

# Seminario Nacional CIGRE Colombia

Máquinas Eléctricas Rotativas 2022

## **COMPENSADORES SÍNCRONOS**

### **EL RESURGIR EN REDES CON ALTA PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES**

*Teoría- Operación-Aplicaciones-Consideraciones –futuro-casos*

Prof. José Luis Oslinger Ing. Dr  
UNIVERSIDAD DEL VALLE

Grupo WG A 1.2 Compensadores  
síncronos en redes de alta  
penetración de renovables

Organizan:

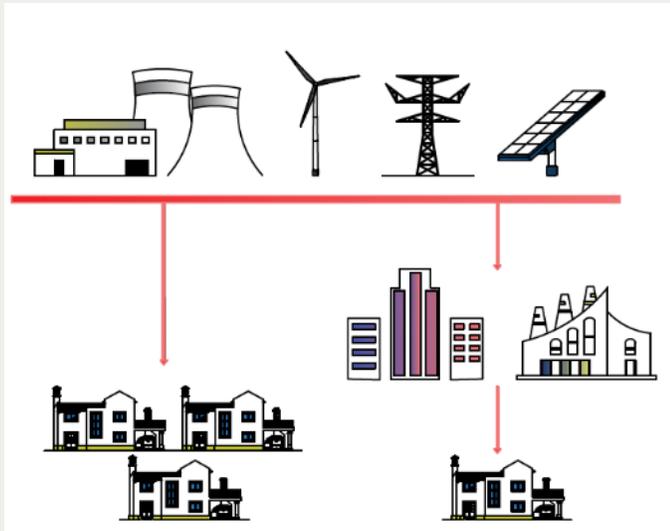


Apoya:



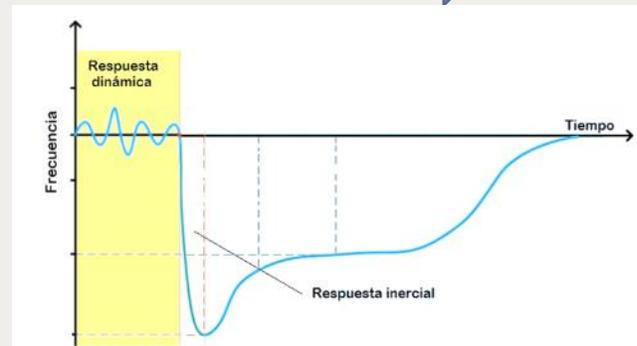
# COMPENSADORES SÍNCRONOS - ANTECEDENTES

## RED TRADICIONAL



**Generación centralizada**  
**Masas giratorias**  
**Red fuerte**  
**Alto nivel corriente de cortocircuito**

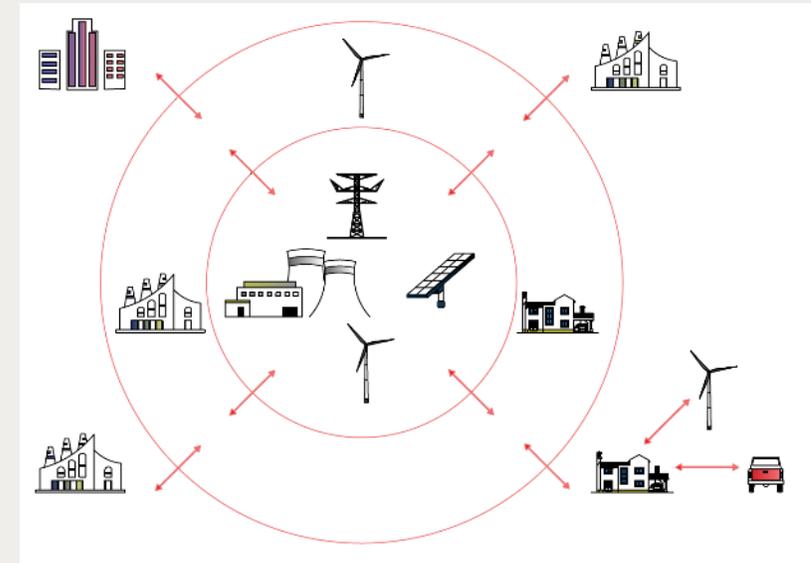
## TRANSICIÓN ENERGÉTICA



**RoCoF (Rate of Change of Frequency)**

$$\text{RoCoF} = \frac{df}{dt} \quad \text{RoCoF} \sim \frac{1}{\text{Inercia}}$$

