresponding machine rated values.
2. Time constants are in seconds.

Valores típicos de las variables de la máquina síncrona

12. Reactancia de secuencia cero (x_0)

Para que esta reactancia exista, la máquina debe estar conectada en estrella, sino, las corrientes de secuencia cero no encontrarían por donde circular y no tendría ningún sentido hablar de reactancia de secuencia cero.

Cuando se aplica a la armadura un sistema de corrientes de secuencia cero, los valores instantáneos de las tres fases se hacen iguales.

Si los arrollamientos de armadura se encuentran infinitamente distribuidos, lo que significa que cada fase produce un Fmm sinusoidal, el campo producido por las tres fases con idéntico valor instantáneo de corrientes, es cero, entonces no hay flujo en el entrehierro.

La única reactancia asociada con cada arrollamiento de fase es debida al flujo de fuga por las ranuras y por los terminales del arrollamiento.

En las máquinas actuales, la distribución de los arrollamientos no es perfectamente sinusoidal, y el flujo debido a las tres fases tendría un valor muy pequeño. Por ello el valor de la reactancia de secuencia cero, es ligeramente más alta que la del caso ideal y depende del paso y distribución del arrollamiento.

13. Circuito Equivalente de la Máquina Síncrona en Estado Estacionario

Sea el sistema de la **Figura 2.24a**, se define la tensión $\mathbf{E}_t$ como la relación entre tensión y corriente de armadura en componentes dq :

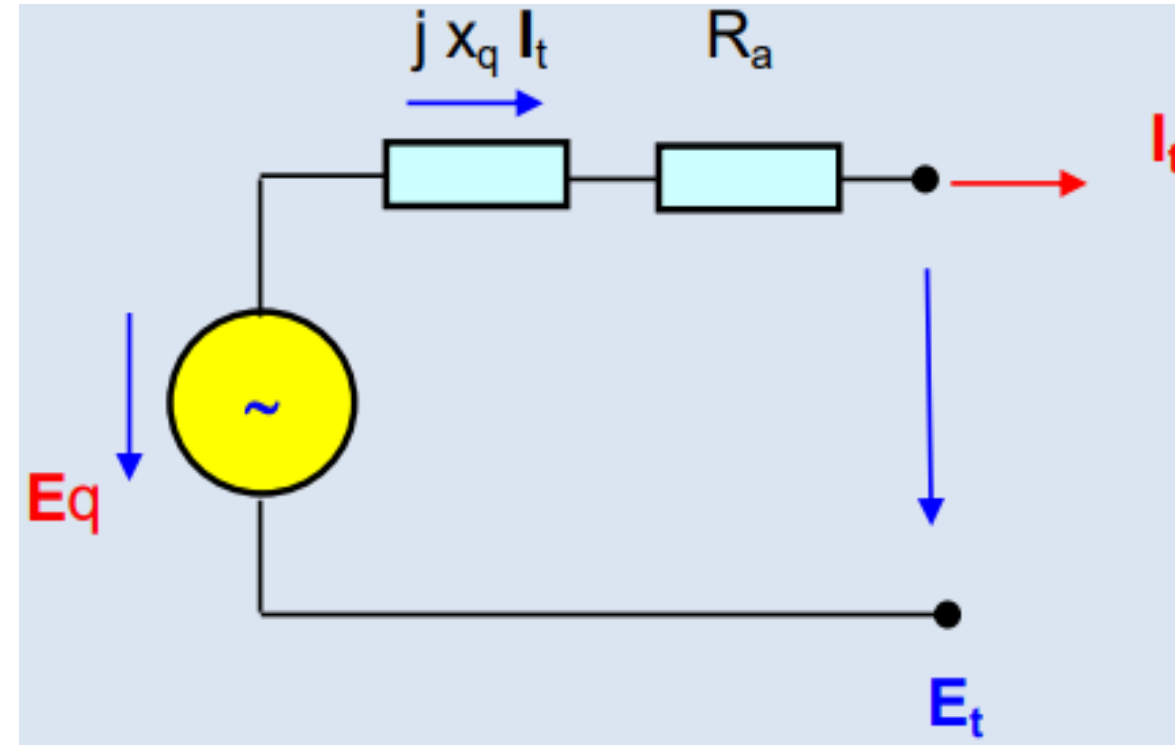


Figura 24 a

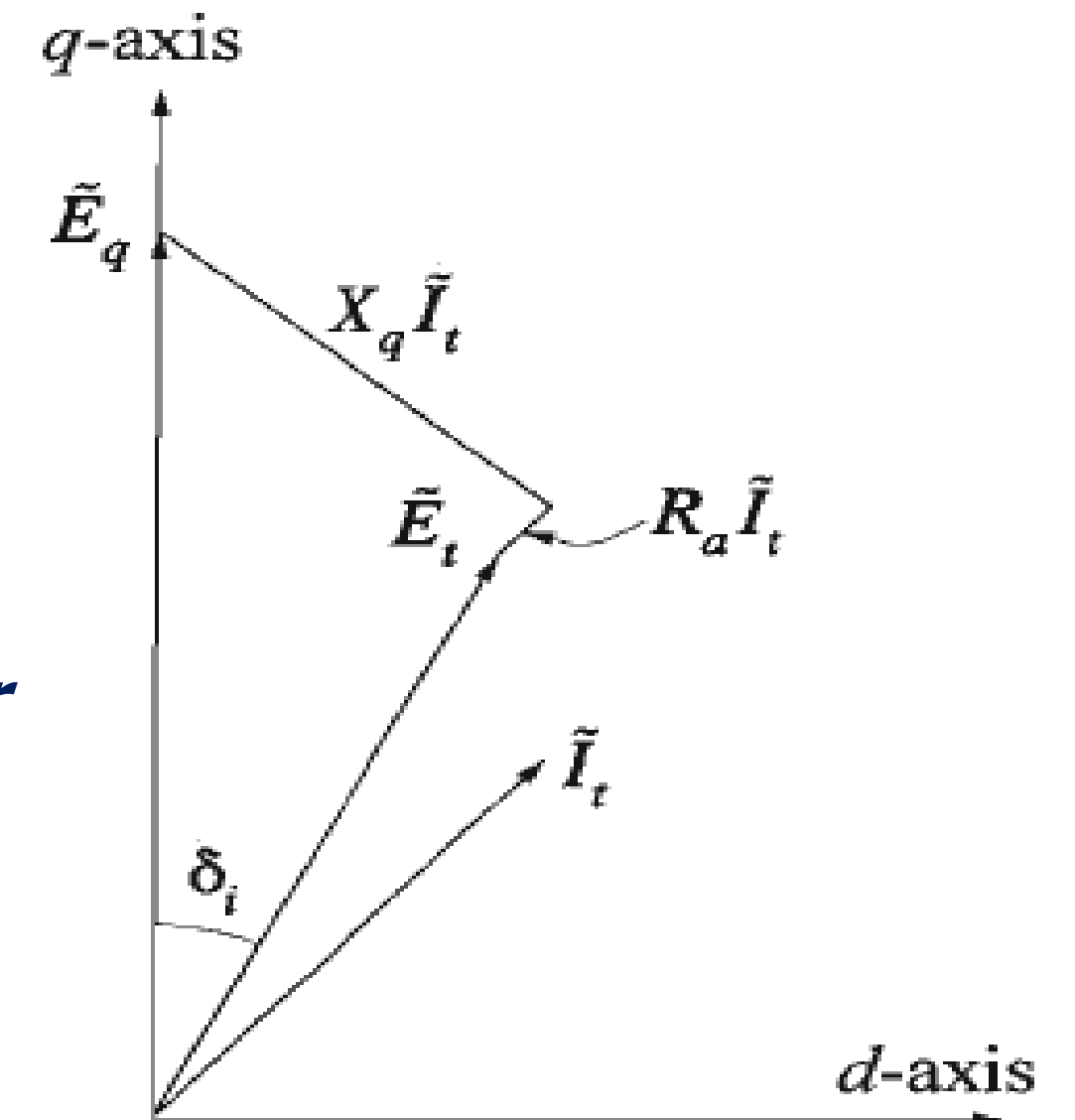
Donde:

$$\mathbf{E}_q = \mathbf{E}_t + (R_a + j X_q) \mathbf{I}_t$$

Cuyo diagrama fasorial es:

Figura 2.24b: Representación Fasorial del Vector $\mathbf{E}_q$ en el Plano Complejo dq

$\mathbf{E}_t$ = Tensión en terminales
 x_q = reactancia sincrónica
 $\mathbf{I}_t$ = corriente de armadura
 R_a = resistencia de armadura



Cálculo de Valores de Estado Estacionario. Procedimiento

Teniendo como dato los valores de Potencia Activa y reactiva; la tensión en terminales de la máquina y todos los parámetros. ***Calcular las variables de la máquina sincrónica en el estado de operación considerado.***

Considerar que todos los datos están en por unidad.

1- Dados los valores en terminales P_t , Q_t y E_t ; calcular I_t y el ϕ

$$I_t = \frac{\sqrt{P_t^2 + Q_t^2}}{E_t} \quad \phi = \cos^{-1} \left(\frac{P_t}{E_t I_t} \right)$$

2- Cálculo del ángulo interno del Rotor δ_1

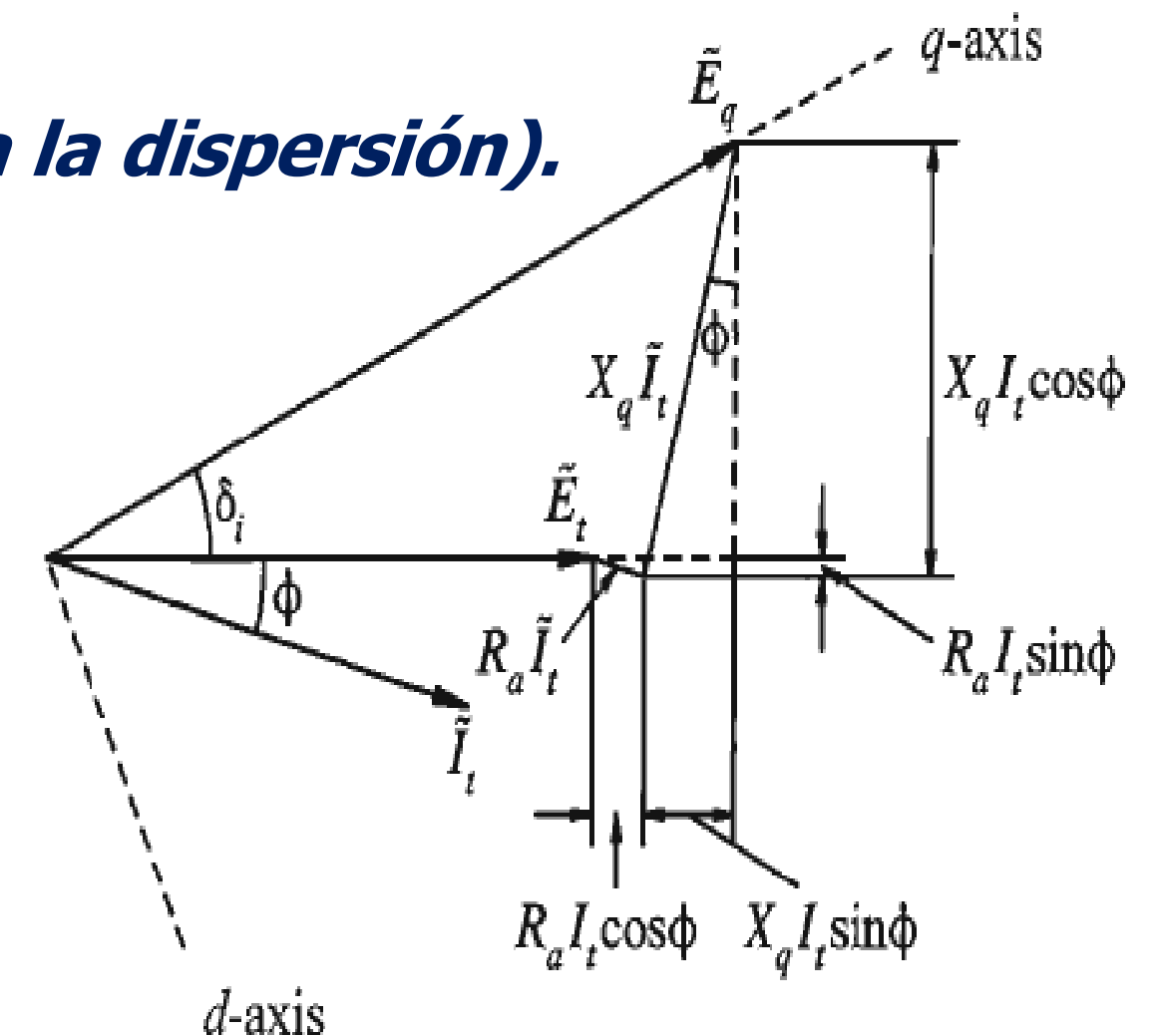
El ángulo de carga es el desfase entre las tensiones $\mathbf{E}_i$ y $\mathbf{E}_p$.

El ángulo entre $\mathbf{U}$ y $\mathbf{E}_i$ se lo desprecia por ser muy pequeño (*ángulo debido a la dispersión*).

Sea el diagrama fasorial correspondiente al sistema de la figura 2.25

$$\delta_i = \tan^{-1} \left(\frac{X_q I_t \cos \phi - R_a I_t \sin \phi}{E_t + R_a I_t \cos \phi + X_q I_t \sin \phi} \right)$$

Figura 2.26: Diagrama Fasorial del Circuito Equivalente de Estado Estacionario

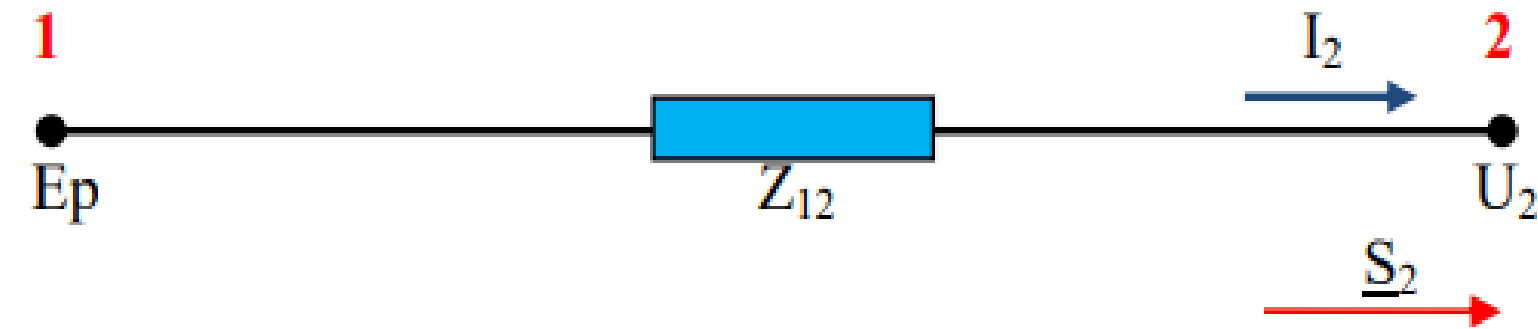


El ángulo de carga " δ " es función de las características de la carga.

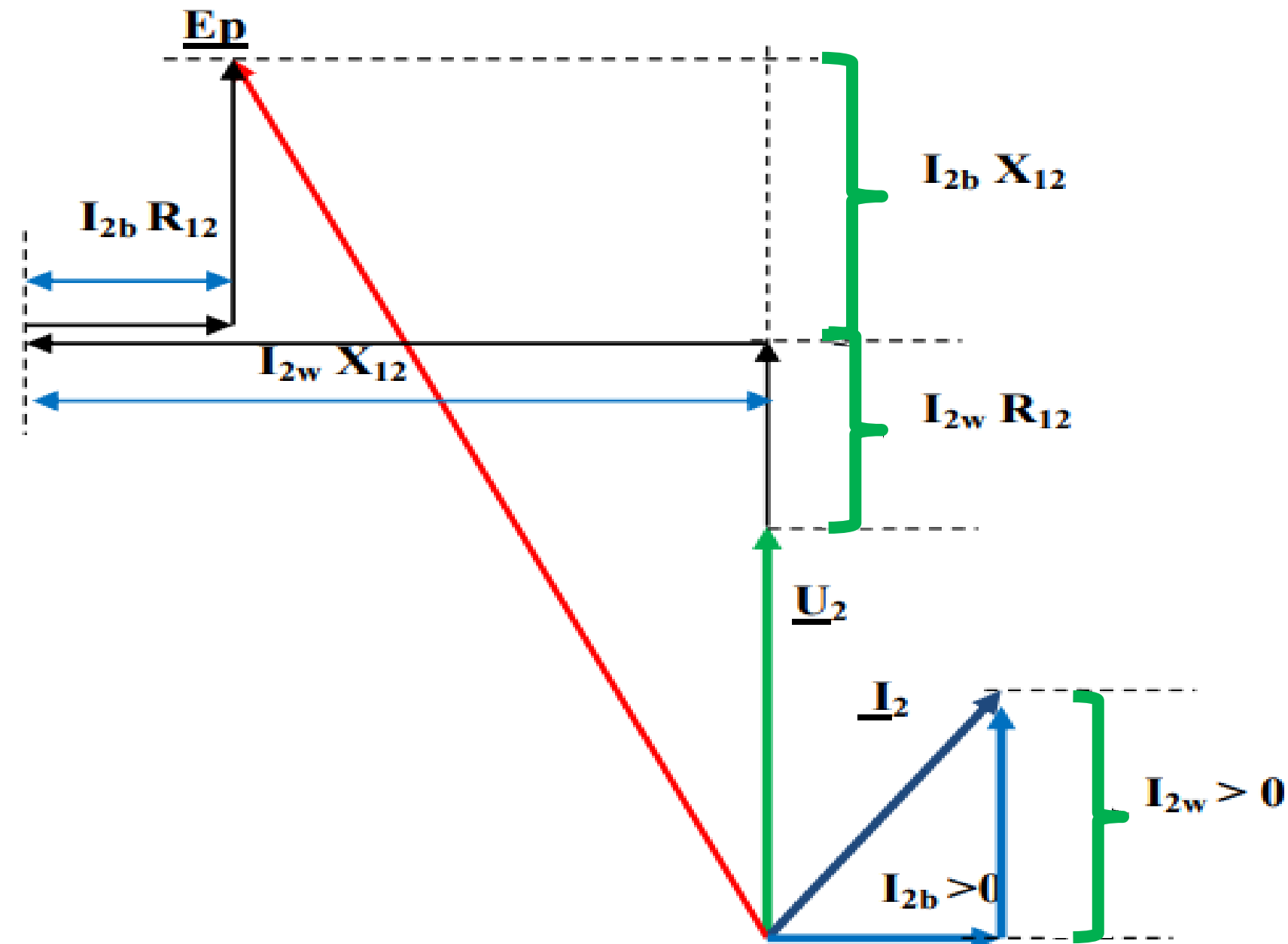
Para cargas puramente inductivas o capacitivas, el ángulo de carga es cero, pero el valor de la tensión de excitación es muy distinto.

Ejemplo

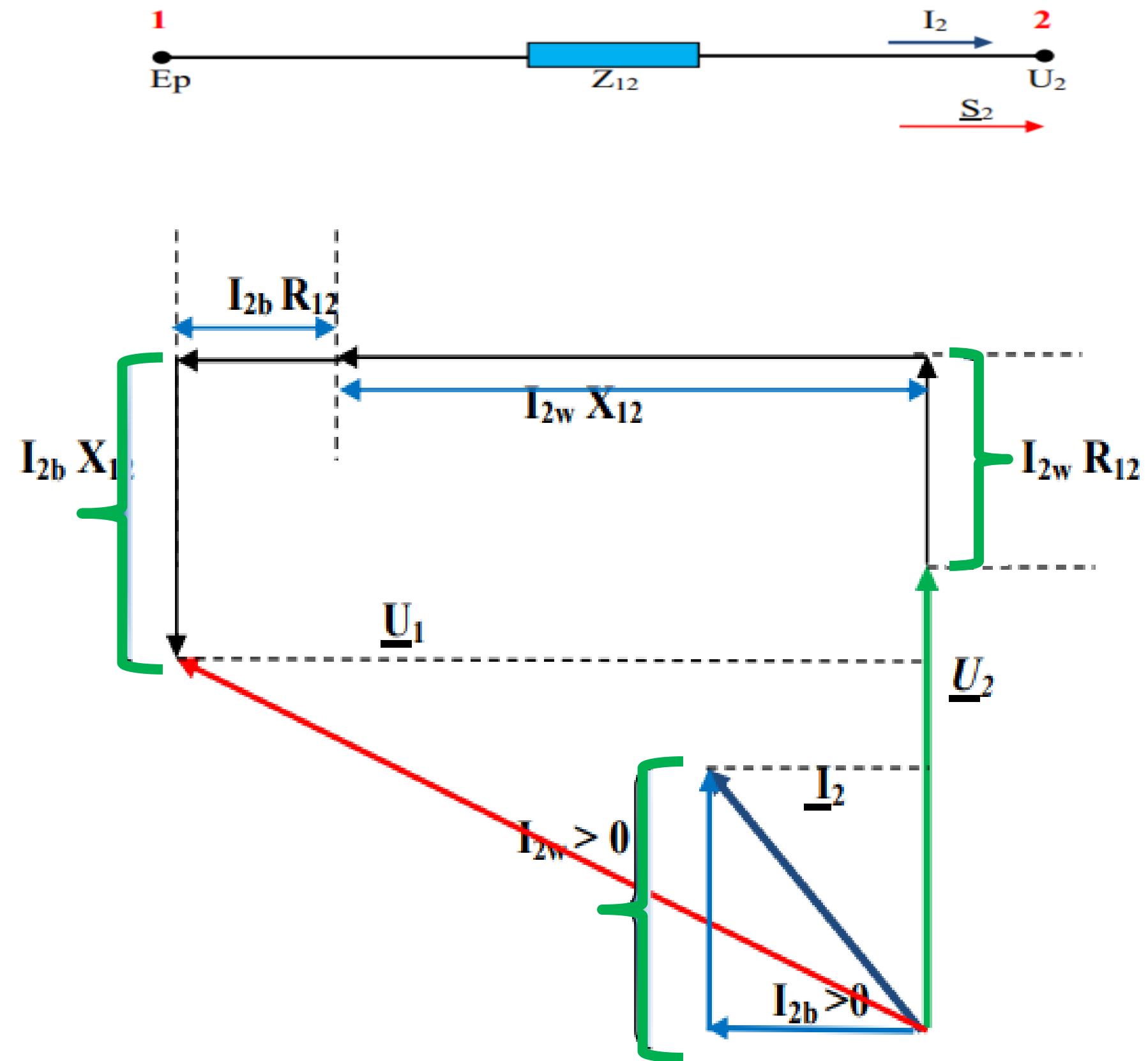
1. Sea el sistema de la figura donde un generador de tensión de excitación E_p alimenta una carga de $\cos \phi = 0.7$ inductivo



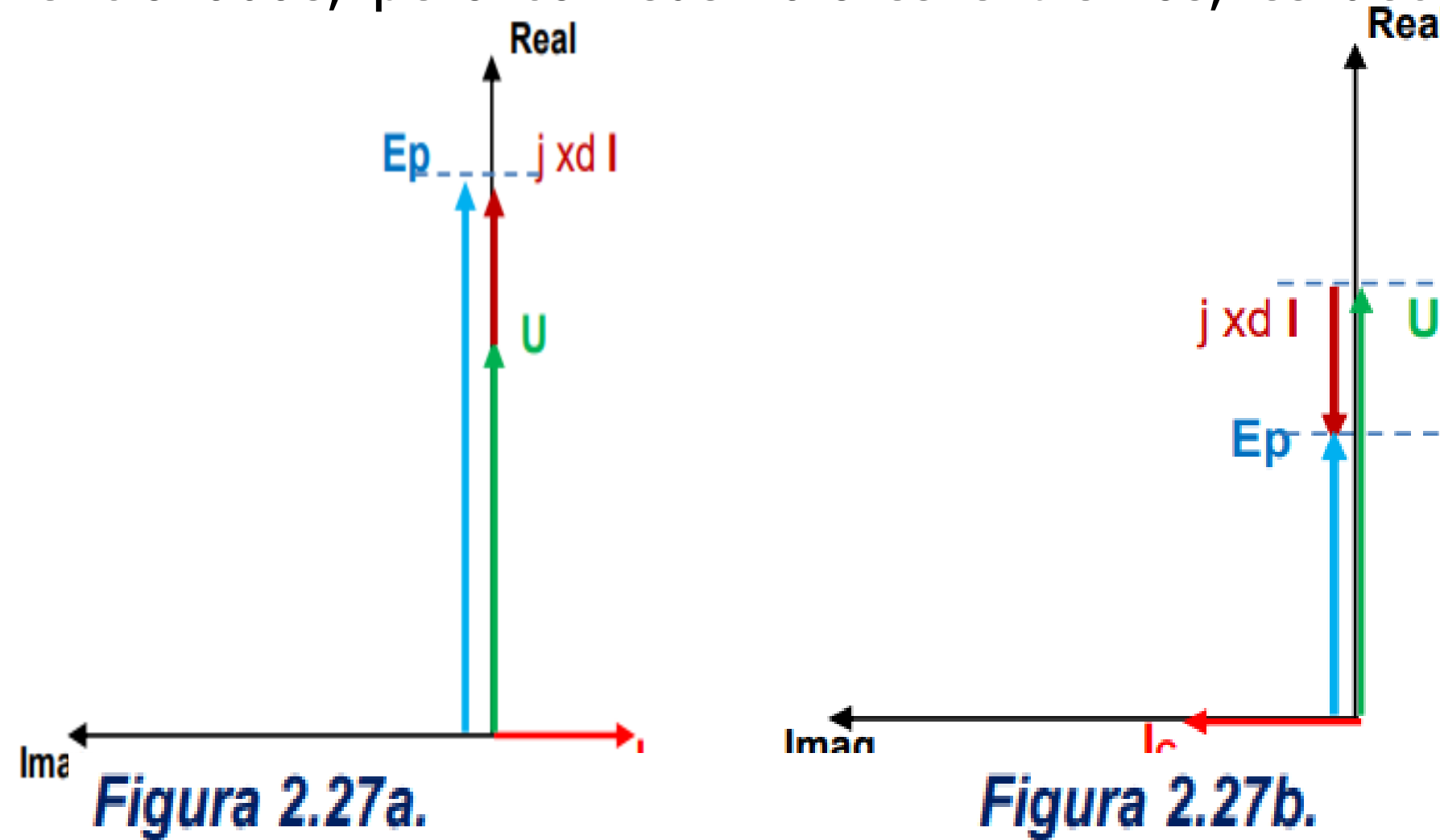
Sea el diagrama fasorial:



2. Sea el sistema el mismo sistema anterior, pero ahora el generador alimenta una carga con un $\cos \phi = 0.7$ capacitivo



Obsérvense los diagramas fasoriales de las **Figuras 2.27a** y **2.27b**, en los cuales se ha graficado las dos situaciones de carga mencionadas, pero con sus valores extremos, es decir carga puramente capacitiva y carga puramente inductiva.

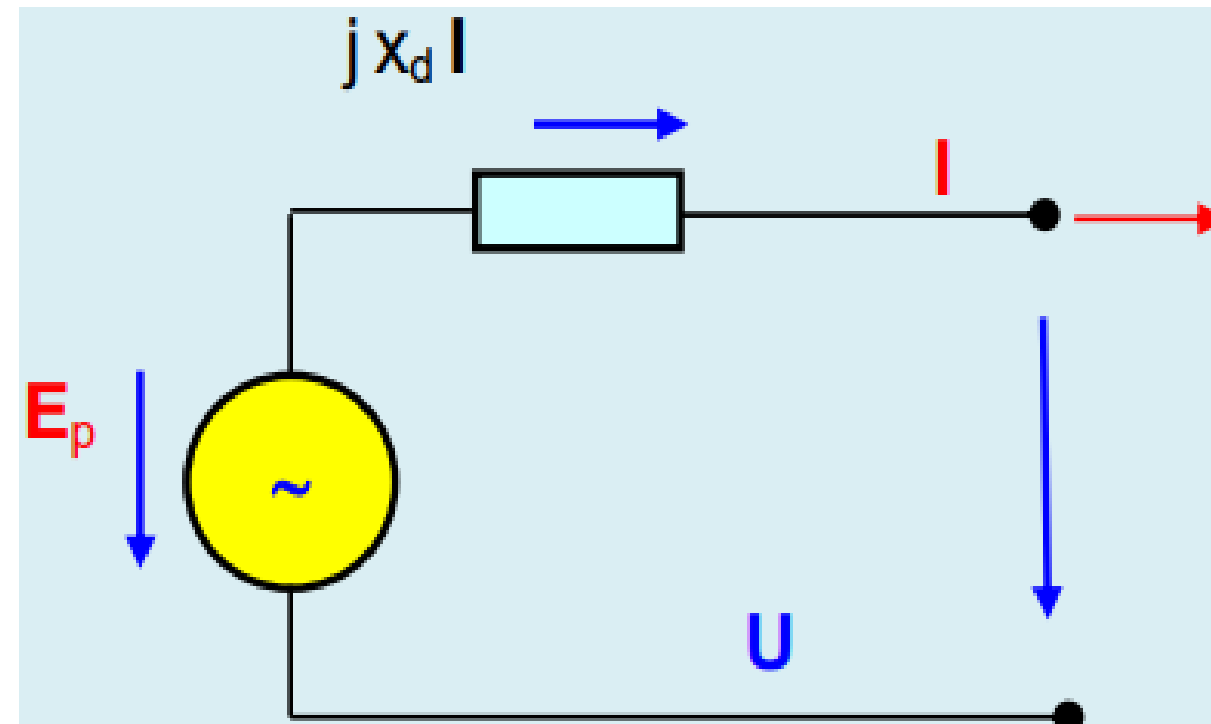


1. La **Figura 2.27a**, muestra el caso de una máquina síncrona alimentando una carga inductiva pura. La corriente inductiva debilita el campo inducido en el rotor y por lo tanto se debe colocar una excitación importante. Dicho efecto se aprecia rápidamente al observar el valor de la tensión de excitación **Ep**.
2. En contrapartida, en la **Figura 2.27b**, se observa que cuando la carga es capacitiva pura, es necesaria una excitación mucho menor para obtener el mismo resultado anterior, es decir la misma tensión **U** en los bornes.
3. Cuando el generador alimenta una carga predominantemente inductiva, se dice que se encuentra en operación "sobreeexcitada" y cuando la carga es predominantemente capacitiva, se encuentra "subexcitada".

14. Cupla Electromecánica en la Máquina síncrona. Característica Cupla - Ángulo.

Sea el circuito equivalente de una máquina síncrona trifásica, **Figura 2.28**.

Despreciando las pérdidas por saturación, dispersión y el valor de la resistencia de armadura:



U = Tensión Eficaz de Fase
x_d = reactancia síncronica

Figura 28

Siendo "**P**" la Potencia eléctrica trifásica que entrega la máquina:

Reemplazando el valor de **U** (de fase) obtenido en el circuito anterior

$$P = \text{Re} \{ 3 \underline{U} \underline{I}^* \}$$

$$\underline{U} = \underline{E}_p - R_1 \underline{I} - j x_d \underline{I}$$

Se tiene: $P = 3 \text{Re} \{ \underline{E}_p \underline{I}^* \} - 3 \text{Re} \{ R_1 \underline{I} \underline{I}^* \} - 3 \text{Re} \{ j x_d \underline{I} \underline{I}^* \}$

$$P = 3 \text{Re} \{ \underline{E}_p \underline{I}^* \} - 3 R_1 \underline{I}^2 = P_\delta - P_p$$

Despejando la corriente de la expresión de **U** y considerando que **R₁** es muy pequeño:

Donde: $3 \text{Re} \{ \underline{E}_p \underline{I}^* \} = \text{Potencia en el campo giratorio}$

$$\underline{I} = j (\underline{U}/x_d) - j (\underline{E}_p/x_d)$$

Con: $\underline{E}_p = E_p e^{j\delta}$

$$3 R_1 \underline{I}^2 = \text{Pérdidas en el estator}$$

$$P_\delta = 3 \text{Re} \{ \underline{E}_p (-j (\underline{U}/x_d) + \underline{E}_p^*/x_d) \}$$

La potencia queda: $P\delta = 3 \{(U.E_p)/x_d\} \sin \delta$

Recordando que:

Cupla es Potencia eléctrica dividida en velocidad angular, la Cupla eléctrica es:

$$C_e = P\delta / \omega_{mec} = p.P\delta / \omega$$

“Cupla Eléctrica”

$$C_e = [3.p.U.E_p / (\omega x_d)] \sin \delta$$

En la **Figura 2.29** se ha graficado la curva característica que relaciona la Cupla Eléctrica con el Ángulo de carga.

