

Capítulo #4 Maquinas Síncronicas

GENERADORES SÍNCRONICOS

- OBJETIVOS:
- DESCRIBIR ESTRUCTURA DEL GENERADOR
 - ANALIZAR EL SISTEMA DE EXCITACION
 - ECUACION BASICA DE UN GS (FEM)
 - DERIVAR ECUACIONES DE FLUJOS DE POTENCIA
 - OBTENER LA EC. DE PAR MECANICO
 - CURVAS CARACTERISTICAS Y REACTANCIAS
 - ECUACIONES: f Vs P y V Vs Q .
 - TRANSITORIOS EN GS
 - VALORES NOMINALES
 - DERIVAR EL DIAGRAMA DE CAPACIDAD.

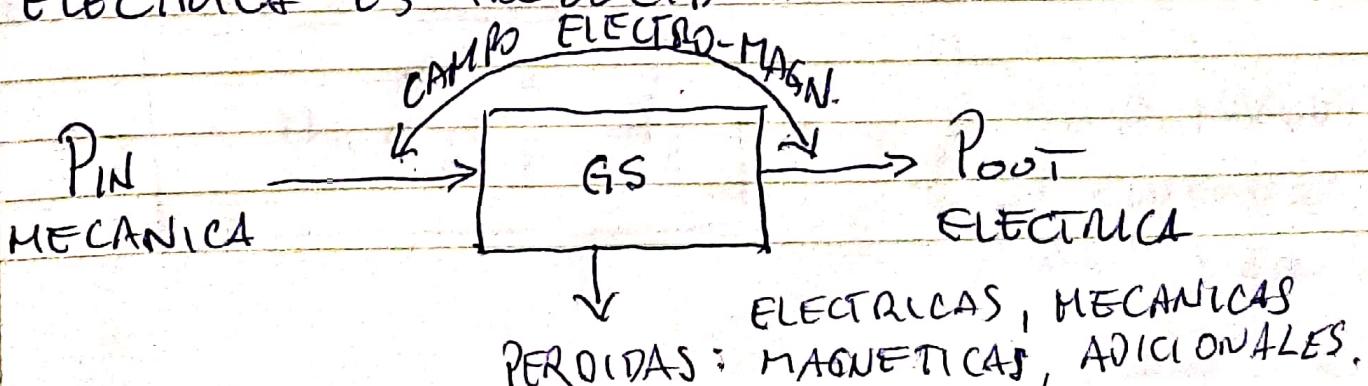
ESTRUCTURA DE LOS GENERADORES (MAQUINAS) SÍNCRONICAS

15% DE TODAS LAS MAQUINAS ELECTRICAS SON AC

65% DE TODA LA GENERACION ELECTRICA USAN GS

→ EL GS Y EL MS ES LA MISMA MAQUINA FISICA,
EL TIPO LO DETERMINA LA DIRECCION DE FLUJO DE
POTENCIAS.

EL GS ES IMPULSADO MECANICAMENTE, EL CIRCUITO DE CAMPO CREA EL CAMPO MAGNETICO NECESARIO PARA ACTIVAR EL PROCESO DE CONVERSION ELECTRO-MECANICO, EVENTUALMENTE POTENCIA Y ENERGIA ELECTRICA ES PRODUCIDA.



DOS PARTES PRINCIPALES:

a.- ESTATOR: BOBINADO DISTRIBUIDO ESPACIALMENTE, GENERA POR INDUCCION F.G.M (ARMADURA)

b.- ROTOR: ES UNA GRAN BOBINA EXCITADA CON DG (CAMPO)

DOS TIPOS DE ROTOR:

- POLOS SALIENTES: SON PROTUBERANCIAS

- POLOS CILINDRICOS: SON POLOS LISOS



ROTOR DE POLOS LISOS

WINDINGS

ROTOR DE POLOS SALIENTES

PARA MAQUINAS DE PC 2,4

TURBOGENERADORES: VAPOR, GAS

PARA MAQUINAS DE MUCHOS POLOS (HIDROGENERADORES)

ECUACION DE VELOCIDAD:

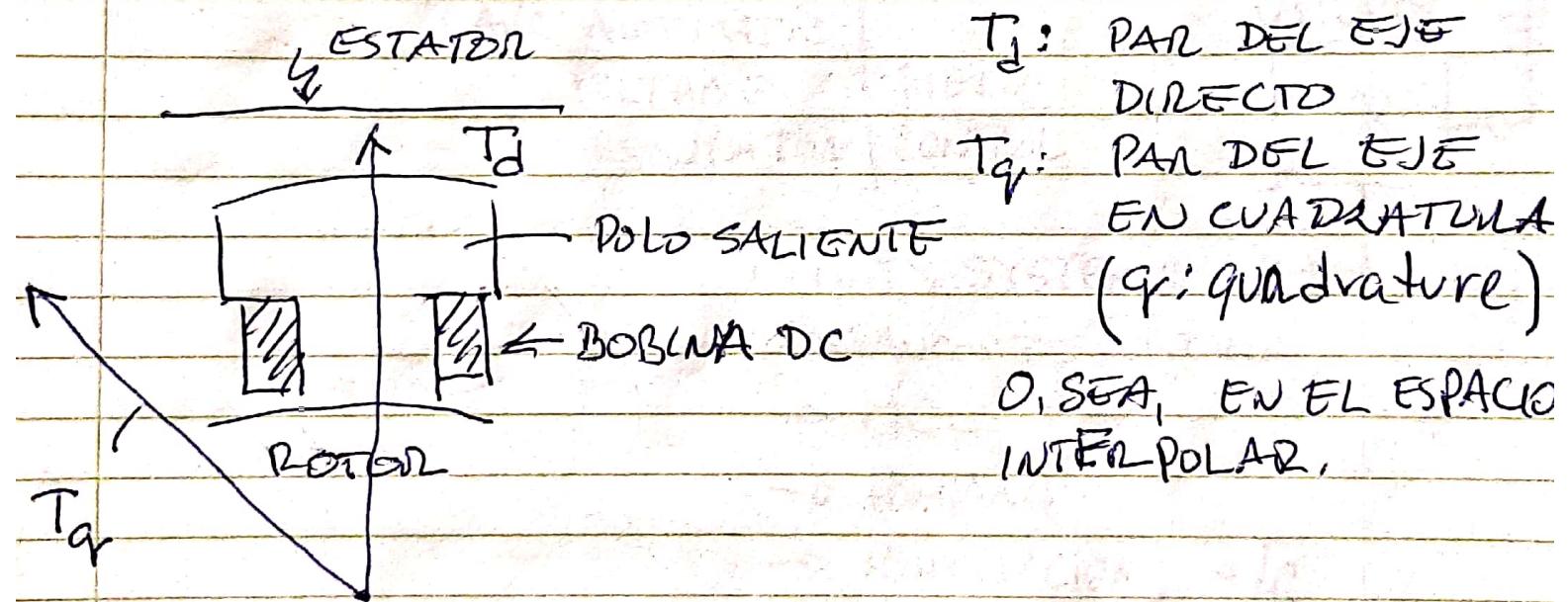
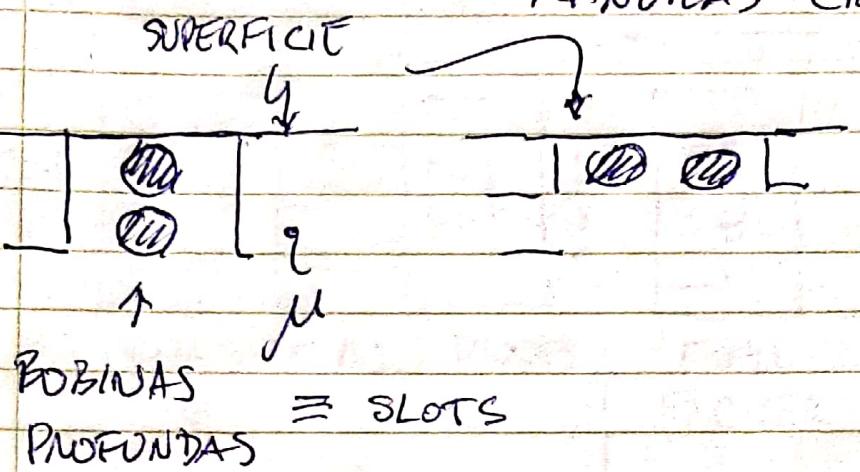
$$n_m = \frac{120}{p} f_e$$

n_m: rpm

p: N° POLOS MAGNETICOS

f_e: FRECUENCIA ELECTRICA

-  POLOS LISO: → DISTANCIA ENTRE ROTOR Y ESTATOR
ES SIEMPRE IGUAL
→ SOLO PRODUCE PAR DE EJE DIRECTO
→ LOS CONDUCTORES ESTAN EN
RANURAS CREADAS EN EL NUCLEO



$$f_e = 50 \text{ Hz}$$

$$60 \text{ Hz}$$

$$\begin{array}{ll} P=2 & N_m = 3000 \text{ rpm} \\ P=4 & = 1500 \text{ rpm} \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} P=2 & N_m = 3600 \text{ rpm} \\ P=4 & = 1800 \text{ rpm} \end{array}$$

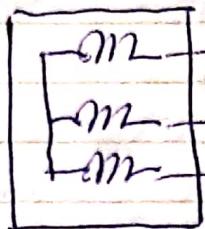
Sistema de Excitación de GS.

PILOT EXCITER

ROTOR
FIELD

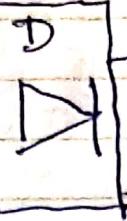


ARMATURE



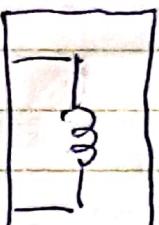
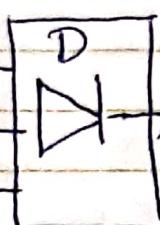
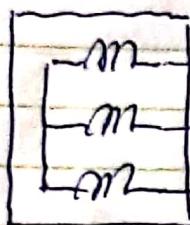
RECTIFIER

MAIN
FIELD



LF

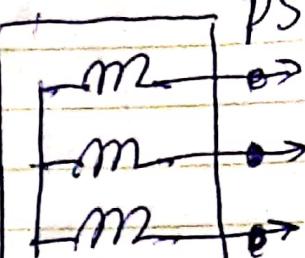
ESTATOR



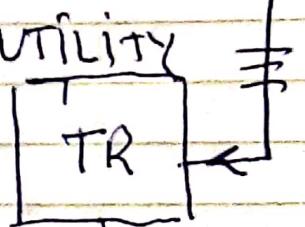
ARMATURE AC
3φ

DIODES

FIELD
EXCITER



ARMATURE



AVR: AUTOMATIC
VOLTAGE
REGULATOR

FIELD
CONTROL

UTILITY SYSTEMS

→ BAUCOS DE BATERIA

→ MCC

→ POMPING

→ ILUMINACION, A/C

→ SAND BLASTING

→ ETC.

DOS TIPOS DE CONTROL PRINCIPAL:

→ CONTROL DE CAMPO: AVR

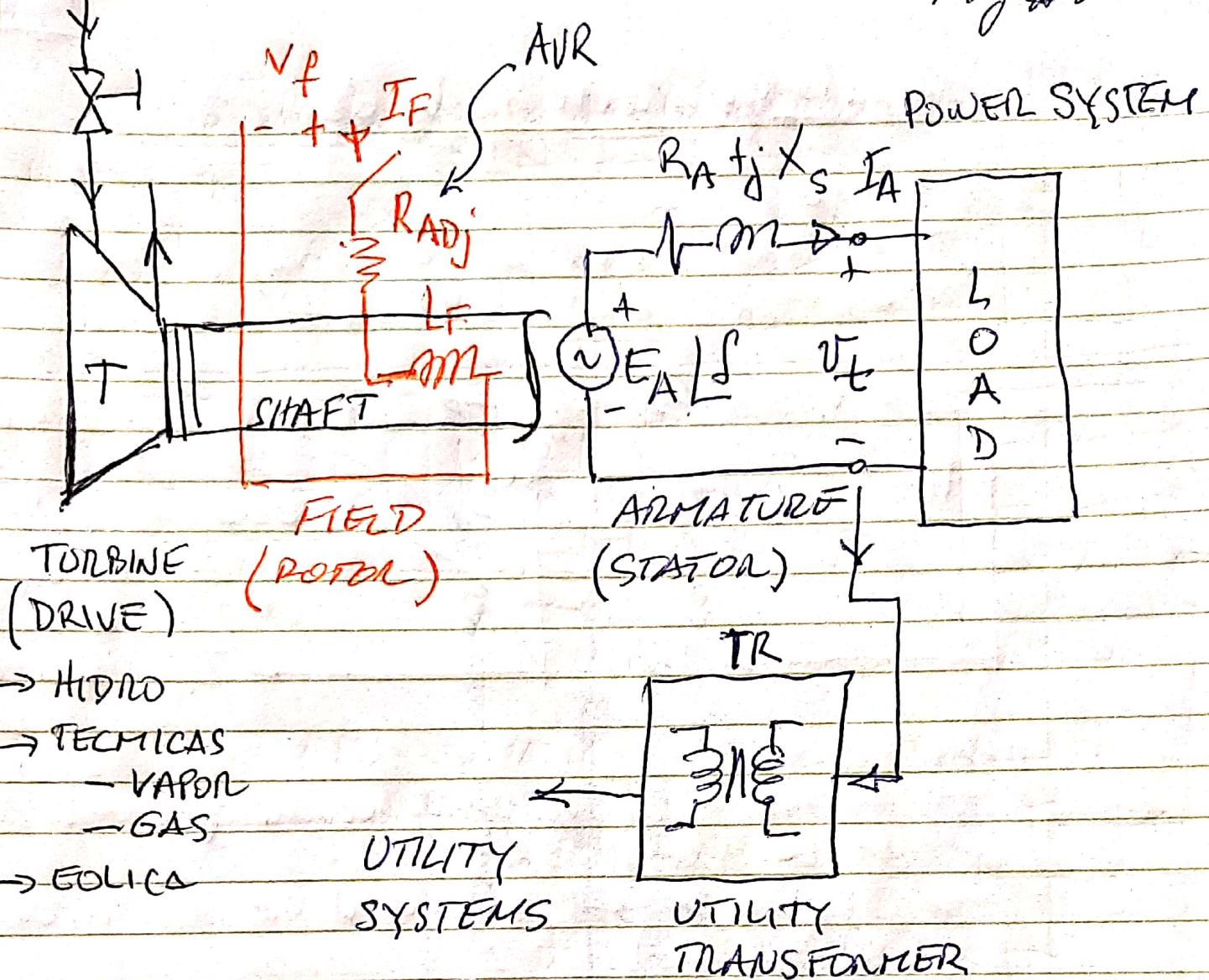
CONTROL REACTIVO
- II - VOLTAJE

→ GOBERNADOR: CONTROL DE VELOCIDAD
(FRECUENCIA)

CONTROL DE POTENCIA REAL

GOVERNR

Pág #5.