## RED FUTURA



**Generación distribuida**  
**Menos masas giratorias**  
**Red débil**  
**Bajo nivel corriente de cortocircuito**  
**Incremento de electrónica de potencia**  
**Mayor contenido de armónicos**

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - ANTECEDENTES

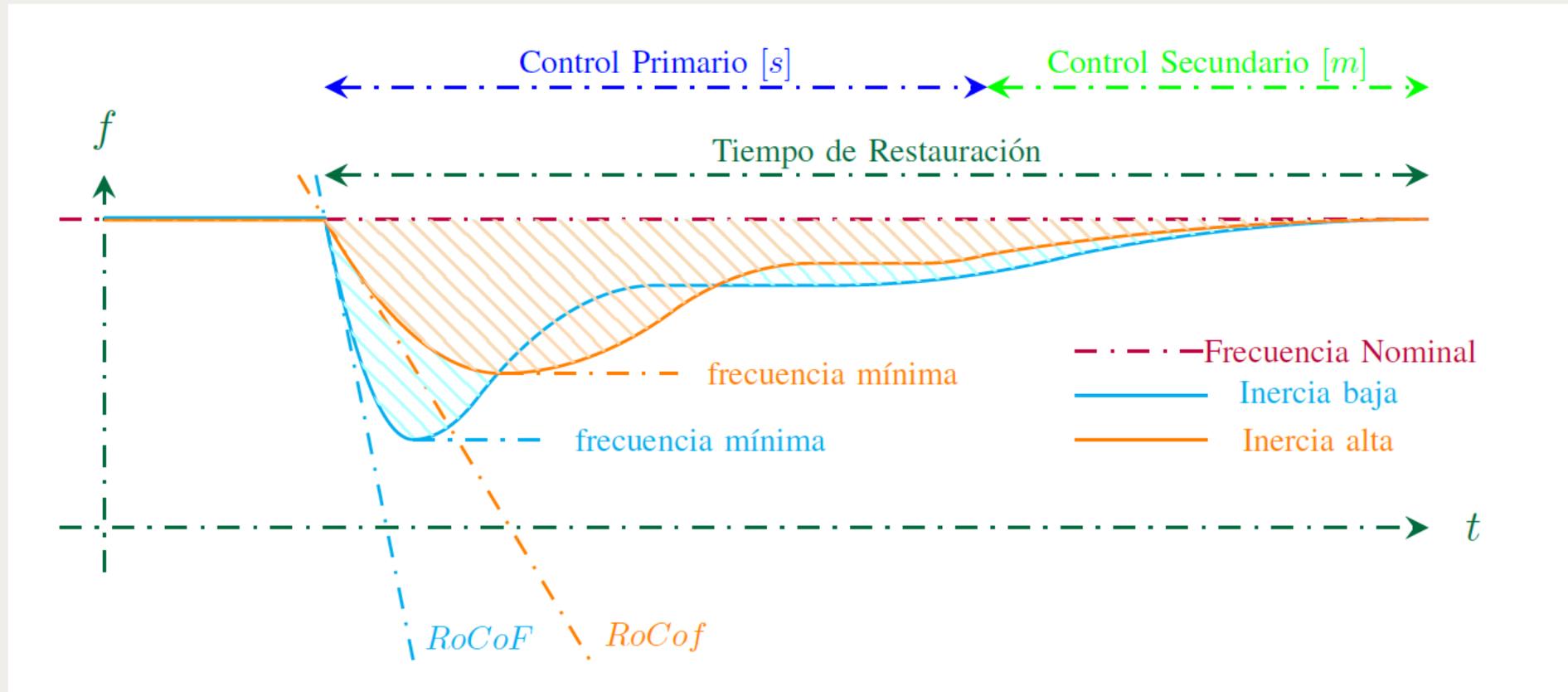


Fig. No. Respuesta de frecuencia después de un evento en frecuencia

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - TEORÍA BÁSICA