“Cupla Eléctrica en función del ángulo δ ”

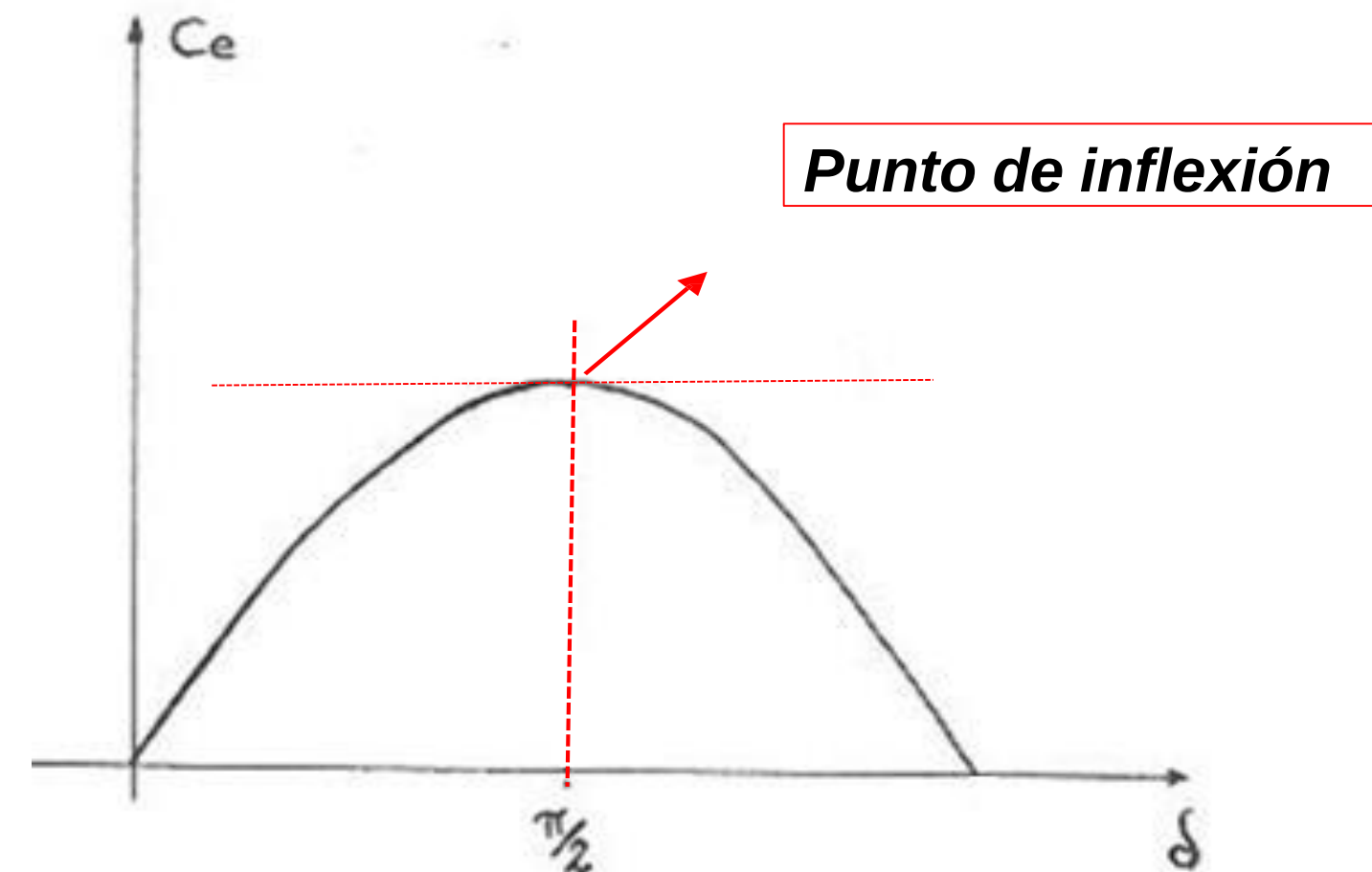


Figura 2.29: Característica Cupla-Ángulo de Carga

15. Funcionamiento del generador síncrono. Formas de Conexión y Operación

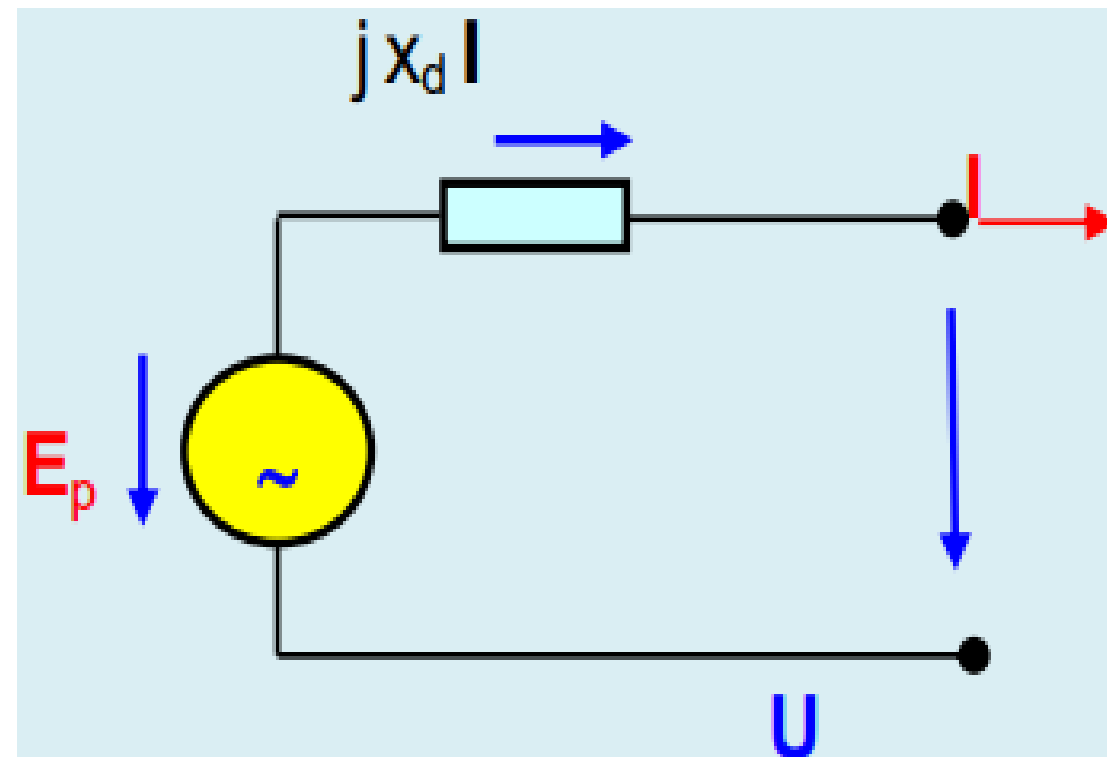
1. Operación AISLADA:

Cualquier cambio en la excitación de la máquina incide directamente en la tensión en bornes ya que la tensión está fijada por la máquina.

2. Operación INTERCONECTADA:

En este caso, la tensión está impuesta por la red y cualquier cambio en la excitación no afecta a la tensión en bornes. La tensión y la frecuencia de la red están definidas directamente por el conjunto de las máquinas generadoras presentes.

Se define como red rígida a una Red muy potente en comparación con la máquina, en este caso, tanto la frecuencia como la tensión en módulo y fase son constantes.



U = Tensión Eficaz de Fase
 x_d = reactancia sincrónica

La tensión de una red Rígida es constante así, considerando el circuito equivalente de una máquina síncrona, la tensión de excitación en el circuito es:

$$E_p = U + jx_d I$$

Donde " E_p " y " δ " son parámetros y " U " es una constante.

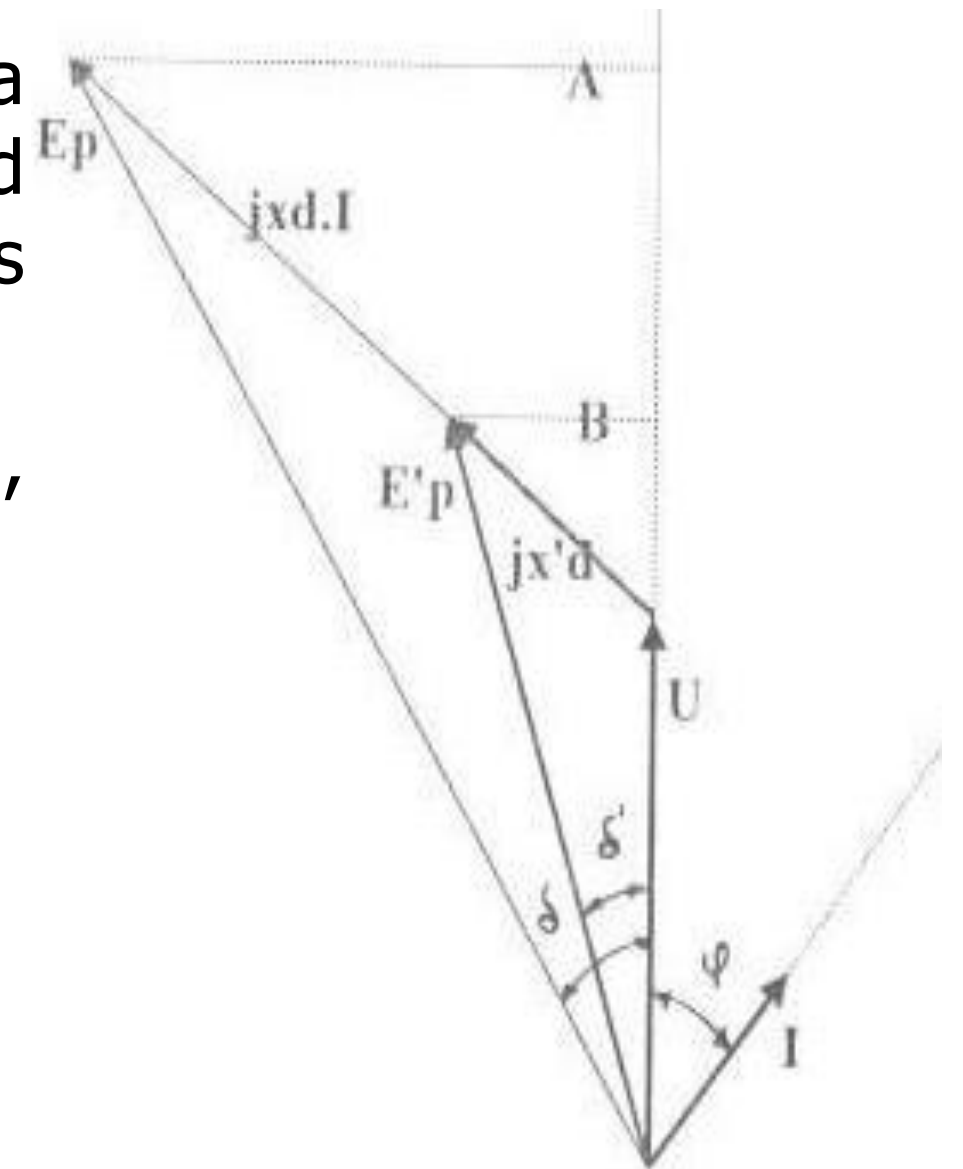


Figura 2.30: Diagrama fasorial de una máquina síncrona conectada a una red rígida de tensión

Diagrama de Corrientes de la Máquina Síncrona

En la **Figura 31** se muestra el diagrama fasorial de corrientes de la máquina síncrona, el cual se obtiene del diagrama de tensiones de la **Figura 29**, despejando la corriente de la ecuación de E_p :

$$\underline{I} = j (\underline{U}/x_d) - j (\underline{E}_p/x_d)$$

Y graficándola, se obtiene el diagrama de corrientes de la máquina síncrona donde se pueden apreciar algunos detalles importantes.

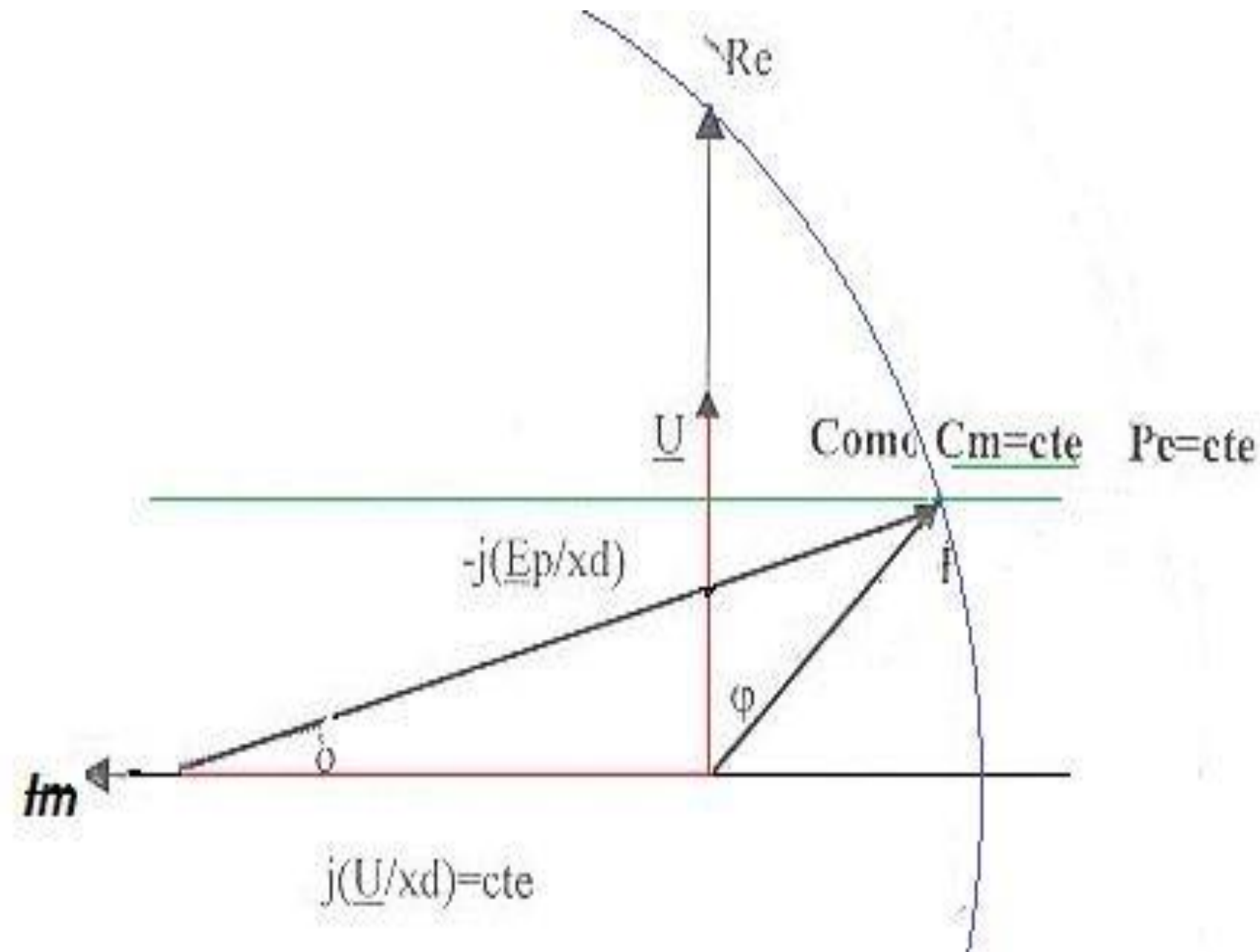


Figura 2.31: Diagrama fasorial de corrientes de la máquina síncrona

CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD DE ESTADO ESTACIONARIO

1. El problema de Estabilidad: Estabilidad Estática y Estabilidad Transitoria.

1. Pequeñas Perturbaciones

2. Estabilidad Estática - Conceptos Básicos.

1. Condición que debe cumplir la falla para que sea considerada Estabilidad Estática

2. Condiciones para la Estabilidad Estática

3. Influencia de la Regulación de Tensión sobre la Estabilidad Estática.

4. Límite de Estabilidad Estática Natural y Artificial.

5. Influencia de la Regulación de Tensión sobre la Estabilidad Estática.

6. Comparación entre Transmisión a Corta y Larga Distancia.

1. Comparación de los diagramas fasoriales

7. Procedimiento para el Cálculo de las Tensiones nodales.

8. Consideración de la Pérdidas en la Transmisión con R distinto de cero.

9. Estabilidad Estática en un sistema de dos Máquinas

10. Funcionamiento del generador sincrónico conectado a una red

1. Operación AISLADA:

2. Operación INTERCONECTADA:

3. Operación conectada a una RED RIGIDA o de POTENCIA INFINITA:

11.Modificación de las variables de operación frente a cambios lentos y pequeños en las condiciones de operación

- 1. Variaciones de cupla mecánica de impulso para corriente de excitación y velocidad angular mecánica constante*
- 2. Cambios en la corriente de excitación para cupla mecánica de impulso y velocidad angular mecánica constantes*

1. El problema de Estabilidad: Estabilidad Estática y Estabilidad Transitoria.

la ecuación diferencial de movimiento de la máquina sincrónica es:

$$\frac{2H}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \bar{T}_m - \bar{T}_e - \frac{K_D}{\omega_0} \frac{d\delta}{dt} \quad \text{Ecuación 1}$$

Cuando en un sistema hay presentes "***n***" ***máquinas sincrónicas***, por cada una existe una ecuación diferencial igual a la anterior, las cuales se encuentran acopladas entre si.

Un sistema de ecuaciones tal como ese, no puede ser resuelto en forma cerrada, por lo que es necesario recurrir a procedimientos numéricos y analizar en cada caso las simplificaciones que pueden realizarse.

Pequeñas Perturbaciones

En el caso de pequeñas perturbaciones originadas a partir de un estado de funcionamiento estacionario normal, la ecuación de oscilación puede ser linealizada en las cercanías del punto de operación prefalla.

En esta unidad se tratará fundamentalmente el problema denominado de "Estabilidad Estática" que consistente en ***la determinación de la potencia límite máxima que una máquina puede entregar sin perder el sincronismo en el caso de que en el sistema se produzcan cambios (aumentos) de carga en forma lenta y en pequeños pasos " ΔP ".***

2. Estabilidad Estática - Conceptos Básicos

Condición que debe cumplir la falla para que sea considerada Estabilidad Estática

La perturbación debe ser lenta y de pequeña magnitud tal que:

- **la corriente de campo se modifique en cada paso (para cada escalón de cambio) de manera que se mantengan constantes las condiciones normales de operación de las máquinas.**
- **Usualmente se mantienen constantes la tensión en los terminales de la máquina y la velocidad sincrónica.**
- Por lo dicho, considerando pequeñas desviaciones " $\Delta\delta$ " respecto al estado de funcionamiento inicial, se pueden reemplazar las funciones " **$P_e(\delta)$** " de la **ecuación 1** por los dos primeros términos del desarrollo de Taylor. Así:

$$P_{ei}(\delta) \approx P_{ei}(\delta_0) + \left. \text{grad } P_{ei}(\delta) \right|_{\delta=\delta_0} \cdot \Delta\delta$$

Obteniendo un sistema de ecuaciones diferenciales lineales del tipo:

$$(2H_i/\omega_N) \Delta\ddot{\delta}_i + (K_{di}/\omega_N) \Delta\dot{\delta}_i + \left. \text{grad } P_{ei}(\delta) \right|_{\delta=\delta_0} \cdot \Delta\delta = 0 \quad \text{ecuación(2)}$$

.....

El cual ha sido simplificado considerando que para un tiempo " t_0 " la potencia mecánica es igual a la potencia eléctrica.

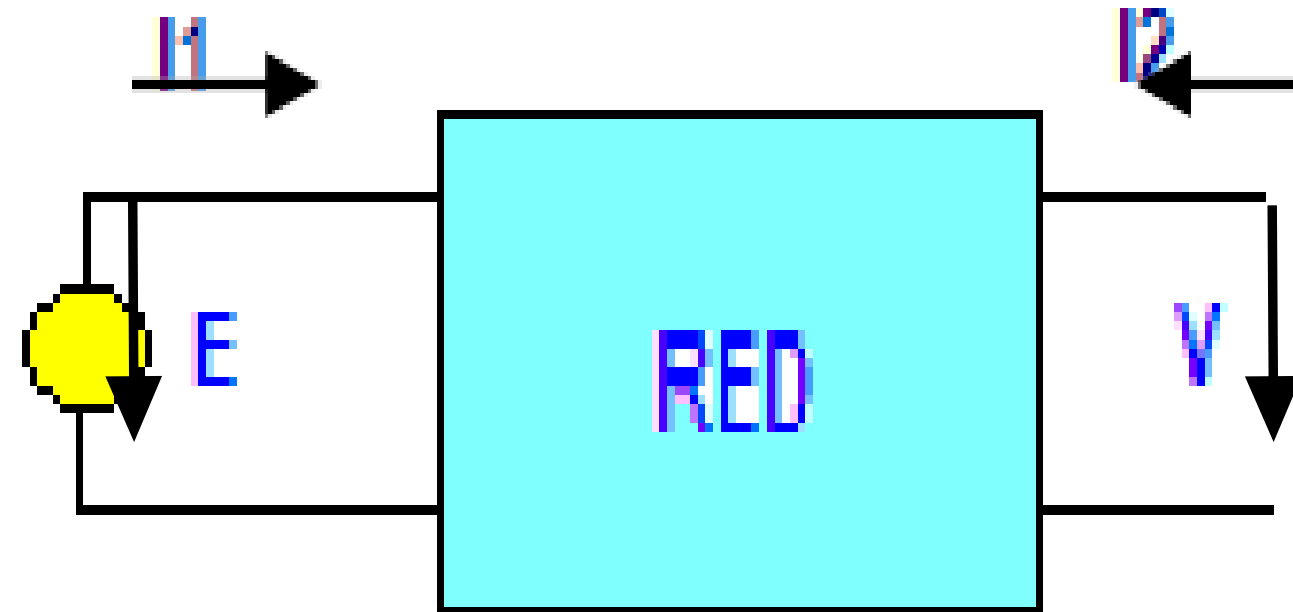
$$P_{ei}(\delta_0) = P_{mi} \quad \longrightarrow \quad (d\delta_i/dt) + d(\delta_i - \delta_{i0})/dt = \Delta\dot{\delta}_i$$

El sistema de **ecuaciones diferenciales (2)** es lineal y puede ser resuelto en forma analítica usando la transformación de Laplace.

Véase y analícese el siguiente sistema.

Se considera una máquina síncrona que alimenta una barra de tensión rígida ($V = \text{cte}$) a través de una red. Ver **Figura 1**

Figura 1: red de tensión constante



$$[I] = [Y] \cdot [V]$$

Ecuación (3)

Para la representación de este estado de operación, se adopta, en primera instancia, el modelo clásico de **una fuente de tensión constante detrás de la reactancia síncrona "xd" de la máquina.**

Esta reactancia se la considera incluida en la red.

Las corrientes y tensiones en esta red, se relacionan a través de la conocida expresión matricial:

Donde:

$[I]$
 $[V]$
 $[Y]$

es la matriz de las corrientes,
es la matriz de las tensiones e
es la matriz de admitancia nodal del sistema formada por inductancias propias y mutuas.

$$\begin{aligned} Y_{ii} &= Y_{iie}^{j\theta_{ii}} = G_{ii} + j B_{ii} \\ Y_{ij} &= Y_{ije}^{j\theta_{ij}} = G_{ij} + j B_{ij} \end{aligned}$$

Ecuación (4)

La potencia eléctrica entregada por la máquina “uno” del sistema tiene la expresión:

$$P_{e1} = \text{Re}\{E_1 I_1^*\}$$

Reemplazando los valores de **E** e **I** y trabajando en la expresión queda que la potencia eléctrica entregada por una máquina sincrónica es:

$$P_{e1} = E^2 \cdot Y_{11} \cos(\theta_{11}) + E \cdot V \cdot Y_{12} \cdot \cos(\theta_{12} - \delta)$$

En el caso de una red puramente reactiva $\theta_{11} = \theta_{12} = 90^\circ$ y la expresión se simplifica ya que el ***coseno de 90° es 0 (cero)***

$$P_{e1} = E \cdot V \cdot Y_{12} \cdot \sin(\delta) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Condiciones para la Estabilidad Estática

Hipotesis:

Se considera una máquina sincrónica conectada a una red infinita.

La máquina se modela a través de una tensión constante detrás de la reactancia sincrónica.

En estado prefalla, la máquina se encuentra suministrando potencia en un estado caracterizado por ***"Po" y "δo"***.

Cumplidas las condiciones anteriores:

Supóngase que se produce una pequeña perturbación que incrementa el ángulo de par provocando un "Δδ" y la potencia que entrega la máquina se incrementa en un "ΔP".

Para los nuevos valores de Potencia entregada y ángulo de carga, se cumple la siguiente expresión:

$$P = P_0 + \Delta P = P_{\max} \sin(\delta_0) \sin(\Delta\delta)$$

Tal que: $P = P_{\max} \sin(\delta_0) \cdot \cos(\Delta\delta) + P_{\max} \cos(\delta_0) \cdot \sin(\Delta\delta)$

Como: $\Rightarrow \Delta\delta$ es pequeño $\begin{cases} \cos(\Delta\delta) = 1 \\ \sin(\Delta\delta) = \Delta\delta \end{cases}$

Entonces: $P = P_{\max} \sin(\delta_0) + P_{\max} \cos(\delta_0) \cdot (\Delta\delta)$

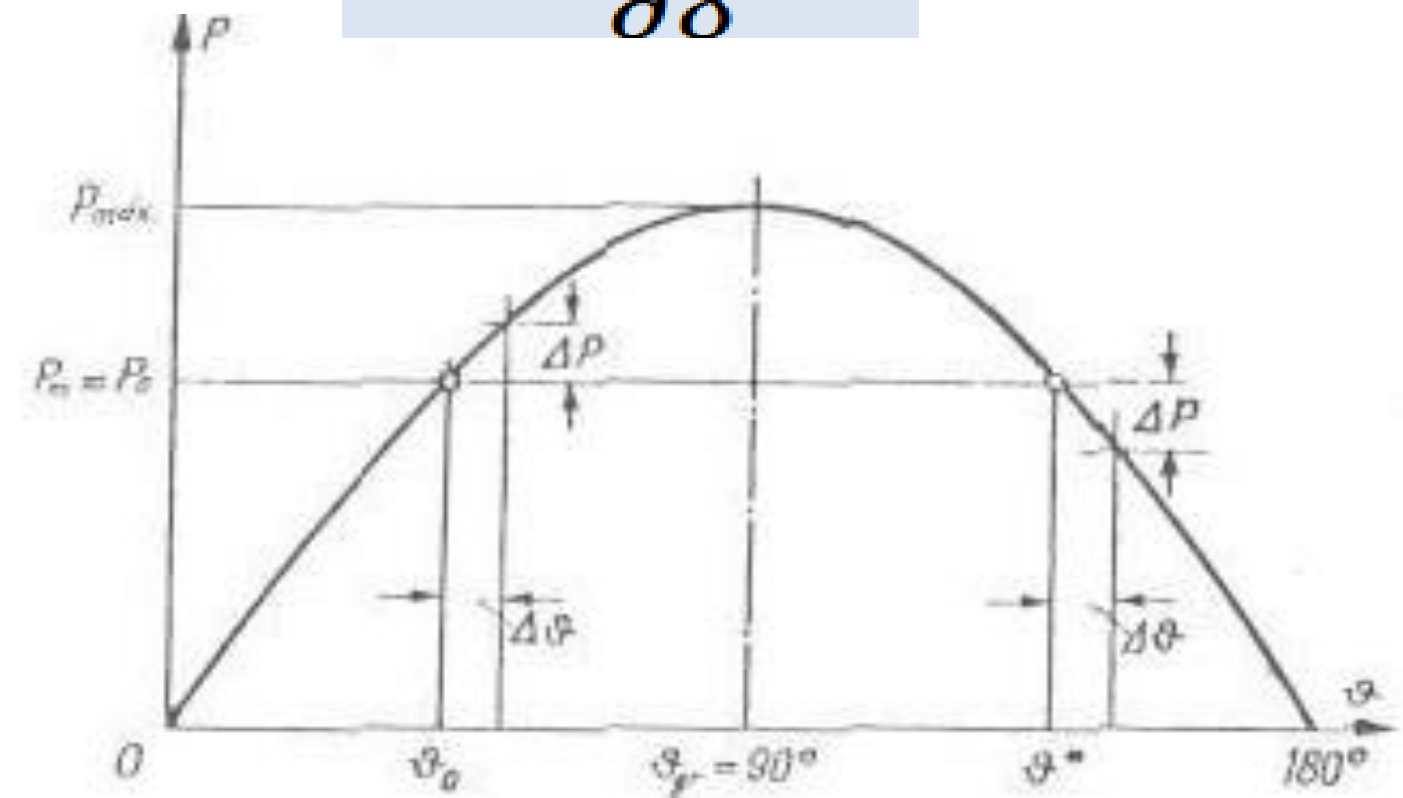
El **primer término** de la expresión es la potencia que entregaba la máquina en el estado inicial (prefalla) " **P_0** " y, al **segundo término** se lo define como:

Analizando la característica P- δ en el sistema siguiente.

“Coeficiente de Potencia Sincronizante”

Para que la máquina permanezca estable con los mismos valores de tensión en bornes y operando a velocidad sincrónica pero haciendo frente al cambio en la demanda es necesario un aumento de la potencia sincronizante, así:

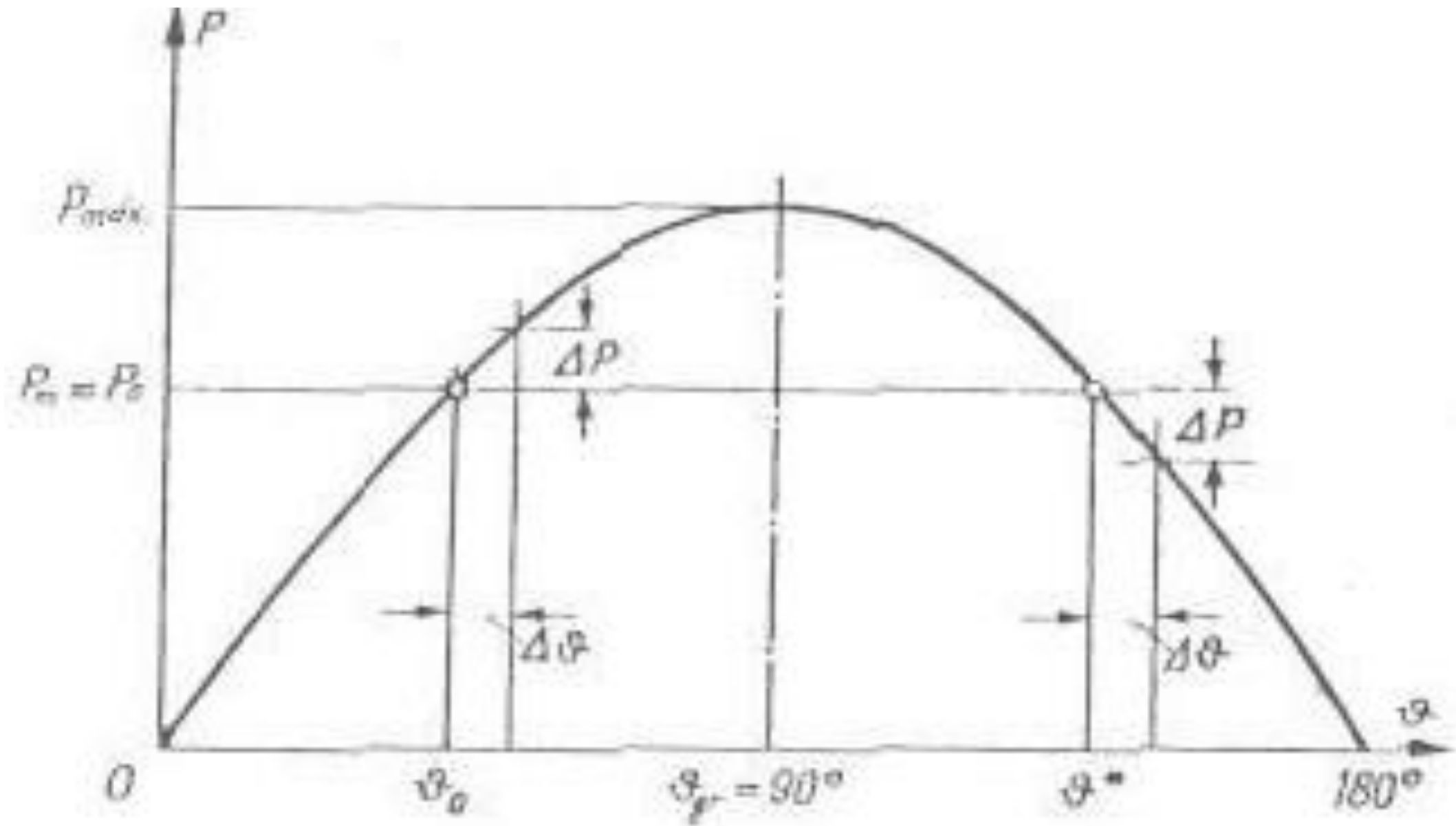
$$P_s = \frac{\partial P}{\partial \delta} > 0 \quad \text{Ecuación (6)}$$



- **La zona de funcionamiento estable bajo las hipótesis consideradas es la delimitada por las condición $0 \leq \delta \leq \pi/2$.**
- **De aquí que se considere como *límite de estabilidad* estática a la potencia transmitida para $\delta = \pi/2$**

En resumen:

Punto de Funcionamiento	Línea característica de Potencia	Condición
(ϑ_0, P_0) <i>ESTABLE</i>	Parte Ascendente	$(dP / d\vartheta) > 0$ <i>Estabilidad</i>
(ϑ^*, P_0) <i>INESTABLE</i>	Parte Descendente	$(dP / d\vartheta) < 0$ <i>Inestabilidad</i>



3. Influencia de la Regulación de Tensión sobre la Estabilidad Estática

Mediante el control de excitación se puede elevar el límite de estabilidad estático o la potencia máxima a transmitir.