ECUACION DE VOLTAJE (CAPITULO #3 CHAPMAN)

$$EA/S = V_\phi \angle \theta + (R_A + jX_S) I_A \angle \phi$$

θ : ANGULO DE PAR

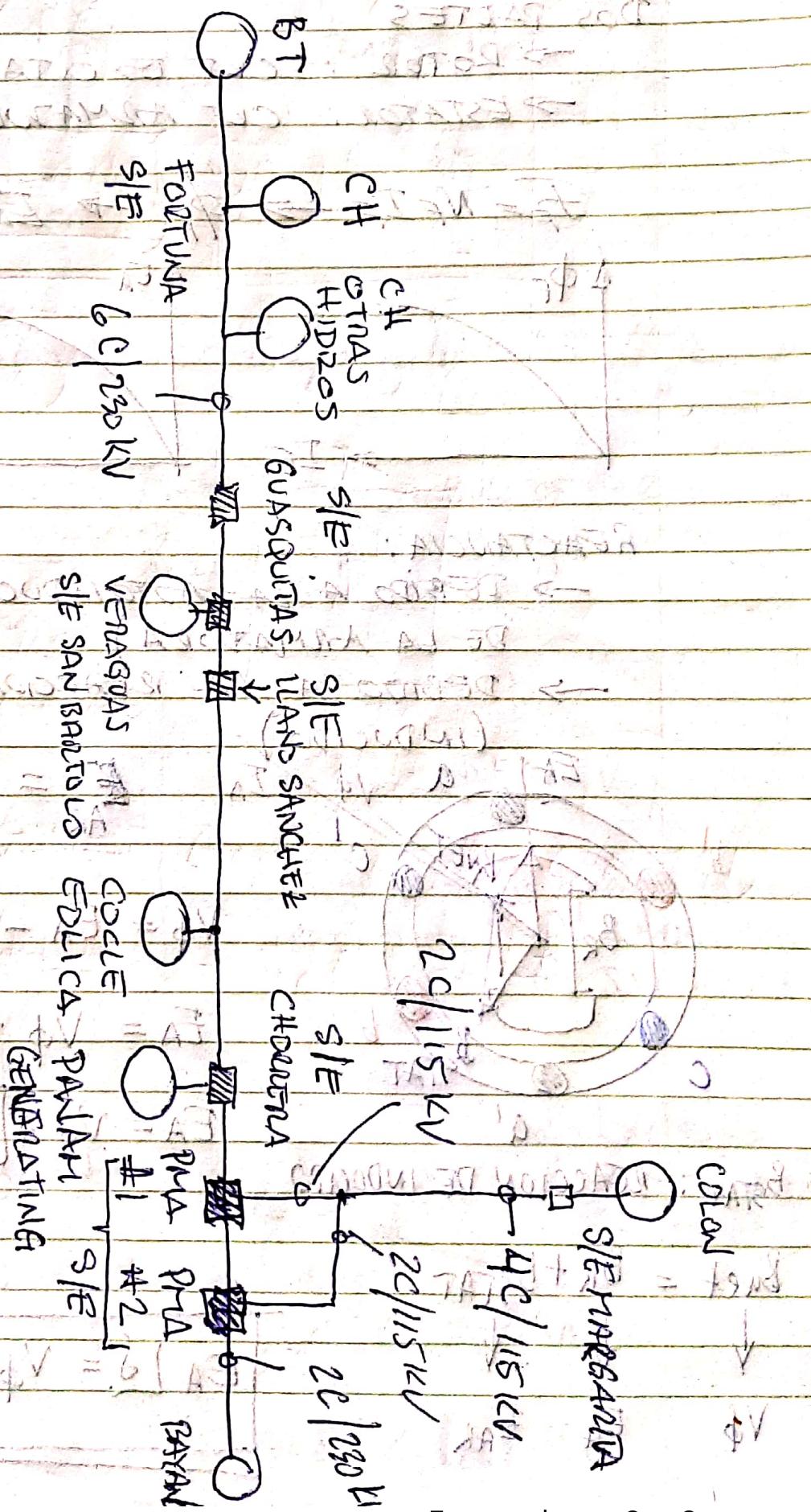
ϕ : ANGULO DE PF

$V_\phi \Rightarrow V_{t,EN}$ VOLTAJE TERMINAL

EA : F.E.M INDUCIDA

I_A : CORRIENTE DE ARMADURA (CARGA)

Sistema de Potencia en Panamá (SIN)

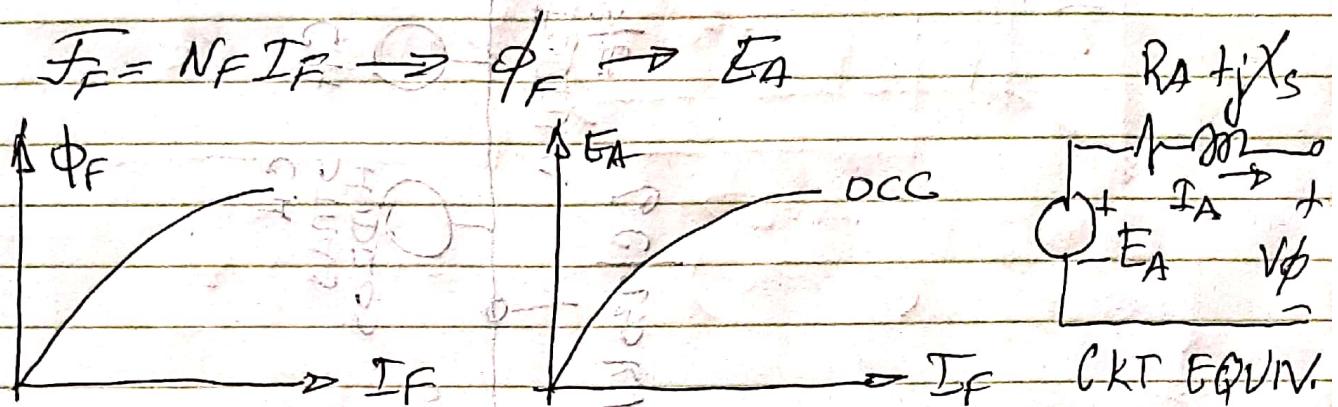


Circuito Equivalente de un GS

DOS PARTES

→ ROTOR : CKT EXCITADOR (CAMPO)

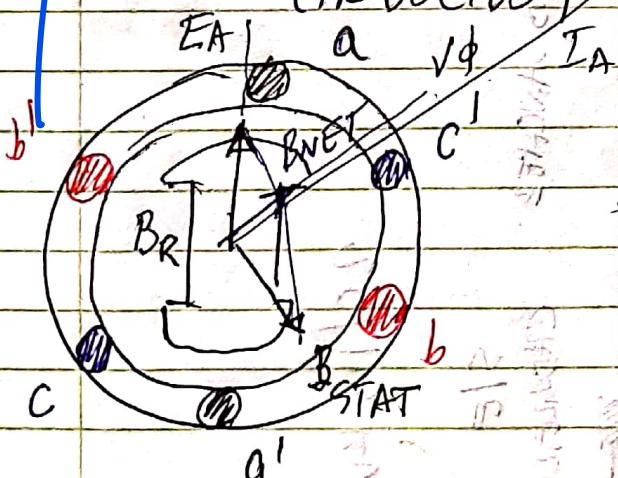
→ ESTATOR: CKT ARMADURA



REACTANCIA:

→ DEBIDO A LA AUTOINDUCCION (CAMPO PROPIO DE LA ARMADURA)

→ DEBIDO A LA REACCION DE ARMADURA (INDUCIDO)



$$E_{AR} = -j X_A I_A$$

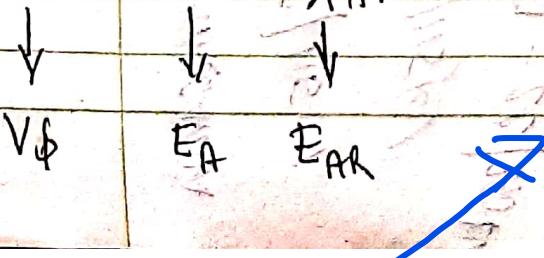
$$V_\phi = E_A - j X_A I_A$$

$$E_A = V_\phi + j X_A I_A + (R_A + j X_S) I_A$$

$$E_A = V_\phi + [R_A + j (X_A + X_S)] I_A$$

B_{STAT} : REACCION DE INDUCIDO

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



X_S = REACT SINCRONICA

$$E_A \boxed{\mathcal{L}} = V_\phi + (R_A + j X_S) \boxed{I_A} \boxed{\phi}$$

Tres tipos de carga:

- 1.- Inductiva
- 2.- Resistiva
- 3.- Capacitiva

La regulación de voltaje:

$$\text{VR}(\%) = \frac{V_{t,NL} - V_{t,FL}}{V_{t,FL}} \times 100\%$$

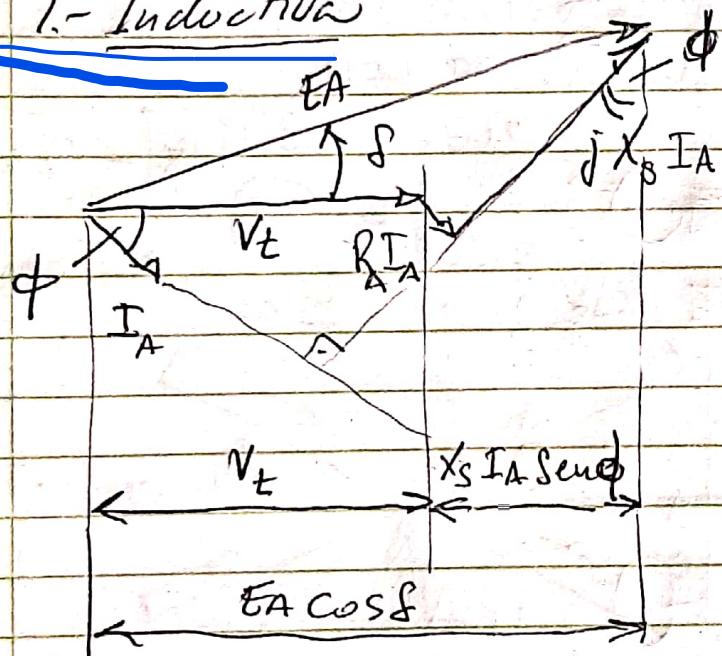
NL: NO-LOAD ($V_{ACID}, I=0$)

FL: FULL-LOAD

t: voltaje terminal

VR: Voltage Regulation: caída porcentual de voltaje.

1.- Inductiva



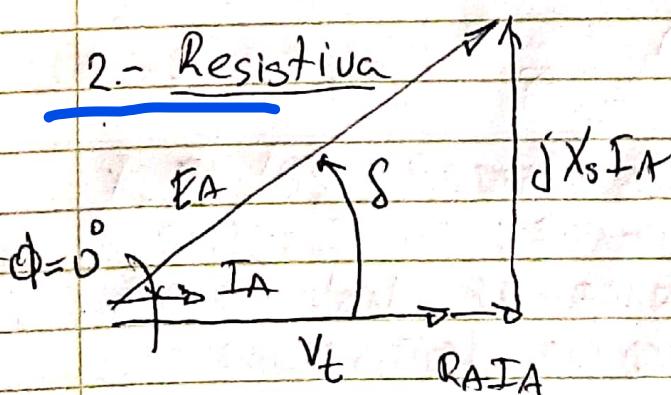
δ : ANGULO DE PAR
 ϕ : " pf.

$$R_I_A \approx 0,$$

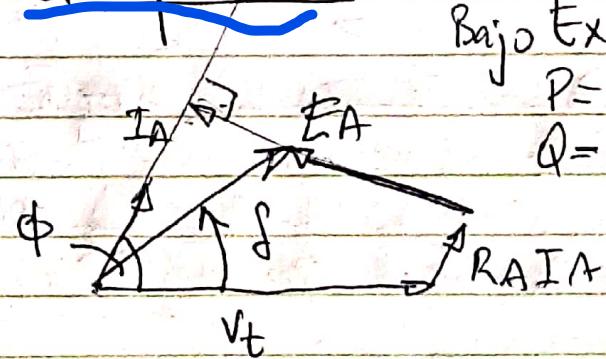
$$\text{Si } |E_A \cos \delta| > |V_t|$$

El generador opera sobre-excitado: $P = \text{SUMINISTRA}$
 $Q = \text{SUMINISTRA}$

2.- Resistiva



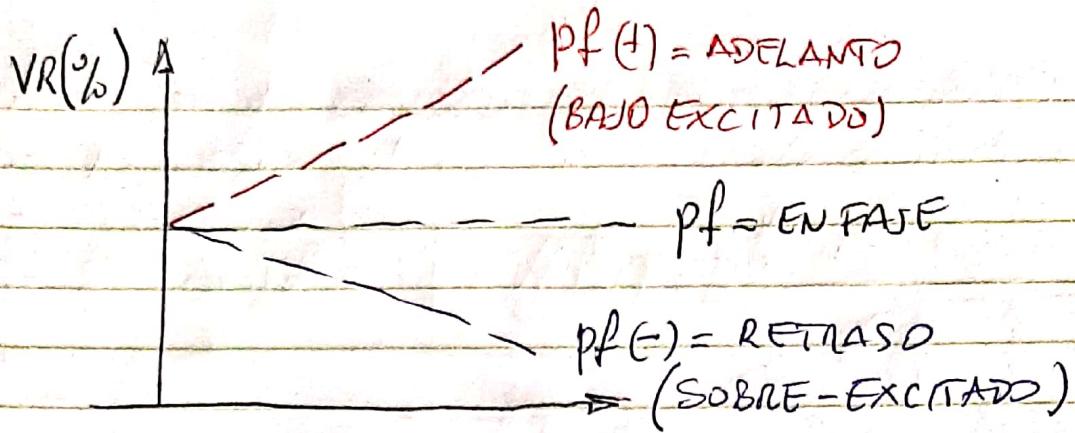
3.- Capacitiva



Bajo Excitado:
 $P = \text{SUMINISTRA}$
 $Q = \text{ABSORVE}$

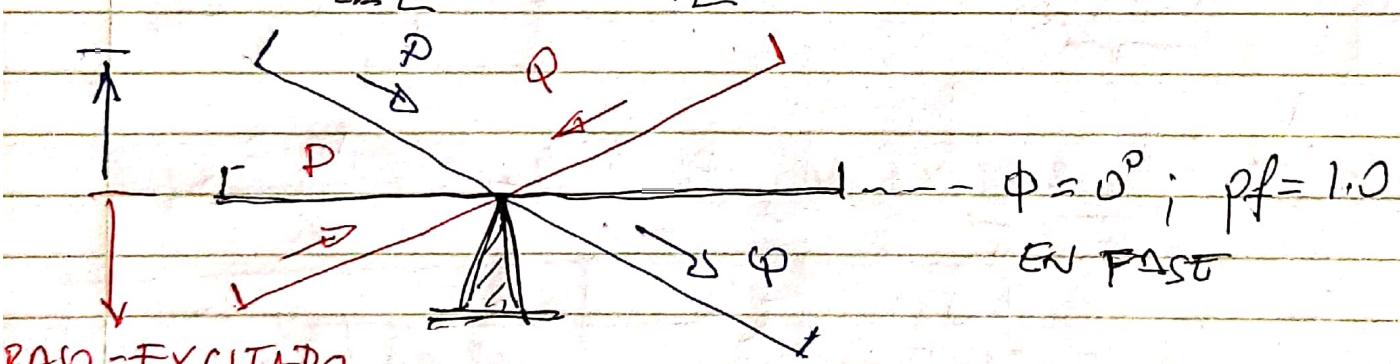
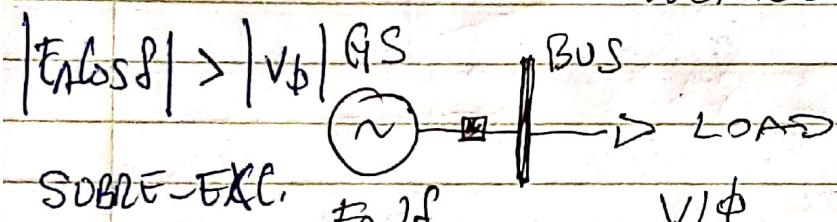
$$|E_A \cos \delta| \approx |V_t|$$

$$|E_A \cos \delta| < |V_t|$$



Q: POTENCIA REACTIVA ES USADA PARA COMPENSACION DEL VOLTAJE EN SISTEMAS DE POTENCIA:

- Q_C : BCO. CAPACITIVO \rightarrow INCREMENTO DE VOLTAJE
- Q_L : REACCIONES \rightarrow ABSORVE REACTIVO ADICIONAL DEL SISTEMA DE POTENCIA \Rightarrow REDUCE ELEVACION DE VOLTAJE.



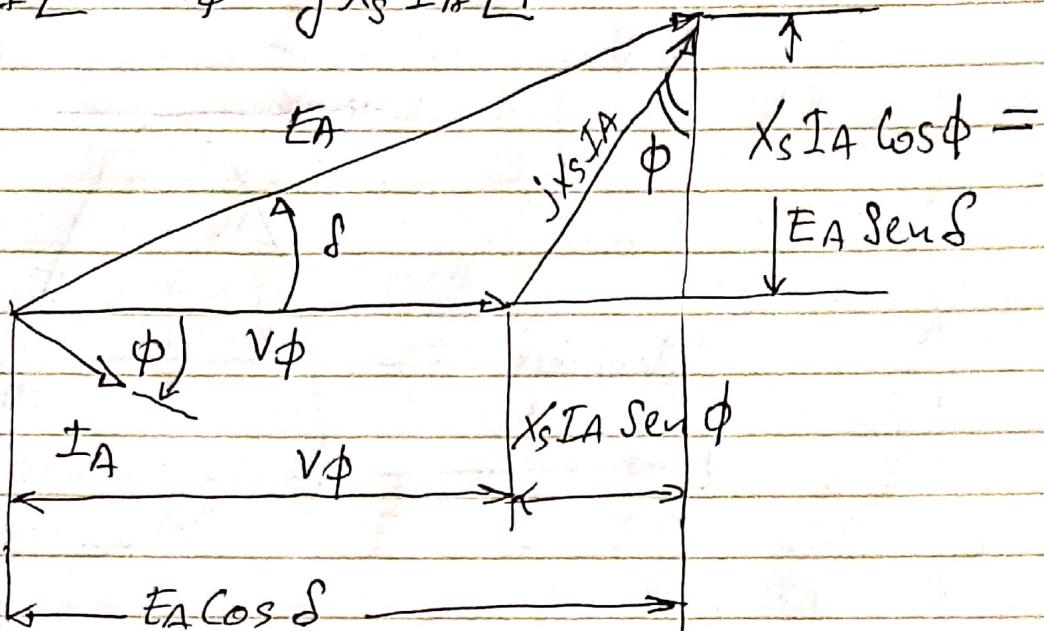
$$|E_A \cos \delta| < |V_\phi|$$

→ EL GS PUEDE COMPENSAR VOLTAJE EN EL SISTEMA DE POTENCIA, SIN EMBARGO CUANDO ABSORVEN REACTIVO (BAJO-EXCITADO), SE RECALIENTAN, MAYORES PERDIDAS, VIBRACIONES.