## CLASIFICACIÓN DE LAS MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE CORRIENTE ALTERNA

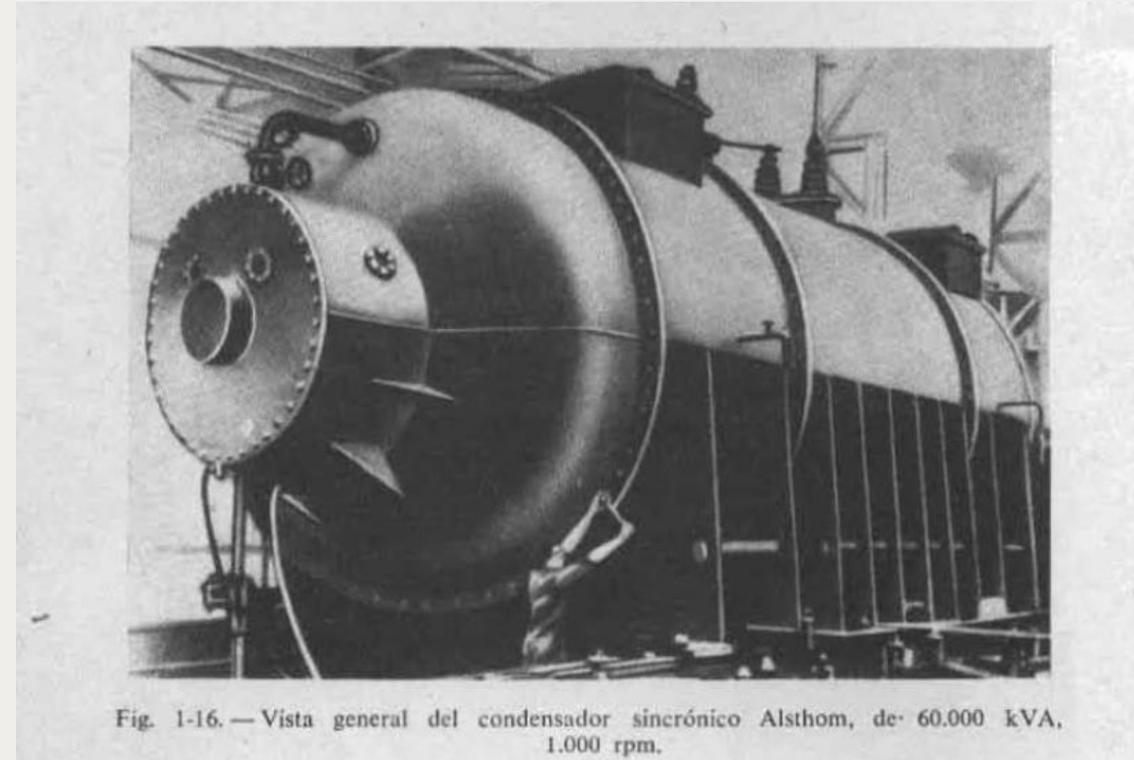
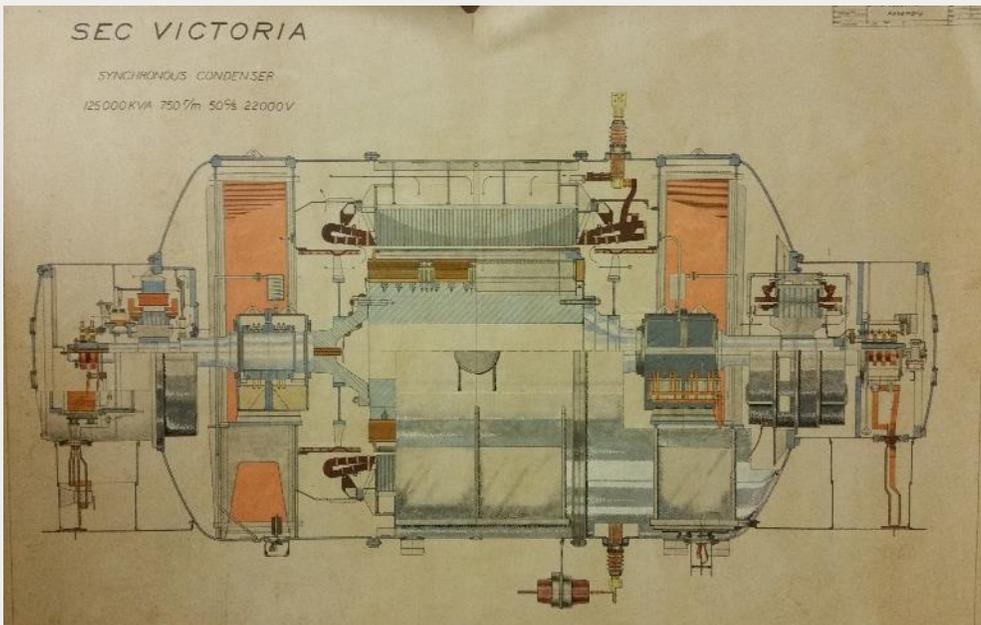
Las máquinas eléctricas rotativas de CA se pueden clasificar :



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - TEORÍA BÁSICA

“Es un motor sincrónico sin carga. Esta máquina se utiliza para mejorar el factor de potencia y regular la tensión de las líneas de transmisión y de las redes.”