Veamos unos ejemplos:- **Ejemplo N° 1**

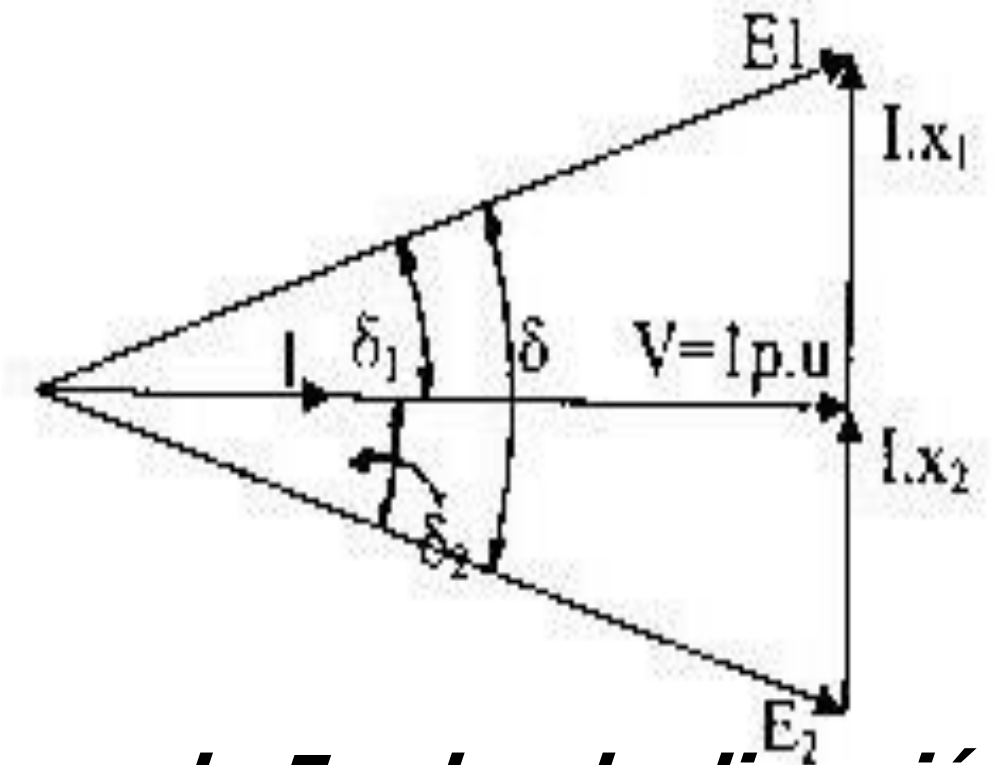
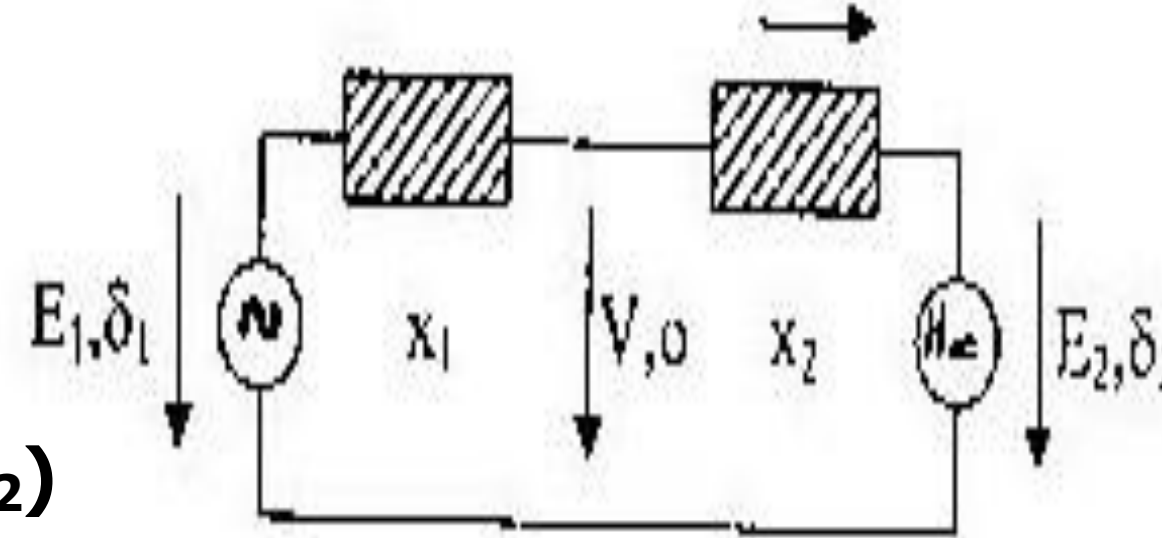
Sea el sistema de la figura, con su correspondiente diagrama fasorial.

Se supone que el factor de potencia es uno y se mantiene constante durante la regulación.

Datos: $x_1 = x_2 = 1 \text{ p.u.}$ y $V = 1 \text{ p.u.}$

La **ecuación (5)** para este sistema es:

$P = E_1 E_2 \sin(\delta_1 - \delta_2)$, "P" tiene su máximo cuando $(\delta_1 - \delta_2) = 90^\circ$ ($x_1 + x_2$)



$$E_1 = V + jI.x_1 = 1 + jI = \sqrt{(1 + I^2)} \cdot e^{j\delta/2}$$

Ecuación (7)

$$E_2 = V + jI.x_2 = 1 - jI = \sqrt{(1 + I^2)} \cdot e^{-j\delta/2}$$

Sumando las proyecciones de E sobre la dirección de V:

$$E_1 + E_2 = 2E = 2 \cdot \sqrt{(1 + I^2)} \cdot \cos(\delta/2) \Rightarrow \sqrt{(1 + I^2)} = 1/[\cos(\delta/2)]$$

1- Suponiendo que E_1 y E_2 son controladas mediante reguladores ideales con el objetivo de mantener $V = 1 \text{ p.u.}$, se tiene:

2. $E = 2V$ y $V = 1$

Multiplicando:

$$|E_1| \cdot |E_2| = (1 + I^2)$$

Reemplazando en la ecuación de Potencia (7)

$$P = \frac{\text{sen}(\delta)}{2 \cos^2(\delta/2)} = \frac{2 \text{sen}(\delta/2) \cdot \cos(\delta/2)}{2 \cos^2(\delta/2)} = \text{tag}(\delta/2)$$

Graficando esta última expresión junto a la curva de la ***ecuación (3)*** que corresponde al caso sin regulación de excitación, se obtiene la ***Figura 3.2***, en la cual se aprecia que no existe un punto claro que marque un límite de estabilidad ya que en toda la curva, la derivada de la potencia respecto del ángulo es positiva y por lo tanto es posible la transmisión de potencia mas allá de los 90°.

ATENCIÓN!!!

- ***Este es un caso ideal y no puede llevarse a la práctica pues requiere de la actuación instantánea del regulador y del efecto instantáneo de la acción del regulador sobre la excitación.***

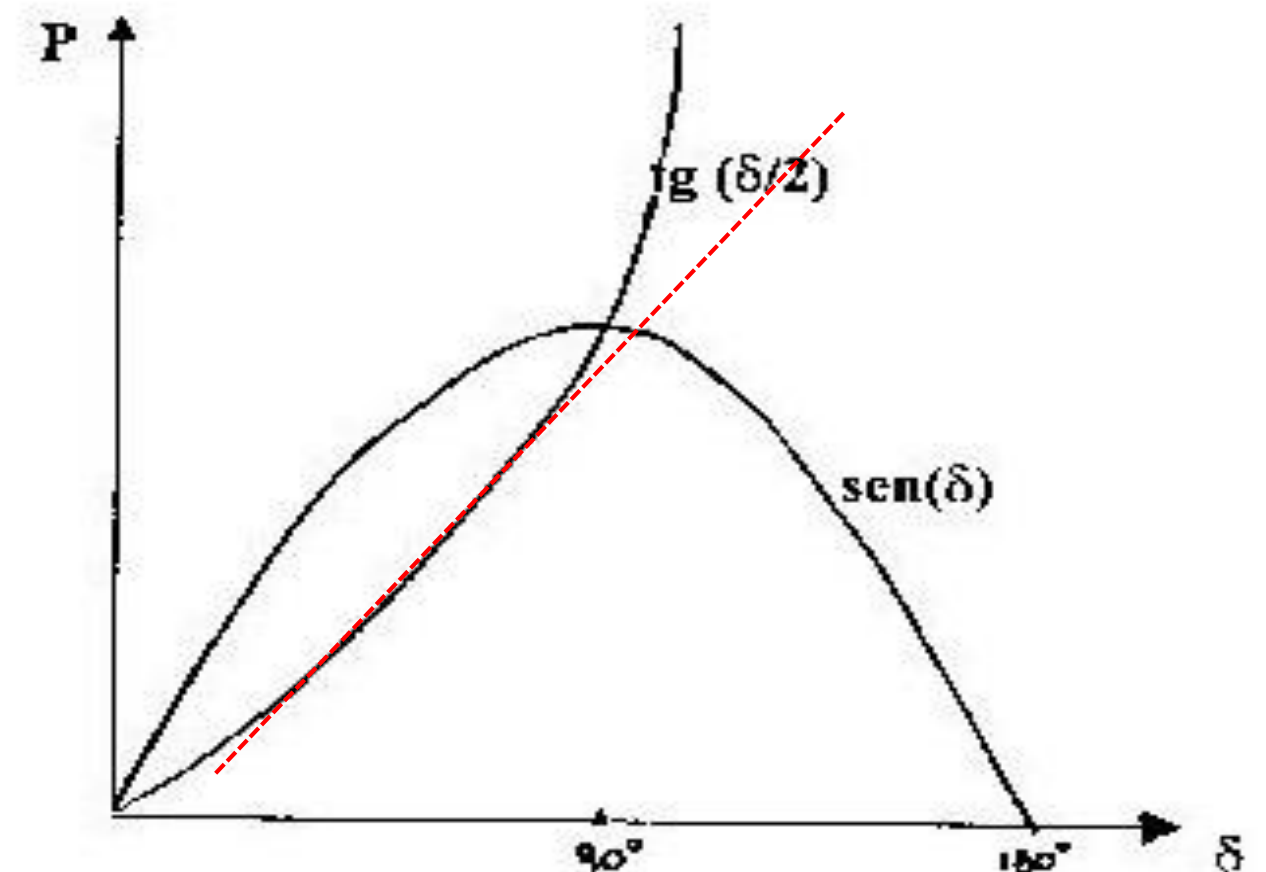
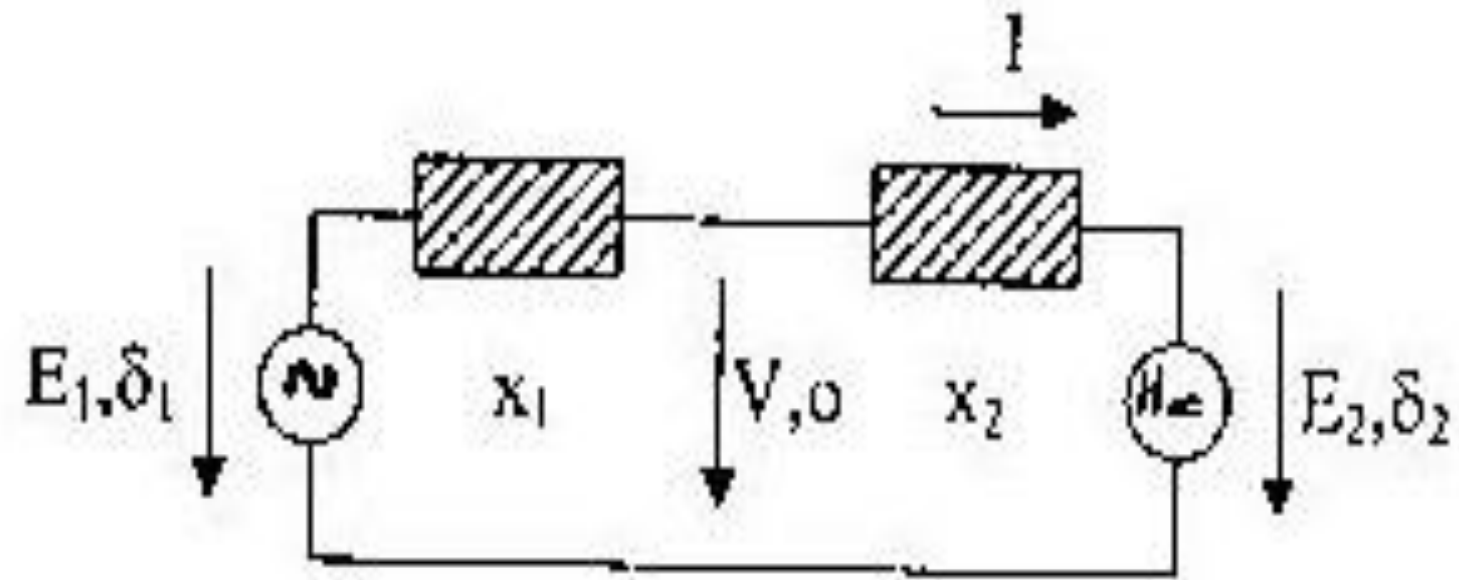


Figura 3.2: Efecto del control de excitación sobre el Límite de Estabilidad Estático- Caso Ideal.

- Ejemplo N° 2 - **Condición N1**

Se considera el caso más realista de controlar la tensión de modo que $E_2 = 1 \text{ p.u}$ dejando variar el factor de potencia.



En estas condiciones se obtiene el diagrama fasorial de la Figura 3

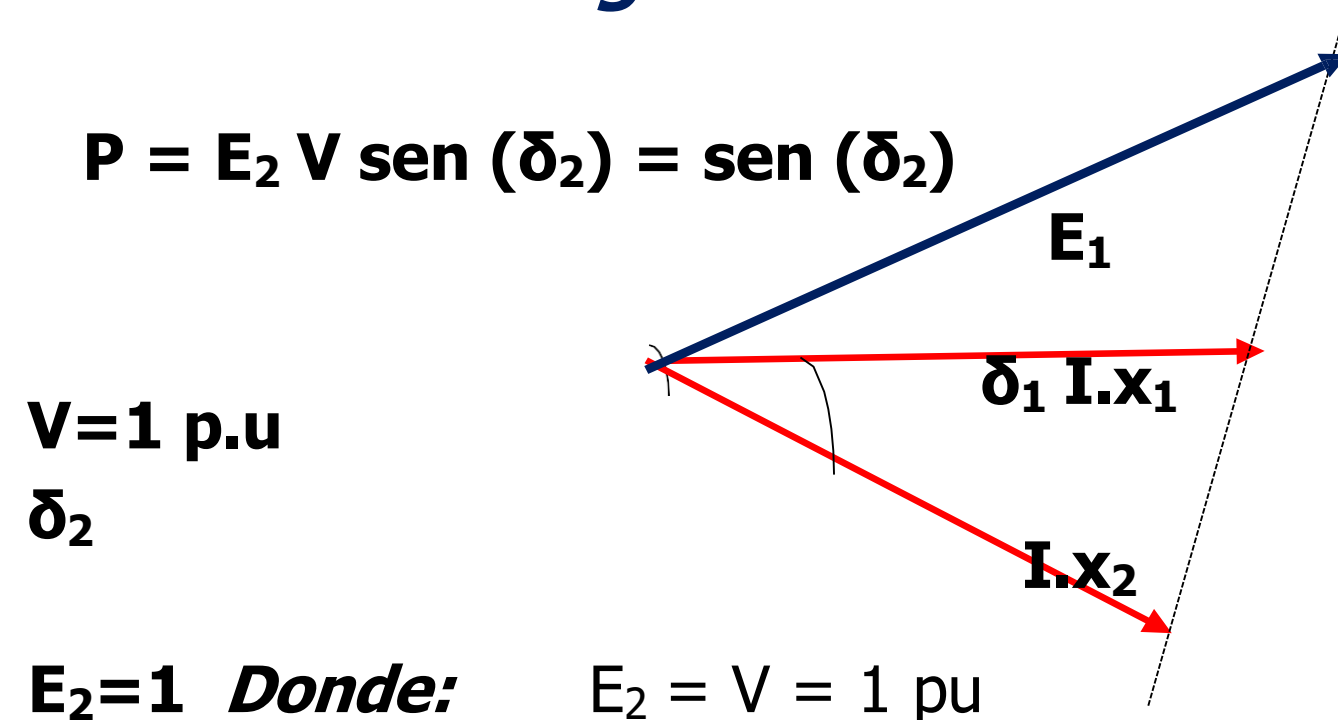


Figura 3:
Control de
Excitación con
factor de
potencia
variable.

E_1 aumenta considerablemente

El máximo valor *de "P"* se obtendrá para $\delta_2 = 90^\circ$; situación que está representada en la **Figura 3.4.**

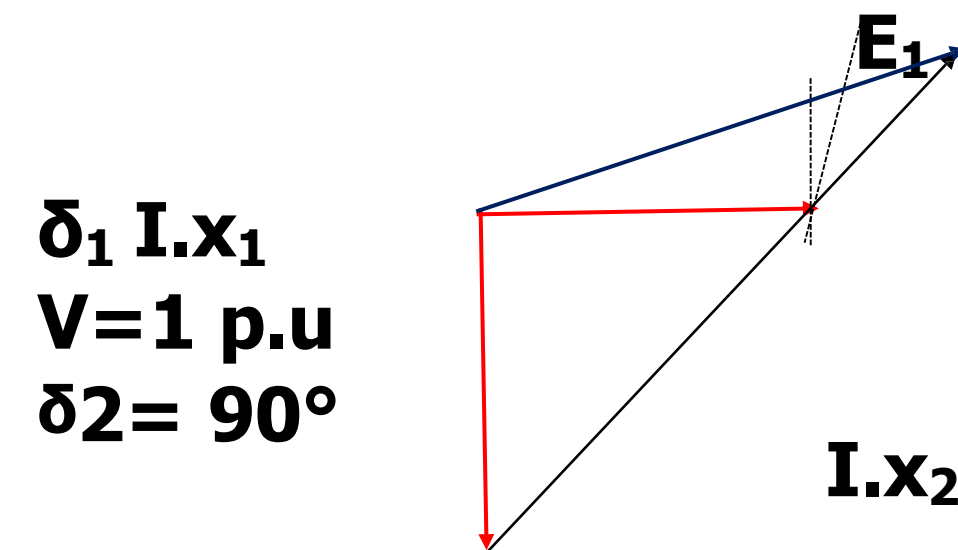


Figura 4:
Control de
Excitación con
factor de potencia
variable. Pmáx

Donde: $\delta_1 = \text{cte}$, $E_2 = V = 1 \text{ pu}$

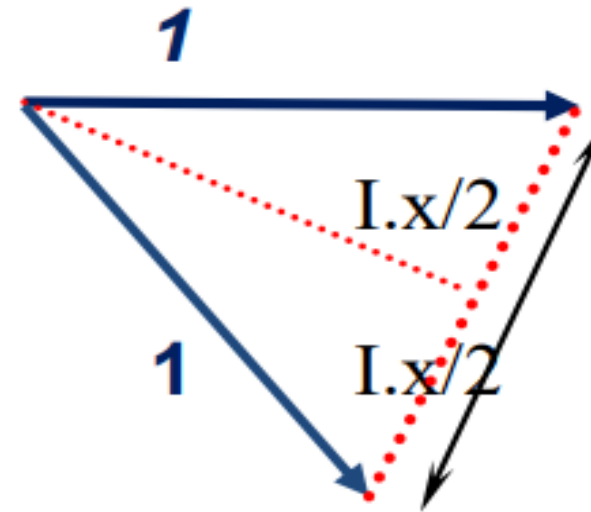
E_1 aumenta considerablemente

$E_2 = 1$

Condición N1: Se mantiene constante el ángulo de carga " δ_1 ".

- **Ejemplo numérico**

Para la Figura 3.3:



$$(I.x)^2 = 1^2 + 1^2 - 2 \cdot 1 \cdot 1 \cos \delta$$

$$(I.x)^2 = 2(1 - \cos \delta) \longrightarrow \cos \delta = (2 - (I.x)^2)/2$$

conocido

Para la Figura 4:

En el triángulo rectángulo inferior:

$I x_2 = \sqrt{2}$ por construcción y si

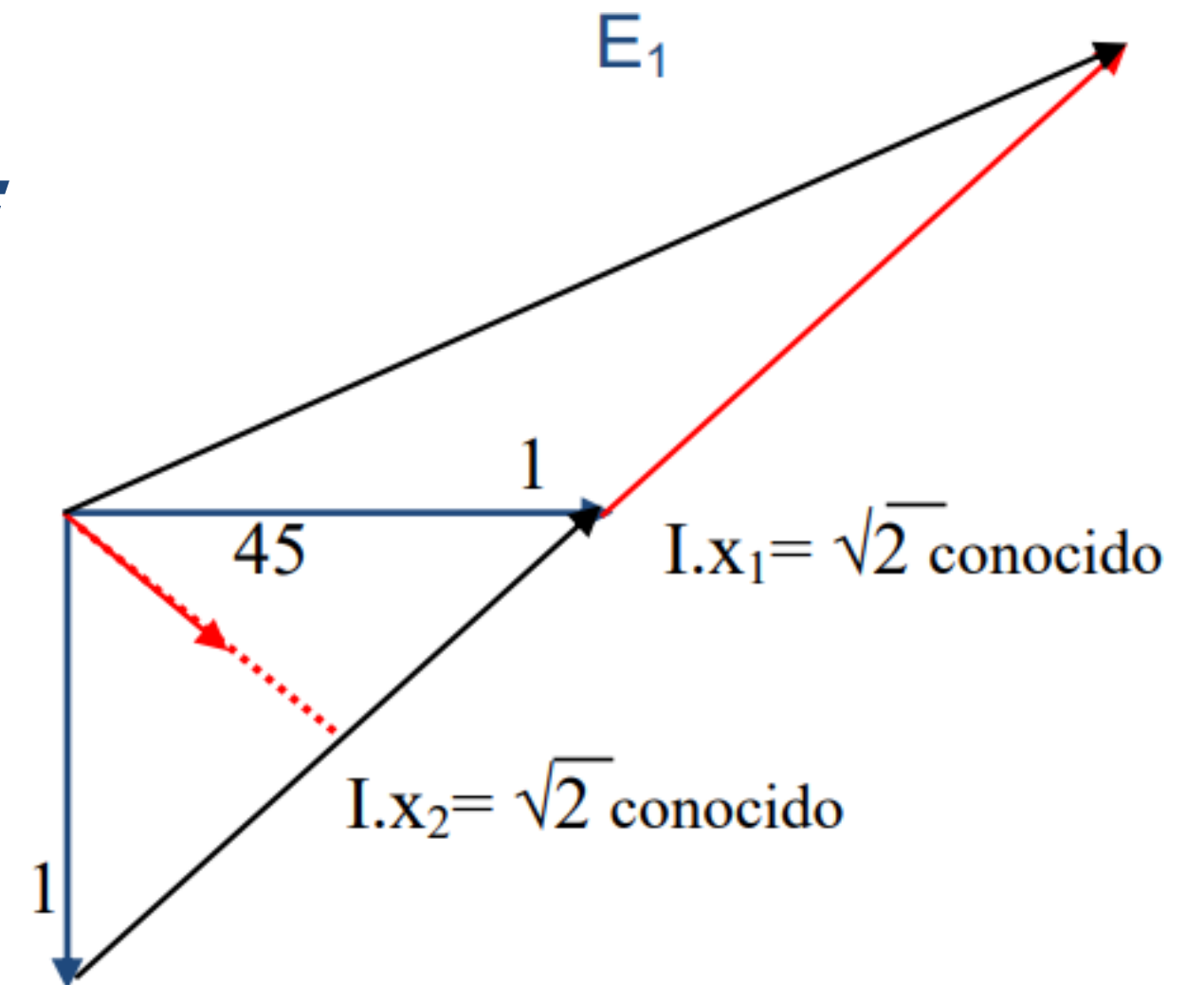
$x_1 = x_2$ originariamente es 1 p.u, la caída $(I \cdot x_1) = \sqrt{2}$

Considerando valores numéricos, por ejemplo: $\delta_1 = 26.6^\circ$;
siendo $\phi = -45$;

$$\delta = \delta_1 + \delta_2 = 116,6^\circ$$

$$E_1^2 = 1^2 + (\sqrt{2})^2 - 2 \cdot 1 \cdot (\sqrt{2}) \cos 135 \quad (-\sqrt{2})/2$$

$$E_1 = 2 + j1E_1 = 2.236 \text{ p.u.}$$



Observar!!!

En este caso, se puede transmitir potencia con un ángulo de carga que supere los 90° sin que aparezcan problemas de estabilidad estática en el sistema (en este caso la Potencia es máxima a los 135°). El único gran inconveniente es que para lograr esta transmisión es necesaria una Tensión de excitación altísima $E_1 = 2.236\text{p.u.}$

Gráficamente:

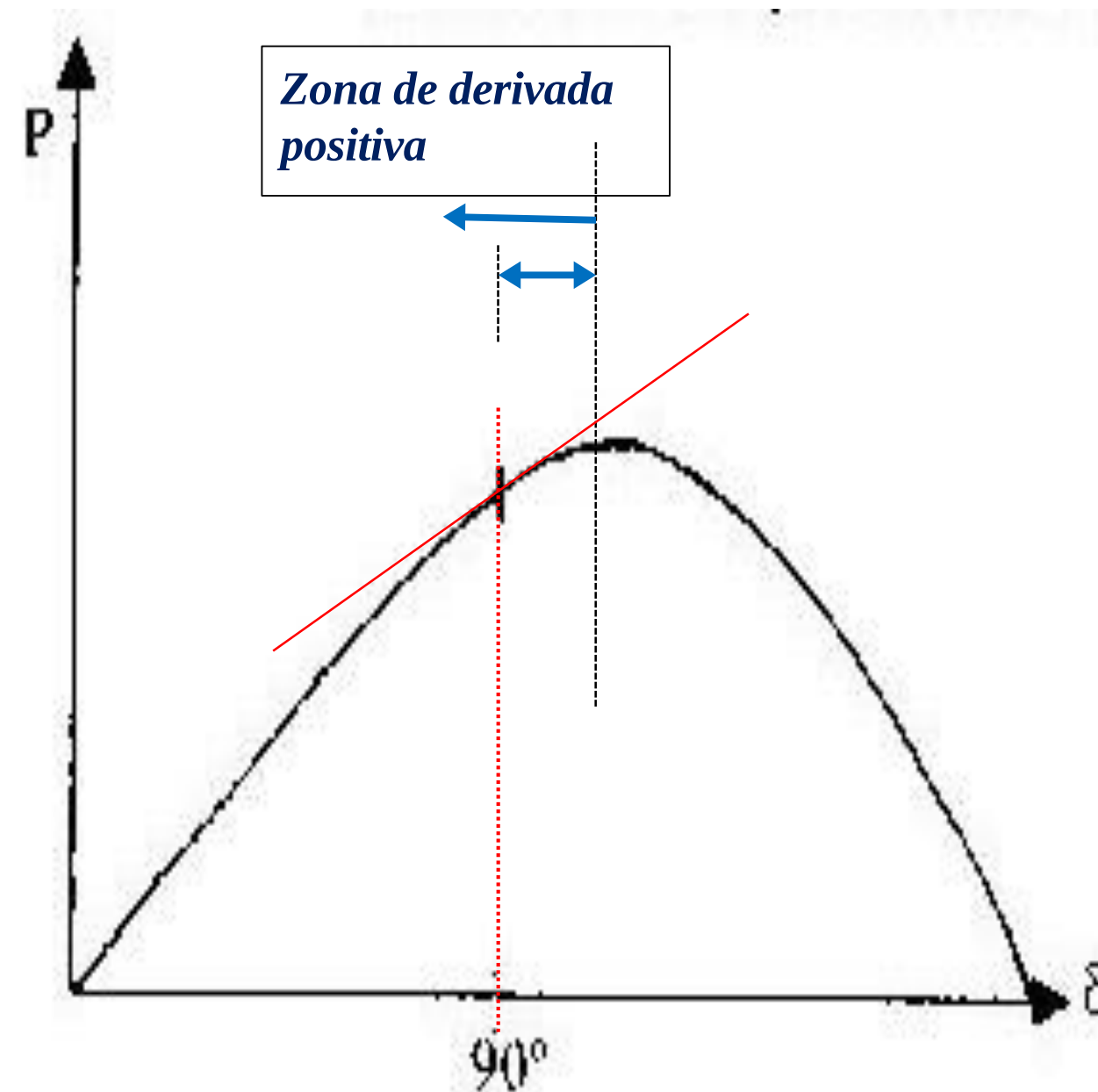


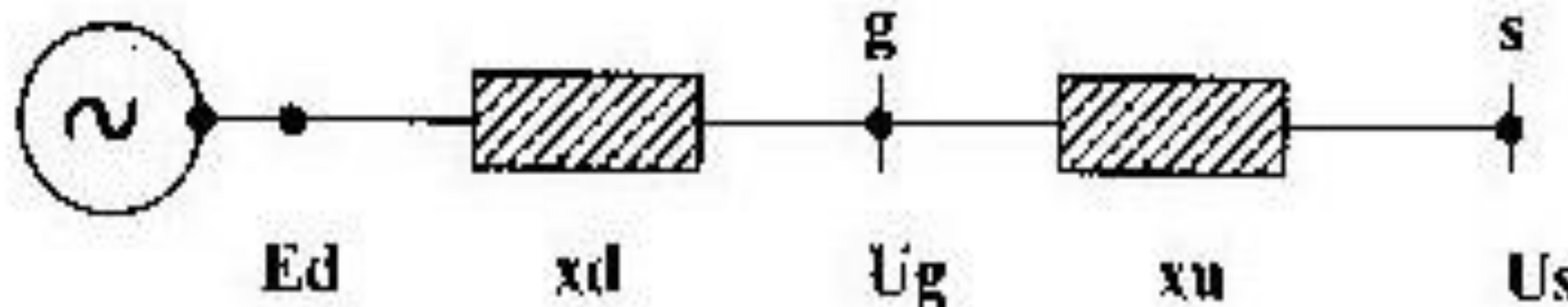
Figura 5: Característica potencia- ángulo con control de excitación - Caso Real

4. Límite de Estabilidad Estática Natural y Artificial

"Límite de Estabilidad Estática Natural" es el máximo flujo de Potencia alrededor de un punto de operación particular para el cual se garantiza el sincronismo del sistema frente a la ocurrencia de una falla que implique un cambio leve en su potencia (aumento o disminución)

Sea el siguiente sistema de transmisión:

Donde: $x_d = 1.0 \text{ pu}$ $U_s = 1.0 \text{ pu}$
 $x_u = 1.5 \text{ pu}$ $|U_g| = 1.0 \text{ pu}$



Aplicando la **ecuación (7)**

$$P = \frac{E_d \cdot U_s \sin \delta}{(x_d + x_u)}$$

Donde el ángulo " δ " es el desfase entre la tensión de la rueda polar " E_d " y la tensión en el punto de suministro " U_s ".

El máximo valor de Potencia Eléctrica se presenta **cuando $\delta = 90^\circ$** y se la denomina **"Límite de Estabilidad Estática Natural del Sistema"** y se la define a través de la siguiente ecuación y condiciones:

$$P^N_{\text{máx}} = \frac{E_d \cdot U_s}{(x_d + x_u)} \quad \text{"Potencia Límite Natural"}$$

Condición:

El ángulo de carga medido entre E_d y U_s (δ) es igual a 90°

"Límite de Estabilidad Estática Artificial": Cuando el ángulo que se hace igual a 90° es el desfase entre la tensión del Punto de suministro y la tensión del nodo controlado por el regulador de Tensión; en este caso el regulador controla la tensión en bornes del generador.

En estas condiciones, la tensión de excitación adquiere un valor diferente al del caso anterior y **el ángulo que forma E_d con U_s es mayor que 90° " δ_{ds} "**

La potencia calculada en estas condiciones es mayor que la anterior (por efecto del cambio en E_d) y se denomina "Límite de Estabilidad Estática Artificial del Sistema", así:

$$P^A_{\text{máx}} = \frac{E^R_d \cdot U_s}{(x_d + x_u)}$$

Condición:

"Potencia Límite Artificial"

- El ángulo de entre el Nodo controlado y U_s es igual a 90°
- $\delta > 90^\circ$

 **El valor de potencia obtenido para el límite artificial es mayor que el natural.**

Cuando un sistema se encuentra trabajando en el límite de Estabilidad Estática Artificial, es mucho menos seguro y su respuesta ante una pequeña perturbación es fundamentalmente función del sistema de regulador presente.