DERIVEMOS ECUACIONES DE POTENCIAS:

ASUMIR: $R_A \approx 0$.

$$E_A \angle \delta = V_\phi + j X_S I_A \angle \phi$$



$$P_{3\phi} = 3 V_\phi I_A \cos \phi$$

$$X_S I_A \cos \phi = E_A \sin \delta$$

$$P_{3\phi} = \frac{3 V_\phi E_A}{X_S} \sin \delta$$

$$V_\phi + X_S I_A \underbrace{\sin \phi}_{=} = E_A \cos \delta$$

$$P_{3\phi} = \left(\frac{3 V_\phi}{X_S} \right) E_A \sin \delta$$

$$P_{3\phi} = 3 V_\phi I_A \sin \phi$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3 V_\phi E_A}{X_S} \cos \delta - \frac{3 V_\phi^2}{X_S}$$

* $P_{3\phi}$ VARIA COMO FUNCION DEL ANGULO TERMINAL

$$P_{3\phi} = \left(\frac{3 V_\phi}{X_S} \right) [E_A \cos \delta - V_\phi]$$

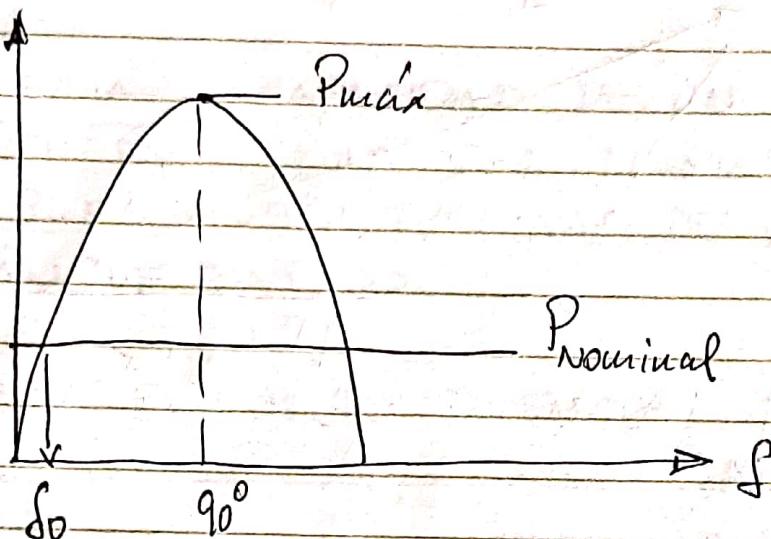
* $Q_{3\phi}$ VARIA COMO FUNCION DE DIFERENCIA DE VOLTAJES.



$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + j Q_{3\phi}$$

$$|S_{3\phi}| = 3 V_\phi I_A \quad \text{kVA o MVA (POTENCIA APARENTE)}$$

P



$$\delta_0 = 15^\circ - 30^\circ$$

EL GS SOLO PRODUCE UNA PEQUEÑA PARTE DE SU CAPACIDAD.

$$\delta = 90^\circ$$

EN EL LIMITE DE ESTABILIDAD

$$P_{3\phi} = \frac{3 V_\phi E_A}{X_S} \operatorname{sen} 90^\circ = \frac{3 V_\phi E_A}{X_S} = P_{max} \quad \text{LIMITE DE ESTABILIDAD ESTATICA.}$$

DEFINIMOS EL CONCEPTO ? FACTOR DE CARGA DE UN GS.

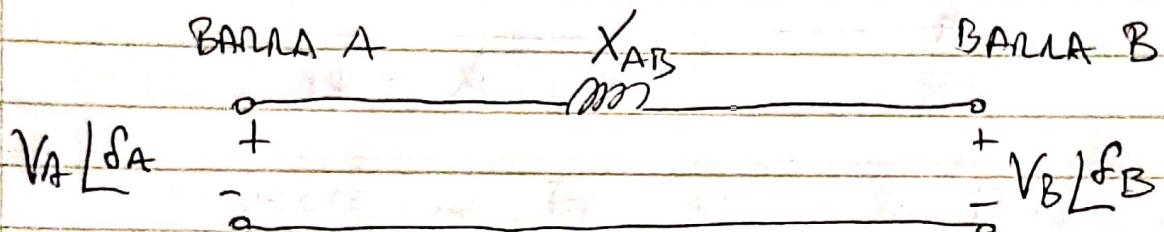
$$\text{FACTOR DE SERVICIO} = \frac{S_{max}}{S_{nominal}} \approx 3$$

ES USADO PARA SUPPLIR "TRANSITORIOS" DE CARGA.

RESERVA ROTANTE: EN PANAMA POR LEY UN GENERADOR DEBE DISPONER DE 5% DE SU CAPACIDAD INSTALADA PARA SUPPLIR TRANSITORIOS DE CARGA, ESTA CAPACIDAD NO PUEDE SER CONTRATADA.

RESERVA FRIA: CAPACIDAD DE UN GS QUE ESTA EN STAND-BY PARA SER LLAMADO A FUNCIONAR. SUELEN SER TURBINAS DE VAPOR O GAS DE ARRANQUE RAPIDO.

DIRECCION DE FLUJOS DE POTENCIA:



LÍNEA DE:

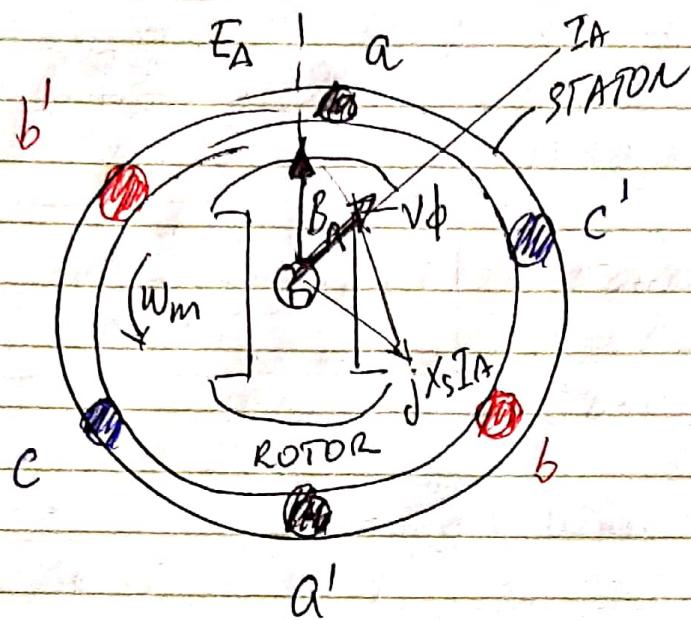
DISTRIBUCION
TRANSMISION

$$P_{3\phi} = \frac{3V_A V_B}{X_{AB}} \operatorname{Sen}(\delta_A - \delta_B)$$

$$Q_{3\phi} = \frac{3V_B}{X_{AB}} \left[V_A \underbrace{\operatorname{Sen}(\delta_A - \delta_B)}_{\curvearrowright} - V_B \right]$$

Si $\delta_A > \delta_B$; $P_{A \rightarrow B}$; $|V_A| > V_B$; $Q_{A \rightarrow B}$

$\delta_A < \delta_B$; $P_{A \leftarrow B}$; $|V_A| < V_B$; $Q_{A \leftarrow B}$

ECUACION DE PAR MECANICO: T_{IND} 

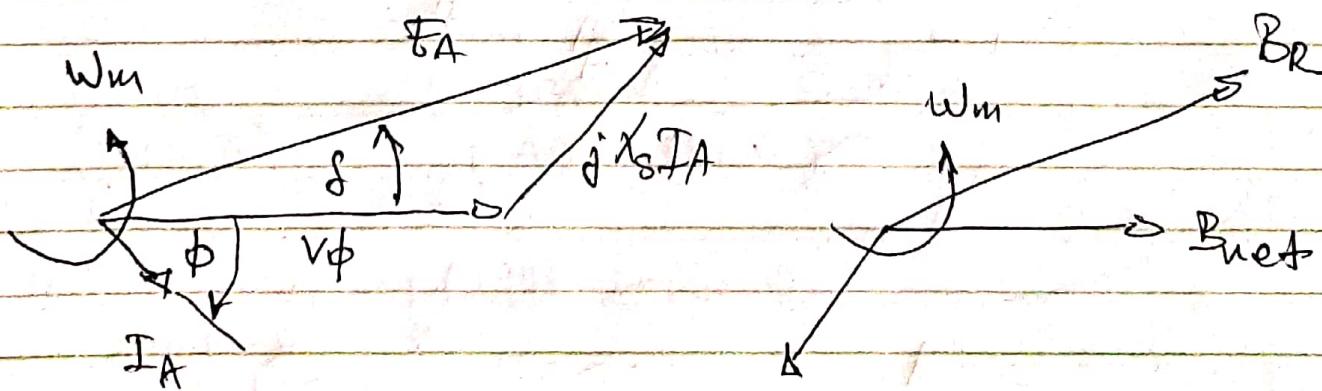
$$E_A \mid \delta = V_\phi + j X_s I_A \mid \phi$$

B_R PRODUCE A E_A

$B_R \parallel E_A$

$$B_{net} = B_R + B_{STAT} \quad \text{PRODUCE A } V_\phi \quad B_{net} \parallel V_\phi$$

B_{STAT} = REACCION DE ARMADURA PRODUCE A $j X_s I_A$

CARGA INDUCTIVA:

B_{STAT} ANTI-PARALELA
(REACCION)

$$P = T w_m$$

P: POTENCIA REAL

$$P = \frac{3 V_d E_A}{X_s} S_{eud}$$

T: PAR MECANICO

w_m: VELOCIDAD MECANICA DEL EJE
DE PLECHAS EN rad/s

$$T_{IND} = \frac{3 V_d E_A}{w_m X_s} S_{eud}$$

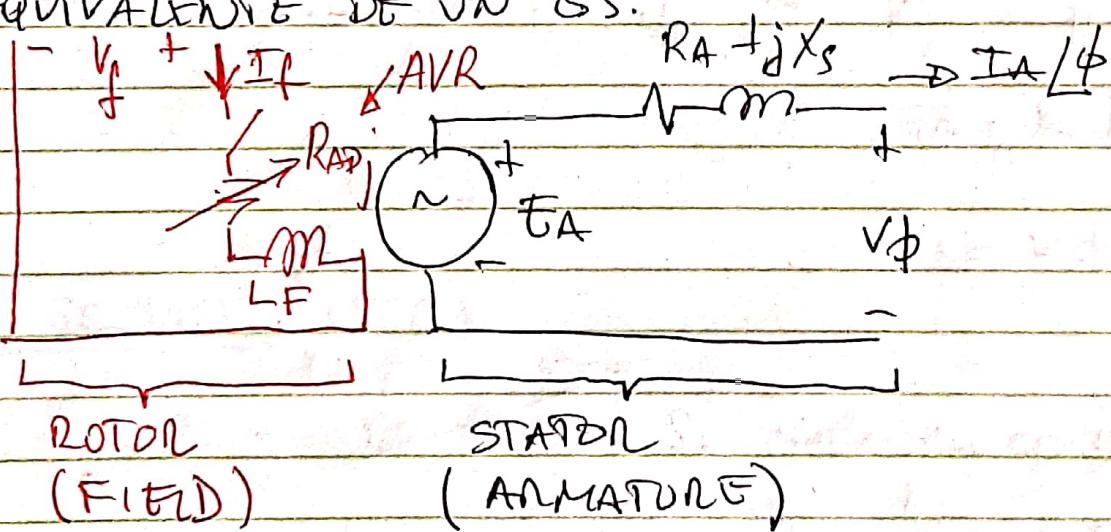
EQUACION CUANTITATIVA
DE PAR SEGUN CANTIDADES
ELECTRICAS.

$$\frac{n_m \times 2\pi}{60} \Rightarrow \text{rad/s} : w_m$$

n_m: VELOCIDAD EN
revoluciones/min.

1 revolución = 2π rad
60 segundos = 1 min

DETERMINACION DE LOS PARAMETROS DEL CIRCUITO
EQUIVALENTE DE UN BS:



AVR: AUTOMATIC CONTROL DE CAMPO

VOLTAGE
REGULATOR

PARAMETROS: R_A, X_S

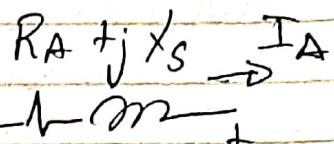
DETERMINACION DE PARAMETROS DE UN GSI: R_A , X_S

TRES PRIMERAS NUEVAS:

1.- OC TEST: OPEN CIRCUIT TEST

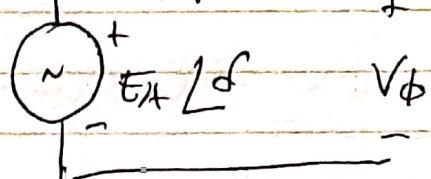
2.- SC TEST: SHORT CIRCUIT TEST

3. V Vs I TEST

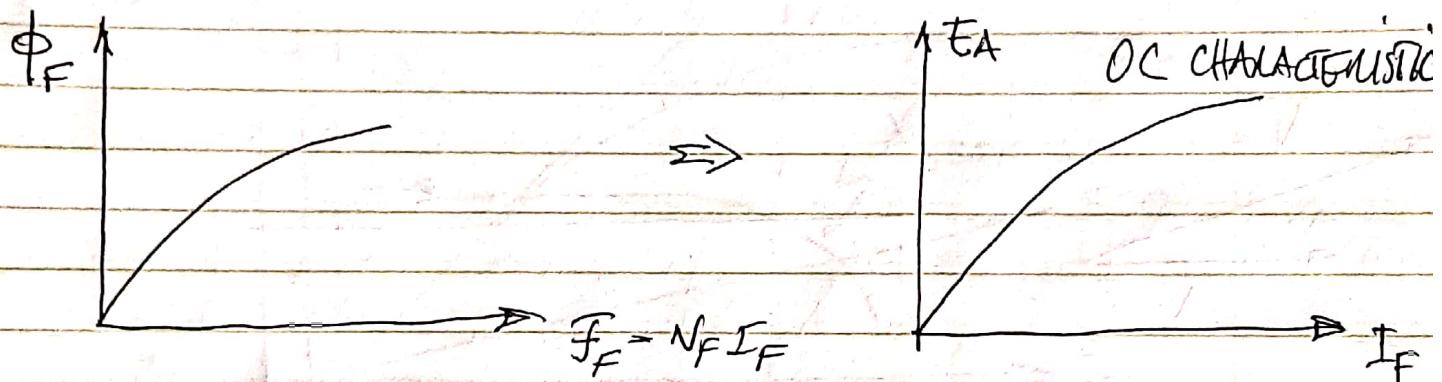


1.- OC TEST: $I_A = 0$

$$(OCC) \quad E_A = V_\phi = V_{t, NL}$$



$$f_F = N_F I_F \rightarrow \phi_F \rightarrow E_A$$



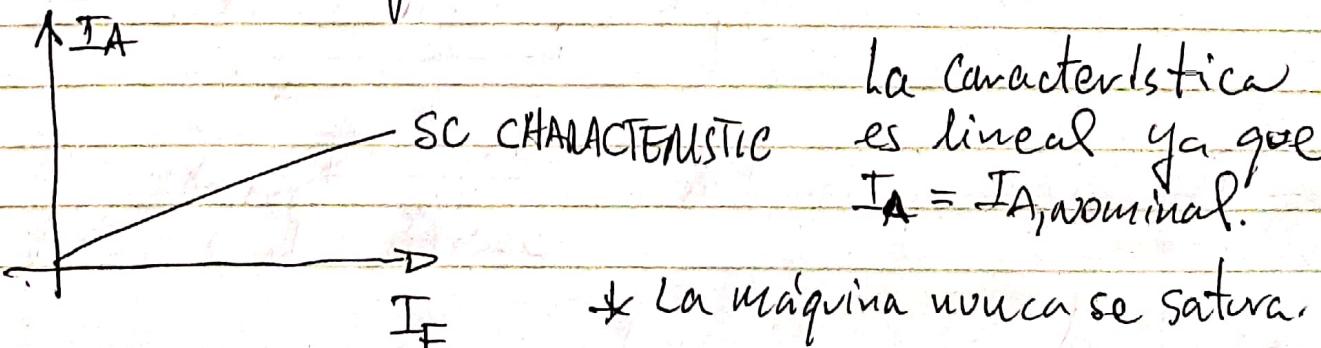
$$E_A = k \phi_F \omega$$

$$E_A = k \phi_F e$$

2.- SC TEST: (SCT)

$$f_F = N_F I_F = 0 \text{ } @ \text{ } t=0. \text{ Se cierra en corto el GS}$$

$I_A = I_{SC}$. Luego $I_F \uparrow$, tal que $I_A = I_{SC} = I_{A, \text{nominal}}$