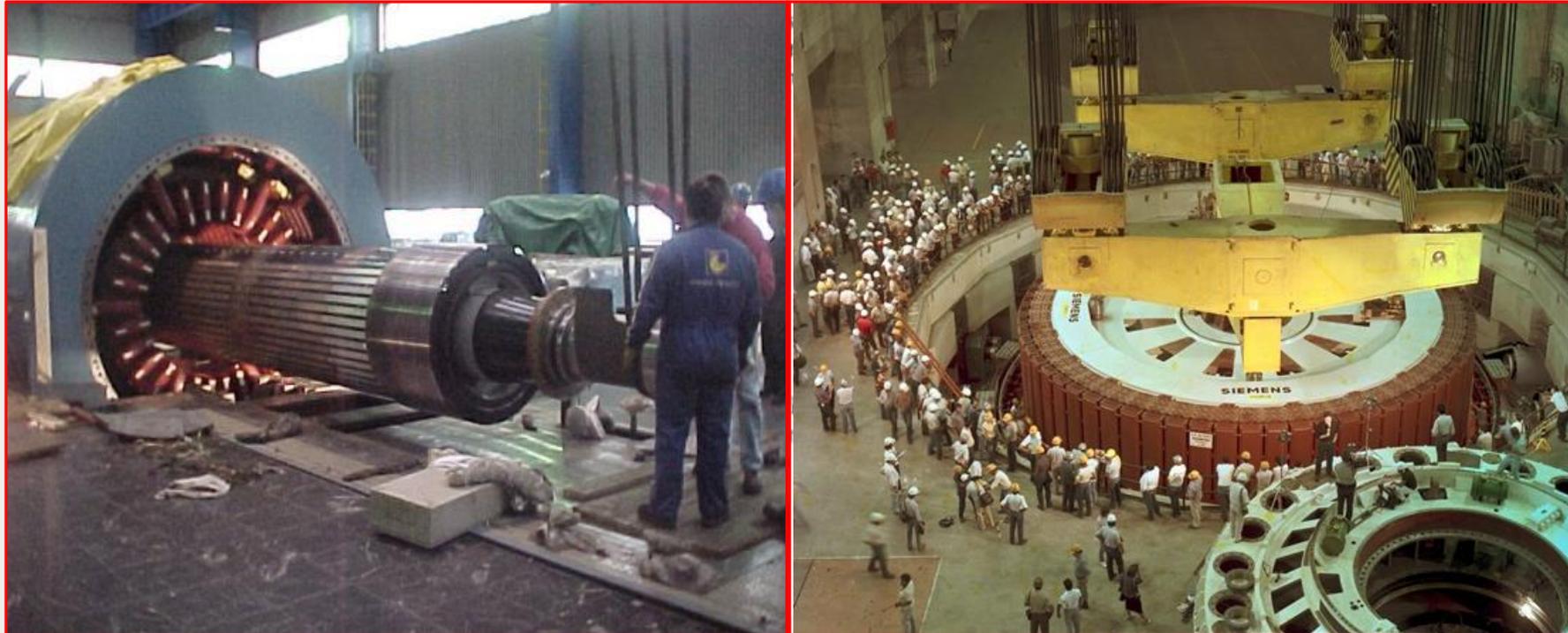
+ INERCIA , + MVA Cortocircuito



REF: Máquinas eléctricas II. M.P: Kostenko – L.M. Piotrovski. Cap 13-9

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - TEORÍA BÁSICA

- *FORMAS CONSTRUCTIVAS - Similar al generador síncrono. Polos lisos y polos salientes*