Puntos importantes que destacar:

- ***En presencia de un regulador lento, con una zona muerta muy grande, cualquier perturbación, compromete la estabilidad estática del sistema.***
- ***Un regulador rápido con una zona muerta moderada favorece el penduleo y hay probabilidad de lograr la estabilidad estática***
- ***Los reguladores electrónicos sin zona muerta garantizan la estabilidad estática.***

5. Influencia de la Regulación de Tensión sobre la Estabilidad Estática

Sea el sistema de transmisión de la figura. Calcular la Potencia a transmitir bajo las condiciones siguientes:

UgUsUgUs

Donde:

Us = constant (Red Rígida)

Ug = 1.00 p.u = constante mediante la actuación manual del regulador de tensión

$$P = \frac{E_d U_s \sin \delta}{(x_d + x'')} = \frac{U_s E_d \sin \delta}{(x_d + x'')}$$

Constante

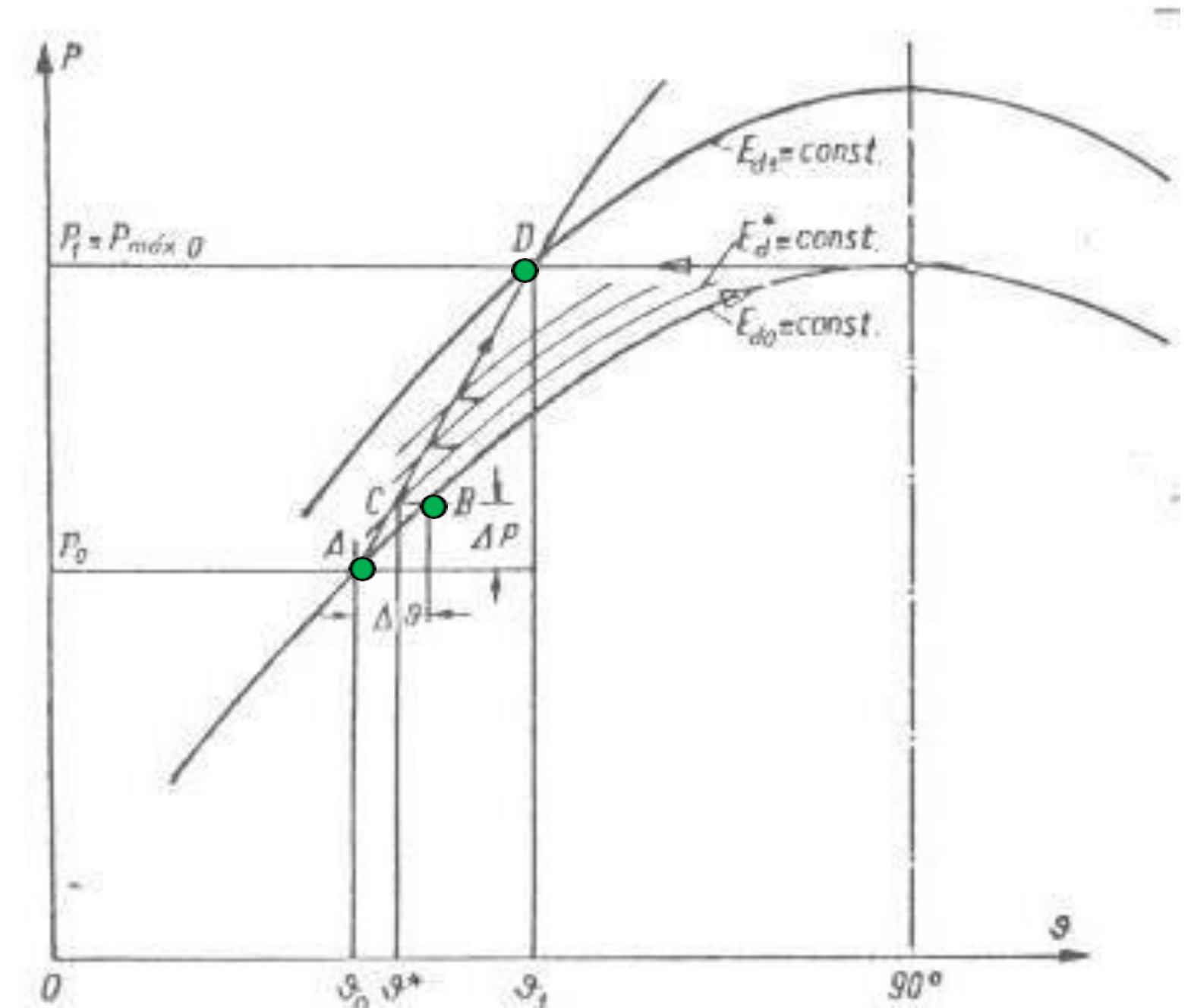
Si llamamos a $E_d = E_{d0}$ para que coincida con la nomenclatura del dibujo entonces

$$P = \frac{E_{d0} U_s \sin \delta}{(x_d + x'')} = P_{\max} \sin \delta$$

A- Análisis de Estabilidad en el punto "A"



Ed xd xt1 xl xt2

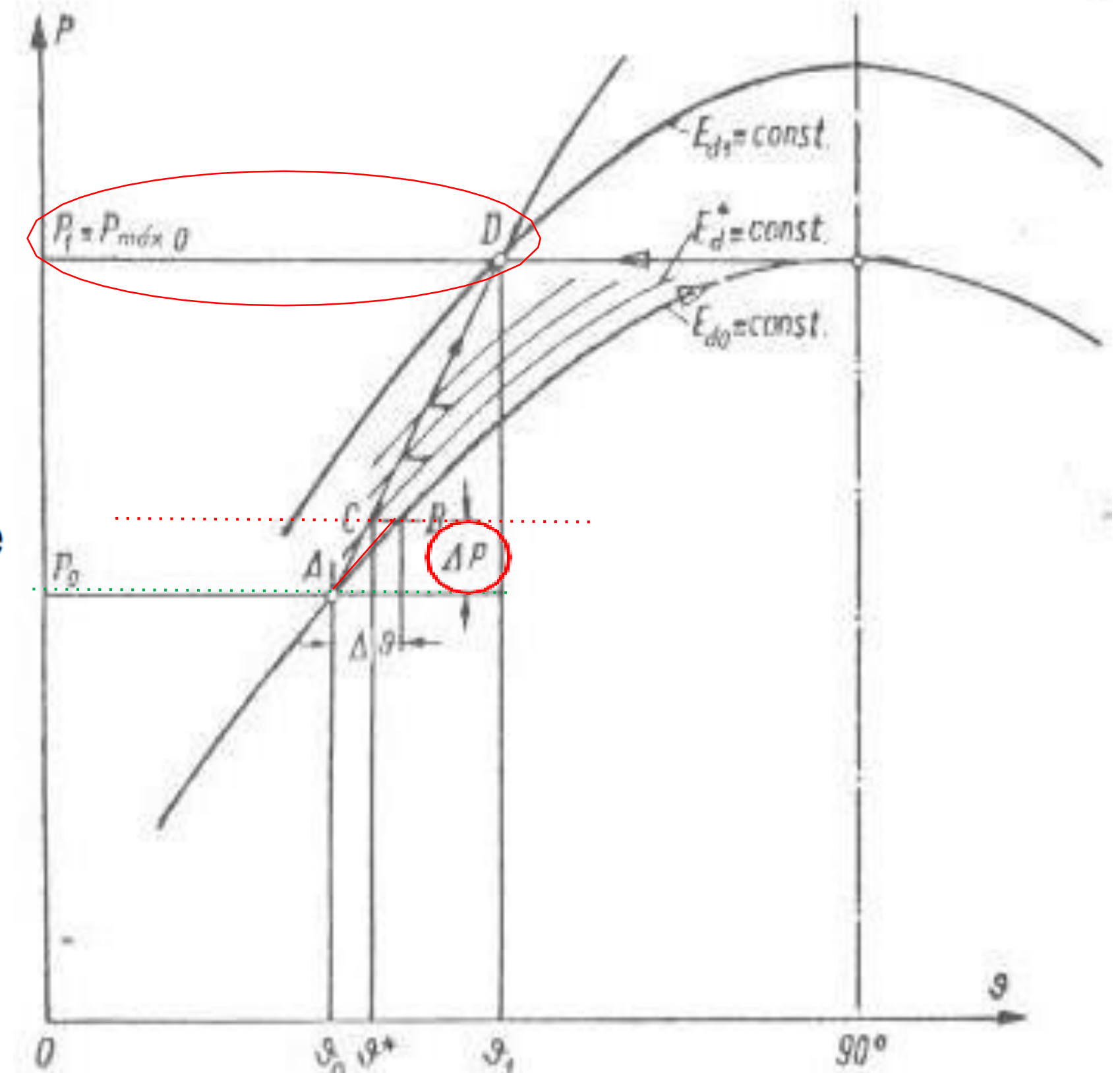


Análisis del proceso:

- **Pm aumenta** $\Rightarrow$ **(Po + ΔP)**
- Pg va de A hasta B sobre la curva roja con $E_{d0} = \text{cte}$
- δ_0 crece a un nuevo valor $\delta \Rightarrow (\delta_0 + \Delta\delta)$
- Ug disminuye
- Actúa el regulador y $\Rightarrow$ lexc aumenta mientras $\Rightarrow (Po + \Delta P) = \text{cte}$
- Ed **crece** de E_{d0} hasta E_d^*
- δ **disminuye** de $(\delta_0 + \Delta\delta)$ hasta δ^*
- El punto de operación va de **B** a **C** ($E_d^* = \text{cte}$)

$$Po + \Delta P = \frac{U_s E_{d0}}{x_d + x_{ii}} \text{sen}(\delta_0 + \Delta\delta)$$

$$Po + \Delta P = \frac{U_s E_d^*}{x_d + x_{ii}} \text{sen}(\delta^*)$$



E_d^*

$> E_{d0}$

por lo tanto

$\delta^* < (\delta_0 + \Delta\delta)$

**Para $P_1 = P_{\text{maxo}}$; punto "D";
mucho mas grande que δ_0**

$\delta_1 < 90^\circ$ aunque

Conclusiones a saber:

- ✚ La regulación de tensión permite transmitir una **Potencia $> P_{\max}$** (amplitud para $E_d = \text{constante}$) en forma estable siempre que en los puntos A, B, C, D se cumpla la

condición de estabilidad estática es decir: $\frac{\partial P}{\partial \delta} > 0$.

En esa parte de la curva no es necesario que el regulador sea muy rápido

- ✚ Si la regulación no actúa también es posible transmitir potencia en forma estable (aunque a mayor aumento de δ) hasta el valor máximo que permita la $E_d = \text{constante}$ que se tenga en ese momento.

- ✚ **P_3** = Potencia límite estática, $\delta_{gr} = 90^\circ$; $\frac{\partial P}{\partial \delta} = 0$.

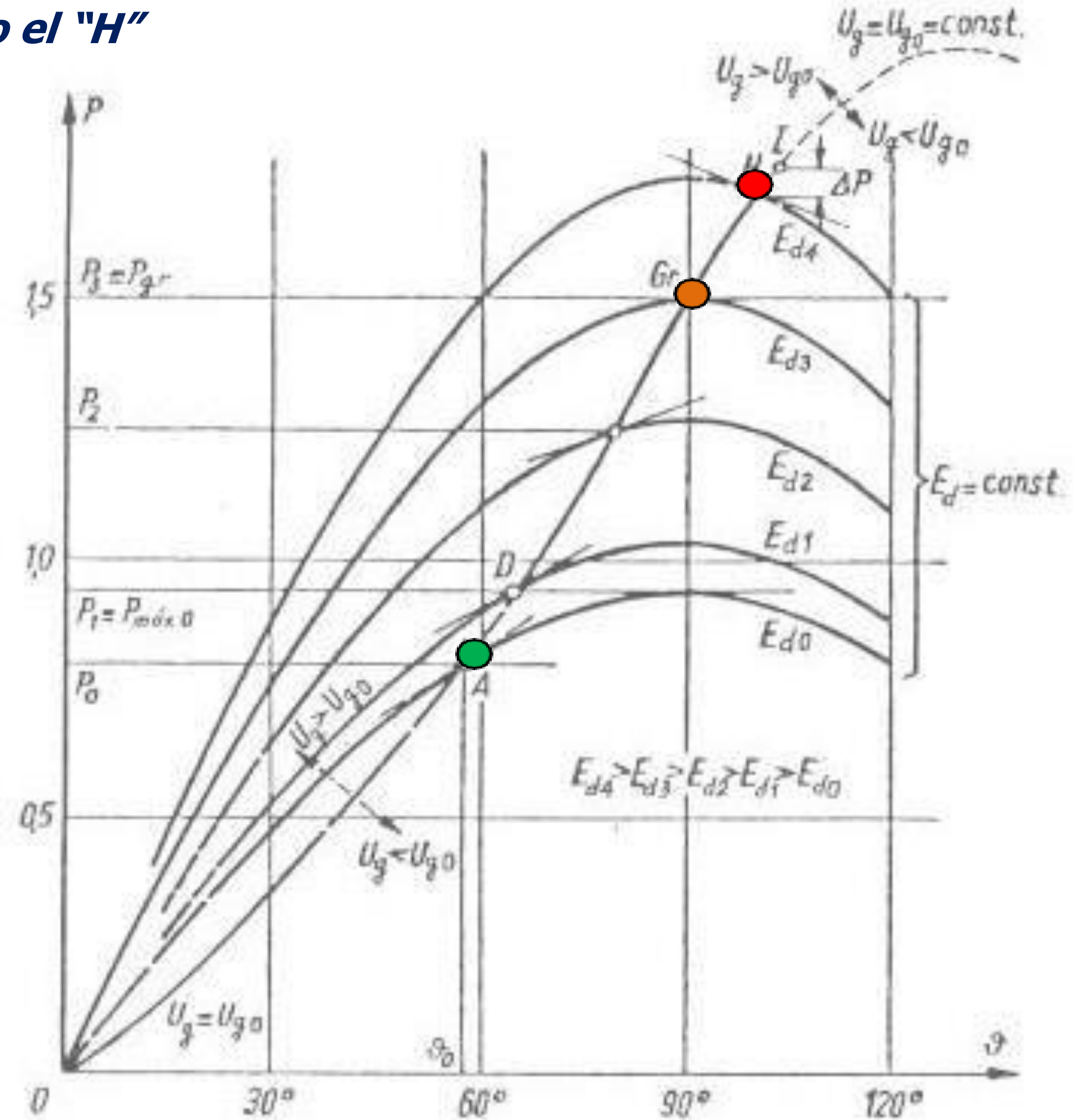
- ✚ En sistemas de transmisión mas complicados δ_{gr} es distinto de cero.

B- Análisis de la estabilidad en un punto tal como el "H"

Análisis del proceso

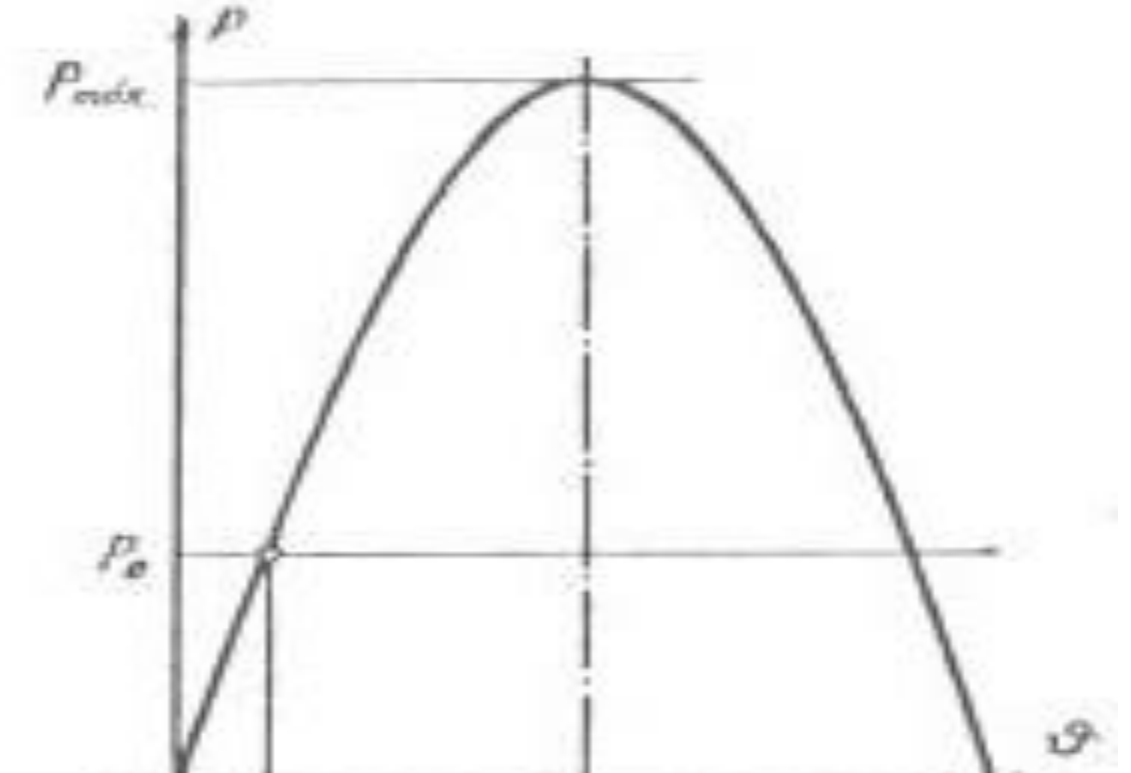
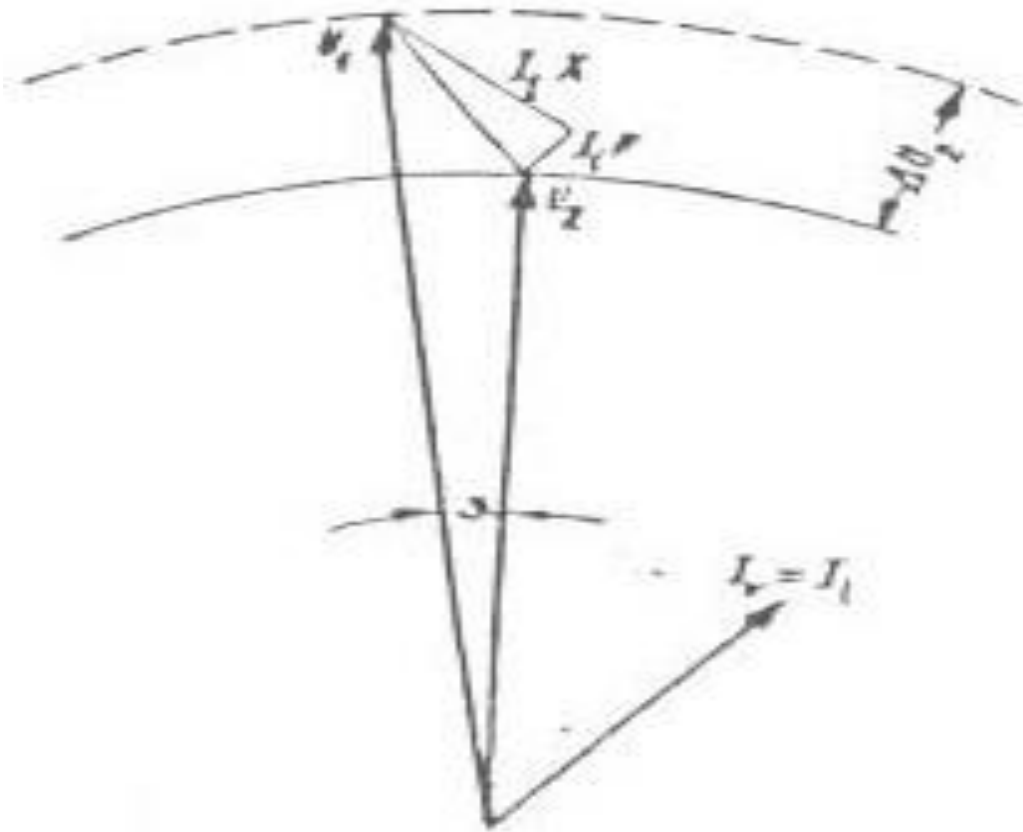
- La Potencia mecánica **aumenta** en ΔP
- δ **aumenta** en $\Delta\delta$
- La Peléctricad**isminuye**.
- La Potencia acelerante es **grande**
- El **ángulo δ aumenta mas** y este aumento provoca la disminución de U_g
- Actúa el regulador de tensión.

En este caso en que el ángulo δ aumenta, se requiere una "rapida" actuación del regulador de velocidad para que sea posible alcanzar el punto "I"



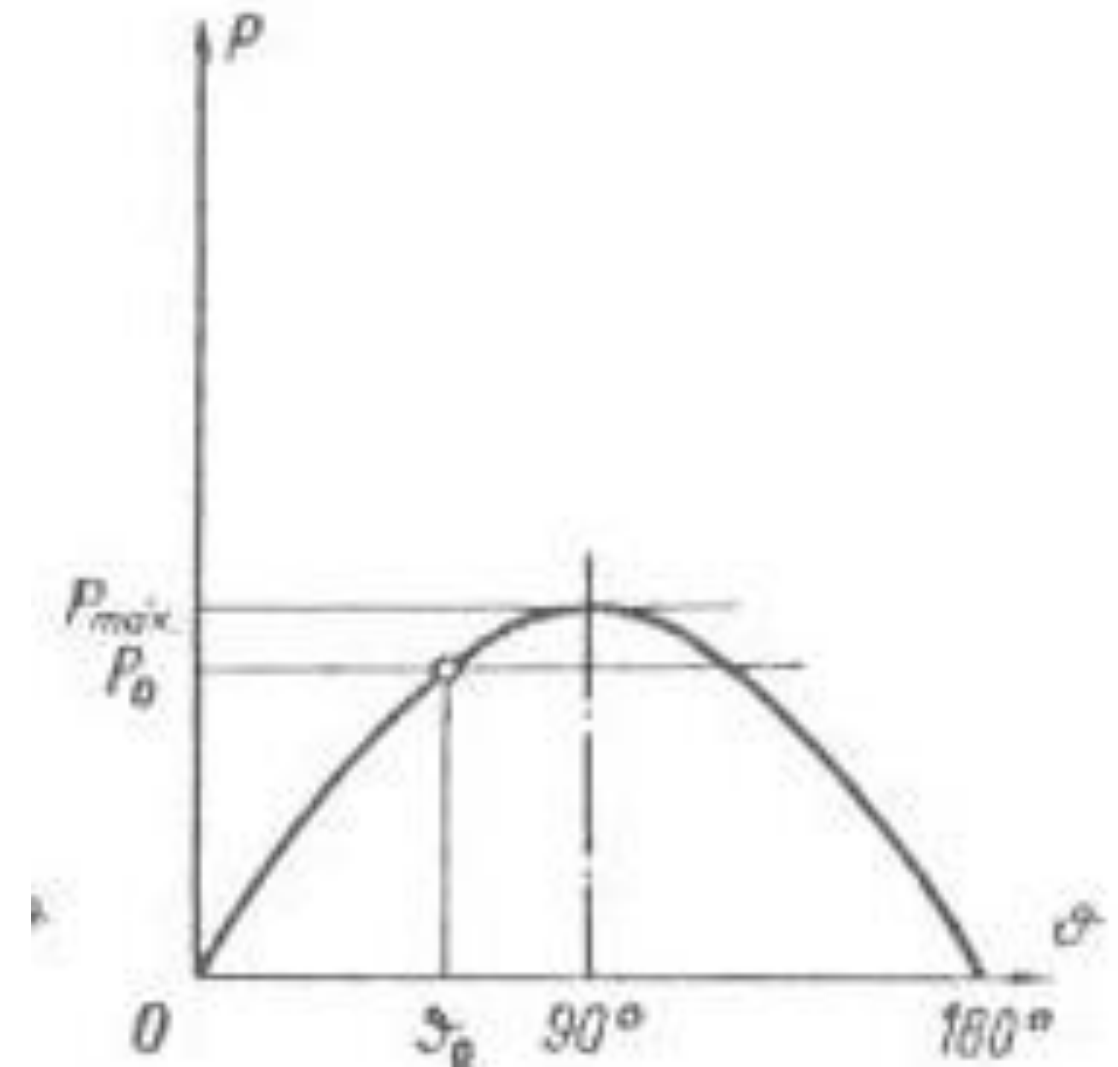
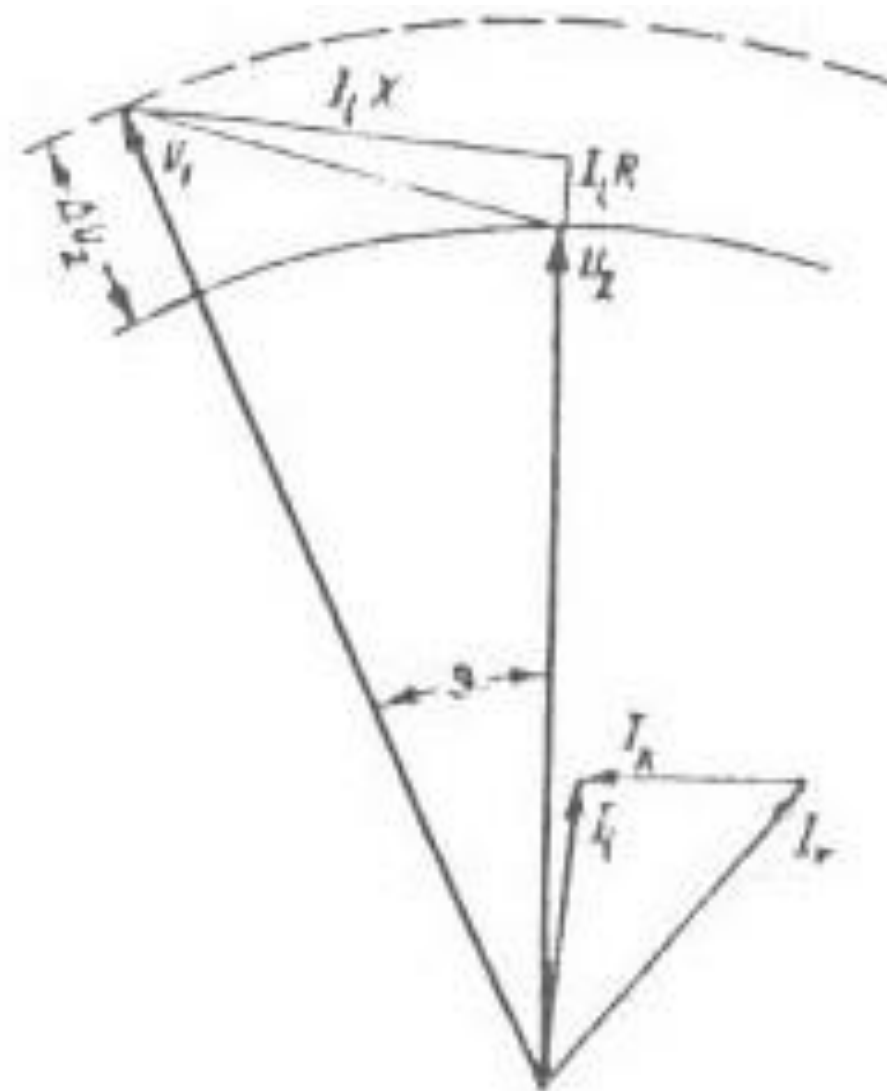
6. Comparación entre Transmisión a Corta y Larga Distancia

1_ Transmisión a Corta distancia:



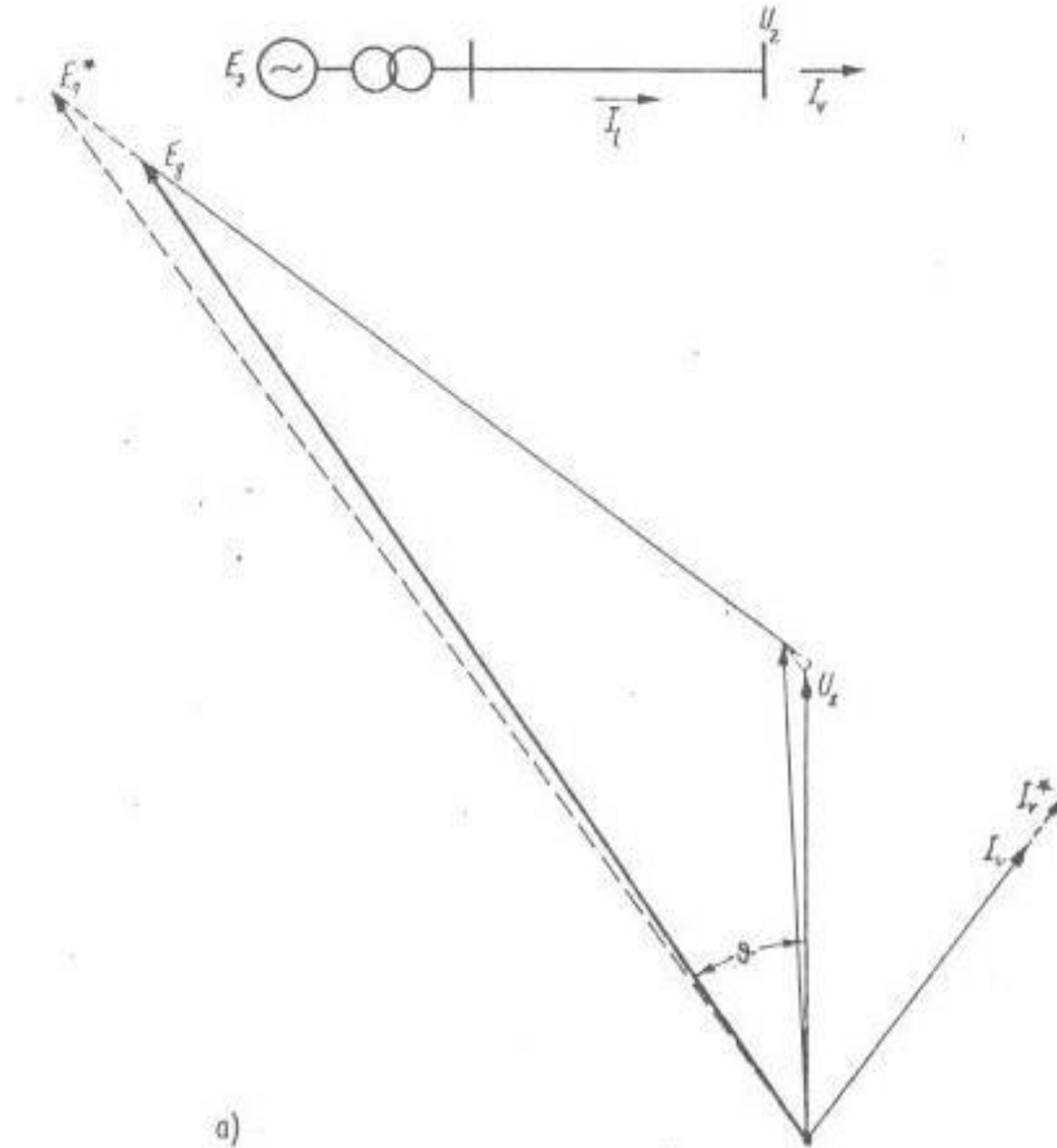
2_ Transmisión a Larga distancia:

Sean los Diagramas Fasoriales correspondientes a los dos tipos de transmisión:

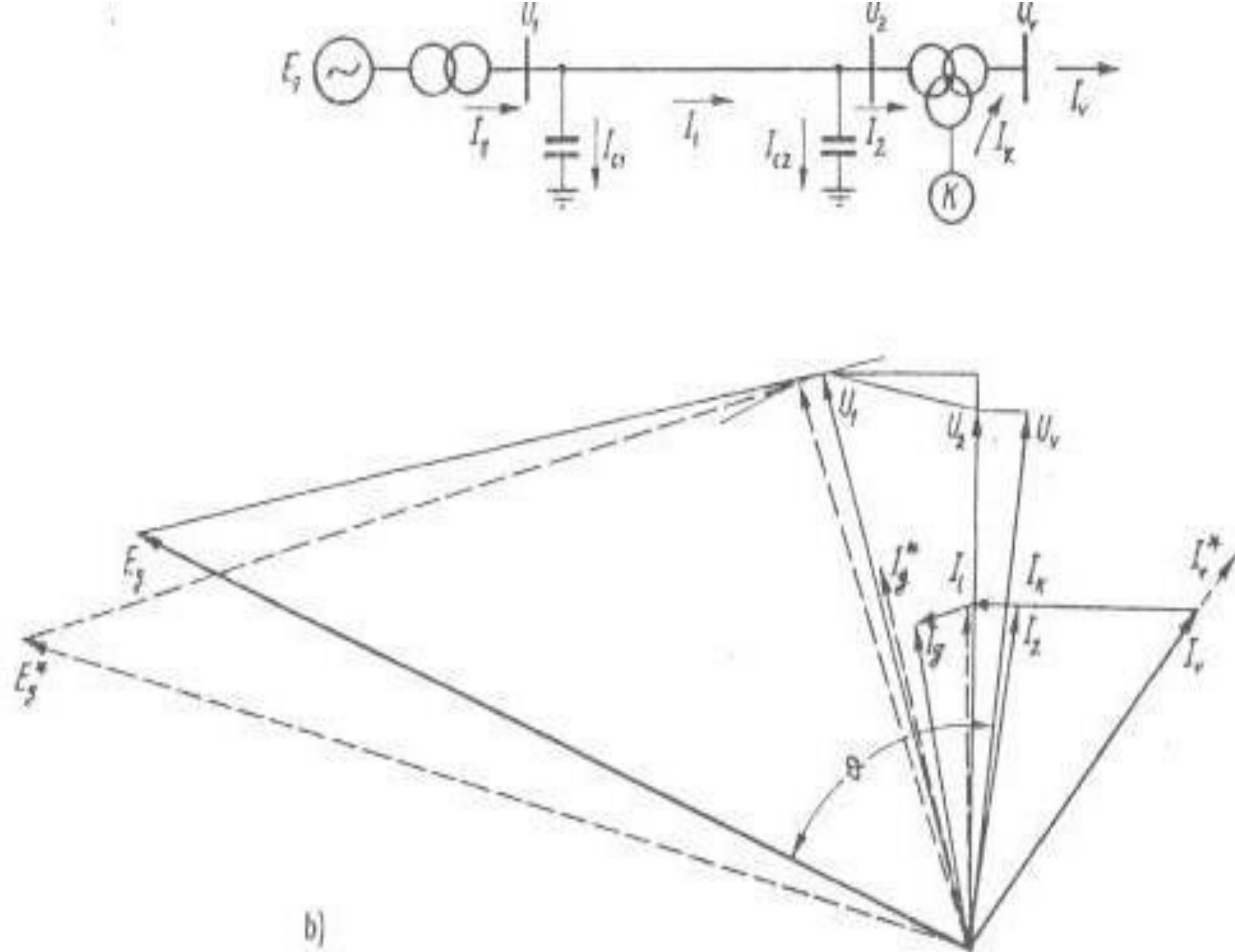


Comparación de los diagramas fasoriales

a- Transmisión de corta distancia (los fasores punteados representan un aumento de carga del 15%)



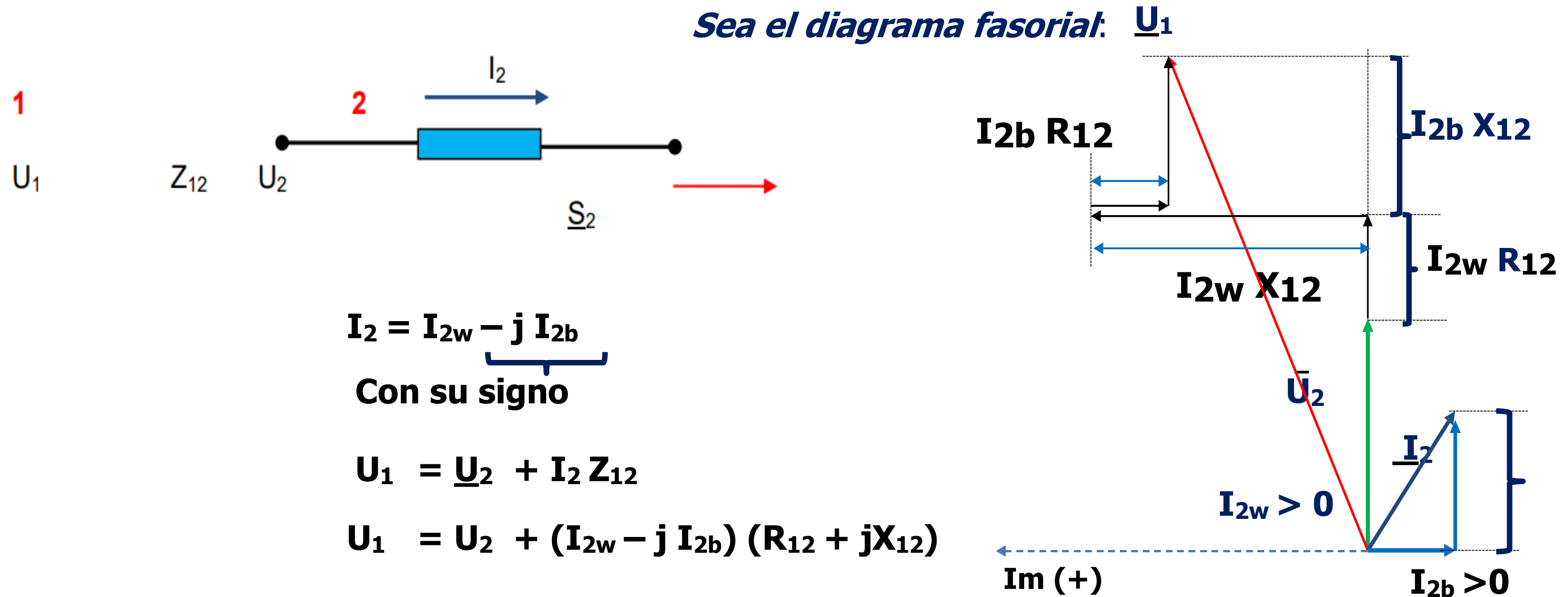
b- Transmisión de larga distancia (los fasores punteados representan un aumento de carga del 15%)



7. Procedimiento para el Cálculo de las Tensiones nodales

A continuación se presenta un procedimiento de cálculo de tensiones en un sistema de transmisión sencillo partiendo de los parámetros de la red y de los valores conocidos de tensión de línea y de potencia trifásica en un punto de suministro, sin necesidad de calcular corrientes.