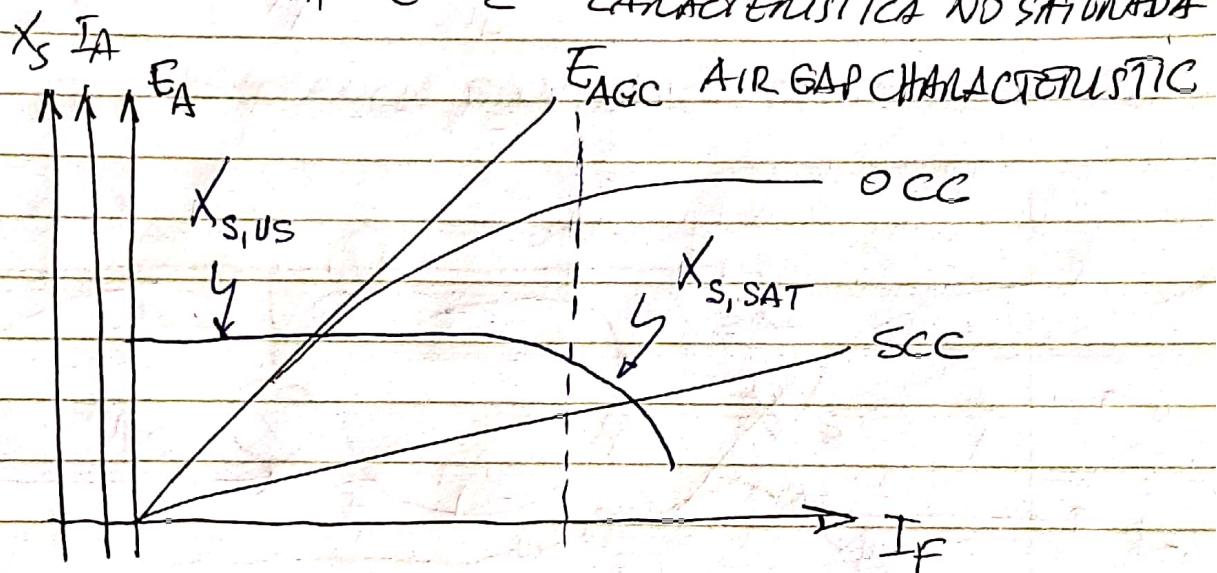
Impedancia:

$$Z_A = R_A + jX_S = \frac{V_{\phi, OCC}}{I_{A, SCC}} \quad | \quad X_S \gg R_A$$

$$|Z_A| = \sqrt{R_A^2 + X_S^2} \Rightarrow$$

→ $X_S = \frac{V_{\phi, OCC}}{I_{A, SCC}}$ ← CARACTERÍSTICA SATURADA

$I_{A, SCC}$ ← CARACTERÍSTICA NO SATURADA



$X_{S, US}$: REACTANCIA SINCRONICA "UNSATURATED"
IMPEDANCIA HASTA LA OPERACION NOMINAL.

$X_{S, SAT}$: REACTANCIA SINCRONICA "SATURATED"
IMPEDANCIA DURANTE TRANSICIONES (EA., FAULAS)

$$X_{S, US} = \left| \frac{E_{AGC}}{I_A} \right| = \frac{E_{AGC}}{I_{SCC}}$$

$$X_{S, SAT} = \frac{E_{A, OCC}}{I_{A, SCC}}$$

 SHORTCIRCUIT RATIO:

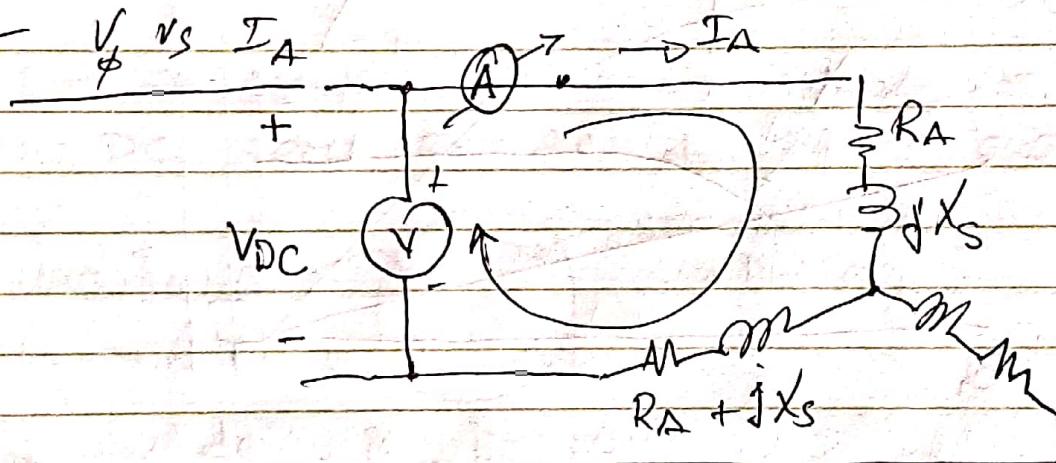
$$SCR = \frac{I_F(V_{\phi,occ})}{I_F(I_A, SCC)} = \frac{1}{X_{S,SAT,PU}}$$

$I_F(V_{\phi,occ})$: VALOR DE I_F EN LA OCC

$I_F(I_A, SCC)$: VALOR DE I_F EN LA SCC

$X_{S,SAT,PU}$: REACTANCIA SINCRONICA SATURADA EN PU.

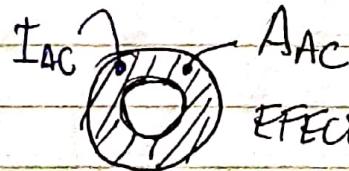
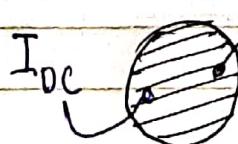
3.- V_ϕ vs I_A



$$2R_A = \frac{V_{\phi,DC}}{I_{A,DC}} \rightarrow R_A = \frac{1}{2} \frac{V_{\phi,DC}}{I_{A,DC}}$$

Sin embargo, en el generador fluye AC

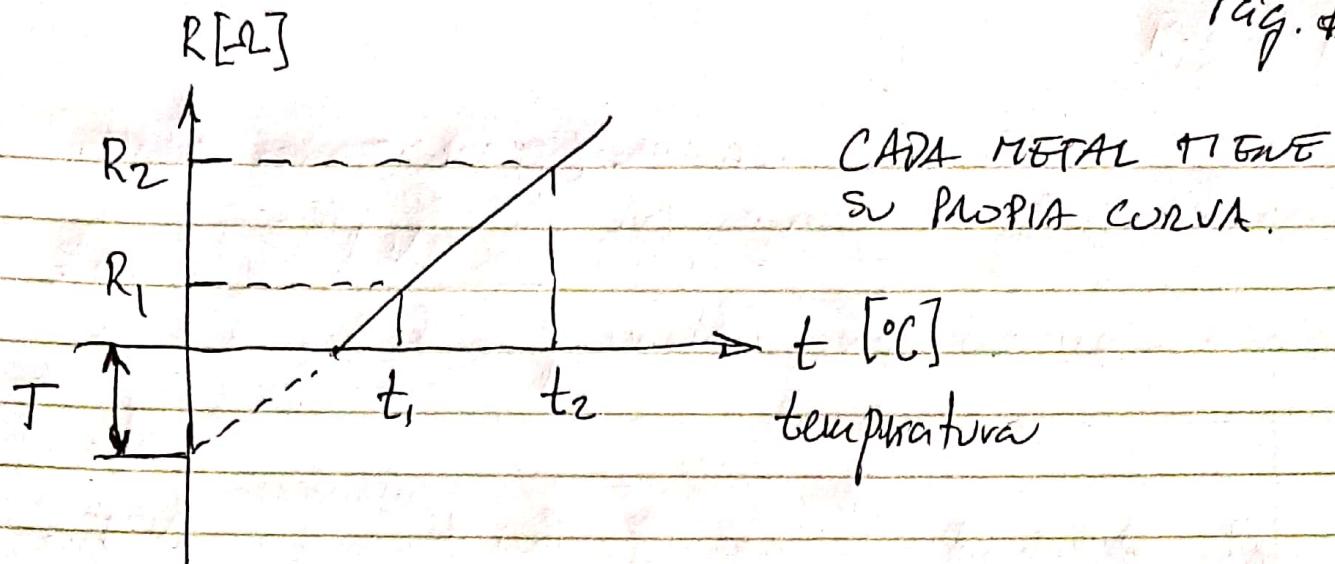
$$R_{AC} > R_{DC}$$



EFFECTO PIEL

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{A_{AC}}{A_{DC}} > 1.0$$

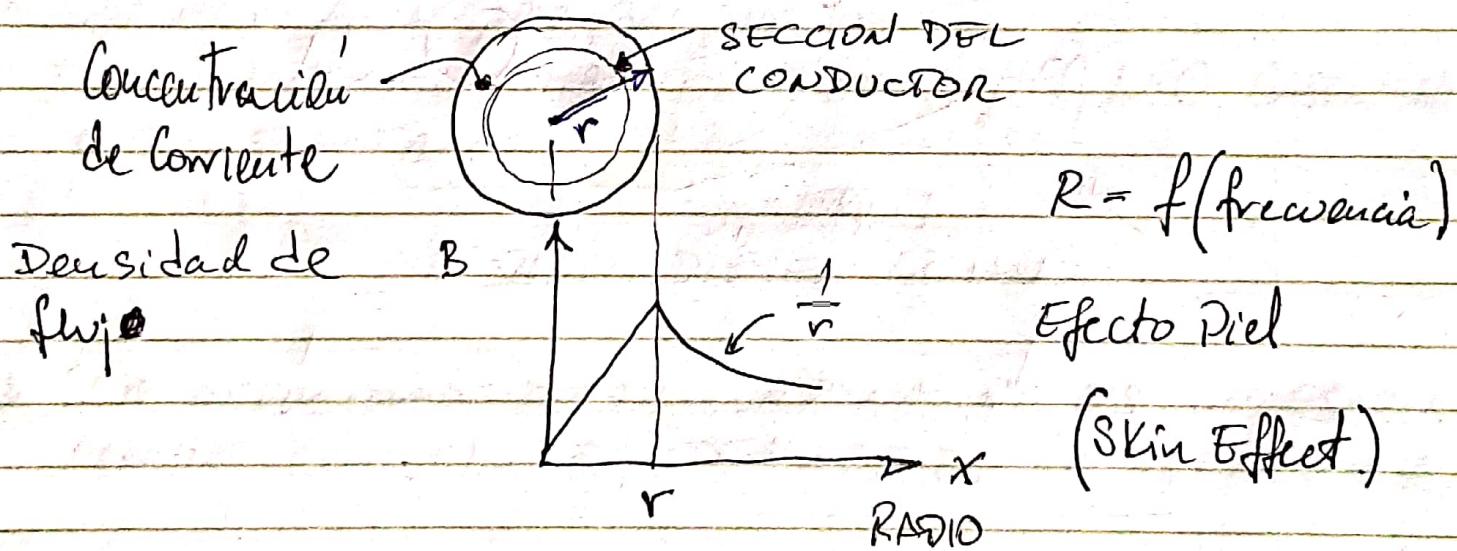
$$R_{DC} = S \frac{l}{A_{DC}} \quad ; \quad R_{AC} = S \frac{l}{A_{AC}}$$



T : coeficiente de temperatura

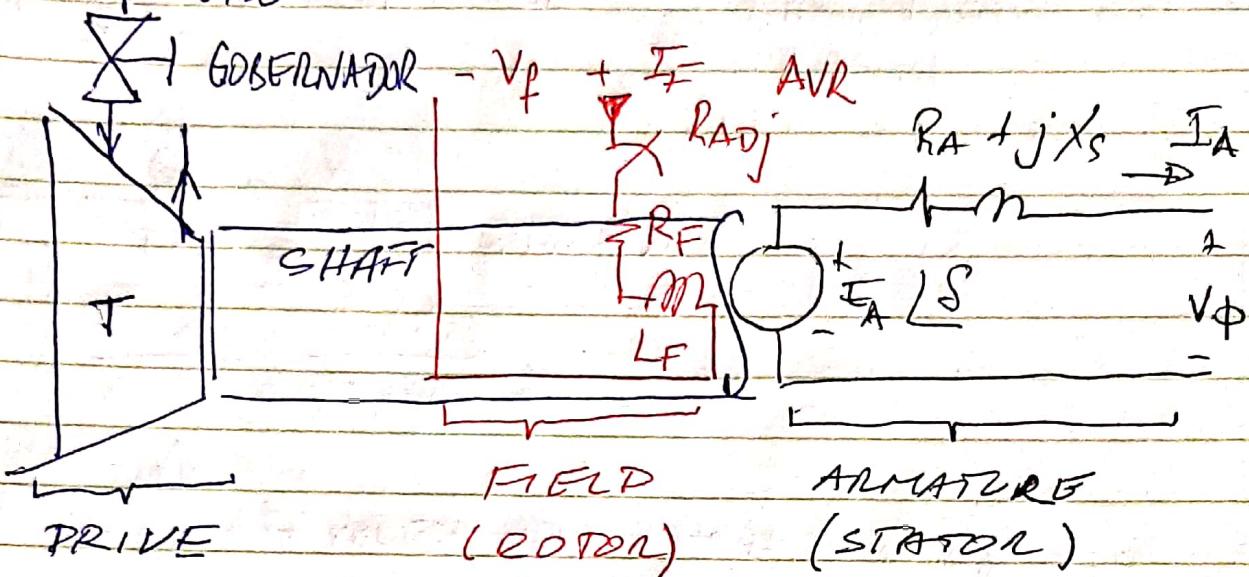
$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1}$$

* LOS FABRICANTES DAN EL VALOR DE R PANDO EN DC COMO EN AC A UNA FRECUENCIA DADA.



CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS:

- 1.- f vs P frecuencia vs potencia real
 - 2.- V vs Q voltaje vs potencia reactiva.
- * FLUIDO



→ TURBINAS: AGUA, VAPOR, GAS, VIENTO
 → ICE: INTERNAL COMBUSTION ENGINE: HFO, LFO, GASOLINA
 → MOTOR ELECTRICO

FO: FUEL OIL: HEAVY: BUNKER C
 LIGHT: DIESEL LIVIANO

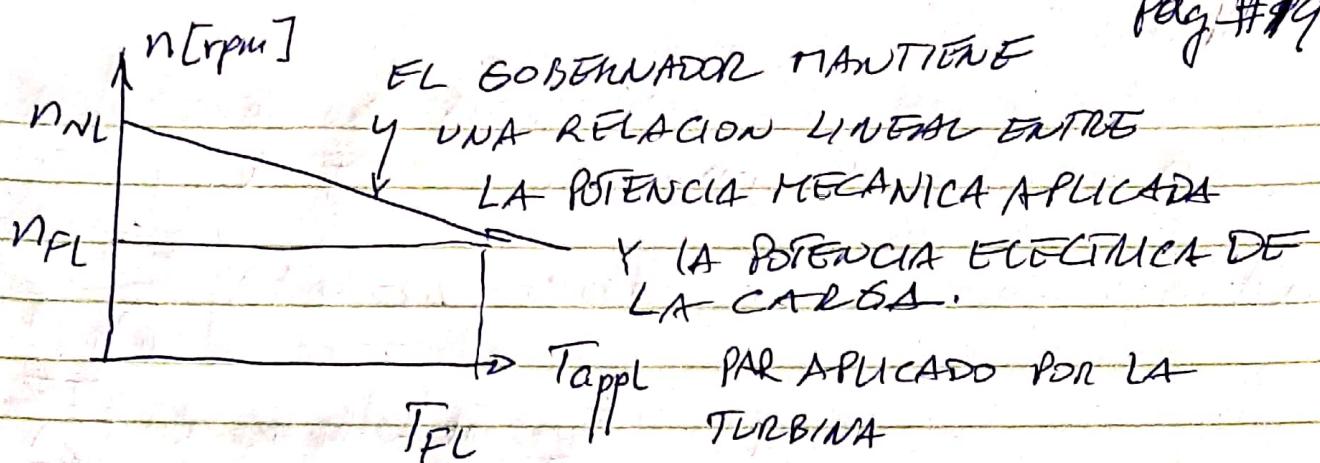
* LA VELOCIDAD DE LA TURBINA NO ES NECESARIAMENTE CONSTANTE, DEPENDE DE LA TECNOLOGIA

* LA POTENCIA ABSORVIDA POR LA CARGA ES VARIABLE, ASI LA RATA DE ENERGIA EN EL GS VARIA.

SPEED DROOP:

$$SD(\%) = \frac{n_{NL} - n_{FC}}{n_{FC}} \times 100\%$$

$$SD(\%) = 2-4\% \text{ EN LAS TURBINAS}$$



Relación entre f_e , V_s , P :

$$P = \frac{3E_A V_\phi}{X_S} \sin \delta \quad \text{POTENCIA ELECTRICA}$$

\hookrightarrow PAR ELECTRICO

$$P = T_{IND} \omega_m \quad \begin{matrix} \leftarrow \\ \text{VELOCIDAD MECANICA} \end{matrix}$$

DEL EJE

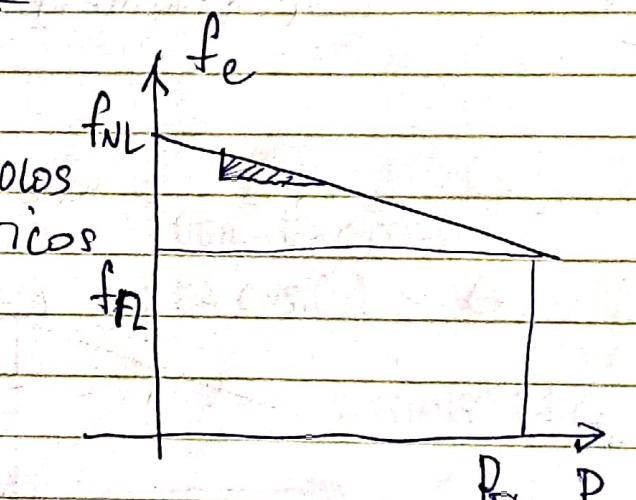
$$n_m = \frac{120}{P} f_e \quad ; \quad P = \# \text{ PAR POLES MAGNETICOS}$$

$$\omega_m = n_m \frac{2\pi}{60}$$

4

PENDIENTE: $m = \frac{f_{NL} - f_{FL}}{P_{FL} - 0}$

$$P = \frac{1}{m} (f_{NL} - f_{sistema})$$



$$m = \frac{H_2}{MW} \rightarrow S_p = \frac{1}{m} = \frac{MW}{H_2}$$

5

$$P = S_p (f_{NL} - f_{sistema})$$

f_e del sistema de potencia

Ajuste de frecuencia en vacío
(Ajuste del gobernador)

Relación V vs Q :

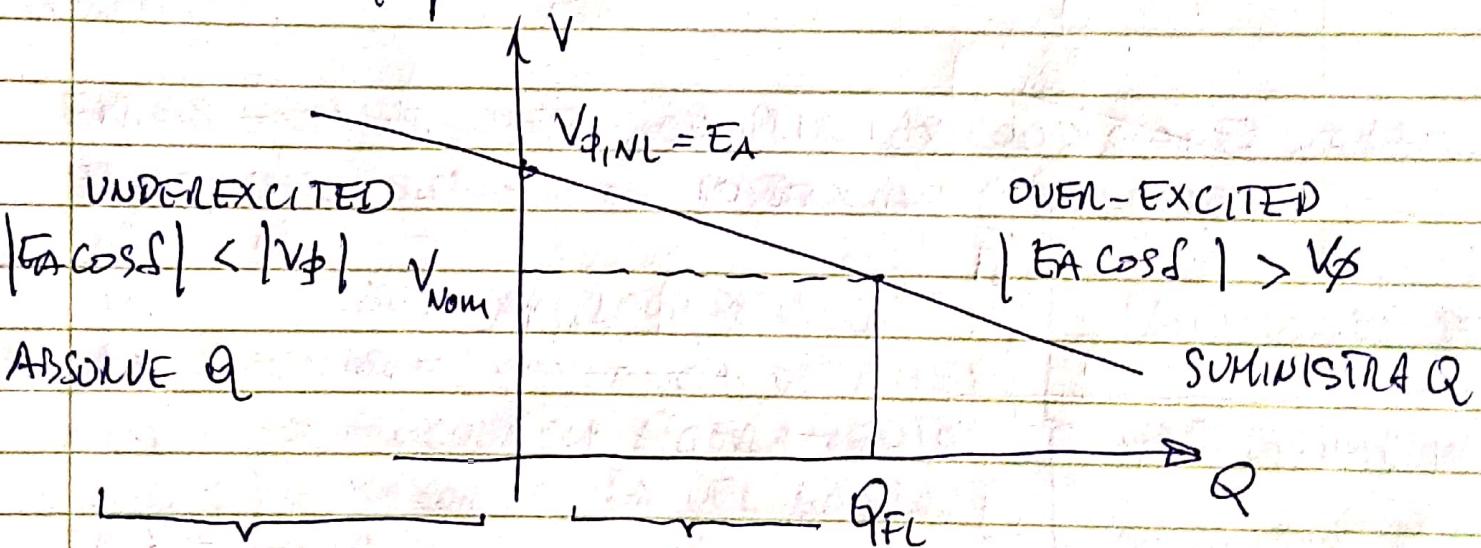
$$Q = \frac{3 V_\phi}{X_s} \left[E_A \cos \delta - V_\phi \right]$$

$|E_A|_{HOR}$: componente horizontal de E_A .

$$E_A = k \phi f_e$$

↑ frecuencia eléctrica
↓ flujo excitador

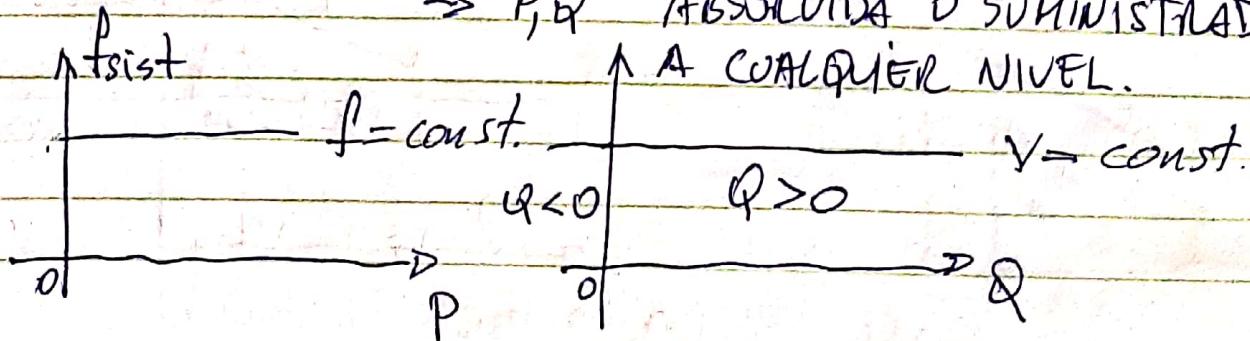
proporcionalidad (diseño)



BARRAJE INFINITO: \rightarrow FRECUENCIA CONSTANTE

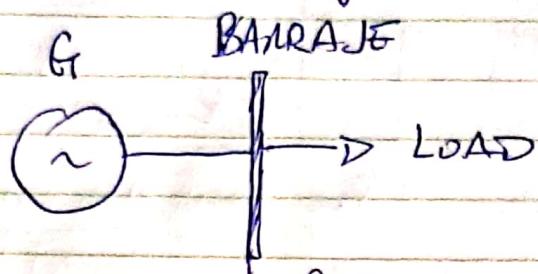
\rightarrow VOLTAJE CONSTANTE

\rightarrow P, Q ABSOLUIDA Ó SUMINISTRADA A CUALQUIER NIVEL.

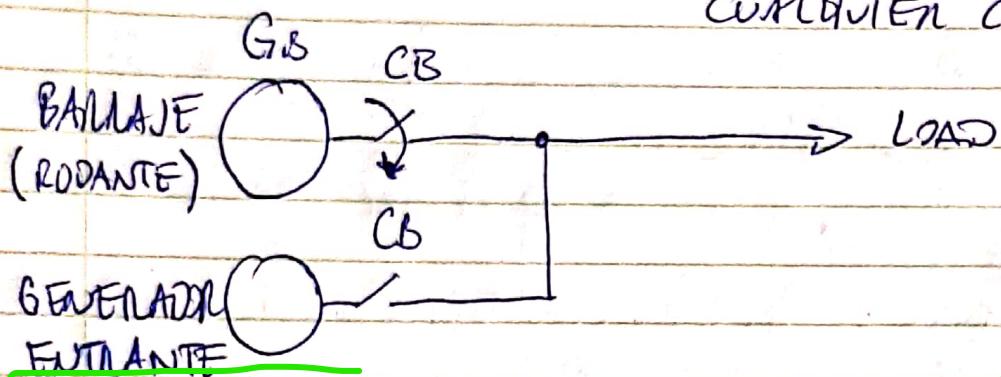


Pág 21

Consiste en un gran sistema de potencia (SIN) con todas las fuentes y LT's.



PUEDE ABSORVER ó SUMINISTRAR CUALQUIER CANTIDAD DE P, Q

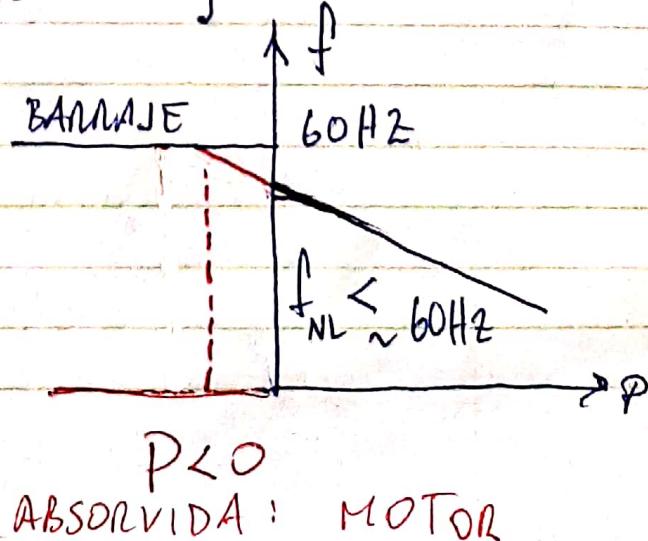
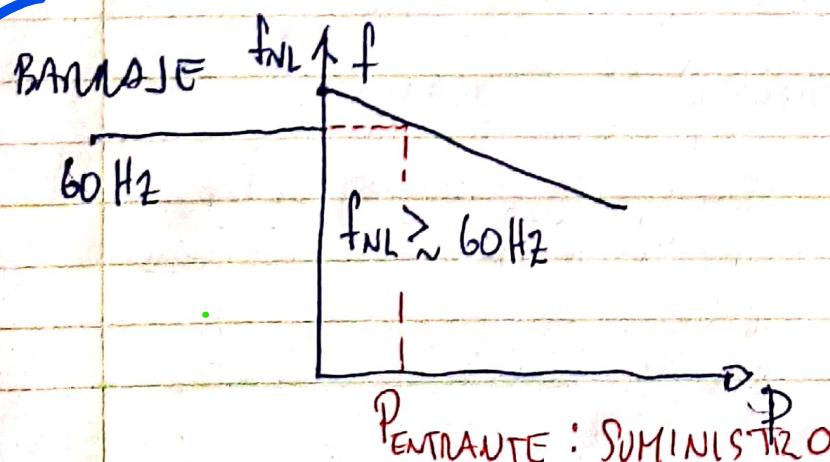


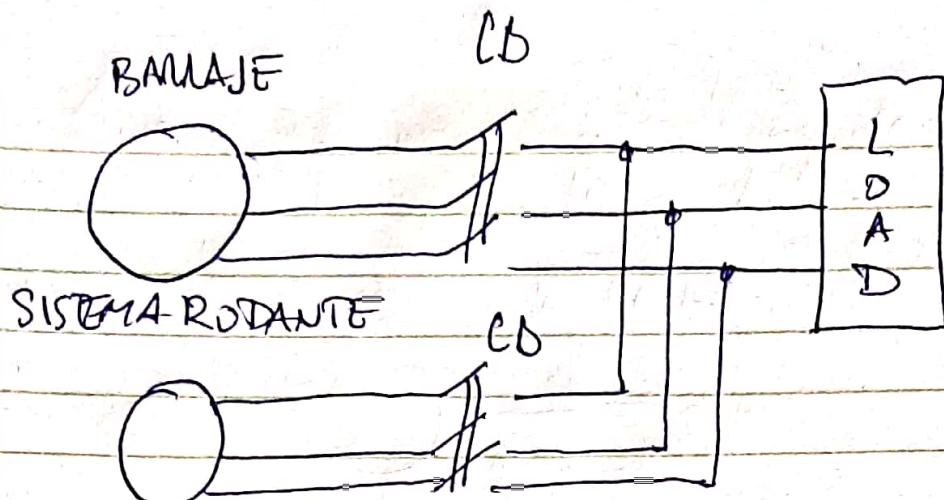
EL GS ENTRANTE DEBE CUMPLIR LAS CONDICIONES OPERATIVAS DEL SISTEMA DE POTENCIA (BARRAJE)

- (1) \rightarrow IGUAL AMPLITUD DE VOLTAJE
- (2) \rightarrow IGUAL SECUENCIA DE FASES
- (3) \rightarrow FRECUENCIA LIGERAMENTE MAYOR A LA DEL BARRAJE
- (4) $\rightarrow \alpha_{\text{ENTRANTE}} = \alpha_{\text{BARRAJE}} = 0^\circ$

CONDICIONES DE
SINCRONIZACION

DE UN GS.





FASOR DE VOLTAJE @ CB

CCW: COUNTER CLOCKWISE

CW: CLOCK WISE

AMPLITUD

frecuencia (rotació)

x fase

Secuencia de fases

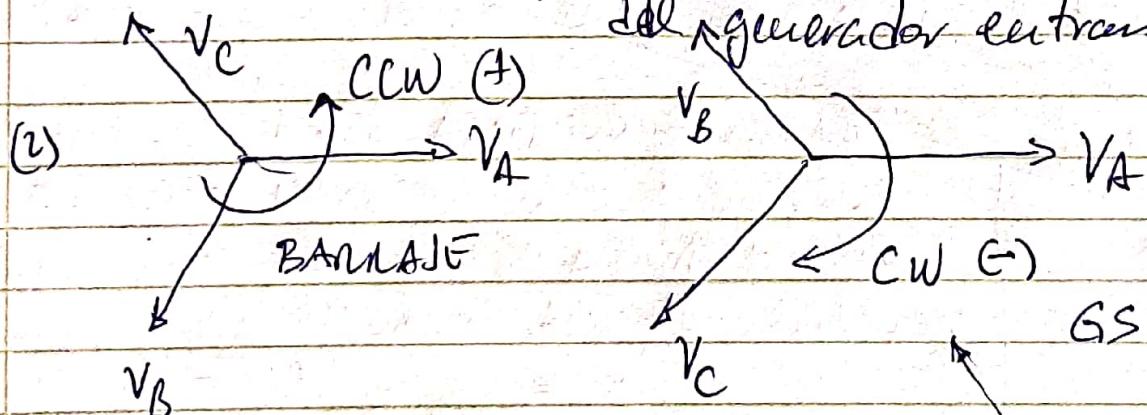
ABC (+)

ACB (-)

CCW

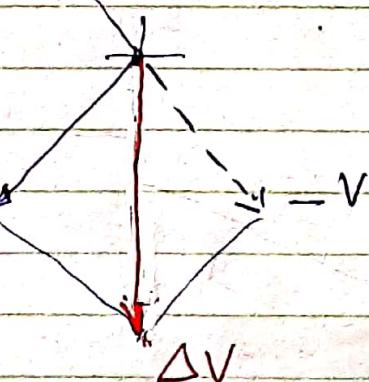
CW

(1) $\Delta V = |V_B| - |V_{ENT}|$ aparece en terminales del CB del generador entrante.