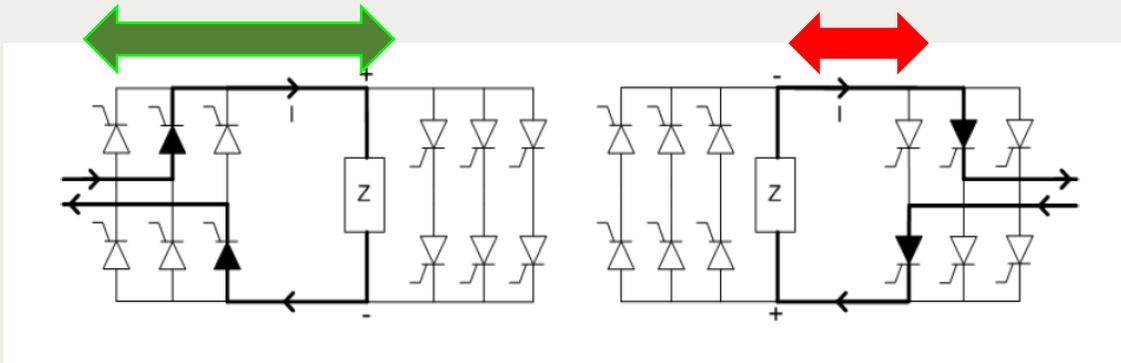




# COMPENSADORES SÍNCRONOS -

# TEORÍA BÁSICA

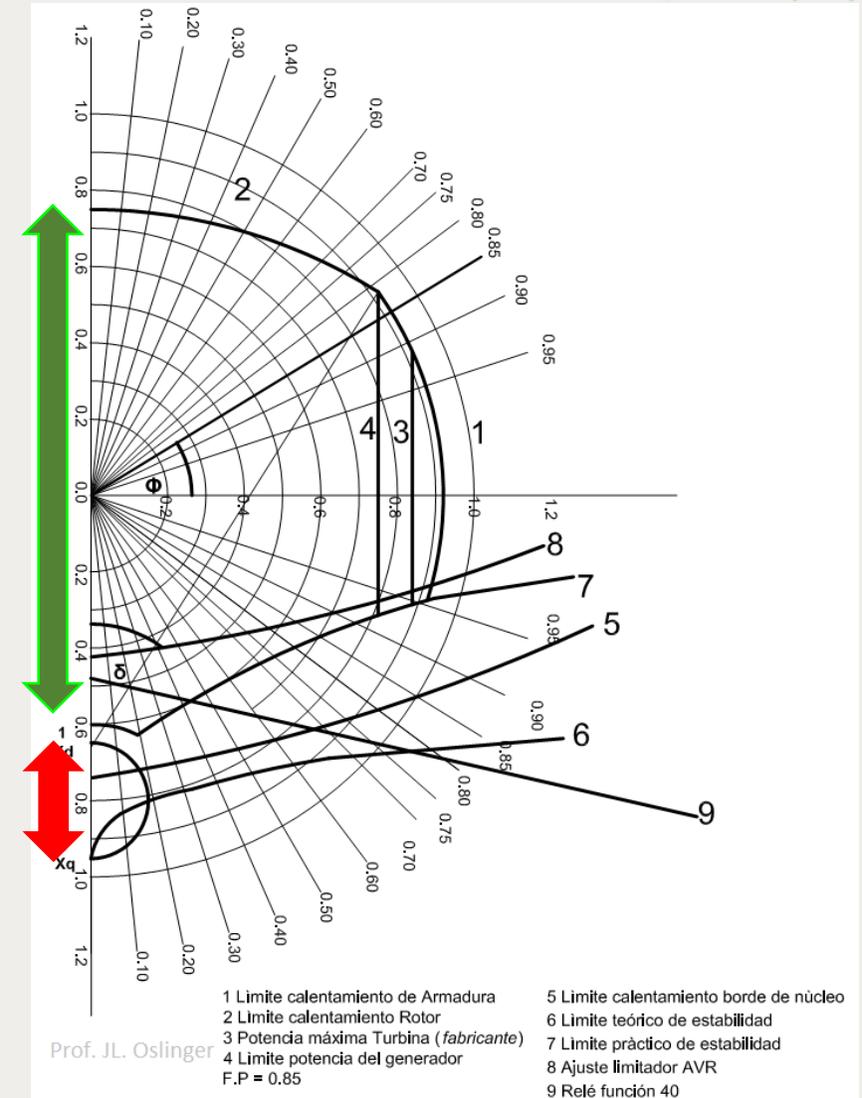
- El compensador síncrono puede trabajar en la zona de excitación negativa, y debe estar diseñado para esta operación. En caso contrario, es necesario realizar el estudio.
- Requiere de un sistema de doble puente (excitación positiva y negativa) . El puente positivo debe ser bloqueado antes de operar el negativo .
- La actuación debe ser muy rápida (ms). Se debe considerar la constante de tiempo transitoria de la máquina  $\tau'_d$