Sea el sistema:



$$U_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \sqrt{(U_2 + I_{2W} R_{12} + I_{2b} X_{12})^2 + (I_{2W} X_{12} - I_{2b} R_{12})^2}$$

$$U_1 = \sqrt{\left(\underbrace{\sqrt{3} U_2}_{U_2} + \underbrace{\sqrt{3} I_{2W}}_{\frac{P_2}{U_2}} R_{12} + \underbrace{\sqrt{3} I_{2b}}_{\frac{Q_2}{U_2}} X_{12} \right)^2 + \left(\underbrace{\sqrt{3} I_{2W}}_{\frac{P_2}{U_2}} X_{12} - \underbrace{\sqrt{3} I_{2b}}_{\frac{Q_2}{U_2}} R_{12} \right)^2}$$

$$U_1 = \sqrt{\left(U_2 + \frac{P_2 R_{12} + Q_2 X_{12}}{U_2} \right)^2 + \left(\frac{P_2 X_{12} - Q_2 R_{12}}{U_2} \right)^2}$$

$$\tan \vartheta_{12} = \frac{\frac{P_2 X_{12} - Q_2 R_{12}}{U_2}}{U_2 + \frac{P_2 R_{12} + Q_2 X_{12}}{U_2}}$$

Definiendo

$$\frac{P_2 R_{12} + Q_2 X_{12}}{U_2} = \Delta U_d$$

$$\frac{P_2 X_{12} - Q_2 R_{12}}{U_2} = \Delta U_g$$

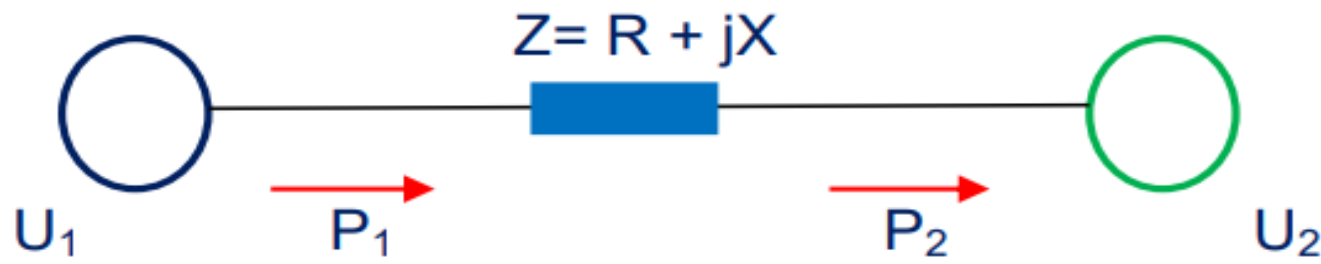
Entonces:

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_d)^2 + \Delta U_g^2}$$

Q_2 con su signo $\begin{cases} > 0 \text{ Ind.} \\ < 0 \text{ Cap.} \end{cases}$

$$\tan \vartheta_{12} = \frac{\Delta U_g}{U_2 + \Delta U_d}$$

8. Consideración de la Pérdidas en la Transmisión con R distinto de cero



$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{12} = Z = R + j X ;$$

$$\alpha_{11} = \alpha_{22} = \alpha_{12} = \alpha = \arctan (R/X)$$

$$\begin{cases} P_1 = (U_1^2/Z) \sin \alpha + (U_1 U_2/Z) \sin (\delta - \alpha) \\ P_2 = (U_2^2/Z) \sin \alpha + (U_1 U_2/Z) \sin (\delta - \alpha) \end{cases}$$

P_1 = Potencia Emitida

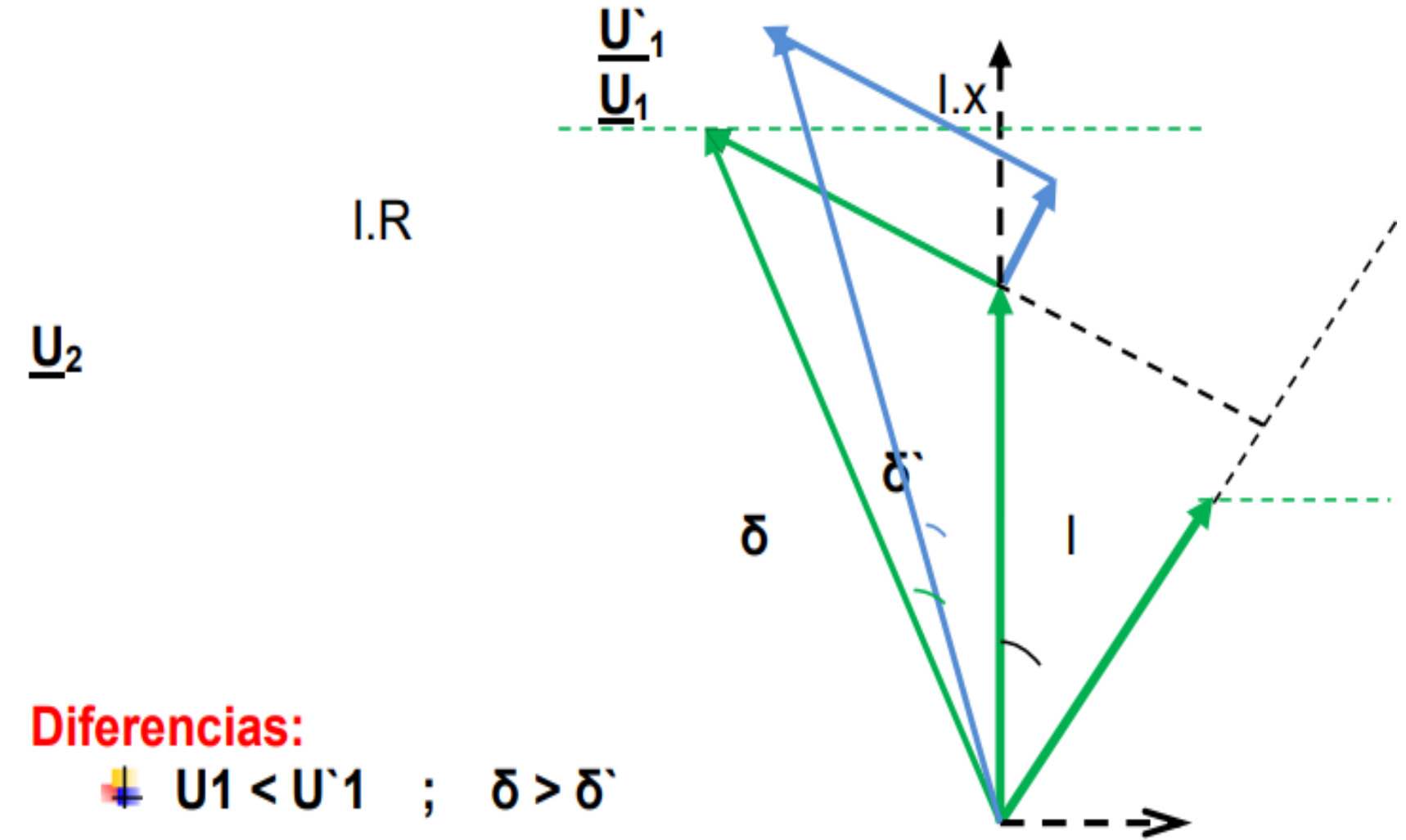
P_2 = Potencia útil en el extremo receptor

$P_1 - P_2$ = Pérdidas de Potencia activa en la línea de transmisión.

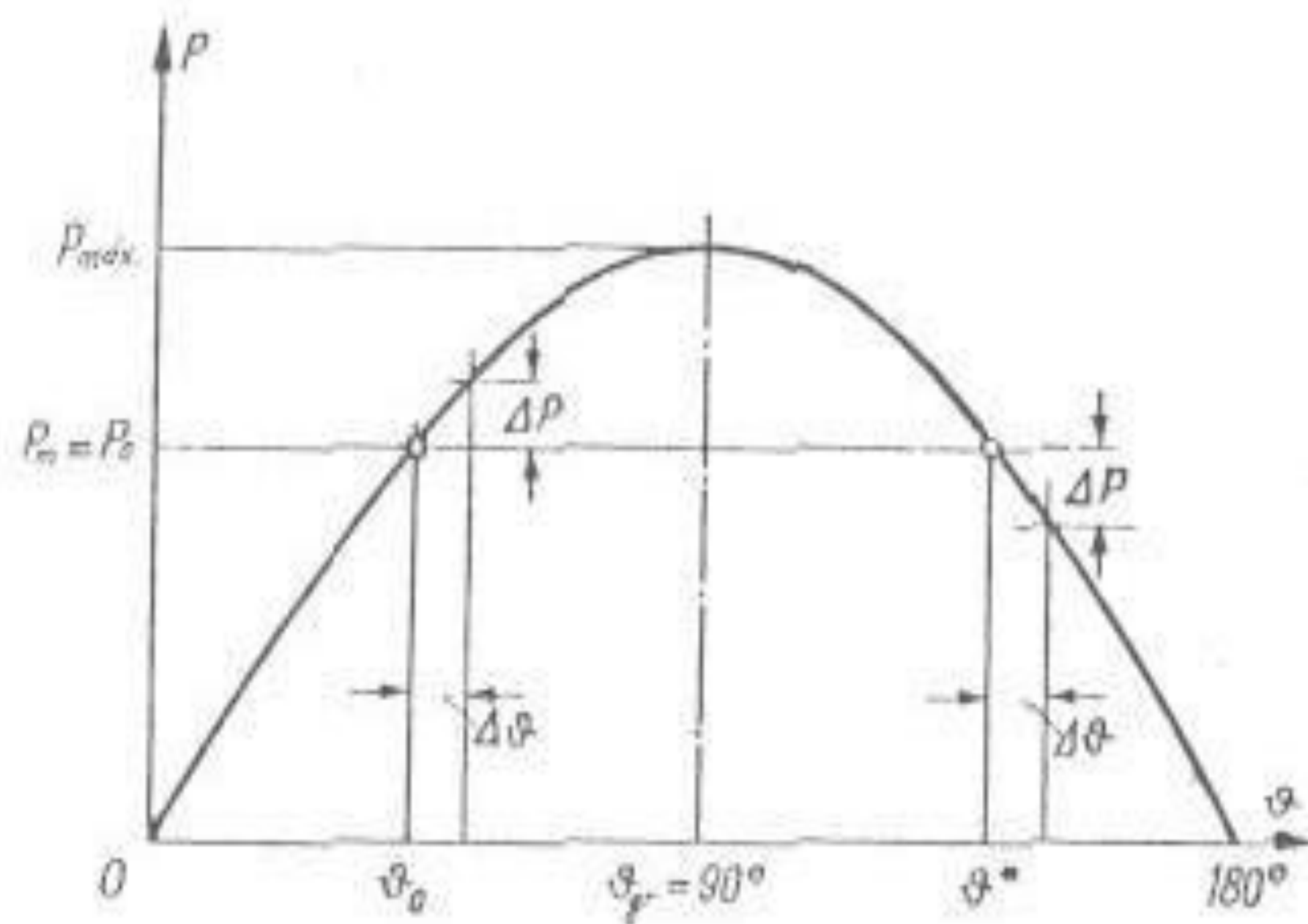
El máximo de potencia útil se tiene para **$\delta = (90)$**

Analicemos en un diagrama fasorial como influye considerar la Resistencia de un sistema de transmisión.

Sea el diagrama dibujado con verde el correspondiente a un sistema de transmisión donde se ha despreciado su parte resistiva.

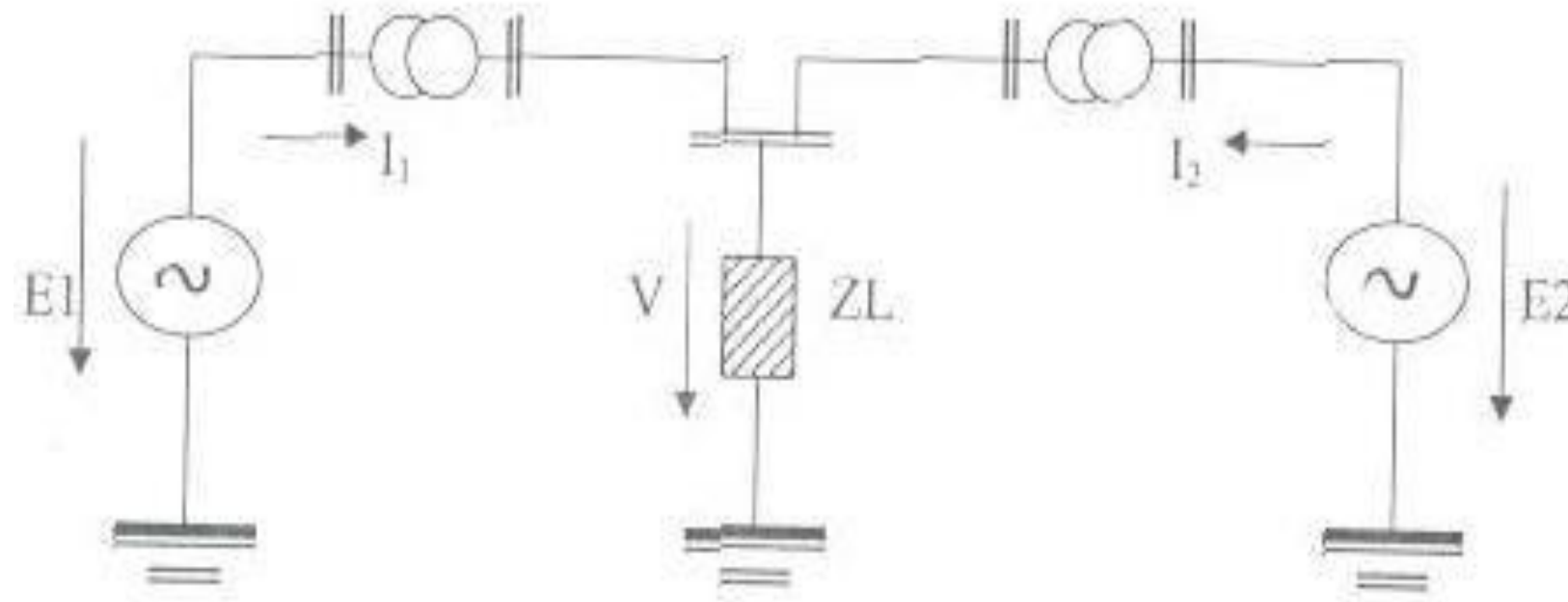


Si calculamos despreciando la resistencia del sistema de transmisión, trabajamos considerando curvas mas bajas y ángulos mas grandes. Por lo tanto, si es sistema, calculado de esta manera es estable, con más razón lo será si consideramos la resistencia.



9. Estabilidad Estática en un sistema de dos Máquinas

Considérese el sistema de transmisión constituido por dos máquinas síncronas alimentando a una carga representada por una impedancia constante "ZL" tal como se indica en la figura.



Para cada máquina se plantea la ecuación de oscilación linealizada según se vio anteriormente. (Con el propósito de simplificar el análisis se desprecia el término correspondiente a la Potencia de amortiguamiento en la ecuación de oscilación.)

$$\left. \begin{array}{l} \text{máquina (1)} \\ \text{máquina (2)} \end{array} \right\} \begin{cases} (2H_1/\omega_N) \cdot \ddot{\Delta\delta}_1 + (\partial P_1/\partial\delta_1) \cdot \Delta\delta_1 + (\partial P_1/\partial\delta_2) \cdot \Delta\delta_2 = 0 \\ (2H_2/\omega_N) \cdot \ddot{\Delta\delta}_2 + (\partial P_2/\partial\delta_1) \cdot \Delta\delta_1 + (\partial P_2/\partial\delta_2) \cdot \Delta\delta_2 = 0 \end{cases}$$

- La potencia entregada por cada una de las máquinas se determina mediante la ecuación:

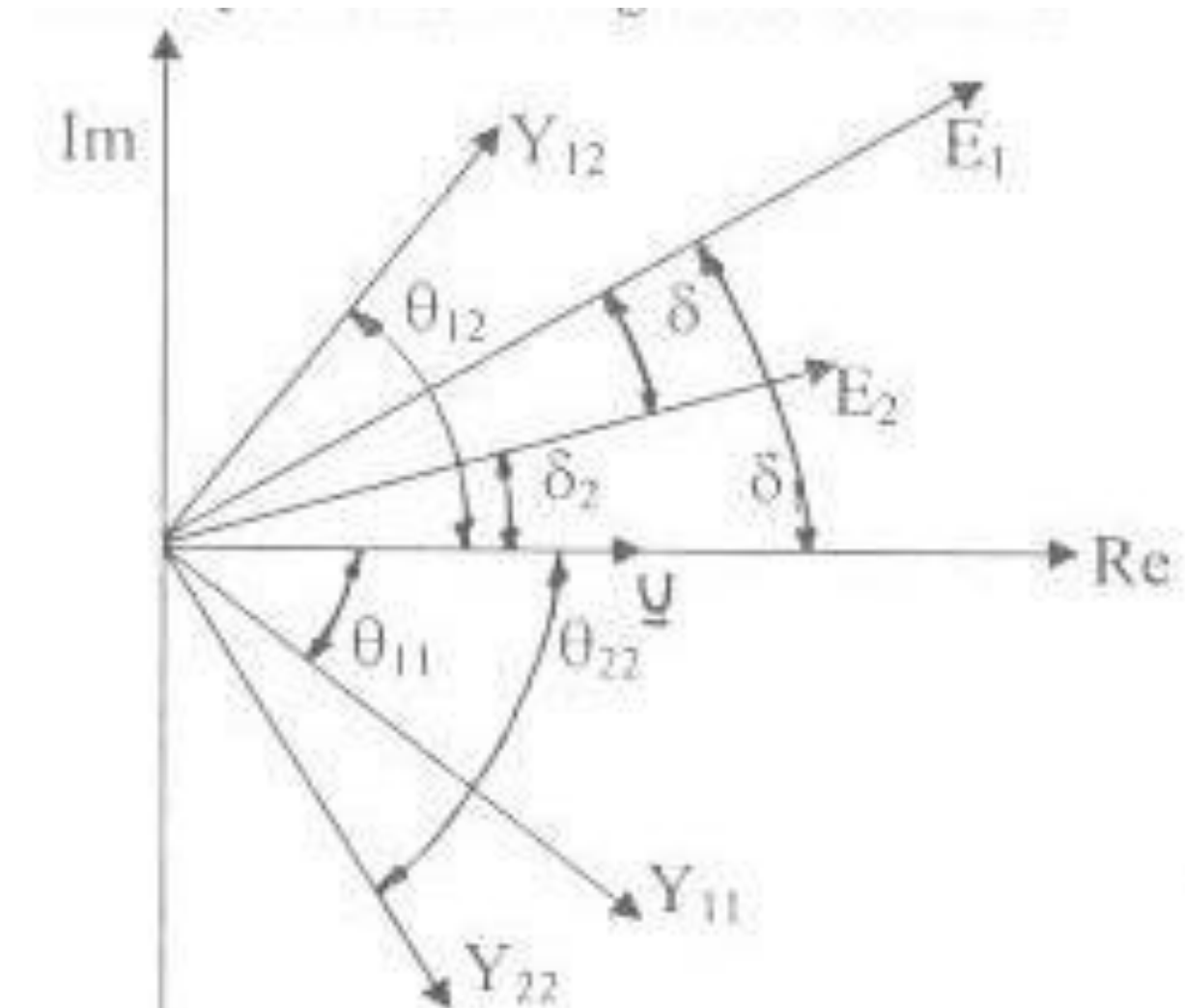
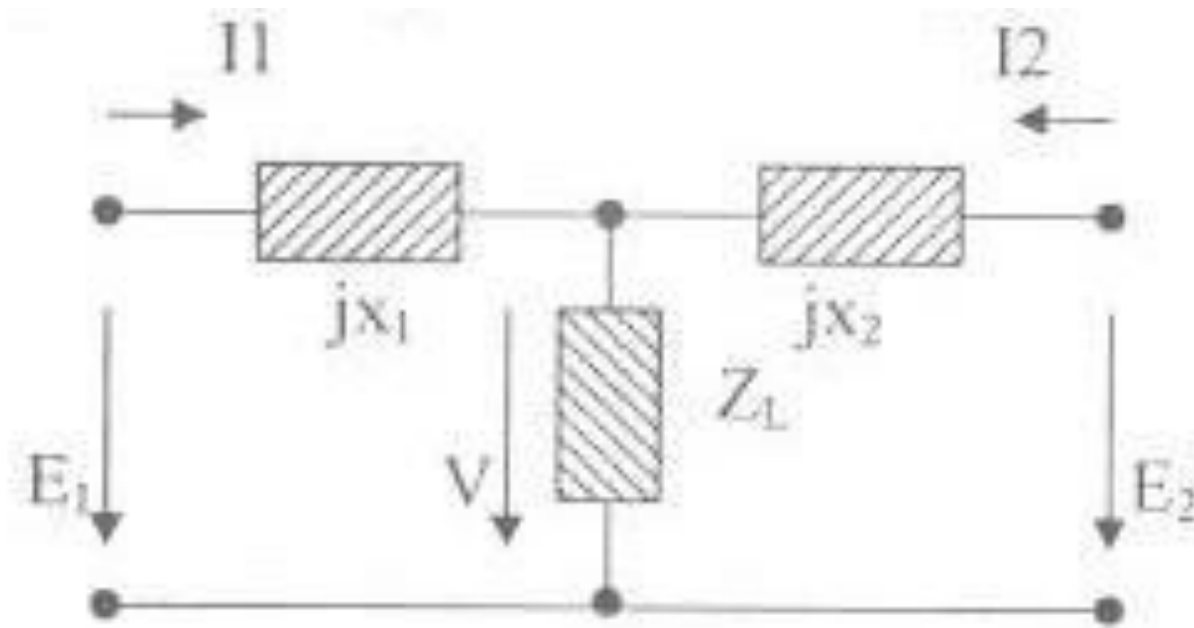
$$P_{e1} = \text{Re}\{E_1 \cdot I_1^*\}$$

- Que desarrollada para cada máquina, en este caso son 2, queda:

$$P_1 = E_1^2 \cdot Y_{11} \cdot \cos(\theta_{11}) + E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2)$$
$$P_2 = E_2^2 \cdot Y_{22} \cdot \cos(\theta_{22}) + E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \cos(\theta_{12} - \delta_2 + \delta_1)$$

Hipótesis simplificativa:

- ***Se desprecian las pérdidas y las impedancias transversales se obtiene para el circuito analizado, el siguiente circuito equivalente de una fase con su correspondiente diagrama fasorial***



Llamando " **δ** " al ángulo de carga de la transmisión, es decir el desfase entre las dos Ep del sistema, se calcula

→ **$\delta = \delta_1 + \delta_2$** (**$\delta_1$** y **$\delta_2$** en este caso se restan)

Aplicando la condición de Estabilidad Estática:

$$\partial P_1 / \partial \delta_1 = -\partial P_1 / \partial \delta_2 = \partial P_1 / \partial \delta = E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \sin(\theta_{12} - \delta) = A1$$

$$\partial P_2 / \partial \delta_1 = -\partial P_2 / \partial \delta_2 = \partial P_2 / \partial \delta = -E_1 \cdot E_2 \cdot Y_{12} \cdot \sin(\theta_{12} + \delta) = -A2$$

Y reemplazando en la ecuación de oscilación de cada máquina, queda:

Aplicando la transformada de Laplace $F_i(s) = L[\Delta \delta_i(t)]$

$$L[\Delta \ddot{\delta}_i(t)] = s^2 \cdot F_i(s) - s \cdot \Delta \dot{\delta}_i(0) - \Delta \ddot{\delta}_i(0)$$

Reemplazando en el sistema de ecuaciones diferenciales a resolver y **recordando que $\Delta \dot{\delta}_i(0) = 0$, ya que el ángulo nunca varía a saltos**

Resolviendo este sistema se obtiene:

donde:

$$D_i = (A_i \cdot \omega_N) / 2 H_i$$

El Polinomio del denominador tiene tres raíces

$$s1 = 0$$

$$s2 = +\sqrt{-(D1 + D2)}$$

$$s3 = -\sqrt{-(D1 + D2)}$$

máquina (1)

$$(2H_1/\omega_N) \cdot \Delta \delta_1 + A1 \cdot \Delta \delta_1 - A1 \cdot \Delta \delta_2 = 0$$

máquina (2)

$$(2H_2/\omega_N) \cdot \Delta \delta_2 - A2 \cdot \Delta \delta_1 + A2 \cdot \Delta \delta_2 = 0$$

"Sistema de Ecuaciones Diferenciales a Resolver"

máquina (1)

$$[s^2 + (A1 \cdot \omega_N) / 2H_1] \cdot F_1(s) - [(A1 \cdot \omega_N) / 2H_1] \cdot F_2(s) = s \cdot \Delta \delta_1(0)$$

máquina (2)

$$[s^2 + (A2 \cdot \omega_N) / 2H_2] \cdot F_2(s) - [(A2 \cdot \omega_N) / 2H_2] \cdot F_1(s) = s \cdot \Delta \delta_2(0)$$

$$F_i(s) = [\Delta \delta_i(0), s^2 + D1, \Delta \delta_2(0) + D2, \Delta \delta_1(0)] / [s \cdot (s^2 + D1 + D2)]$$

-Si $(D1 + D2) < 0$, las raíces $s2$ y $s3$ son reales y la oscilación es exponencialmente creciente **Sistema Inestable**

-Si $(D1 + D2) > 0$, las raíces $s2$ y $s3$ son imaginarias puras y la oscilación es no amortiguada **Sistema Oscilatorio**

$$D1 + D2 = (A1 \cdot \omega_N) / 2H_1 + (A2 \cdot \omega_N) / 2H_2$$

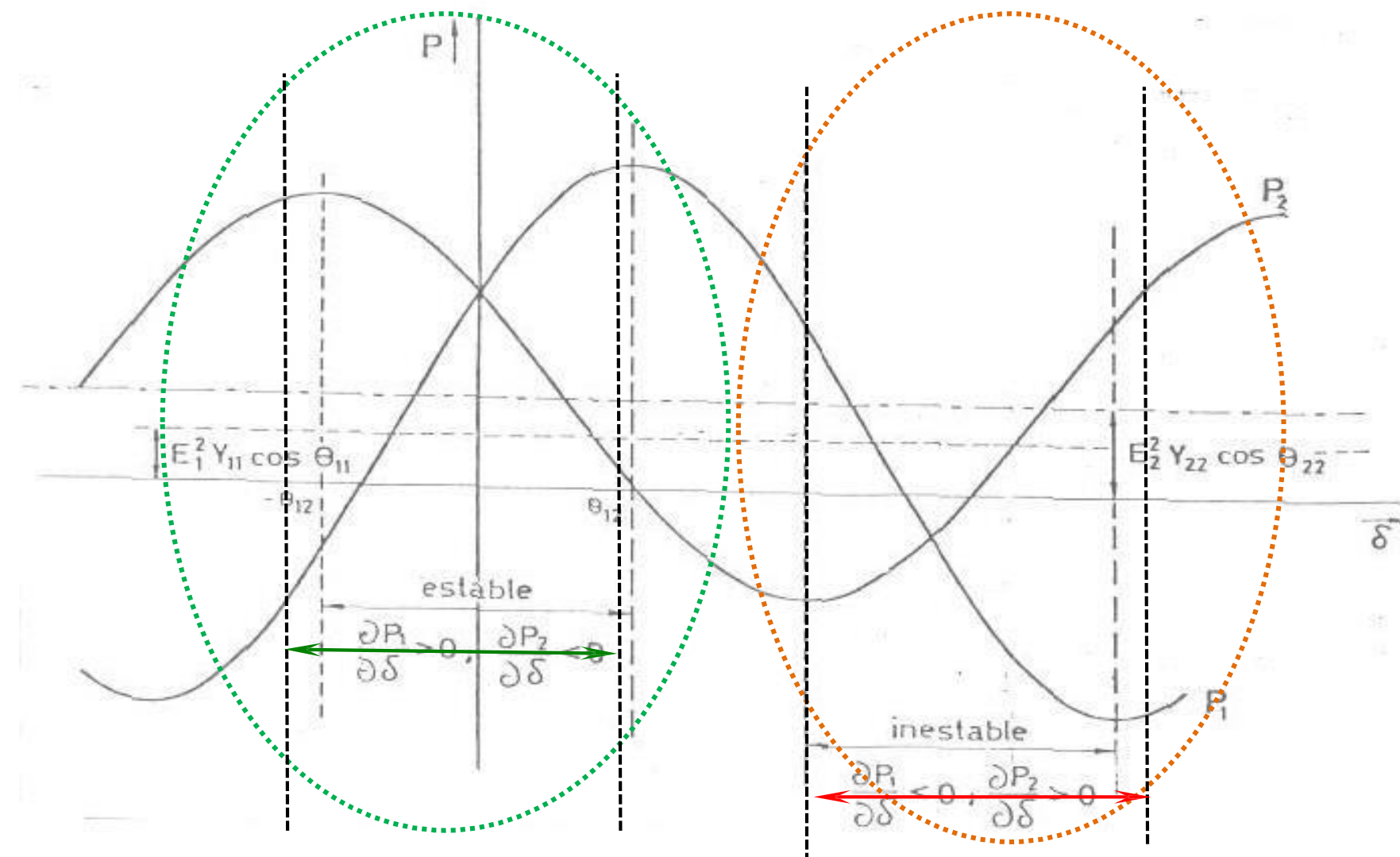
$$= (\omega_N / 2H_1) \cdot [\partial P_1 / \partial \delta - (H_1 / H_2) \cdot (\partial P_2 / \partial \delta)]$$

En resumen, el Sistema será ESTABLE si y solo si: $(\partial P_1 / \partial \delta) > (H_1 / H_2) (\partial P_2 / \partial \delta)$

Condición de Estabilidad Estática de un sistema de "dos" Máquinas

A continuación se adjuntan las características de oscilación de las dos máquinas.
Evidentemente, en este sistema, habrá estabilidad si $(\partial P_1 / \partial \delta) > 0$ y $(\partial P_2 / \partial \delta) < 0$ y no la habrá en las otras regiones.

En cada sistema y estado de operación particular, la estabilidad depende de las relaciones entre las derivadas de las potencias respecto de delta y de las relaciones entre las constantes de inercia de las máquinas.



10. Funcionamiento del generador sincrónico conectado a una red

$$\underline{I} = j (\underline{U}/x_d) - j (\underline{E}_p/x_d)$$

1. Operación AISLADA:

Cualquier cambio en la excitación de la máquina incide directamente en la tensión en bornes ya que la tensión está fijada por la máquina.

2. Operación INTERCONECTADA:

En este caso, la tensión está impuesta por la red y cualquier cambio en la excitación no afecta a la tensión en bornes. La tensión y la frecuencia de la red están definidas directamente por el conjunto de las máquinas generadoras presentes.

3. Operación conectada a una RED RÍGIDA:

Se define como red rígida a una Red muy potente en comparación con la máquina, en este caso, tanto la frecuencia como la tensión en módulo y fase son constantes.