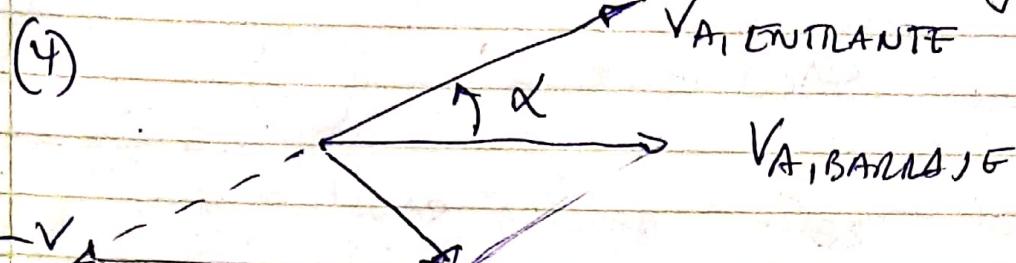


$$\Delta V = V_{B, \text{BARRAJE}} - V_{B, \text{ENTRANTE}}$$

equivale al voltaje de LL.



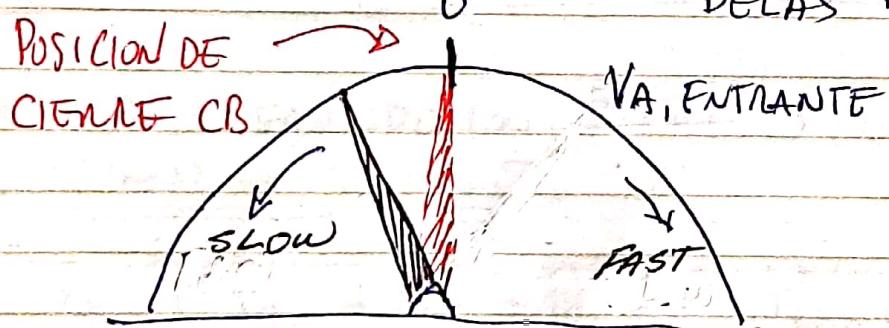
(3) $f_{BARRAJE} < f_{ENTRANTE}$ OPERADOR COMO GENERADOR
(VER PÁG 21 APUNTES)



$$\Delta V = V_A, BARRAJE - V_A, ENTRANTE$$

$\alpha = 0^\circ$ DEBE SER CERO AL MOMENTO DEL CIERRE DEL CB.

USO DEL SINCROSCOPIO: MUESTRA EL ANGULO DE FASE DE LAS FASES "A".



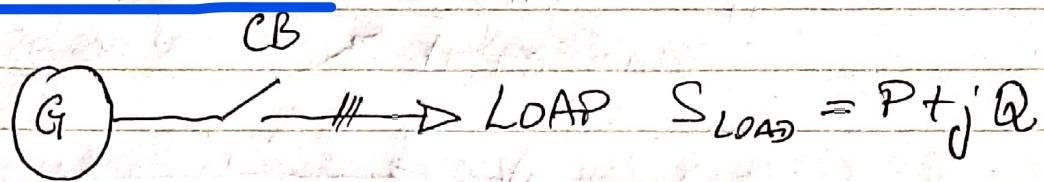
¿POR QUÉ LOS GENERADORES OPERAN EN PARALELO?

- MAYOR CAPACIDAD (FIRME)
- POTENCIA DISPONIBLE PARA MANTENIMIENTOS
- MAYOR ESTABILIDAD
- ENERGIA MAS BARATA
- LOS GENERADORES SE OPERAN OPTIMALEMENTE

CASOS OPERATIVOS:

- ① GS OPERANDO SOLO
- ② GS EN PARALELO CON OTROS DE SIMILAR CAPACIDAD
- ③ GS EN PARALELO CON UN BARRAJE.

• GS OPERANDO SOLO:



$$S_{LOAD} = P_{LOAD} + j Q_{LOAD} = S_{GS} = P_{GS} + j Q_{GS}$$

$$P_{LOAD} = P_{GS}; \quad Q_{LOAD} = Q_{GS}; \quad \text{pf} = \cos\phi \text{ CARGA}$$

* LA CARGA DETERMINA $P, Q, \text{pf.}$

GOBERNADOR: CONTROLA f_e

AVR: CONTROLA V_t

• GS OPERANDO EN PARALELO CON OTROS DE SIMILAR TAMAÑO

$$P_{g1} + P_{g2} + \dots + P_{gn} = P_{load}$$

$$S_{p1}(f_{NL1} - f_{sist}) + S_{p2}(f_{NL2} - f_{sist}) + S_{pn}(f_{NLn} - f_{sist}) = P_{load}$$

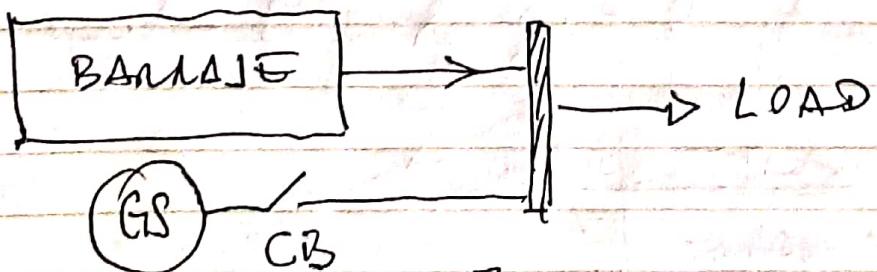
$$\sum S_{pj} f_{NLj} - f_{sist} \sum S_{pj} = P_{load}$$

$$f_{sist} = \frac{\sum S_{pj} f_{NLj} - P_{load}}{\sum S_{pj}}$$

* Incremento de P_j en un generador requiere ajuste operativo en otro.

* Incremento de Q_j en un generador requiere ajuste operativo en otro.

- La f_{sist} la determinan los ajustes de frecuencia de todos los generadores.
- * En general: se fijan los ajustes de frecuencia (gobernador) y de AVR (campo) de $(n-1)$ generadores.
- * El mejor generador se usa como "SWING" para realizar ajustes de voltaje y frecuencia.
- * En PANAMA: BAYANOD: controla la frecuencia ya que está cerca de la mayor carga
FORTUNA: controla la voltaje con su alta producción de reactivo, pero requiere compensación (ILANO SANCHEZ) debido a que las líneas son de uno 400km hasta Panamá.
- Operación sobre un BANDEO INFINITO



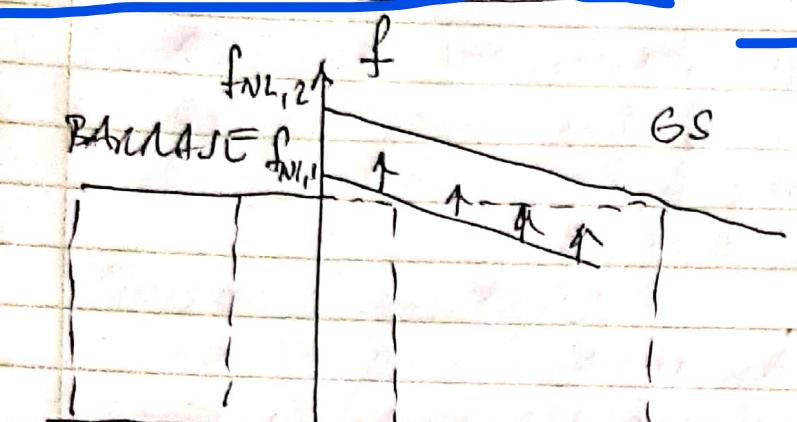
$$\begin{aligned} V &= \text{const.} \\ f_{sist} &= \text{const.} \end{aligned}$$

P, Q : DISPONIBLE

GOBERNADOR: CONTROLA P_{GS}

AVR: CONTROLA Q_{GS}

Ajuste del gobernador: (f_{NL}: frecuencia en vacío)

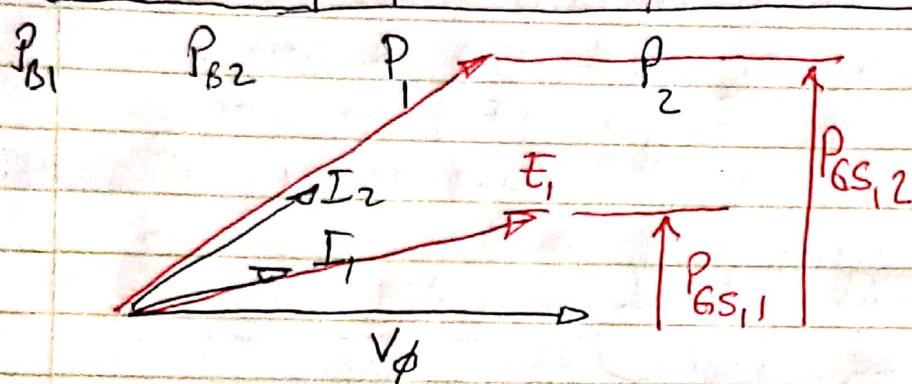


$$@ NL \quad I_A = 0$$

$$E_{A,LN} = V_{L,LN}$$

$$@ FL \quad I_A \neq 0$$

$$\Rightarrow |E_A \cos \delta| < |V_\phi|$$



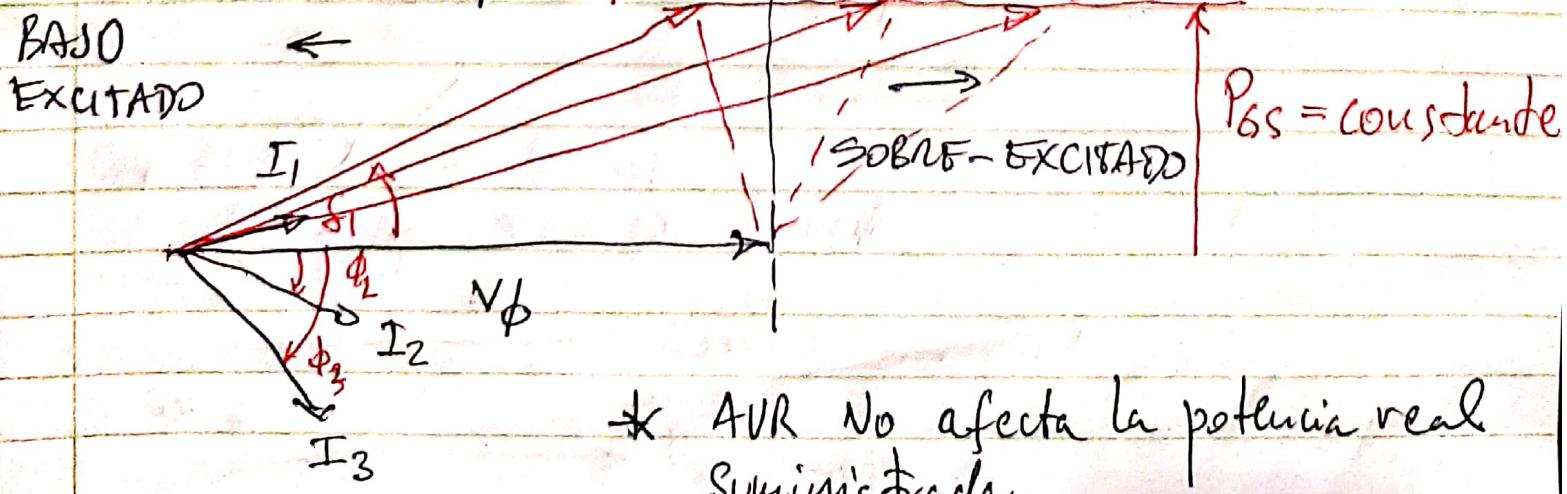
EL GENERADOR
OPERA BAJO EXCITADO
EN EL MOMENTO DE
CIERRE DEL CB.

CON EL AJUSTE
 f_{NL}^* SE INCRE-

MENTA LA P.

Ajuste del AVR: (control de campo)

Una vez ajustada la potencia real deseada, se ajusta la potencia reactiva con el AVR.



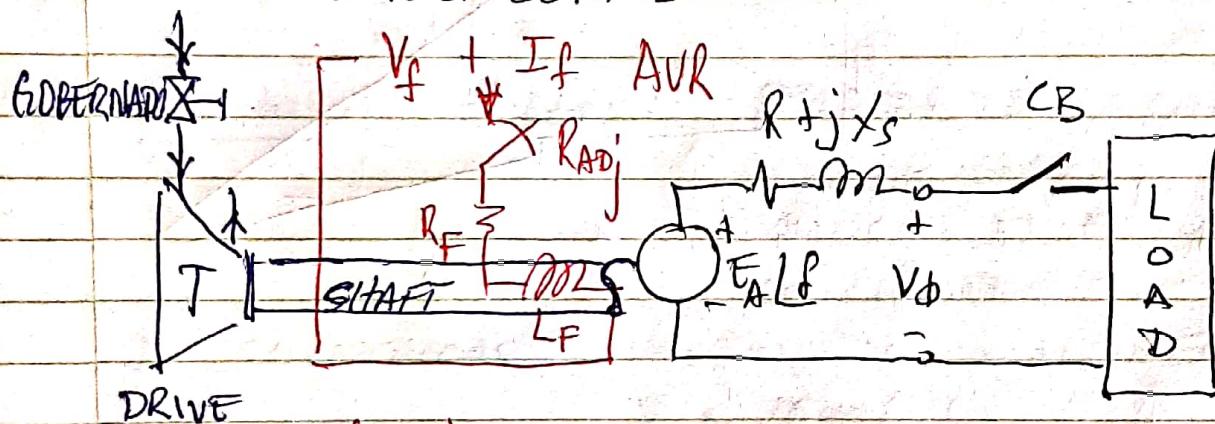
* AVR No afecta la potencia real suministrada.

TRANSITORIOS EN GENERADORES SINCRONICOS

- TRANSITORIO: Evento de corta duración (tiempos eléctricos : μ s (10^{-6} s) DESCARGAS ATMOSF. ms (ciclos) COND CIRCUITOS s, min OSCILACIONES

Tipos de transitorios:

- Temporal el alumbrado (sincronización)
- Cambios súbitos de carga
- Cortocircuitos



El control de campo opera en Segs.

La parte mecánica opera en min

~~* Tanto el gobernador como el AVR no tienen efectos alguno durante un transitorio, o sea, se pueden olvidar.~~

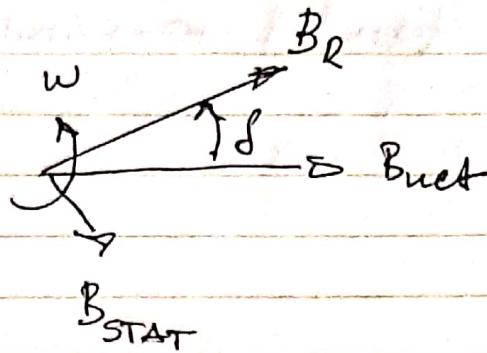
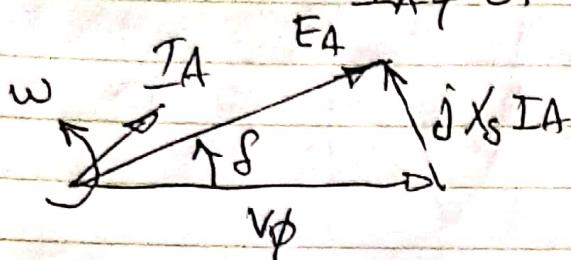
Caso #1. CB=OFF (operal)

$$\omega \rightarrow E_A = V_d, I_A = 0. \quad \text{VACIO}$$

$$\omega \rightarrow E_A = V_d$$

$$\omega \rightarrow B_R = B_{net}$$

CASO #2: CB = "ON", CERRADO
 $I_A \neq 0$, CON CARGA



OPENA BAJO EXCITADO
 DEBIDO A LA CAIDA
 EN LA IMPEDANCIA
 DURANTE CIERRE DE CB.