$$\text{Potencia de reluctancia } \propto V^2 \left( \frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right)$$

$$I_{exc_{negativa}} \cong I_{fo} \left( \frac{x_d}{x_q} - 1 \right)$$

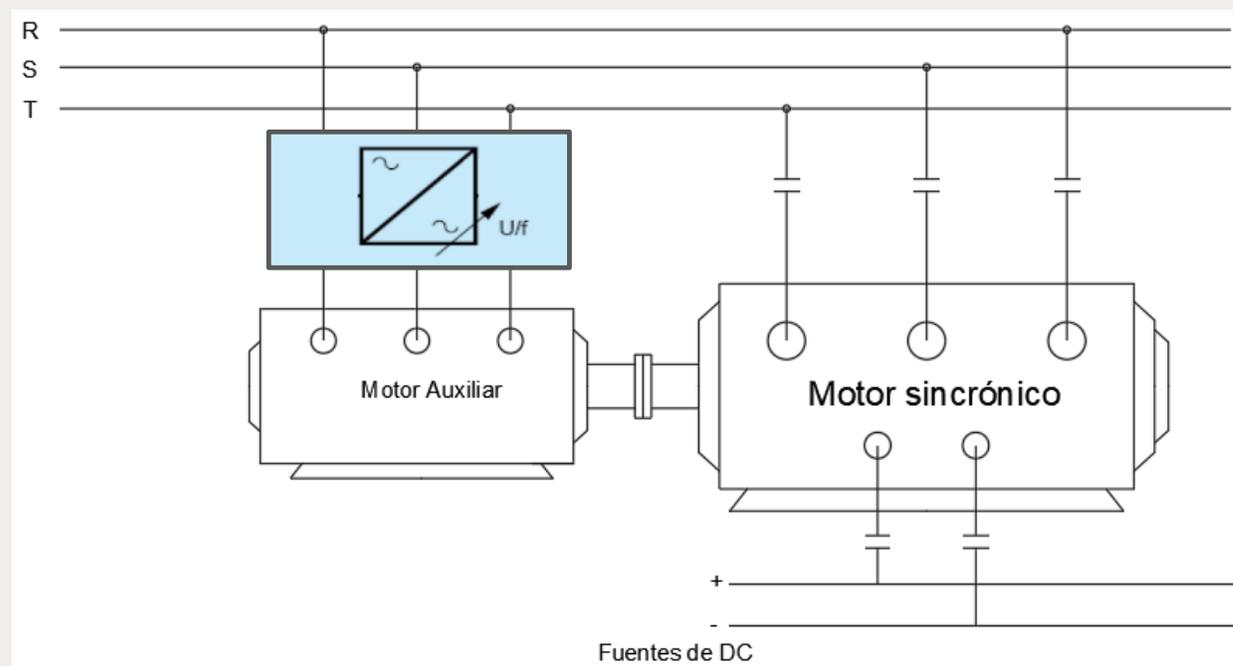
$$\tau'_d = \frac{X'd}{X_d} \tau'_{do}$$