La tensión de una red Rígida es constante así, considerando el circuito equivalente de una máquina sincrónica, la corriente en el circuito es:

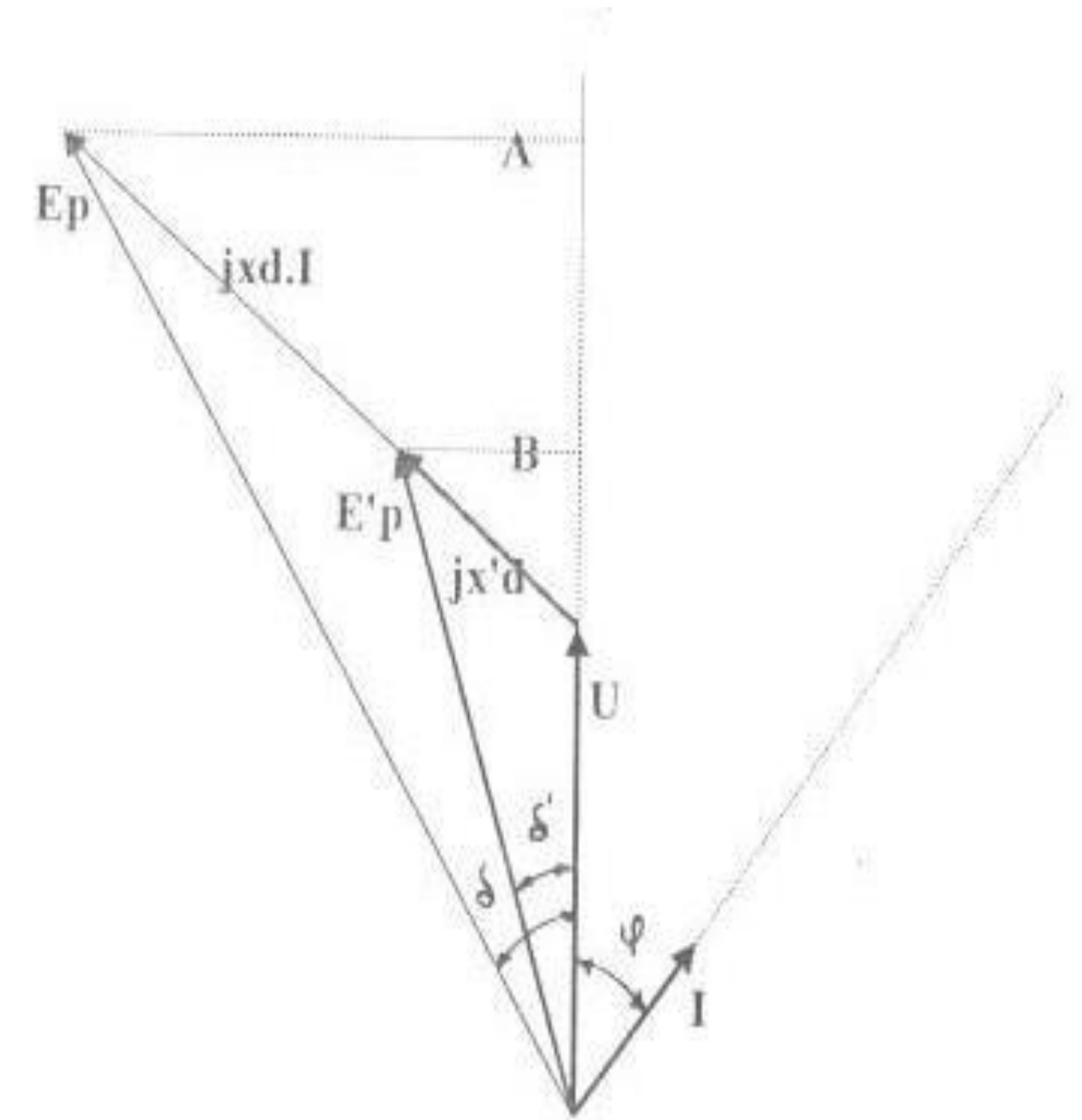


Diagrama fasorial de una máquina sincrónica conectada a una red rígida de tensión ($U =$ Tensión constante)

Donde " $\underline{E}_p$ " y " δ " son parámetros y " $\underline{U}$ " es una constante.

En la **Figura a continuación** se muestra el diagrama fasorial de corrientes de la máquina síncrona, el cual se obtiene del diagrama de tensiones anterior, aplicando la última ecuación.

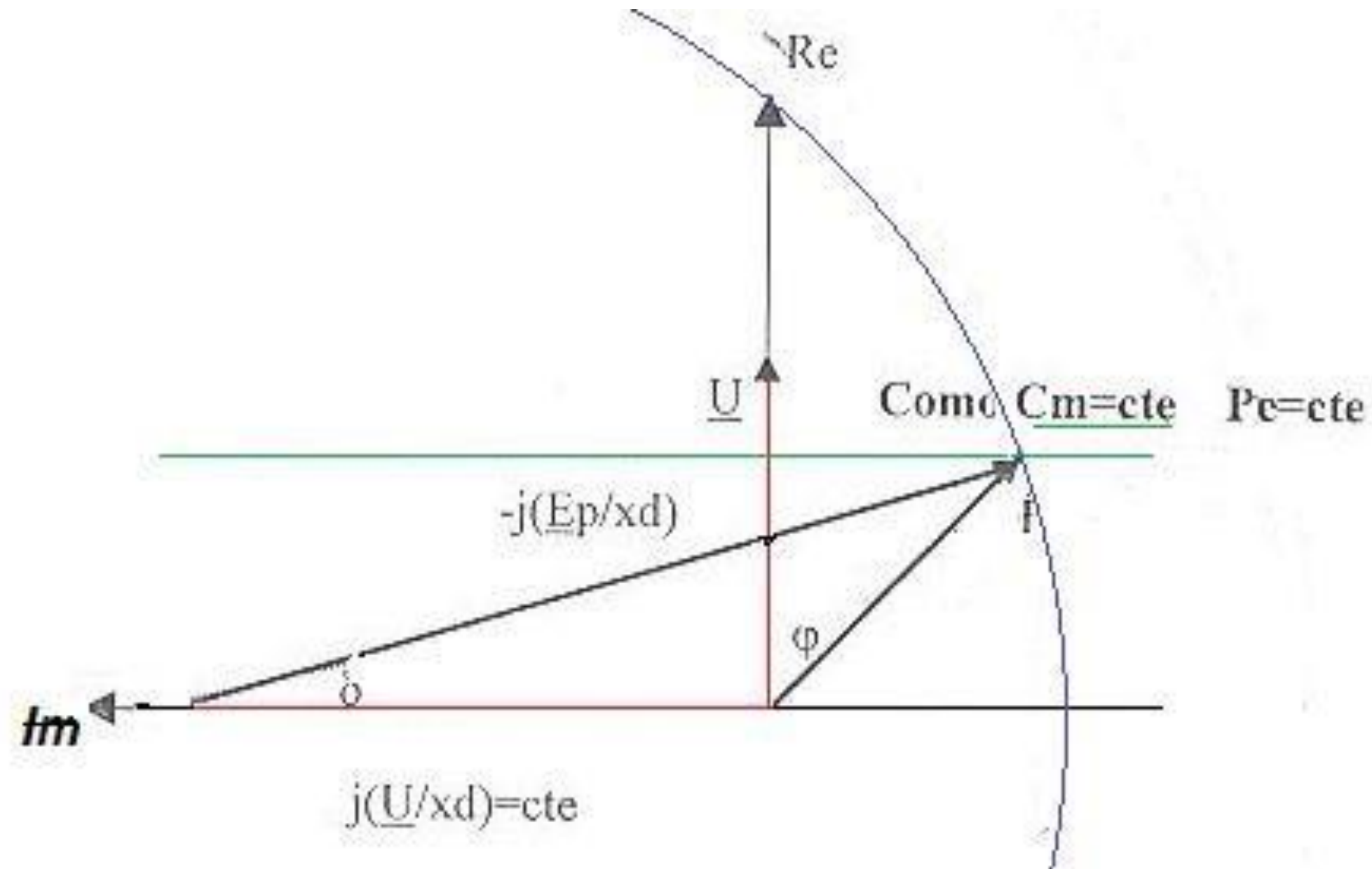


Diagrama fasorial de corrientes de la máquina síncrona

11. Modificación de las variables de operación frente a cambios lentos y pequeños en las condiciones de operación

Para realizar este análisis se considera una máquina sincrónica conectada a una red rígida de Potencia Infinita, lo que implica que la tensión U es una constante en el problema

Variaciones de cupla mecánica de impulso para corriente de excitación y velocidad angular mecánica constante

Supóngase que se produce un cambio en la cupla mecánica manteniendo constante la excitación y suponiendo que el cambio es tan paulatino y lento que la velocidad sincrónica permanece constante, así, un aumento de la cupla con tensión de excitación constante produce un aumento de la potencia activa " P " y un aumento en el ángulo delta.

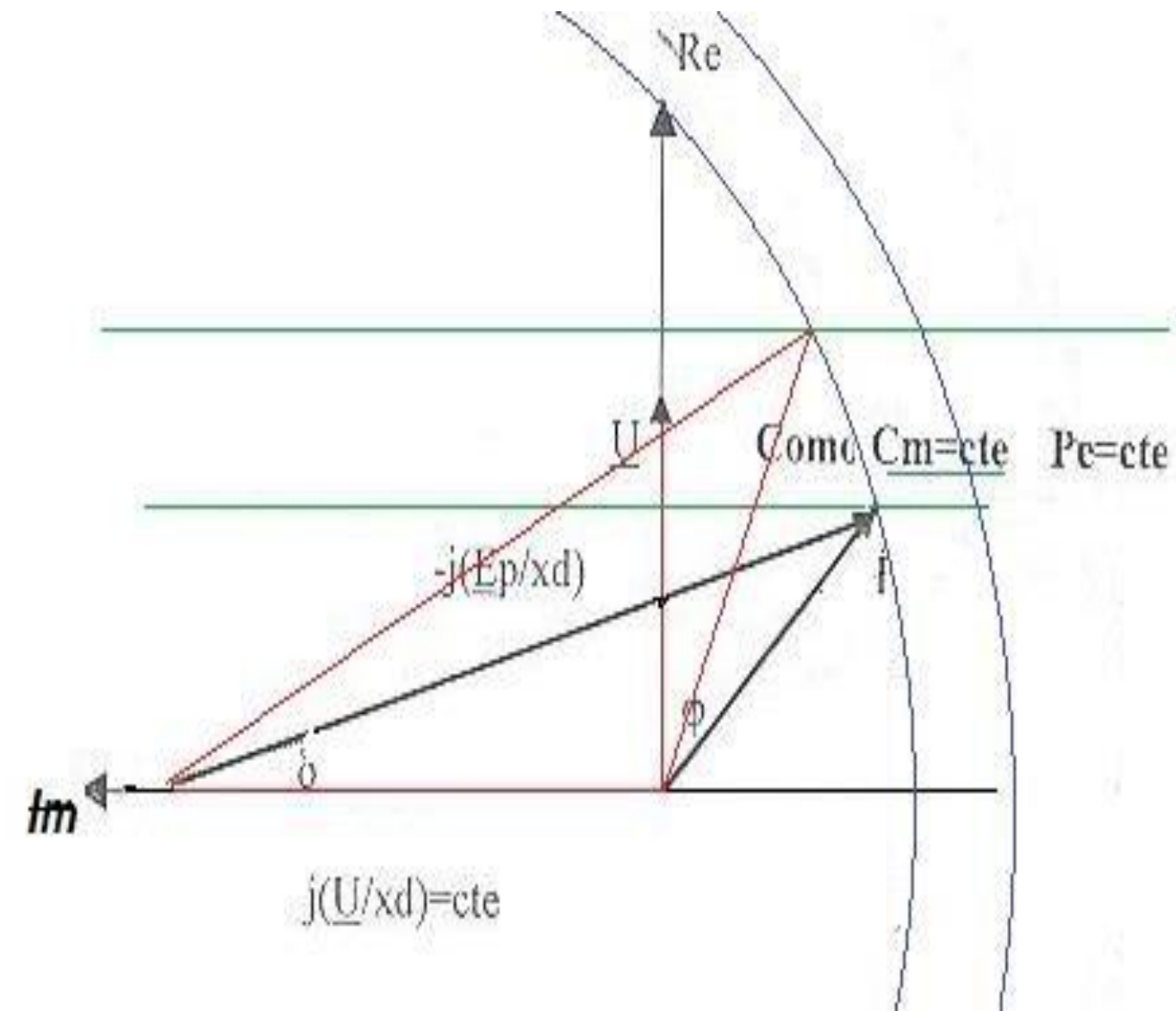
Traducido a corrientes, ese aumento de la potencia activa, puede verse como un incremento en el módulo de la componente activa de la corriente.

Para que ello suceda la corriente de excitación debe deslizarse sobre un círculo de radio **(E_p/x_d)** constante (corriente de excitación constante), de esta forma, un aumento en la cupla, implica un aumento en el ángulo de carga " δ ", hasta una posición **$\delta = 90^\circ$** y la componente activa de la corriente es máxima.

El círculo de color azul representan los puntos en los cuales la Corriente de Excitación **(E_p/x_d)** es constante para un estado de operación determinado.

Las dos líneas verdes, representan el espacio geométrico de dos estados de operación a cupla mecánica constante.

Figura 6: Diagrama fasorial de corrientes de la máquina sincrónica- Cambio en la Cupla a tensión de excitación constante.



Si el estado de operación inicial es el graficado de color negro, y el cambio que se realiza es un “aumento” en la cupla mecánica, el estado de operación final es el graficado con rojo.

Observe el valor de los ángulos δ y ϕ y el valor de las potencias activa y reactiva que suministra la máquina sincrónica para este nuevo estado de operación.

CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOS PARA EL CÁLCULO DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

1. Estabilidad Transitoria. Introducción

1. El periodo transitorio puede clasificarse en tres subperiodos a saber

2. Pautas para realizar estudios de Estabilidad Transitoria.

3. Cortocircuito en las cercanías del Generador

4. Evolución temporal del ángulo δ frente a fallas

5. Ángulo de Transmisión durante el estado Estacionario y durante el Fenómeno Transitorio

6. Método de las Áreas Iguales

1. Ejemplo de Cálculo

7. Determinación del Ángulo y Tiempo Crítico de Despeje de la Falla

8. Metodología de Cálculo en el Problema de Estabilidad Transitoria

9. Integración Numérica de la Ecuación Diferencial de Movimiento. Aplicación en el Tiempo Crítico de despeje.

1. Método de Integración Numérica Paso a Paso

10. Influencia de las Pérdidas de Potencia Activa. $R \neq 0$

11. Relación entre Potencia de Transmisión y la Estabilidad del Sistema.

12. Influencia de la Ubicación de la Falla

13. Impacto de diferentes Tipos de Cortocircuitos sobre la Estabilidad Transitoria.

1. Estabilidad Transitoria. Introducción

Por Estabilidad se entiende la habilidad de un sistema para regresar en un tiempo finito al estado de equilibrio o trabajo sincrónico entre sus máquinas, desarrollando fuerzas recuperadoras entre sus elementos capaces de controlar o someter las fuerzas perturbadoras desarrolladas por perturbaciones o fallas.

La Estabilidad Transitoria es la habilidad de un Sistema de Potencia para recobrar su estado de operación de equilibrio, igual al previo a la ocurrencia de una falla, o uno derivado de una nueva configuración originada cuando suceden en el sistema cambios repentinos (violentos) que involucran grandes montos de Potencia.

Conceptos Fundamentales:

- ✓ El concepto de ***Estabilidad*** e ***Inestabilidad*** no puede tomarse con carácter absoluto para el sistema ya que es frecuente la aparición de estados de operación ***Cuasi- estables***, en los cuales parte del sistema se mantiene operando en sincronismo mientras que el otro alcanza la inestabilidad.
- ✓ Los ***estudios de estabilidad transitoria tradicionales*** determinan el comportamiento en el tiempo de todo el sistema y su periodo de análisis abarca el tiempo que transcurre desde la ocurrencia de la perturbación hasta que se alcanza un nuevo estado de operación seguro.
- ✓ La ***clasificación de los fenómenos*** en función del periodo de tiempo que abarca el análisis es fundamental, porque de esa forma se determina la adecuada modelación dinámica necesaria del sistema.

El periodo transitorio puede clasificarse en tres subperiodos a saber

- ***Periodo Inicial:*** este cubre los primeros ciclos o milisegundos después de producirse la falla. En este periodo actúan las protecciones que detectan y despejan la falla, pero aún no está controlado el funcionamiento de los generadores debido a que la respuesta de los reguladores de tensión y velocidad no se ha iniciado aún. Tiempos menores a las constantes del sistema de Regulación.
- ***Periodo Intermedio:*** En el cual los reguladores de tensión y velocidad actúan y su influencia se hace presente en el control y manejo del proceso transitorio.
- ***Periodo final:*** En fallas severas, el efecto se extiende por varios minutos. Durante este periodo se pueden ejecutar políticas de control tales como forzar la salida de líneas, generadores, desconexión de cargas y/o partición del sistema en subsistemas. Medidas todas, tendientes al mantenimiento del sistema y la conservación de la calidad del producto final.

¡!! Los dos primeros periodos son los mas críticos frente a la ocurrencia de una falla severa y a la vez, son los que requieren de una modelación detallada y precisa de la dinámica de las máquinas y de todo el sistema de regulación.

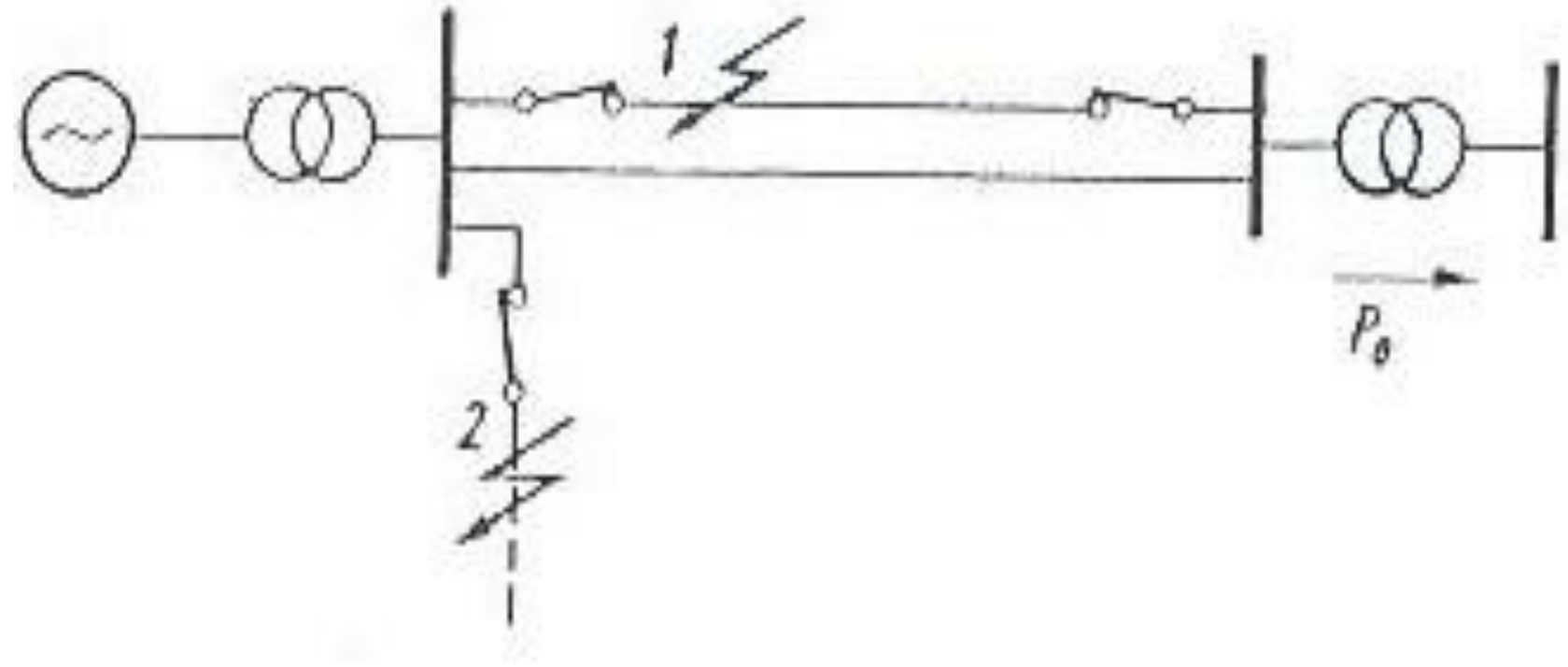
2. Pautas para realizar estudios de Estabilidad Transitoria

- Los cambios de estado introducidos por una perturbación, se reflejan mediante modificaciones del esquema unifilar del sistema eléctrico.
- En estado transitorio, se ponen en evidencia nuevos valores de los parámetros característicos de las máquinas sincrónicas. Se manifiestan nuevos valores de impedancias propias y mutuas y nuevos valores de fem de los generadores, entre otros cambios.
- Las potencias entregadas por los generadores, se calculan a partir de las impedancias y fem del esquema unifilar del sistema eléctrico. A una modificación de este, le corresponde una inmediata modificación de la potencia eléctrica.
- Para calcular la variación del ángulo de **carga** (" δ ") **"no se considera" la influencia de la componente aperiódica de la corriente de estator.** En casos excepcionales (cortocircuitos trifásicos y/o de dos fases a tierra) puede ser necesario considerar estas componentes y en ese caso se representan mediante la disminución del momento mecánico de la turbina en un 10 a 15% del momento mecánico nominal.

3. Cortocircuito en las cercanías del Generador

- Sea el sistema de transmisión de la figura

Figura 1: Cortocircuito en proximidades del generador.



1. Antes de la falla $\longrightarrow P_m = P_g$
2. Durante la falla $\longrightarrow P_m$ no varía al menos durante el primer segundo. entonces,
 $P_g \text{ casi } 0 \longrightarrow \Delta P = P_m$
 $\Delta M = c\Delta P$ momento angular muy grande.

Si la duración del cortocircuito no es suficientemente pequeño se llega inevitablemente a la pérdida de estabilidad Transitoria.

4. Evolución temporal del ángulo δ frente a fallas

El ángulo de carga, par o ángulo delta es una de las variables más ilustrativas del comportamiento transitorio de un sistema.

Por ello, frente a la ocurrencia de una falla severa en un sistema eléctrico, es de fundamental importancia observar la oscilación temporal de dicha variable junto con la evolución de las tensiones nodales, la frecuencia y las Potencias en líneas de transmisión.

Para explicar la oscilación que presentan las variables consideraremos el sistema representado en la ***Figura 2***, cuyo circuito equivalente se muestra en la ***Figura 3***.

En este sistema el generador sincrónico es representado por una fuente de tensión interna $E' e^{j\delta}$ detrás de una reactancia sincrónica x'_d , unido a un nodo de potencia infinita por medio de un transformador de reactancia x_{tr} y dos líneas en paralelo de reactancias x_{l1} y x_{l2} . El Nodo de potencia infinita tiene una tensión $E_{red} e^{j0}$ y representa un punto rígido en el sistema, en el, la tensión es inamovible ya que depende del resto del sistema y cualquier variación en la porción mostrada no ejerce ninguna influencia sobre él.

Todas las pérdidas son despreciadas.

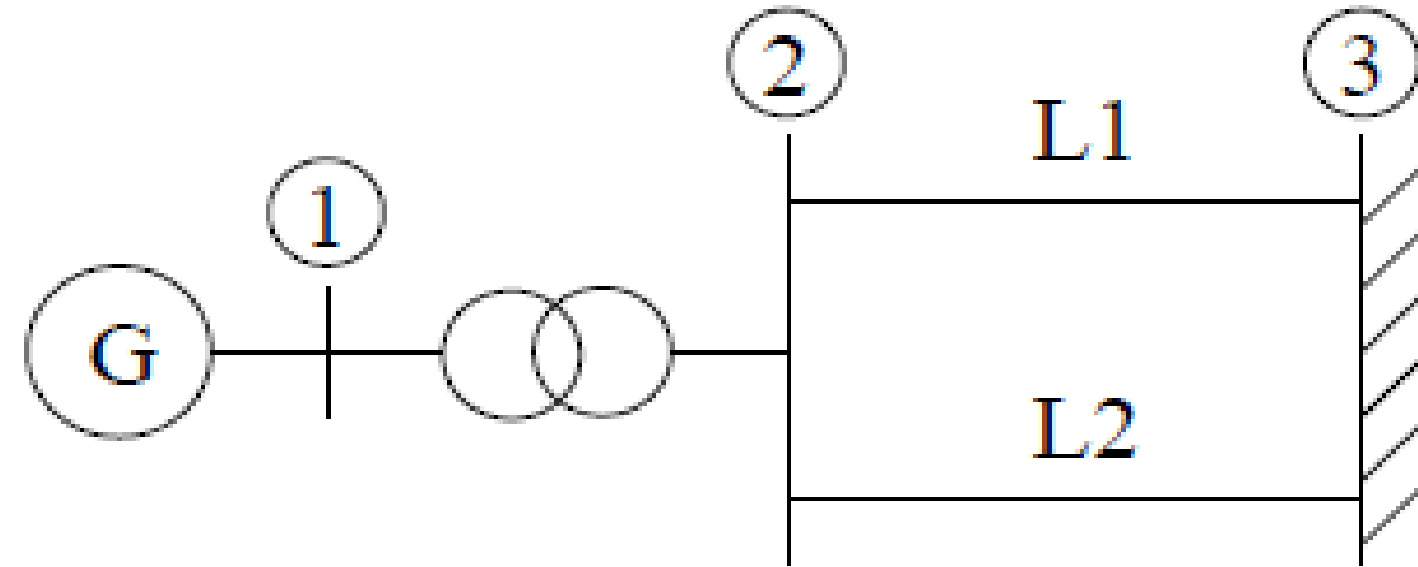


Figura 2: Sistema simple. Generador/Barra de Potencia infinita.

Representando el generador a través del sistema clásico y despreciando el efecto de los reguladores de tensión si los hubiere, el circuito equivalente de una fase es...

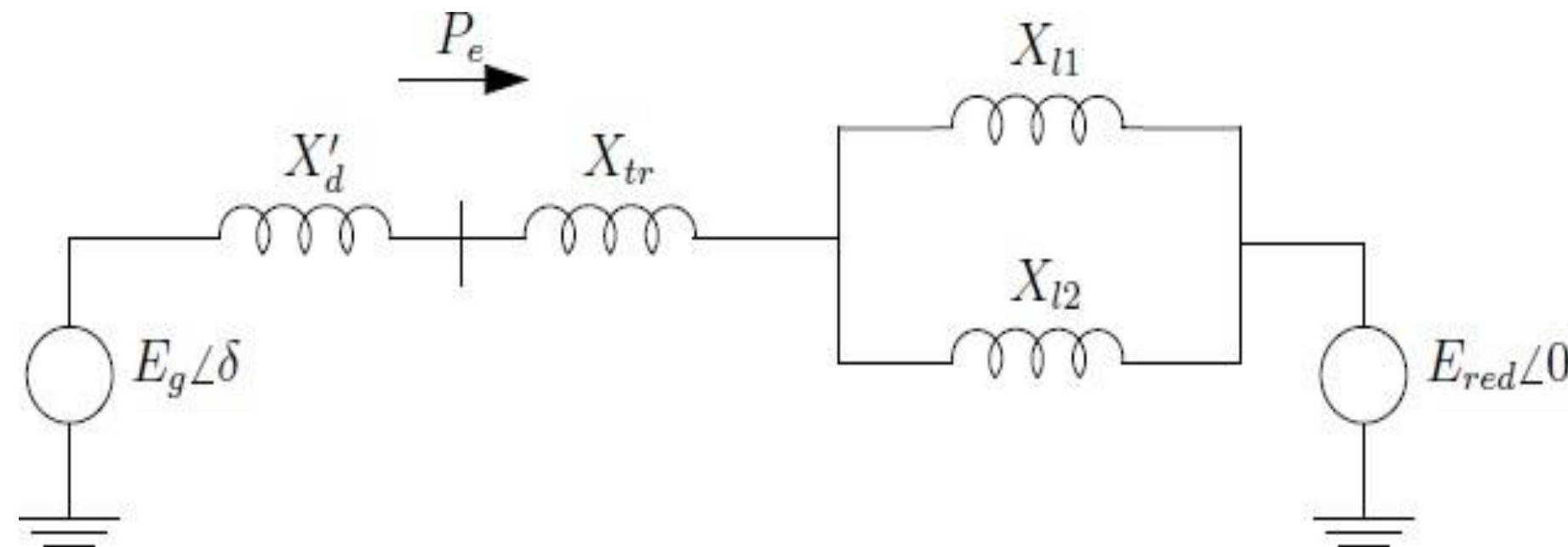


Figura 3: Circuito equivalente de una fase. Generador/Barra de Potencia infinita.

Agrupando las reactancias y aplicando transformaciones estrella-triángulo, el sistema puede ser reducido al mostrado en la **Figura 4.4**, donde la reactancia X_t incluye la reactancia transitoria del generador y todas las reactancias del sistema de transmisión existente entre el generador y el nodo de Potencia Infinita.

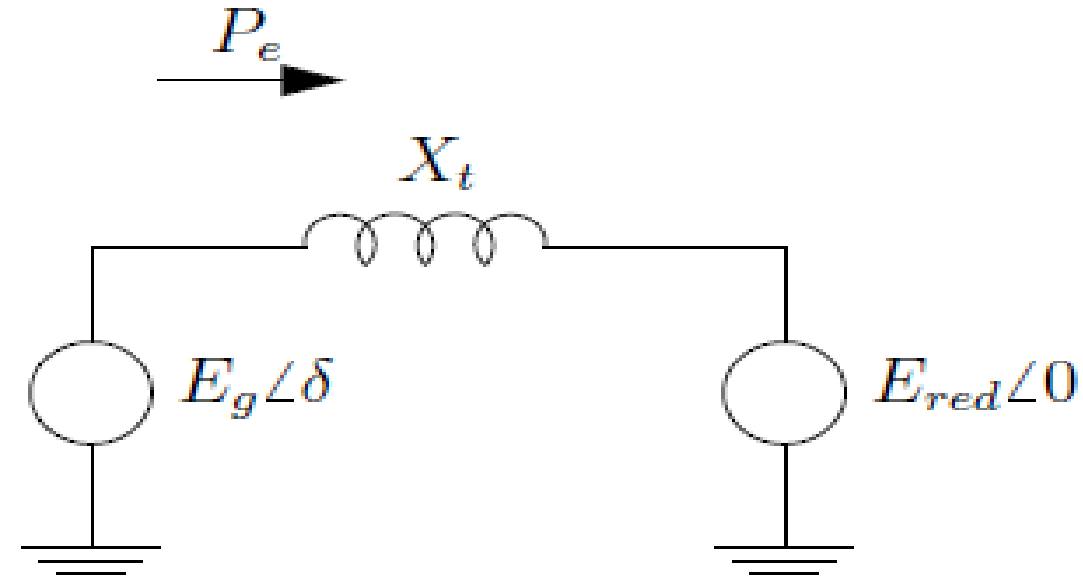


Figura 4: Circuito equivalente reducido.

La Potencia eléctrica entregada por el generador sincrónico es:

$$P_e = \frac{E' E_{red}}{X_t} \sin \delta = P_{max} \sin \delta$$

Cuyo máximo se presenta para $\delta = 90$ grados y es:

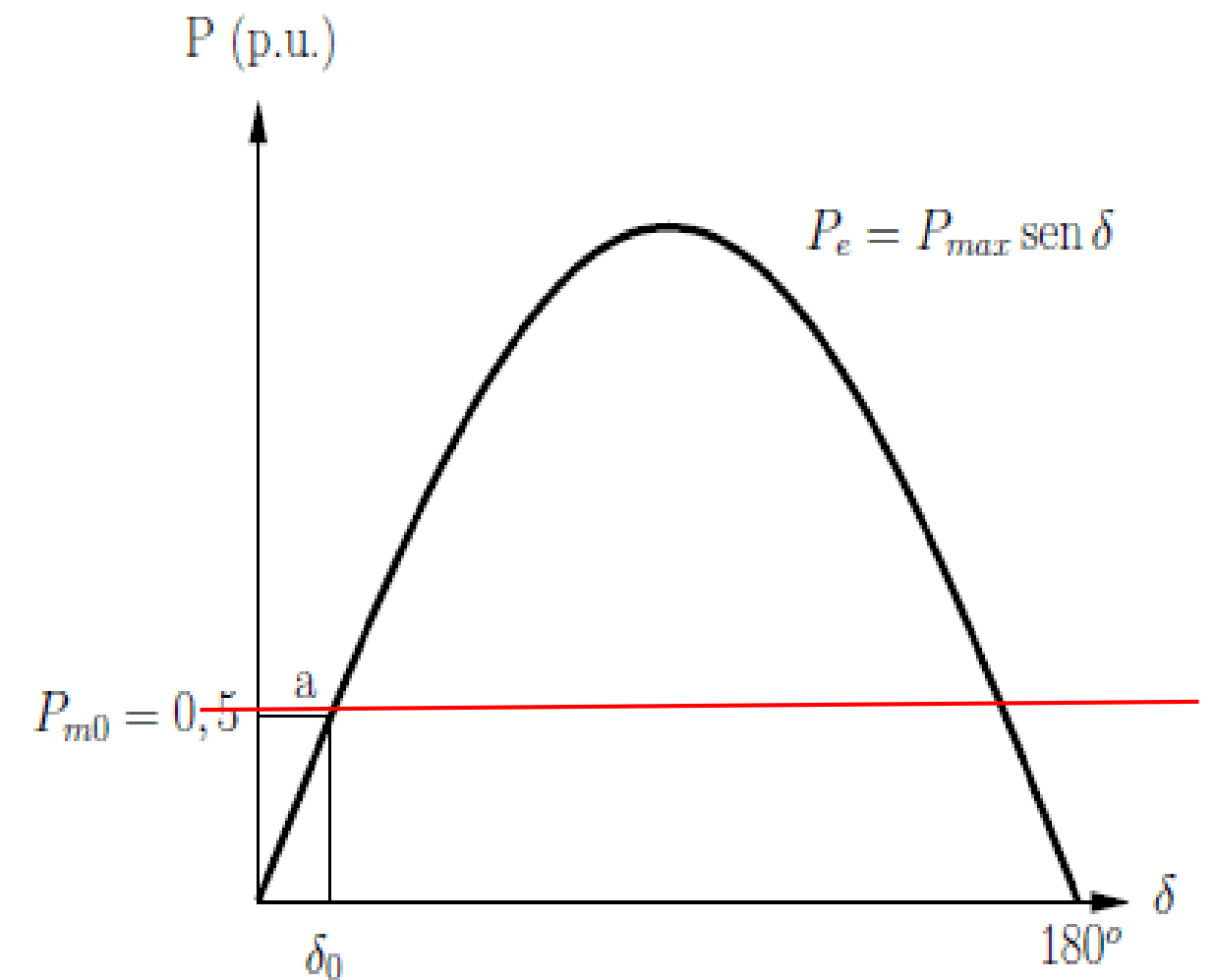
$$P_{max} = \frac{E' E_{red}}{X_t}$$

Suponiendo que el generador está funcionando al 50% de su potencia nominal. Tomando la potencia nominal del generador como potencia base del sistema, ello significa que el generador entrega 0,5 pu.

Esta situación se representa en un sistema de ejes coordenados (P, δ) tal como se ve en la **Figura 4.5**.

Figura 4.5: Característica Potencia-Ángulo de la Máquina Sincrónica.

- La senoide es la representación de la ecuación de Potencia eléctrica y su máximo coincide con el valor de Potencia máxima encontrada para $\delta = 90$ grados
- La recta horizontal trazada para $P = 0,5$ representa la característica de Cupla mecánica entregada por el motor de impulso
- El ángulo δ_0 de operación en estado estacionario, se puede calcular realizando la intersección matemática de las expresiones de P_e y P_m .