CASO #3: FALLAS: PERDIDA DE LA CAPACIDAD DE AISLAMIENTO. SE DAN FLUJOS ANORMALES E INDESEABLES DE CORRIENTES.

1- SIMETRICAS: VOLTAJE Y CORRIENTES POR FASE SON IGUALES.

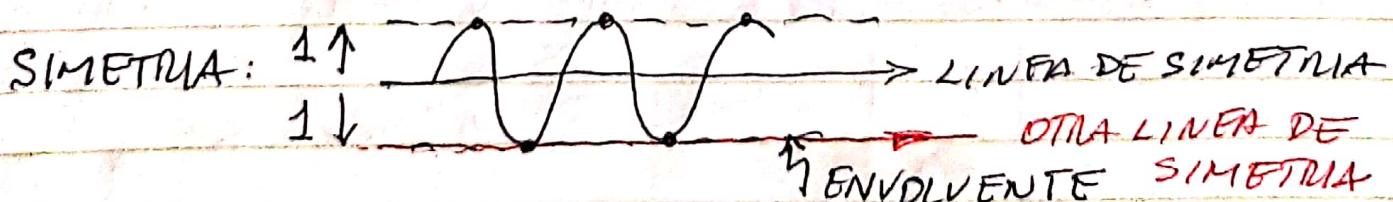
$3\phi FG$, $3\phi F$

2- ASIMETRICAS:

SLGF: SINGLE LINE GROUND FAULT (1ϕ)

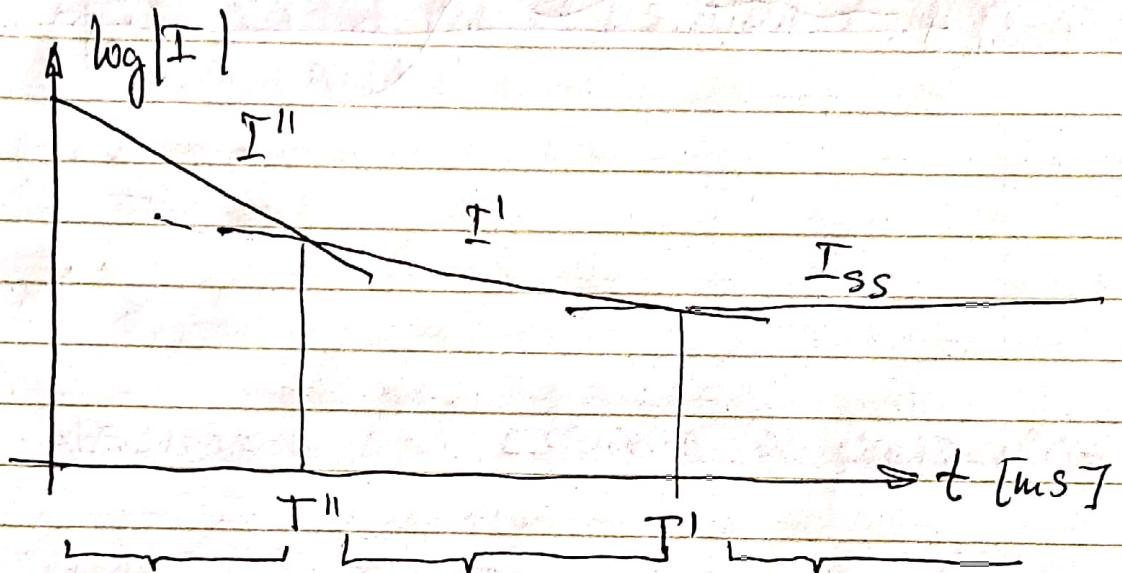
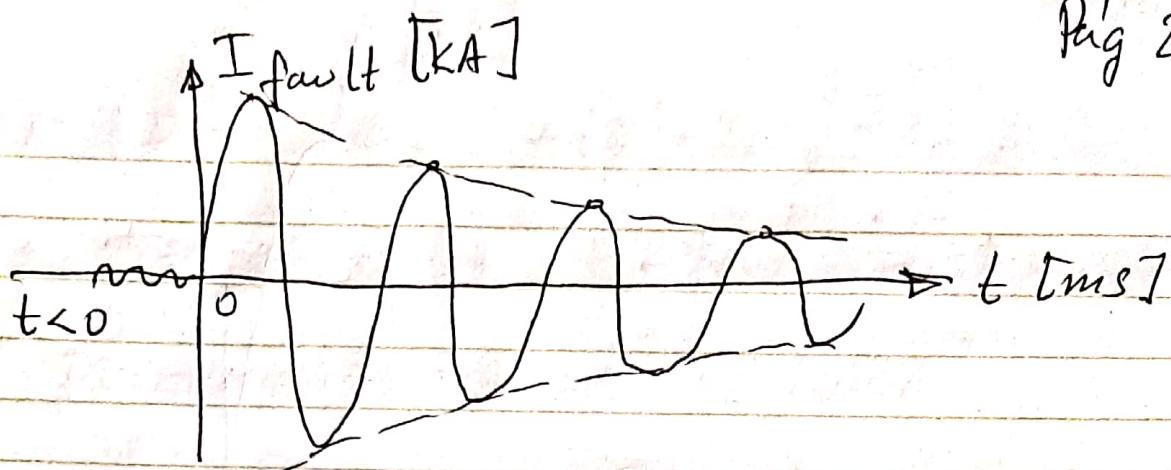
DLGF: DOUBLE " " " " (" $2\phi G$)

DLF: DOUBLE LINE FAULT (2ϕ)



* Máxima asimetría = 2 unidades.

* En vida real la máxima asimetría está limitada por las impedancias del sistema (amortiguada)



SUB-TRANSITORIO TRANSITORIO SS: STEADY STATE

$R_A + jX_S$ 0 - 2 CICLOS 3 - 8 CICLOS HASTA 40 CICLOS

$$\text{Circuit diagram: A voltage source } E_A \text{ in series with resistance } R_A \text{ and in parallel with reactance } jX_S. \text{ The current } I_{SC} \text{ flows through the parallel branch.}$$

$$|I_{SC}| = \sqrt{\frac{E_A}{R_A^2 + X_S^2}} = \frac{E_A}{\sqrt{R_A^2 + X_S^2}}$$

E_A = constante porque AVR = constante

$$X_S \gg R_A, \text{ Así } |I_{SC}| = \frac{E_A}{X_S}$$

$T'' | X_S = X''$ REACT. SUBTRANSITORIA; $I'' = 10 I_{ss}$

$T' | X_S = X'$ REACT. TRANSITORIA; $I' = 5 I_{ss}$

I_{ss} : COMIENTE DE ESTADO ESTACIONARIO.

$$I(t) = (I'' - I') e^{-t/T''} + (I' - I_{ss}) e^{-t/T'} + I_{ss}$$

X'' : DETERMINADA POR LA BOBINA COMPENSADORA

X' : DETERMINADA POR LA DEL ROTOR

$X_{ss} = X_s$: DETERMINADA POR EL ESTATOR + REACCION DE ARMADURA.

$$X'' < X' < X_{ss}$$

$$I'' > I' > I_{ss}$$

SEGUN LA EXPERIENCIA EN ESTUDIOS DE CIRCUITO:

$$I_{ASIMETRICA} = K \cdot I_{SIMETRICA}$$

K = FACTOR DE ASIMETRIA

$K = 1.25$ PARA $V < 1000$ V BAJO VOLTAJE

$K = 1.60$ PARA $V > 1000$ V ALTO VOLTAJE

ASI, PARA UN NIVEL DADO DE VOLTAJE

$$\text{MVA}_{SC} = \sqrt{3} V_{LL} I_{ASIMETRICA}$$

* LOS DISPOSITIVOS SE DISEÑAN

a.- $V_{LL, \text{nominal}}$ NIVEL VOLTAJE OPERATIVO

b.- I_{CONTINUA} CORRIENTE CONTINUA (Nominal)

c.- IC: Interrupting Capacity: máx corriente que maneja el dispositivo en condiciones de falla.

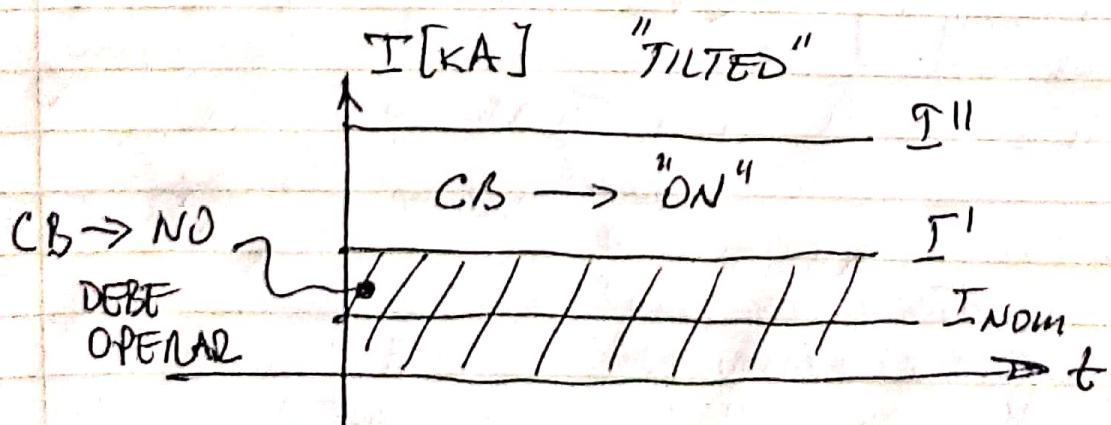
Ejemplo: Un CB: circuit breaker el IC es la máxima energía que puede manejar

Vuelta Baja: el IC es la más cortante (potencia, energía) que puede manejar con seguridad.

* EL objetivo de los análisis de SC es la determinación de la máxima corriente de falla en todos los puntos de interés (BARRAS)

Usamos: $\begin{cases} X'' : \text{generadores y motores sincrónicos} \\ X' : \text{motores de inducción} \\ X_{ss} : \text{líneas, transformadores} \end{cases}$

Usamos: $\begin{cases} X' : \text{generadores y motores sincrónicos} \\ X_{ss} : \text{motores de inducción, transformadores, líneas.} \end{cases}$



* I'' y I' son los puntos de fijación del CB.

Valores Nominales

Nominal: valor máximo o límite definido por diseño, para lograr la protección operativa (operación segura) del dispositivo permanentemente.

- Voltaje
- Frecuencia
- Velocidad en rpm
- Potencia Aparente (capacidad instalada)
- Factor de Potencia, pf
- Corriente de Campo, I_f
- Factor de Servicio, SF(%)

Frecuencia: $f [Hz]$

$$E_A = k \phi f$$

50 Hz

$$E_{A,50} = k \phi 50$$

60 Hz

$$E_{A,60} = k \phi 60$$

$$E_{A,60} = \frac{6}{5} E_{A,50} = 125\% E_{A,50}$$

UPRATING

PARA QUE
 $\phi = \text{CONST EN}$

$$E_{A,50} = \frac{5}{6} E_{A,60} = 86,7\% E_{A,60}$$

DERATING

EL DISPOSITIVO.

¿Cuánto varía la potencia con la frecuencia?

↳ $S_{3\phi} = \sqrt{3} V_{nom,LL} I_{nom}$

Imáx por diseño
Depende de la carga.

↳ $I_{max} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3} V_{nom,LL}}$

$\rightarrow 3 R_A |I_{max}|^2 \Rightarrow \text{CALOR}$

PARA DISEÑAR EL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO, DETERMINAR
"HOT SPOTS" Y UBICAR LOS SENSOR-
RES DE TEMPERATURA "RTD"

RTD: RESISTOR
TEMPERATURE
DETECTORS

En el circuito de campo, similarmente

$$R_F |I_F|^2 \Rightarrow \text{CALOR}$$

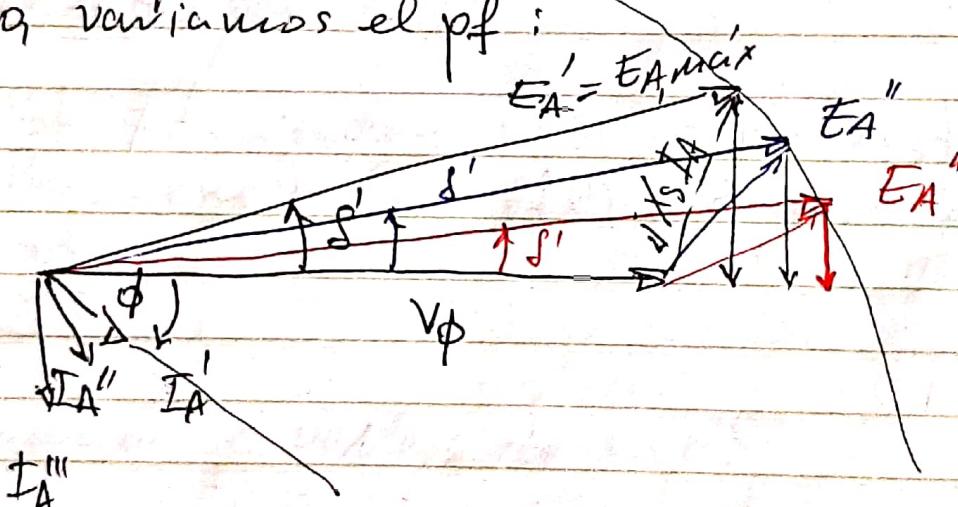
¿ Factor de Potencia Nominal ?

$P_{f, \text{nom}}$: es el mínimo pf ó máximo χ pf que produce la máxima intensidad de campo (F_{EM}) en la armadura.

En general $P_{f, \text{nom}} \approx 0.8 - 0.9$ (-) ↑ EN RETRASO.

Suponemos que $I_F = \text{const.} \Rightarrow E_A = \text{constante.}$

Luego variaremos el pf :



Existe un $p_{f, \text{mínimo}}$ ó $\phi_{\text{máx}}$ bajo $E_{A, \text{máx}}$.

* Si $|I_{A, \text{máx}} \cos \phi| >$ Capacidad de aislamiento de la armadura, el aislamiento se pica (pinch effect).

Factor de Servicio:

$$SF = \frac{S_{\text{máx}}}{S_{\text{nom}}} = 3 \quad \begin{array}{l} \text{USADO PARA ABSORVER} \\ \text{TRANSITORIOS DE CARGA.} \end{array}$$

DIAGRAMA DE CAPACIDAD

Muestra gráficamente la región de operación Segura de un GS, estableciendo los factores que limitan su operación.

1.- $I_{A,\max}$ Calentamiento en las bobinas

2.- $I_{f,\max}^{\prime \prime \prime}$ " " "

3.- $P_{\max}^{\prime \prime \prime}$ Límite de Estabilidad Estática

4.- P_{PNOM} Factor de Potencia Nominal

5.- $T_{máx}$ Par mecánico máx sobre el eje de flecha.