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - TEORÍA BÁSICA

## MÉTODOS DE ARRANQUE- MOTOR AUXILIAR

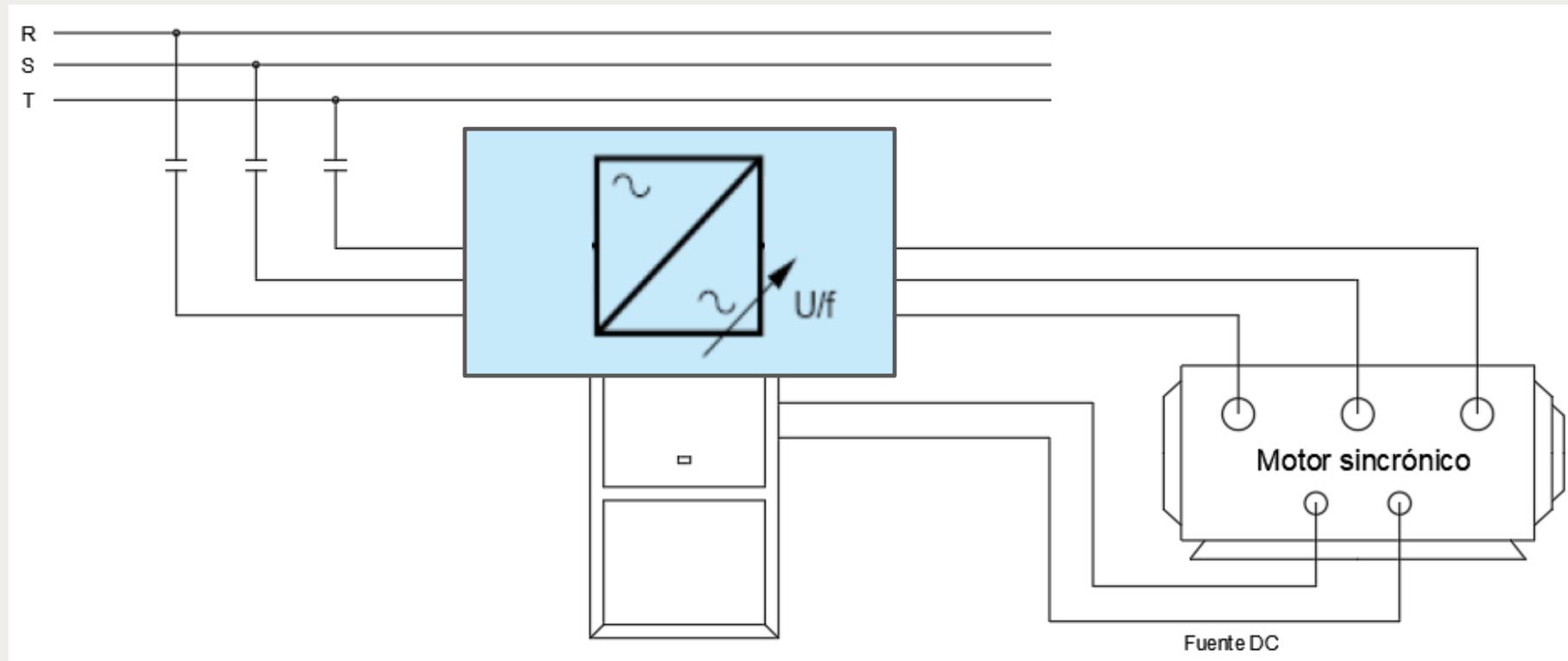
El método de arranque con un motor auxiliar emplea particularmente motores asíncronos conectados directamente al árbol del compensador síncrono. El arranque se puede realizar con un variador de velocidad .