Hasta acá lo descripto corresponde al estado de operación prefalla del sistema estudiado, observemos que pasa si se produce una falla que ocasiona un desbalance de Potencia ($P_{eléctrica} \neq P_{mecánica}$).

Oscilación de la Máquina Sincrónica

Si de repente se produce un incremento de la potencia mecánica entrante al generador desde **$P_{m0} = 0,5$ p.u.** hasta **$P_{m1} = 0,8$ p.u.**, el nuevo punto de operación quedaría ubicado en b donde la nueva horizontal corta a la senoide, como se ve en la **Figura 6**

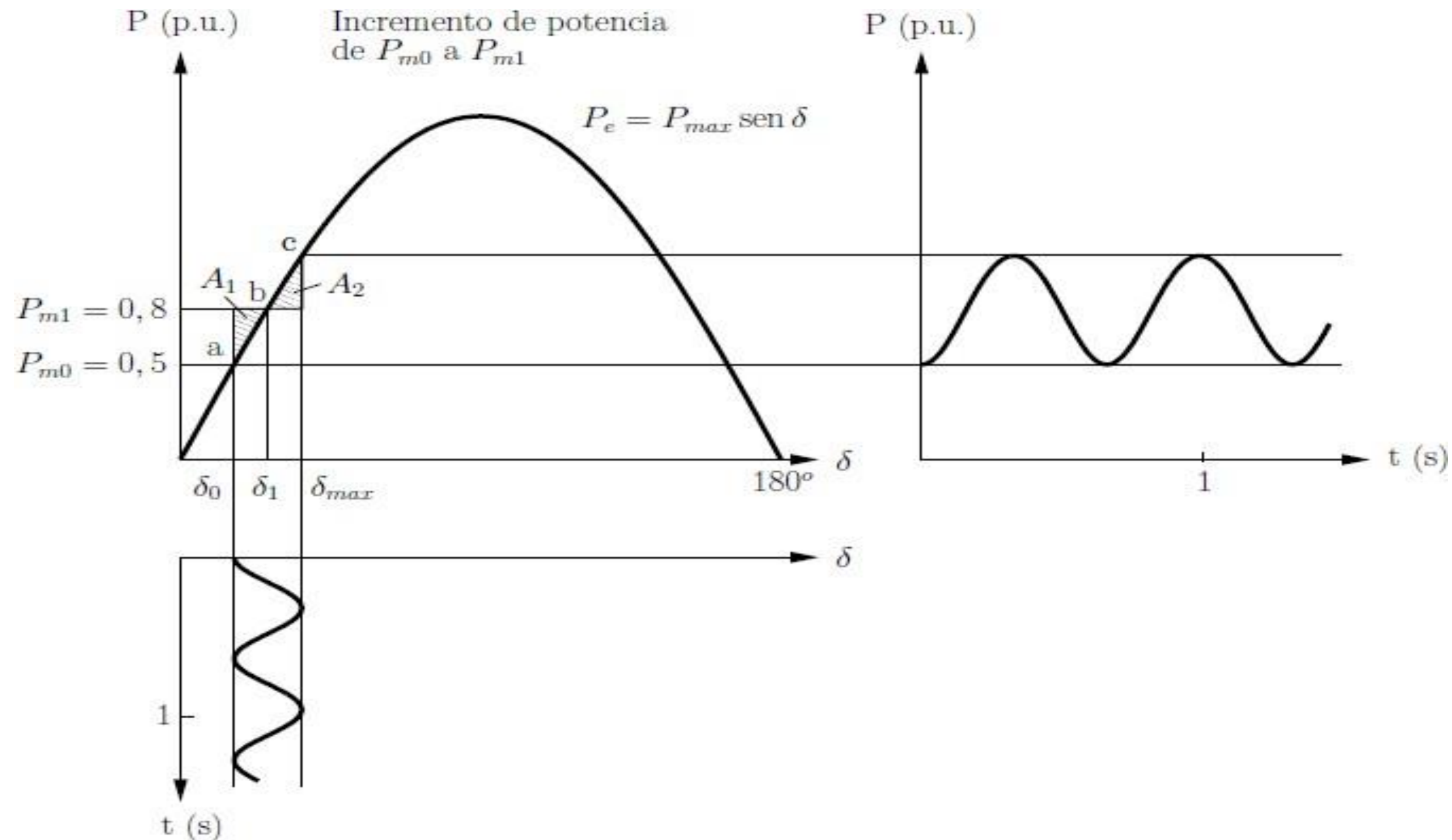


Figura 6: Oscilación del ángulo δ y de la Potencia eléctrica.

La evolución dinámica desde el punto Inicial hacia el punto "b" se puede describir así:

- Al aumentar la ***Potencia mecánica*** el generador recibe más energía que la que entrega y por ello comienza a acelerarse y a incrementar su energía cinética.
- Al aumentar la velocidad del rotor, comienza a crecer el ángulo " **δ** " y el punto de funcionamiento se desplaza sobre la senoide hacia la derecha.
- Una vez que se sobrepasa el punto "***b***", la ***Potencia mecánica*** entrante es menor que la ***Potencia eléctrica*** de salida y en este momento la máquina comienza a frenarse y a entregar la Energía cinética que acumuló.
- El punto "***c***" corresponde a la ***máxima desviación angular que alcanza el rotor***. Este punto es un nuevo punto de velocidad sincrónica y corresponde al momento en que el rotor entregó toda la energía que acumuló en la evolución desde "***a***" hasta "***b***".
- A partir del punto "***c***" comienza a decrecer en ***ángulo δ*** y comienza un proceso oscilatorio alrededor del punto de equilibrio "***b***".

5. Ángulo de Transmisión durante el estado Estacionario y durante el Fenómeno Transitorio

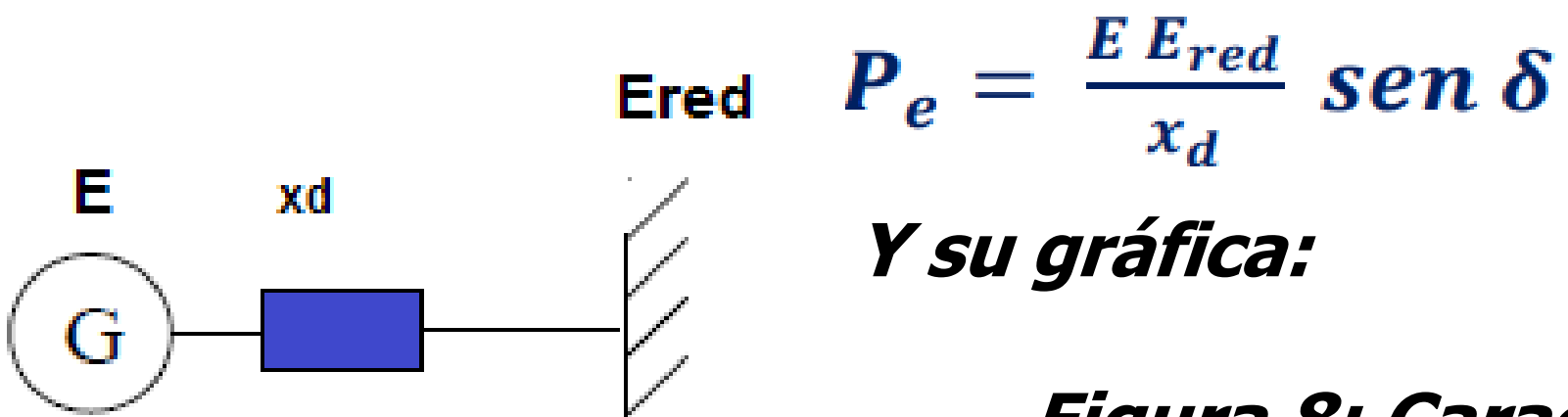
En el apartado anterior se escribió que la potencia eléctrica de estado permanente que entrega una máquina sincrónica operando en un sistema de única máquina conectada a una barra de potencia infinita es:

$$P_e = \frac{E' E_{red}}{X_t} \sen \delta = P_{max} \sen \delta$$

Y no nos preguntamos porque llamamos E' a la tensión de excitación de estado permanente y empleamos la reactancia transitoria antes de la falla. Hagamos el análisis:

Consideremos el sistema simple de una única máquina sincrónica conectada a una barra de potencia infinita

- ***En Estado Estacionario la Potencia Eléctrica es:***



Y su gráfica:

Figura 8: Característica Potencia- δ de estado Estacionario

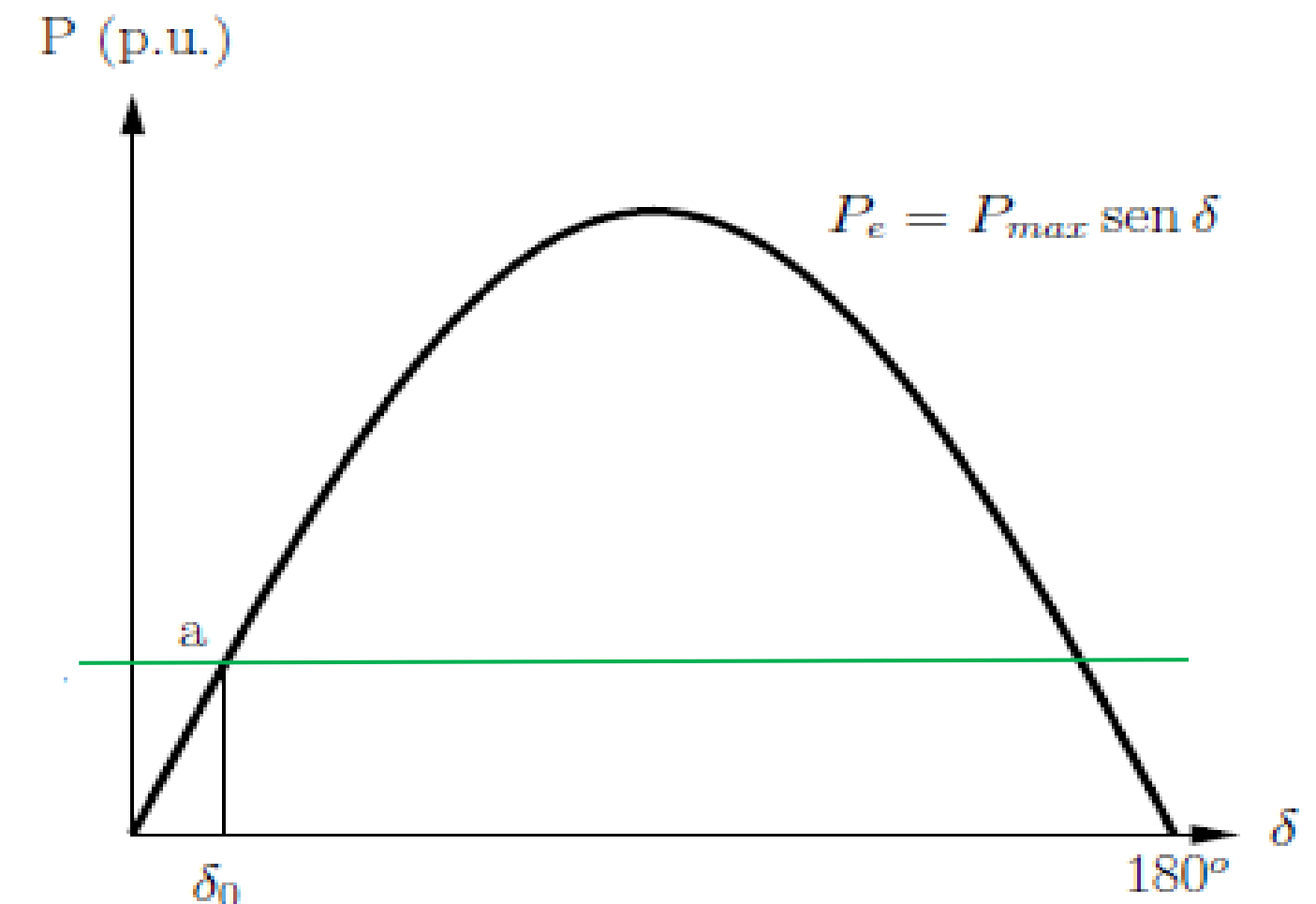


Figura 7: Sistema de transmisión simple

- **En Estado Transitorio la Potencia Eléctrica es:**

$$P'_e = \frac{E' E_{red}}{x'_d} \text{ sen } \delta$$

Y su gráfica:

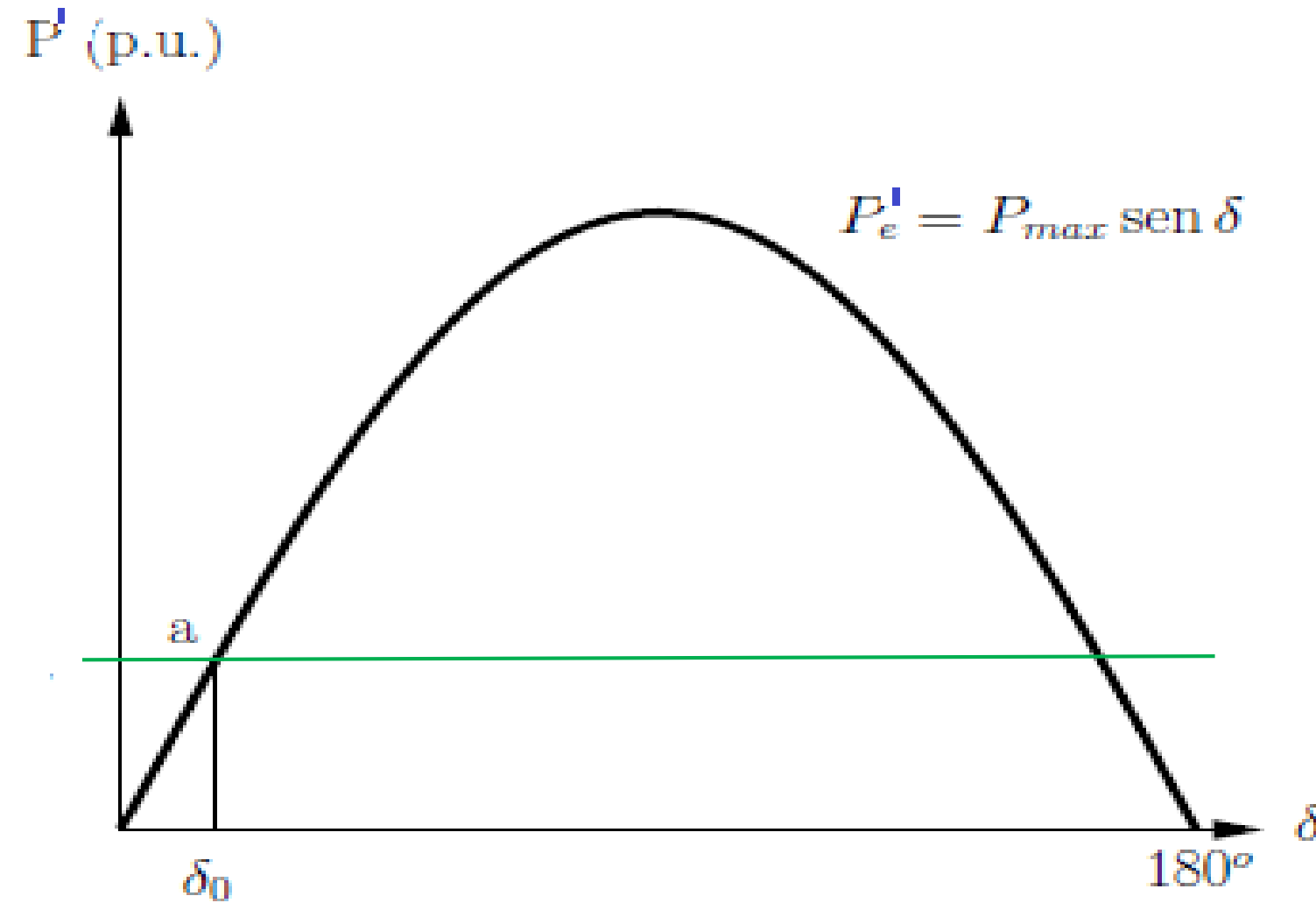


Figura 4.9: Característica Potencia- δ de Estado Transitorio

Cuando en el sistema se produce una perturbación importante la reactancia de acoplamiento entre el nodo "generador" y en nodo de la "demanda" se modifica.

Dicha modificación obedece a dos factores

- 1. Cambio en la topología de la red**
- 2. Cambio en los parámetros de la máquina síncrona**

Es decir que los parámetros con que se había modelado la máquina síncrona para su operación en régimen permanente, cambian por parámetros de régimen transitorio. Líneas, transformadores y demás componentes no cambian sus parámetros pero en las máquinas síncronas se pone en evidencia la reactancia transitoria ya definida $x'd$

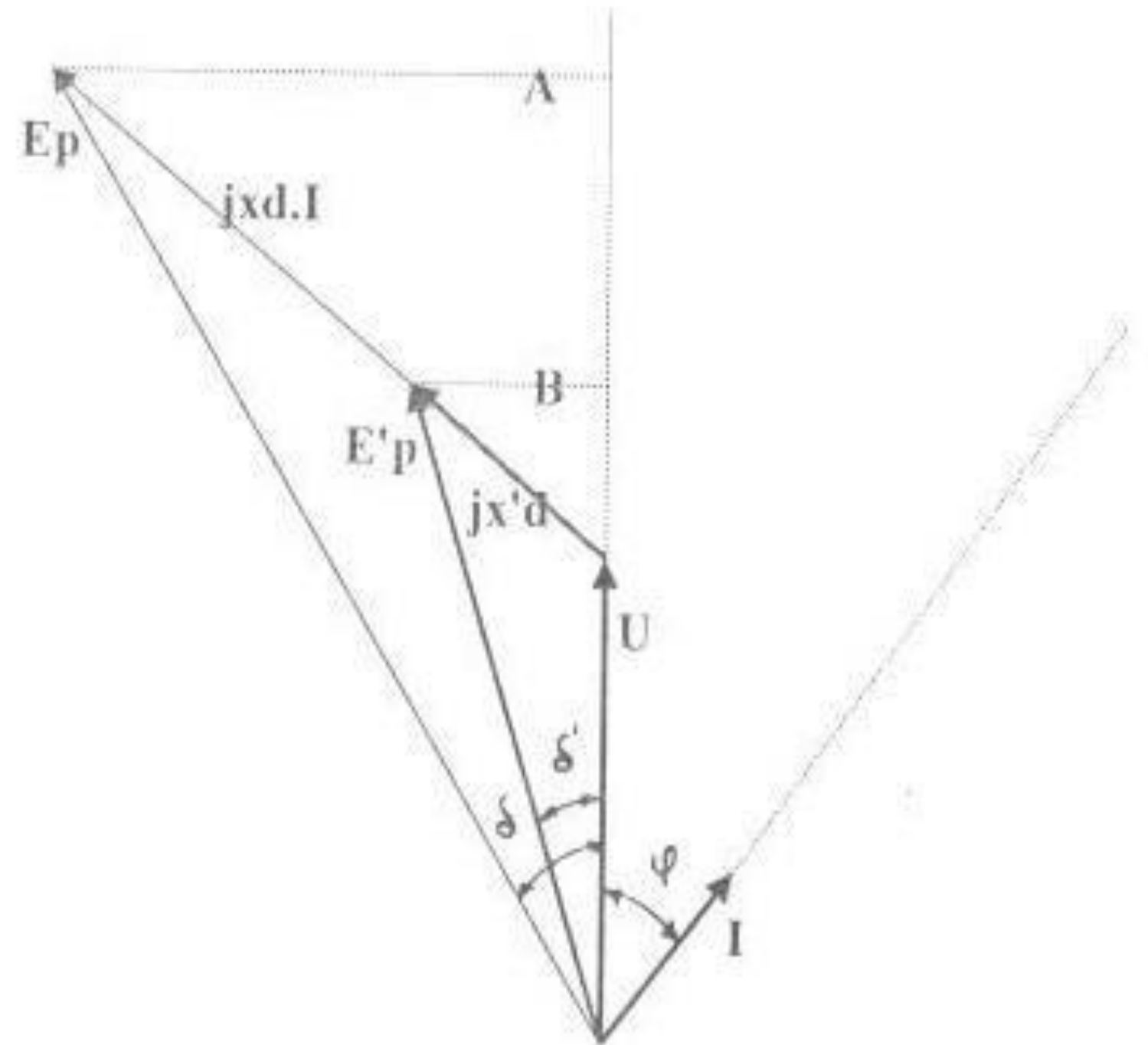
Así:

Prefalla $x_{acoplamiento} = x'd$

Falla $x_{acoplamiento} = x_d$

Volcando esto en un diagrama fasorial único

Figura 10: Diagrama Fasorial del sistema en estados Estacionario y Transitorio



Analizando los dos triángulos rectángulos definidos por los segmentos A, B, las caídas de tensiones y sus proyecciones, se deducen las siguientes relaciones:

$$\cos \varphi = \frac{A}{x_d I} = \frac{B}{x'_d I} \quad (a)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{sen } \delta = \frac{A}{E_p} \\ \text{sen } \delta = \frac{B}{E'_p} \end{array} \right\} \frac{\text{sen } \delta}{\text{sen } \delta'} = \frac{A E'_p}{B E_p} = \left(\frac{A}{B} \right) \left(\frac{E'_p}{E_p} \right) \quad (b)$$

$$\text{De (a)} \quad \frac{A}{B} = \frac{x_d}{x'_d}$$

$$\text{Reemplazando en (b)} \quad \frac{\text{sen } \delta}{\text{sen } \delta'} = \left(\frac{x_d}{x'_d} \right) \left(\frac{E'_p}{E_p} \right)$$

- ***La igualdad de la última expresión indica que es equivalente calcular la potencia eléctrica que entrega la máquina sincrónica empleando la reactancia sincrónica y la tensión de la Rueda Polar de estado permanente (x_d ; E_p) que calcularla empleando la reactancia transitoria y la Tensión de la Rueda Polar de régimen transitorio siempre que se considere un cambio de coordenadas adecuado.***

En la **figura 11** se muestran las dos características calculadas.

En ella se observa que en ambas coincide el punto de operación.

- Esta propiedad es de gran utilidad, porque permite, empleando los valores de estado transitorio calcular el estado de operación estacionario y volcarlos sobre la **característica $P-\delta$** de estado transitorio sobre la cual se volcaran los puntos de operación correspondientes al estado Transitorio.

Importante!!!

Al contar con todos los estados volcados sobre un mismo sistema de referencia, es posible compararlos y aplicar un método muy sencillo e interesante que se denomina "Método de las Áreas Iguales"

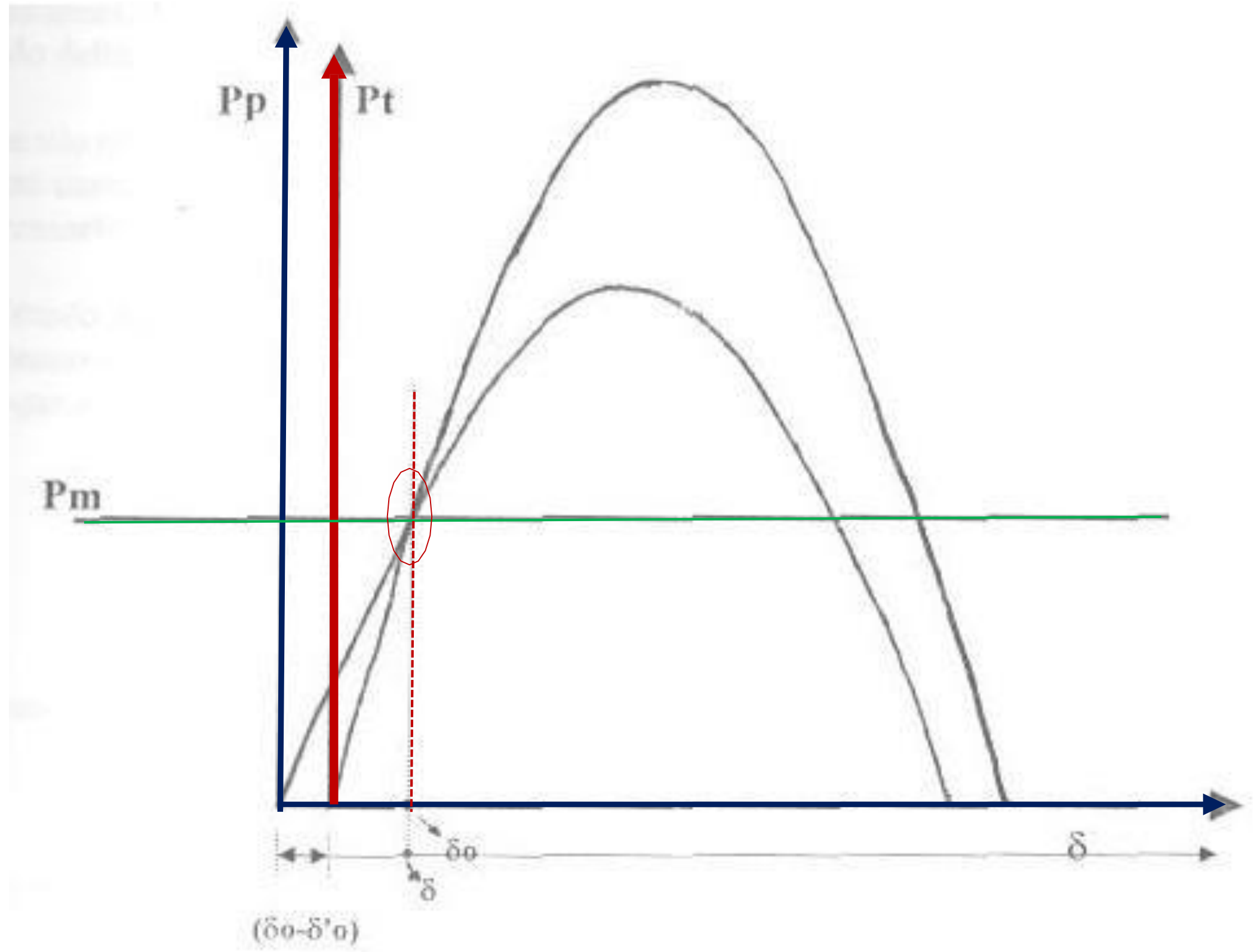


Figura 11: Características de estados Estacionario y Transitorio

6. Método de las Áreas Iguales

Para efectuar el análisis de estabilidad transitoria, se considera el caso sencillo de una máquina conectada a una red Rígida a través de una Doble Terna.

El modelo dinámico más simple se basa en las siguientes hipótesis simplificadoras:

- ***La potencia mecánica de la máquina de impulso permanece constante $P_m = \text{cte}$.***
- ***Se desprecian las pérdidas por amortiguamiento y rozamiento.***
- ***Se emplea el modelo más simple de la máquina sincrónica es decir, una tensión detrás de una reactancia sincrónica.***

Si se supone una perturbación que acelere el rotor de la máquina:

- ***El ángulo de carga del rotor se incrementará.***
- ***Si esto ocurre indefinidamente, habrá pérdida de sincronismo.***
- ***Si el cambio alcanza un máximo y luego decrece, se producirá un movimiento oscilatorio de amplitud constante (en realidad el movimiento es decreciente debido al amortiguamiento).***

6. Método de las Áreas Iguales

En estas condiciones, el modelo clásico supone que la estabilidad se decide en la primera oscilación del ángulo delta, es decir en un tiempo menor a un segundo.

Ya se vio que las ecuaciones que caracterizan el movimiento de las máquinas son no lineales y en este caso, tratándose de perturbaciones grandes no es posible la linealización, esto hace necesario recurrir a métodos numéricos para su resolución.

El Método de las áreas Iguales, consiste en un procedimiento muy sencillo solamente aplicable a un sistema de una sola máquina modelada a través del modelo clásico descrito anteriormente y conectada a una red de potencia infinita a través de una doble terna.

Este método solo es útil a los fines didácticos y permite esclarecer conceptos tales como:

- ***Desplazamiento de la posición del rotor en el tiempo.***
- ***Variación de Potencia Acelerante.***
- ***Desviación de la velocidad angular en el tiempo.***
- ***Desviación del ángulo del rotor en el tiempo.***

La ecuación de oscilación de una máquina sincrónica conectada a una barra infinita es:

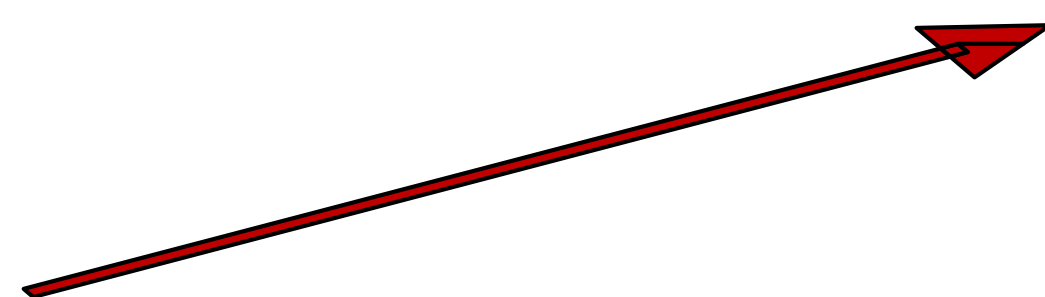
$$P_e - P_m = P_a = (2 H / \omega_N) d^2 \delta / dt^2$$

Despejando $(d^2 \delta / dt^2)$ y multiplicando ambos miembros por $2(d\delta/dt)$ y trabajando se llega a:

$$d[(d\delta/dt)^2] = [\omega_N \cdot P_a / H] d\delta$$

Integrando entre δ_0 y δ

$$\left(\frac{d\delta}{dt}\right)^2 = \left(\frac{\omega_N}{H}\right) \int_{\delta_0}^{\delta} P_a \cdot d\delta$$


$$\left(\frac{\omega_N}{H}\right)(\delta^2 - \delta_0^2) = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e(\delta)) d\delta$$

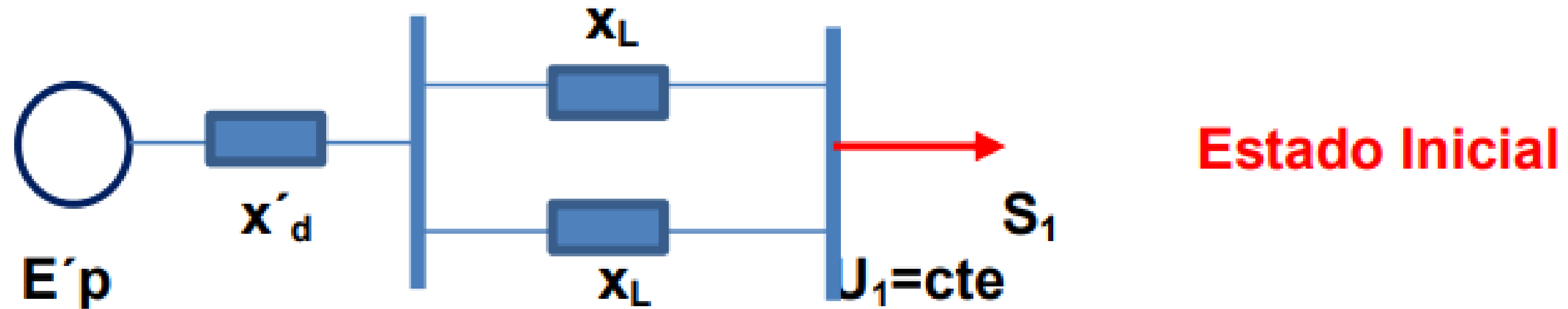
El primer término de la ecuación anterior vale cero, porque tanto la derivada del ángulo δ en la posición inicial como la derivada del ángulo máximo son cero.

De donde la condición de estabilidad es: $\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e(\delta)) d\delta = 0$

Ejemplo de Cálculo

Sea el sistema de la figura, en el cual se muestra un sistema eléctrico formado por una máquina síncrona que alimenta una red rígida a través de un sistema de transmisión formado por una doble terna.

- El sistema originalmente se encuentra operando en un estado definido por " $P_m = P_e(\delta_0)$ ".