Regiones de operación:

a.- Sobre-excitada $p_f(+) \rightarrow$ Suministra Q

b.- Bajo-excitada $p_f(-) \rightarrow$ Absorbe Q

c.- GS

d- MS

• Ecuación de voltaje de un GS

$$E_A | \phi = V_\phi L^0 + (R_A + j X_s) I_A | \phi$$

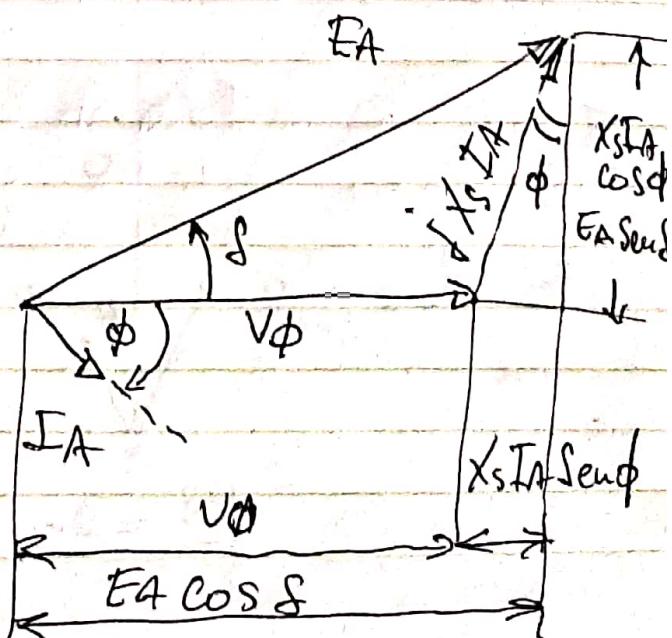
$$X_s > R_A$$

• ECUACIONES DE POTENCIA

$$P = \frac{3V_\phi}{X_s} (E_A \operatorname{sen} \delta)$$

$$Q = \frac{3V_\phi}{X_s} [E_A \cos \delta - V_\phi]$$

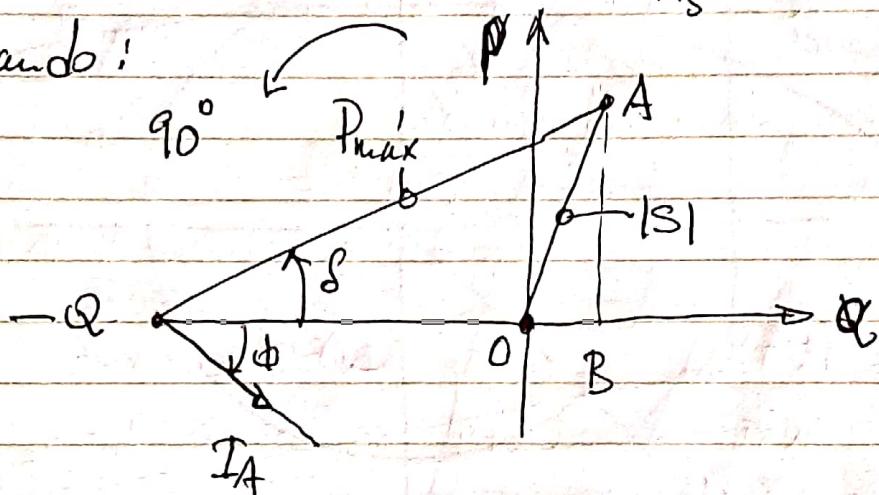
FACTOR DE CONVERSIÓN



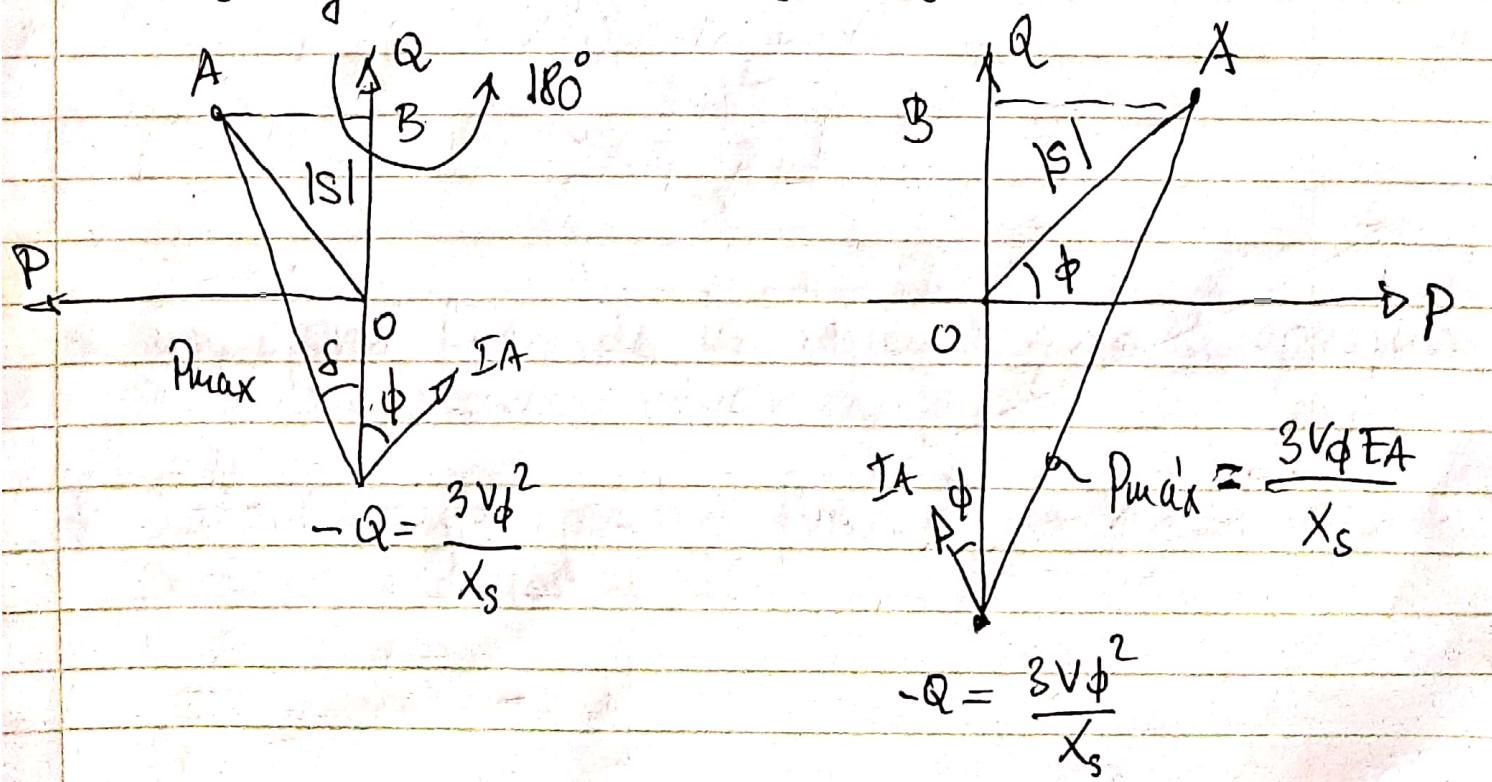
Si cada factor de voltaje se multiplica por el factor de conversión, se obtiene un valor de potencia:

$$\frac{3V\phi}{X_s} \times \left\{ \begin{array}{l} V\phi \rightarrow \frac{3V\phi^2}{X_s} = Q \quad \text{POT. REACTIVA} \\ jX_s I_A \rightarrow 3V\phi I_A = |S| \quad \text{POT. APARENTE} \\ \delta_A \rightarrow \frac{3V\phi E_A}{X_s} = P_{\max} \end{array} \right.$$

Resultando:

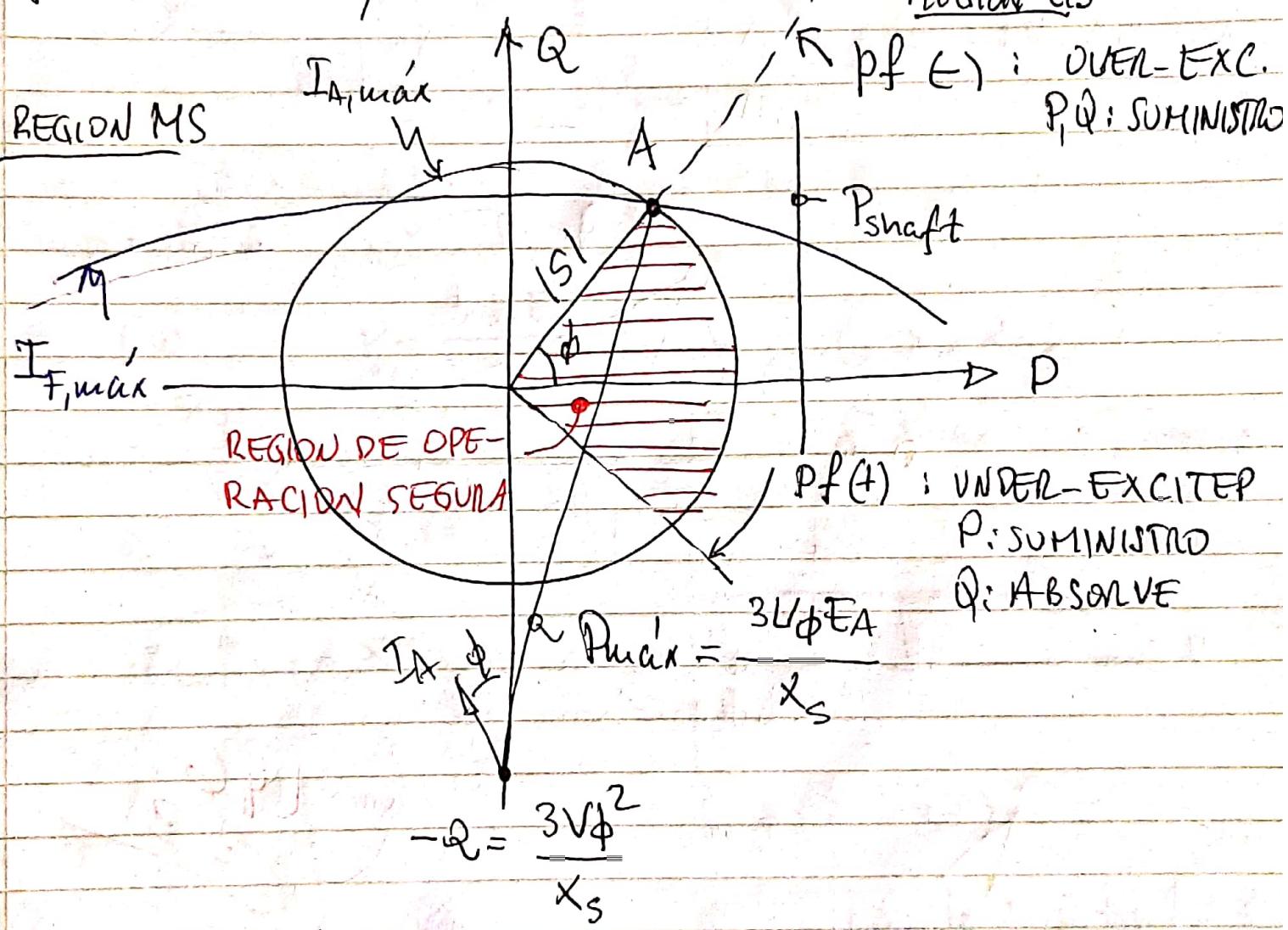


Queremos un sistema en donde Q esté en el eje vertical y P en el horizontal.



El punto A puede hacerse girar alrededor del origen "O", obteniendo un círculo (IS1).

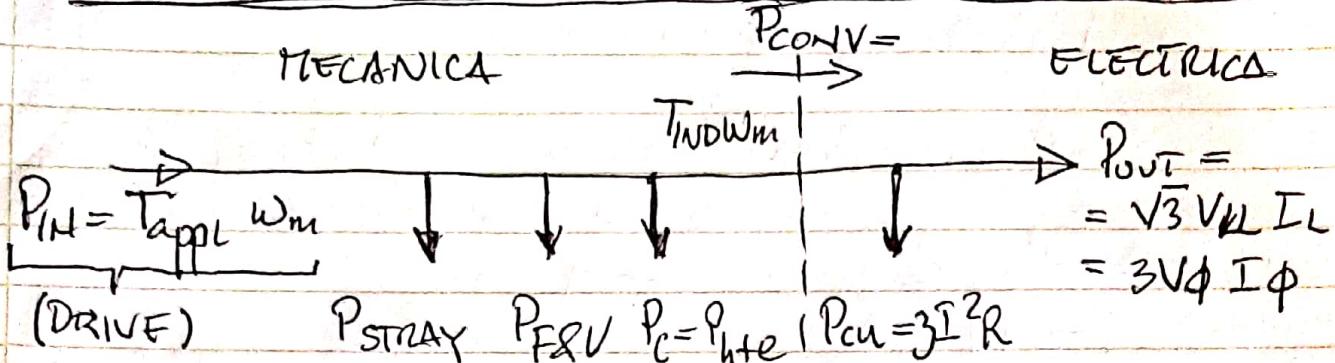
Si el punto A se hace girar alrededor de $-Q$, forma un segundo círculo.



* Para operar fuera de la región segura de operación sería necesario reducir la $|S|$.

* Cualquier punto operativo fuera de la región segura produciría daños al GS.

DIAGRAMA DE FLUJOS DE POTENCIA DE UN GS:

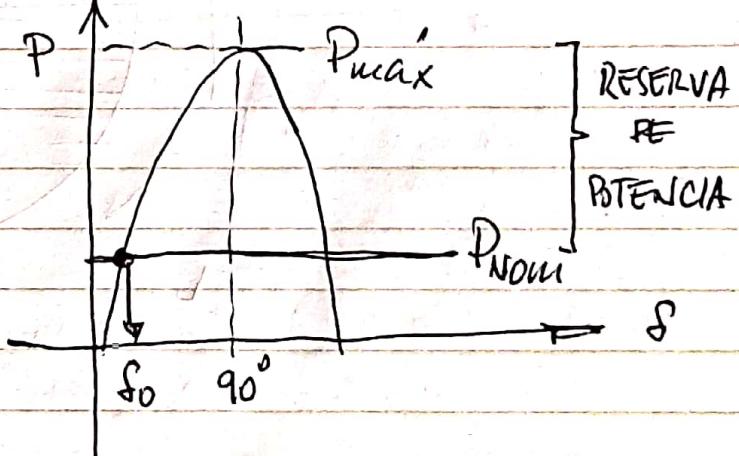
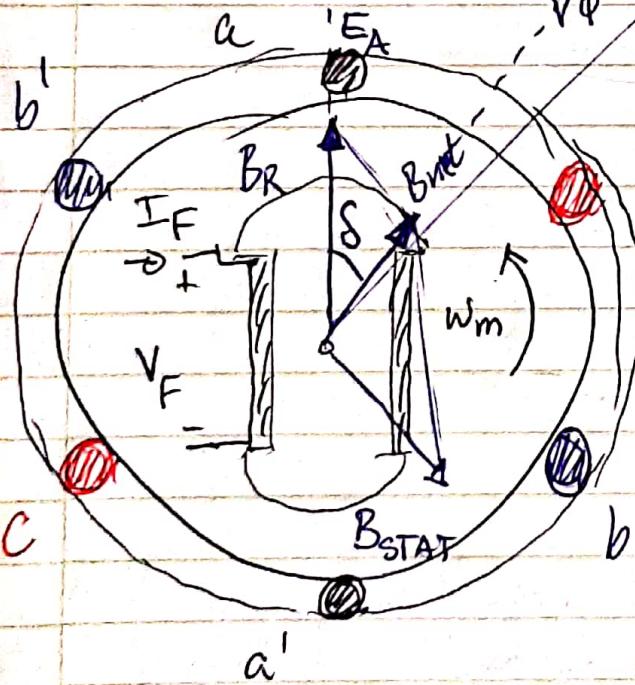


$$T_{IND} = K(B_R \times B_{net}) ; \quad B_{net} = B_R + B_S$$

$$T_{IND} = K B_R B_{net} \operatorname{Sen} \delta$$

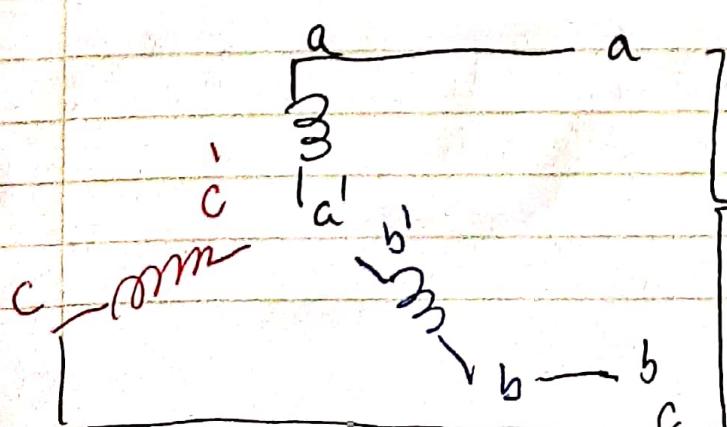
$$P = T_w ; \quad P_{CONV} = \frac{3V\phi EA}{X_s} \operatorname{Sen} \delta ; \quad X_s \gg R_A$$

$$T_{IND} = \frac{3V\phi EA}{\omega_m X_s} \operatorname{Sen} \delta$$



$$\delta_0 = (20^\circ - 30^\circ)$$

$P_{max}' = \text{Límite de Estabilidad Estática.}$
 $\delta = 90^\circ, \operatorname{Sen} 90^\circ = 1.0$



$B_R \rightarrow E_A$
 $B_{net} \rightarrow V\phi$

i_{abc} i_{abc} $B_{STAT} \rightarrow -jX_s I_A$ ARMATURE REACTION

$$E_A L_s = V\phi L_0 + (R_A + jX_s) I_A L_s$$