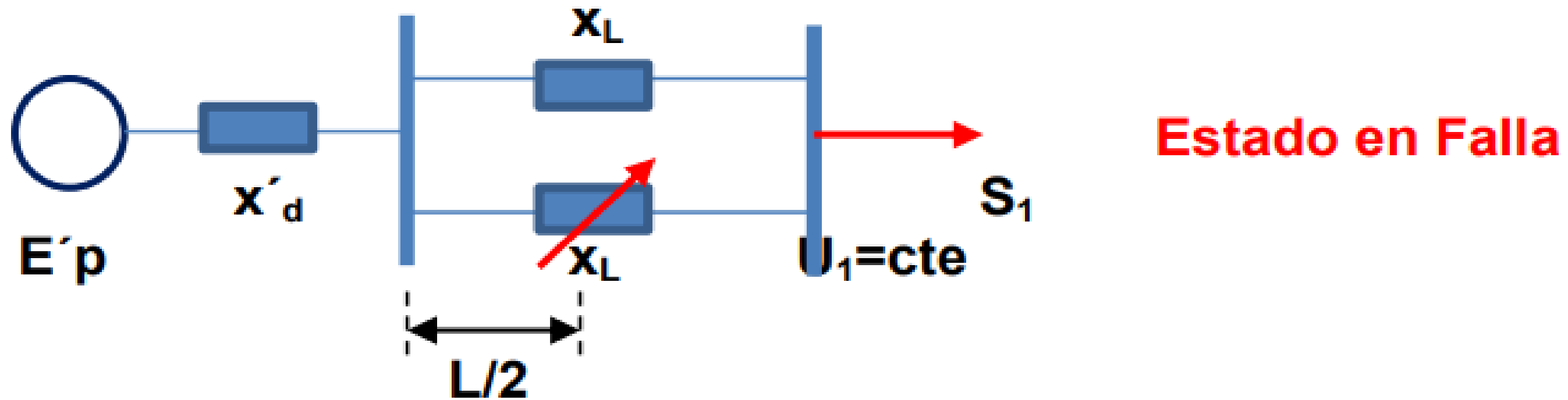
La potencia eléctrica que entrega la máquina en estado inicial es:

$$P_e^0 = \frac{E'_p U_1}{x_{ac}} \text{sen}(\delta)$$

Reactancia de acoplamiento del sistema completo

La característica potencia ángulo correspondiente a este estado es la más alta representada en la **Figura 15** (*Pe antes de la falla*)

- **En forma repentina se produce un cortocircuito trifásico en una de las líneas de la doble terna. La ubicación de ese cc divide a la línea en dos partes iguales**

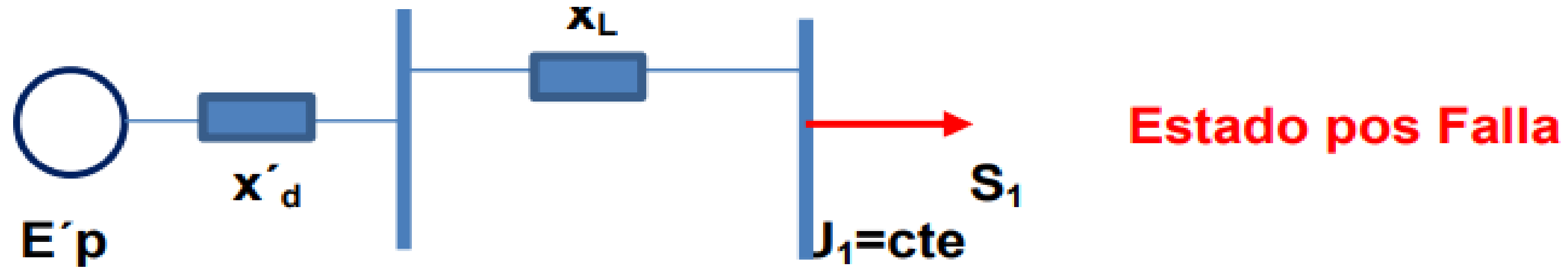


La potencia eléctrica que entrega la máquina mientras se encuentra presente el cc es:

$$P_e^f = \frac{E'_p U_1}{x_{ac}^f} \text{sen}(\delta)$$

Reactancia de acoplamiento durante la falla

- Después de un tiempo determinado por el sistema de protecciones, la falla es removida y el sistema queda funcionando con una sola línea, por lo tanto la reactancia de acoplamiento cambia nuevamente y la característica de ese nuevo estado es una más baja que la de estado inicial y más alta que la de falla.



La potencia eléctrica que entrega la máquina después de ser removido el cc es:

$$P_e^{pf} = \frac{E'_p U_1}{x_{ac}^{pf}} \text{sen}(\delta)$$

Reactancia de acoplamiento post falla

La **Figura 12** muestra las tres características mencionadas y sobre ellas los distintos puntos de Potencia eléctrica. Sobre el eje de abscisas se señalan los ángulos de carga correspondientes a cada instante.

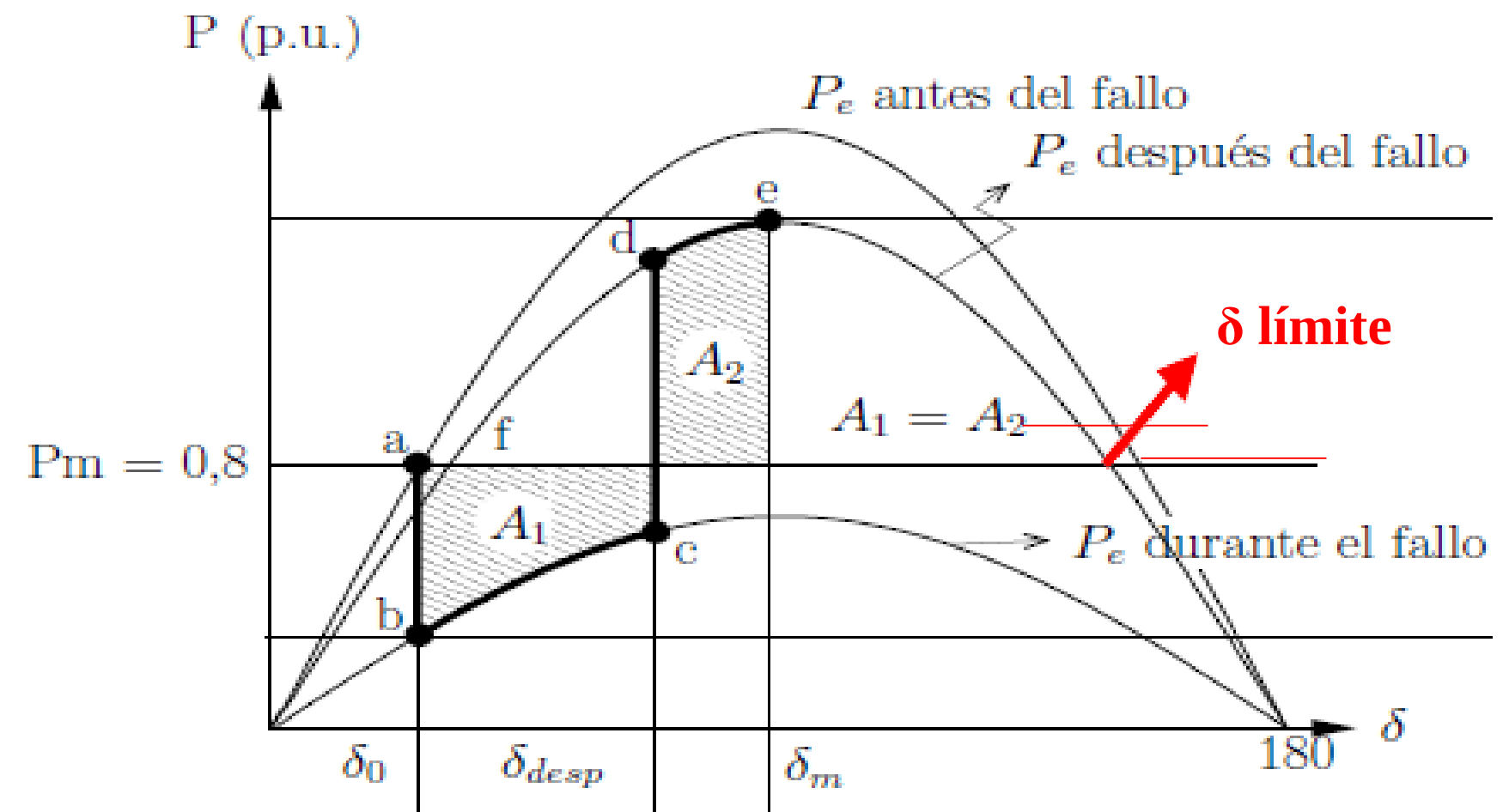


Figura 12: Características Potencia – Ángulo del sistema frente a la falla.

Observando la figura anterior, se ve que la integral de la ecuación representa el área entre las características de **P_m y $P_e(\delta)$** , y se la puede descomponer en dos partes coincidentes con las dos etapas presentes en el fenómeno.

Así:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{desp}} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta + \int_{\delta_{desp}}^{\delta_m} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = 0$$

Donde:

δ_{desp} : es el ángulo de carga para el cual la falla es despejada, también llamado δ apertura (**δa**)

δm : es el ángulo que define el máximo área de frenado que se desarrolla en la máquina para esa falla y el sistema de protecciones considerado.

- ✓ ***El primer término equivale al área A1 y corresponde a la condición de aceleración positiva. (AREA ACELERANTE)***
- ✓ ***El segundo término equivale al área A2 y corresponde a la condición de aceleración negativa.(AREA DE FRENADO)***
- ✓ ***Si el valor absoluto del área A2 es menor que el de A1, el ángulo crecerá indefinidamente y se perderá la estabilidad del sistema.***
- ✓ ***El ángulo δ límite señalado en la figura como intersección de la característica de pos falla y la característica de potencia mecánica, es el ángulo que me permite obtener el máximo Área de Frenado disponible.***
- ✓ ***Si el máximo Área disponible no alcanza a compensar el Área de aceleración desarrollada, el sistema pierde sincronismo y hay Inestabilidad de ángulo.***

De lo dicho, la condición de estabilidad es entonces

$$A_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_{desp}} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta \leq \int_{\delta_{desp}}^{\delta_{lim}} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = A_{2m\acute{a}x}$$

CONDICION DE ESTABILIDAD

En ella se observa claramente cómo, disminuyendo el tiempo de despeje de la perturbación, el área denominada acelerante disminuye, aumentando de esta manera la posibilidad de lograr la Estabilidad del Sistema.

7. Determinación del Ángulo y Tiempo Crítico de Despeje de la Falla

Cuando se realiza el diseño de las protecciones de un sistema eléctrico es necesario conocer cuál es el tiempo máximo que se puede esperar antes de eliminar la falla.

Este tiempo está asociado con la evolución del ángulo de carga y por lo tanto a ese “tiempo” se lo denomina “**ángulo crítico δ_{cc}** ” y realmente es crítico, ya que si la medida correctiva no se toma antes de que el sistema lo haya alcanzado, con seguridad el área de frenado disponible será insuficiente y por lo tanto la inestabilidad estará asegurada.

Ya que el ángulo crítico es aquel que hace “ **$A1 = A2$** ”, para calcularlo se debe plantear la condición de estabilidad, colocando en los límites de integración el ángulo incógnita, es decir el que hace **$A1 = A2$** .

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{lim}} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = 0$$

Integrando, reemplazando los límites y despejando la incógnita δ_{cc} , se calcula el ángulo crítico de esa transmisión.

8. Metodología de Cálculo en el Problema de Estabilidad Transitoria

Pasos a seguir en la aplicación del método:

1. Analizar el funcionamiento del estado prefalla, para ello:

Dibujar el Unifilar Equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento. Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica y calcular la $P_{m\acute{a}x}$ para el estado.

2. Analizar el funcionamiento del estado de falla, para ello:

Dibujar el Unifilar Equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento en falla. Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica y calcular la $P_{m\acute{a}x}$ para el estado.

3. Analizar el funcionamiento del estado posfalla, para ello:

Dibujar el Unifilar Equivalente y calcular la reactancia de acoplamiento.

Encontrar la expresión de la Potencia Eléctrica posfalla y calcular la $P_{m\acute{a}x}$ para el estado.

4. Graficar, sobre un mismo sistema de ejes coordenados las tres características ($P-\delta$) encontradas y marcar los ángulos δ_0 , δ_a y δ_{lim}

5. Plantear las integrales que permiten evaluar las distintas áreas acelerante y de frenado

6. Realizar los cálculos necesarios para encontrar las incógnitas del problema

9. Integración Numérica de la Ecuación Diferencial de Movimiento.

Aplicación en el Tiempo Crítico de despeje.

Siguiendo los 6 pasos anteriores, se calculan las expresiones de Potencia Eléctrica para los distintos estados:

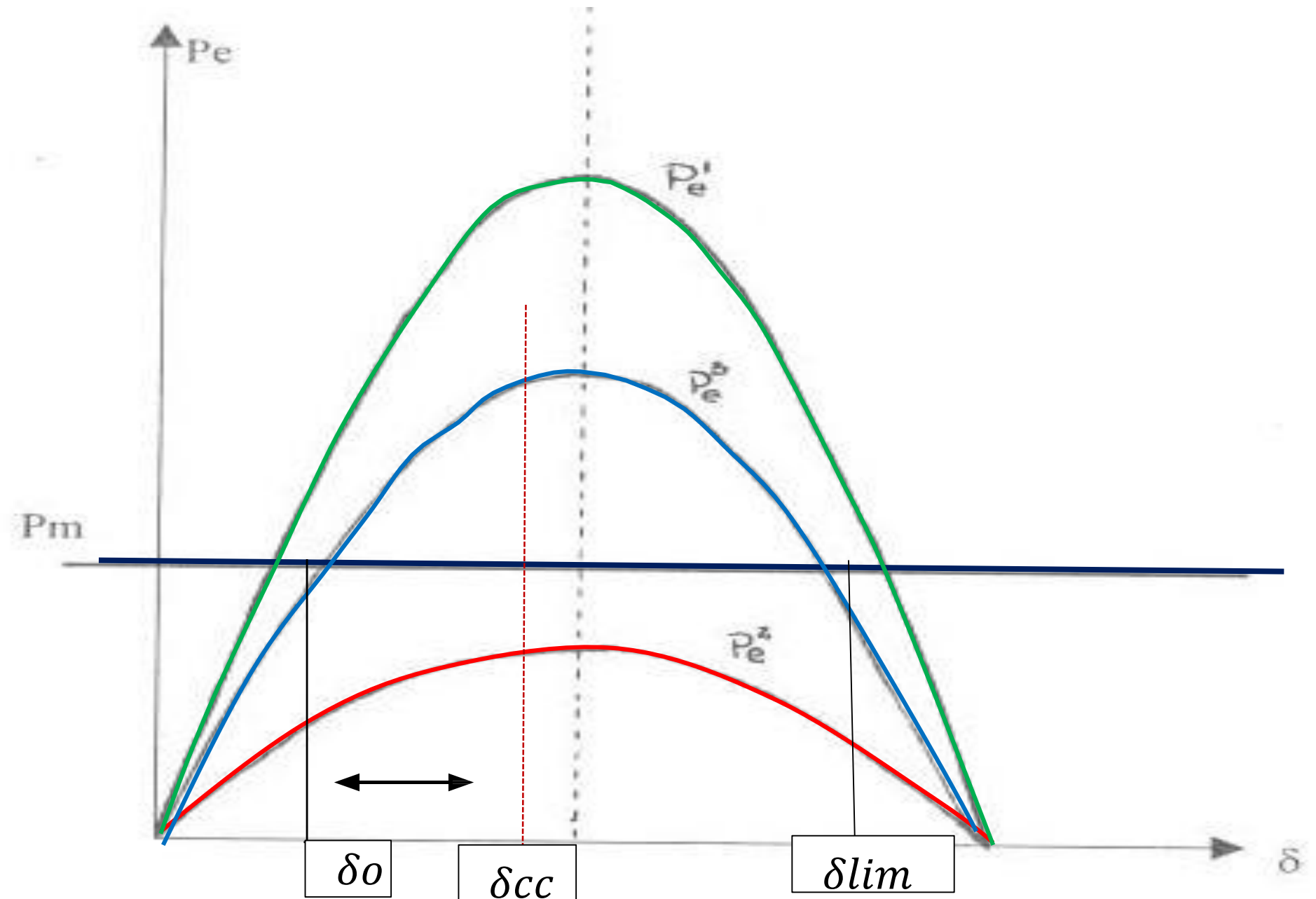
Estado prefalla $P^1_e = [(E^1_p \cdot U_1) / x^1_{acop}] s$

Estado falla $P^2_e = [(E^2_p \cdot U_1) / x^2_{acop}] s$

Estado pos falla $P^3_e = [(E^3_p \cdot U_1) / x^3_{acop}] s$

Graficamente:

Figura 13: Características de Estados Estacionario, falla y posfalla



El ***tiempo crítico*** para el despeje, es aquel para el cual se presenta el ***δcrítico***, por lo tanto se debe plantear la ecuación de igualdad entre el área acelerante y de frenado.

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{cc}} (P_m - P_e^f(\delta)) d\delta + \int_{\delta_{cc}}^{\delta_{lim}} (P_m - P_e^{pf}(\delta)) d\delta = 0 \quad \} \Rightarrow \delta_{cc}$$

Para traducir el ángulo encontrado a tiempo, es necesario aplicar un método de integración numérica.

A continuación, se presenta un procedimiento sencillo que permite calcular el Tiempo crítico (***Tcc***) y seleccionar el sistema de interruptores más adecuado para el sistema.

Método de Integración Numérica Paso a Paso

Se define para cada intervalo de integración un

$$\Delta\delta(n) = \Delta\delta(n-1) + Pa(n-1).(\Delta t^2/M)$$

$$\delta(n) = \delta(n-1) + \Delta\delta(n)$$

Donde:

$$M = 2H/\omega$$

Δt= intervalo de integración (debe adoptarse)

Pa= Potencia Acelerante = ***Pm - Pe***

Aplicación

Primer Paso

$$\begin{array}{l} t = 0^- \\ t = 0^+ \end{array} \quad \begin{array}{l} P_a = 0 \text{ (aún no se ha producido la falla)} \\ P_a = P_m - P^2 e^{\left| \delta_0 \right.} \end{array}$$

- ***Como en el primer paso, es decir el momento en que se produce la falla, la potencia acelerante es muy grande, es conveniente tomar su valor medio para acercarnos mas al resultado y no necesitar tantos pasos de integración. Así:***

$$P_a(\text{del intervalo } 1) = P_{a1} = P_a/2$$

- **Reemplazando en :** $\Delta\delta(n) = \Delta\delta(n-1) + P_a(n-1).(\Delta t^2/M)$

$$\Delta\delta(1) = \Delta\delta_0 + P_a.(\Delta t^2/M)$$

$$\Delta\delta(1) = P_a.(\Delta t^2/M)$$

Así:

$$\delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1$$

Segundo Paso en adelante

$$Pa = Pm - Pe(\delta) \quad | \quad \delta_1$$

Repitiendo el mismo procedimiento del primer paso, pero tomando el valor completo de la Potencia Acelerante,

$$\Delta\delta(2) = \Delta\delta_1 + Pa.(\Delta t^2/M)$$

Así:

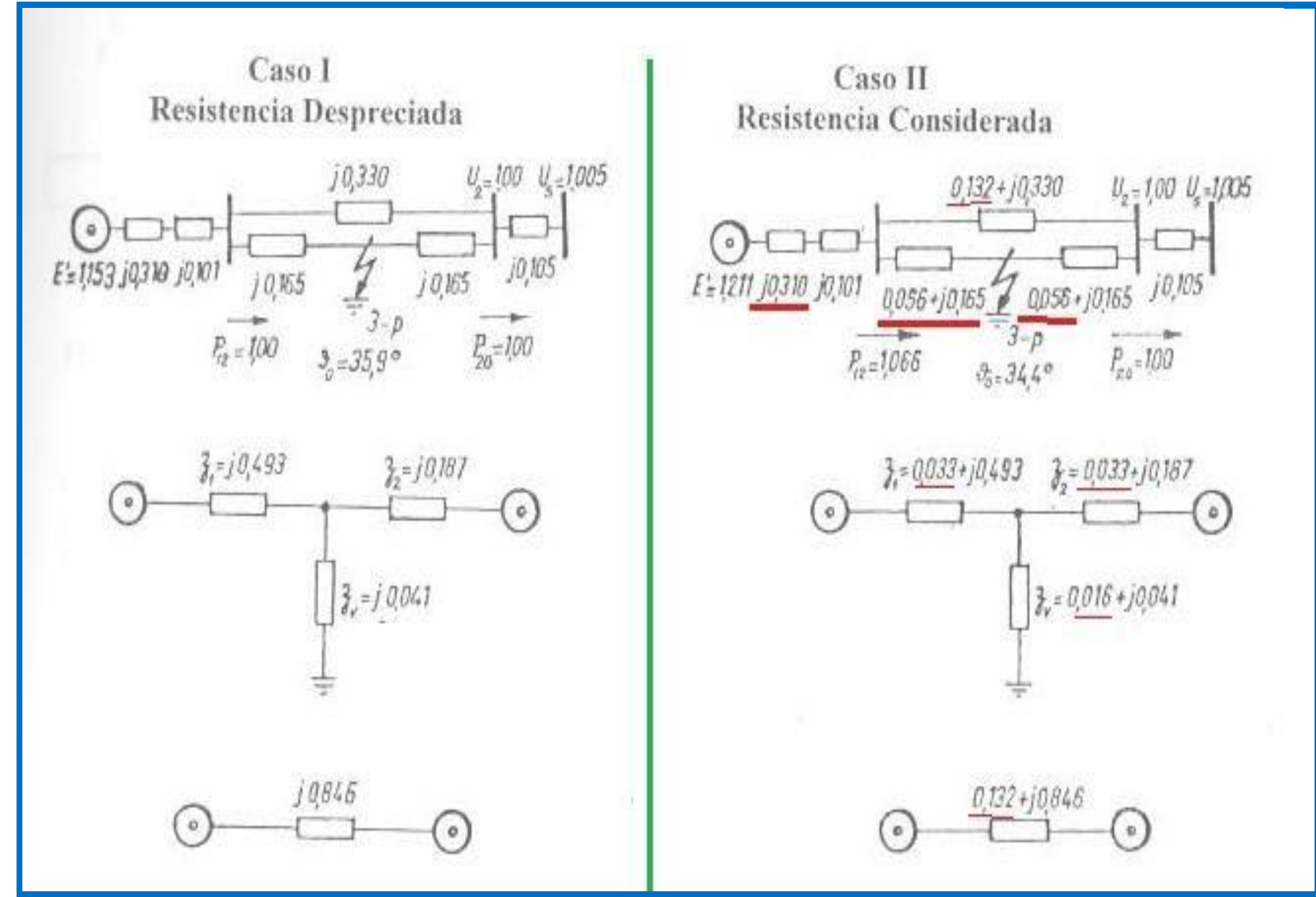
$$\delta_2 = \delta_1 + \Delta\delta_2$$

10. Influencia de las Pérdidas de Potencia Activa. $R \neq 0$

- Las expresiones de potencia eléctrica que se están empleando, no involucran las resistencias presentes en los sistemas de Transmisión.
- Se demostrará la influencia que ellas tienen sobre la estabilidad del sistema y el efecto de no considerarlas en los cálculos.
- Para considerar las resistencias del sistema, es necesario analizar la expresión completa de la potencia eléctrica. Es decir:

$$P_e = \frac{E'^2}{Z_{11}} \sin(\theta_{11}) + \frac{E' \cdot U_s}{Z_{12}} \sin(\theta_{12} - \delta_{12})$$

Los casos I y II de la figura, muestran un mismo sistema eléctrico con y sin consideración de las Resistencia



En el **caso II** se observa que para abastecer la demanda **$P_{20} = 1 \text{ pu}$** , al considerar las resistencias en el sistema, se produce un aumento de la Potencia **P_{12}** que debe entregar el generador.

De 1 p.u que entrega originalmente sin considerar las resistencia, pasa a 1,066 p.u con resistencias, lo que implica mayor corriente y por consecuencia mayor tensión de la rueda polar.

Así, calculando los valores de potencia entregada por el generador sincrónico en cada caso:

$$P_e(\text{caso I}) = 0.395 \sin(\delta);$$

$$\delta_{cc} = 63^\circ;$$

$$T_{\text{crítico}} = 0.17 \text{ segundos}$$

$$P_e(\text{caso II}) = 0.263 + 1.423 \sin(\delta - 8.8^\circ);$$

$$\delta_{cc} = 93.5^\circ;$$

$$T_{\text{crítico}} = 0.31 \text{ segundos}$$

Claramente se ve que al considerar las resistencias se mejora la estabilidad del sistema.

Si se comparan las características de potencia de los dos casos. **Figura 14**, se ve que el aumento de estabilidad que se evidencia en el valor del ángulo crítico, se debe fundamentalmente a un notable ascenso de la curva, lo que permite disponer de mayor área de frenado.

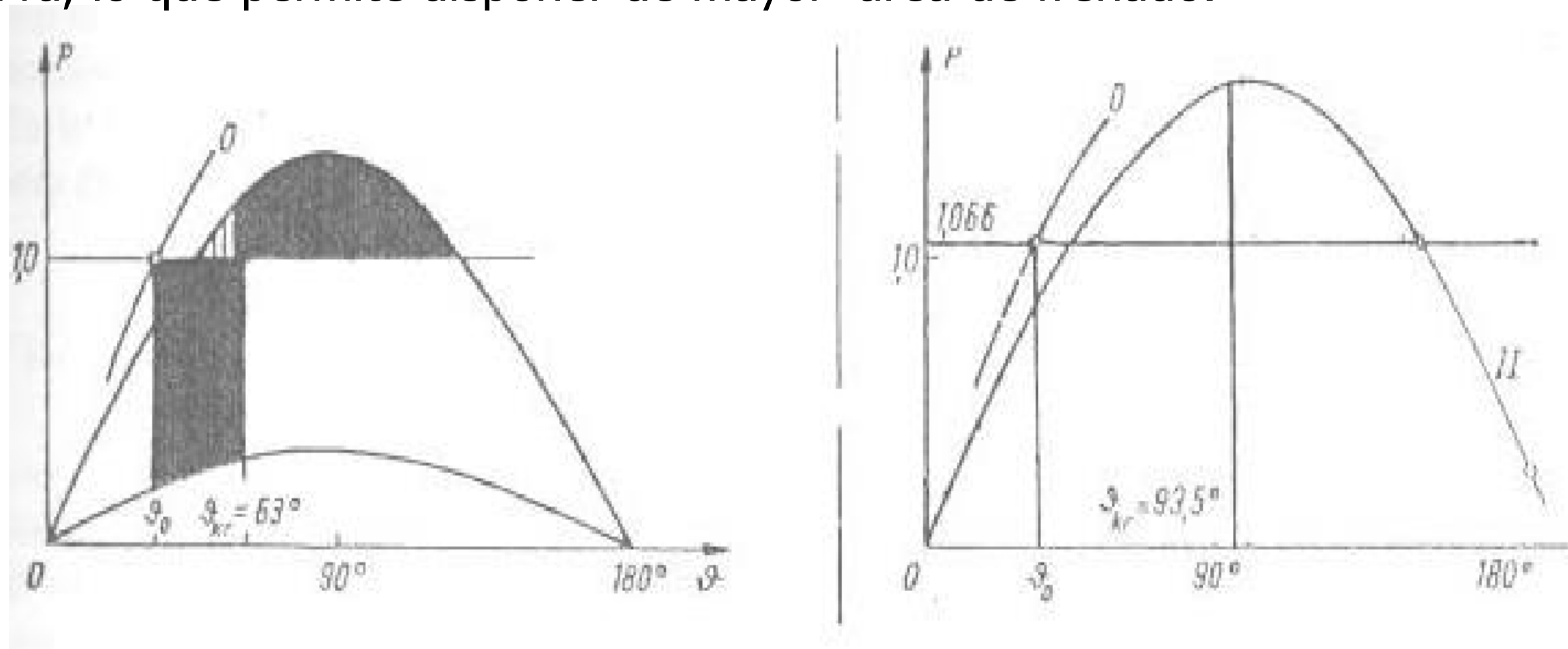


Figura 4.14: Características de Estados Estacionario, falla y posfalla con $R=0$ y $R \neq 0$

11. Relación entre Potencia de Transmisión y la Estabilidad del Sistema.

Considérese un sistema eléctrico constituido por una máquina síncrona conectada a una red Rígida a través de una doble terna.

En la **Figura 15 a**, el generador abastece una carga $P_o = 0.5$ pu y en la **Figura 15 b**, una carga considerablemente mayor $P_o = 1.2$ pu.

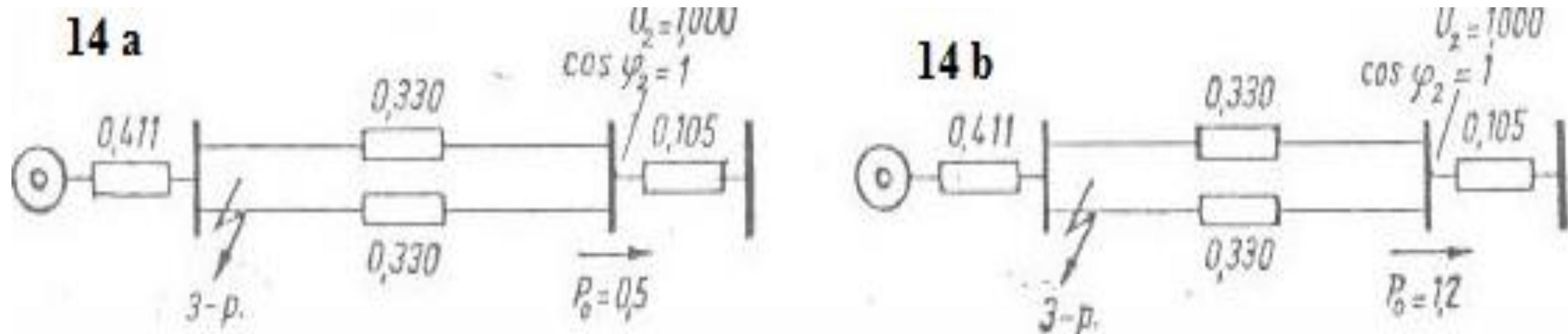


Figura 15 a y 15 b

Supóngase que para ambos estados de funcionamiento se produce un cortocircuito trifásico en bornes del generador y las características en cada caso son las presentadas en la **Figura 16 a y b** respectivamente.

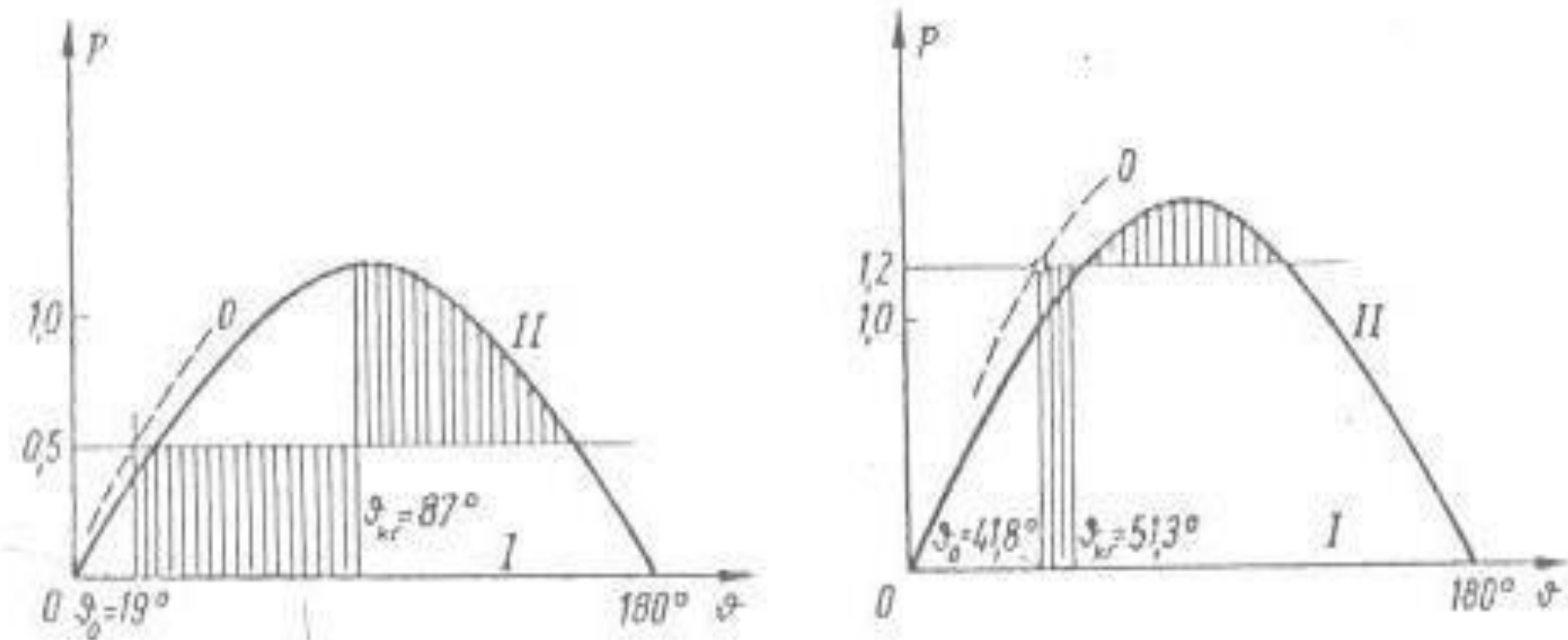


Figura 16 a y b: Características de Estados Estacionario, falla y posfalla con $\neq$ valores de Demanda

- En ambas figuras, las líneas de puntos representan la característica de estado estacionario.
- Como el cortocircuito considerado es en bornes de la máquina, mientras este este presente (en falla) la tensión y la **Pe son cero**, por lo tanto la característica de falla, coincide con el eje delta.
- Comparando el tamaño de las áreas sombreadas en ambos casos, es evidente que cuanto mayor es la Potencia generada menor es el área de frenado disponible y por lo tanto desmejora el comportamiento dinámico del sistema.

12. Influencia de la Ubicación de la Falla

- *La severidad de las fallas, tiende a disminuir a medida que aumenta la distancia entre la falla y los generadores.*
- *El aumento de la distancia entre falla y generador se refleja en un incremento de la admitancia de acoplamiento, lo que beneficia a la estabilidad transitoria permitiendo mayores tiempos para realiza las maniobras de despeje.*
- *Por consecuencia, cuando una falla es en bornes del generador estamos frente a la situación mas desfavorable desde el punto de vista de la Estabilidad Transitoria.*

13. Impacto de diferentes Tipos de Cortocircuitos sobre la Estabilidad Transitoria.

- *Existen un gran número de perturbaciones que se pueden presentar y causar problemas de inestabilidad en los sistemas de potencia.*
- *A su vez, el sistema puede estar operando en muy distintos estados de carga, configuración y generación.*
- *Tanto la perturbación como el estado de operación prefalla son determinantes de la Estabilidad Transitoria de un Sistema e cuestión.*

Las fallas más frecuentes en los sistemas eléctricos se clasifican en:

- 1. Cortocircuitos trifásicos**
- 2. Cortocircuitos bifásicos con contacto a tierra**
- 3. Cortocircuitos bifásicos sin contacto a tierra (aislados)**
- 4. Contacto monofásico a tierra**

La probabilidad de ocurrencia de estas fallas crece con el orden mencionado, en tanto que la severidad disminuye en el mismo sentido.

Por ejemplo, según estadísticas del Sistema Eléctrico de Gran Bretaña, se registran para un periodo de 6 años, en líneas aéreas de 400 kV la siguiente ocurrencia de fallas:

1. Cortocircuitos trifásicos	0.52%
2. Cortocircuitos bifásicos con contacto a tierra	5.90%
3. Cortocircuitos bifásicos sin contacto a tierra (aislados)	22.46%
4. Contacto monofásico a tierra	71.12%

Naturalmente los valores dependen de cada sistema, pero la distribución mostrada ilustra cualitativamente la gran diferencia existente entre la probabilidad de ocurrencia de fallas severas y fallas más benignas.