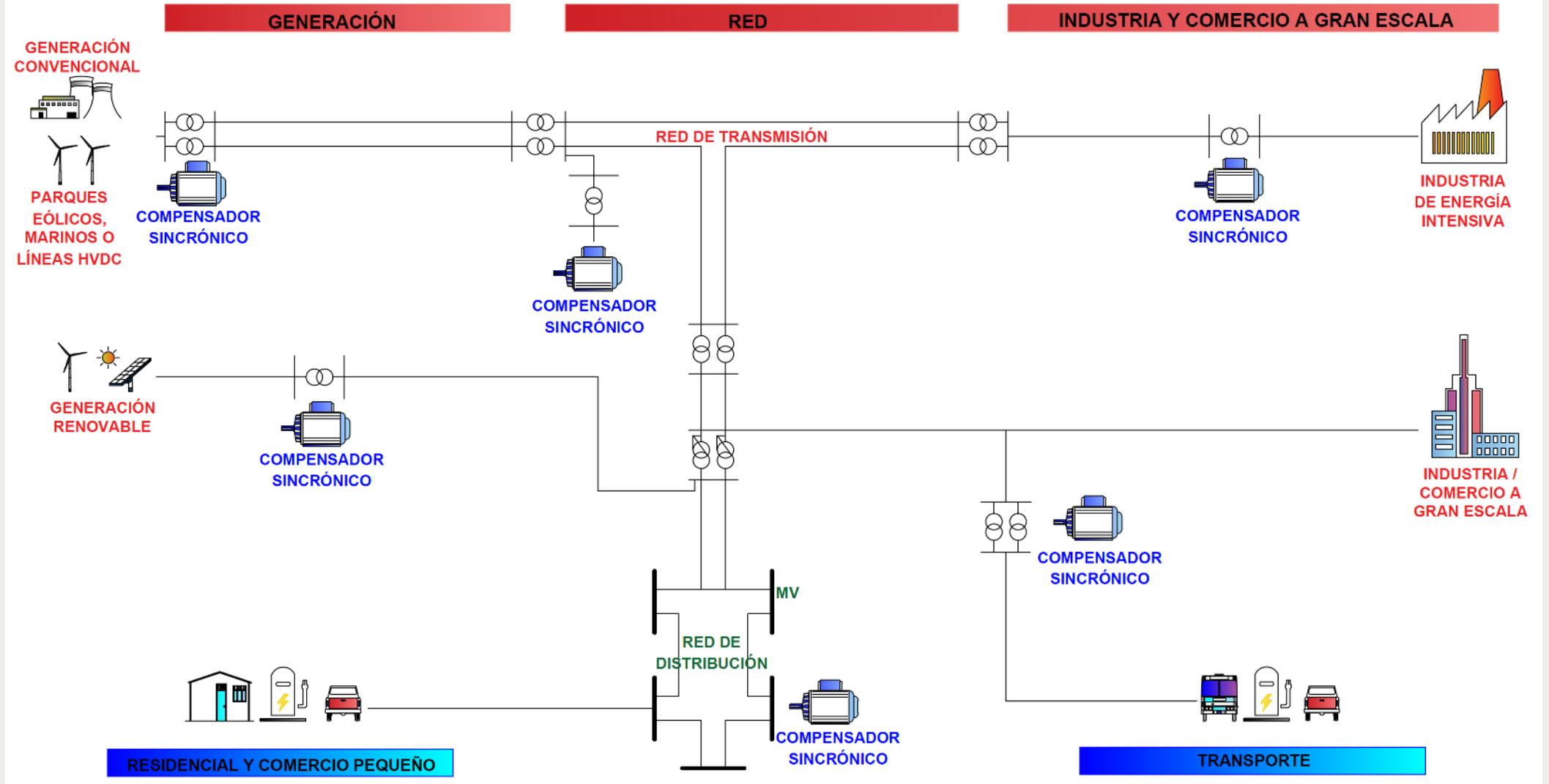
# COMPENSADORES SÍNCRONOS - TEORÍA BÁSICA

## MÉTODOS DE ARRANQUE- VARIADOR DE FRECUENCIA

Este método consiste en variar lentamente la frecuencia con la que se alimenta el compensador , ya sea con un variador de frecuencia o un arrancador suave.



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - APLICACIONES

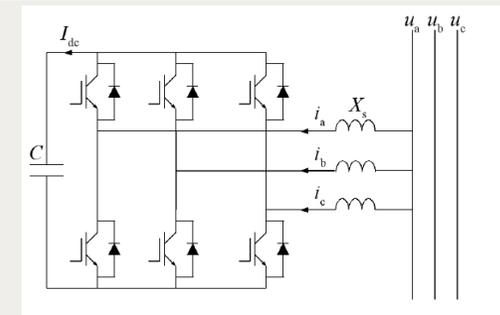


# COMPENSADORES SÍNCRONOS - VENTAJAS

**APORTE:** de Inercia, compensación de potencia reactiva , capacidad adicional de potencia de cortocircuito.

| EQUIPO                 | CONTROL DE VOLTAJE | CONTROL HZ | POTENCIA REACTIVA | CONTRIBUCIÓN DE INERCIA | TIEMPO DE RESPUESTA | FLEXIBILIDAD | COSTO DE MANTENIMIENTO | EXPECTATIVA DE AÑOS DE VIDA |
|------------------------|--------------------|------------|-------------------|-------------------------|---------------------|--------------|------------------------|-----------------------------|
| COMPENSADOR SÍNCRÓNICO | Bueno              | Bueno      | Bueno             | Alto                    | Bueno               | Bueno        | Medio                  | 25+                         |
| STATCOM                | Medio              | Medio      | Bueno             | No                      | Bueno               | No           | Bajo                   | 10 -15                      |

Compensador Síncrono Estático (STATCOM, del inglés "static synchronous compensator"), también conocido como condensador síncrono estático (STATCON, del inglés "static synchronous condenser"),



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - VENTAJAS

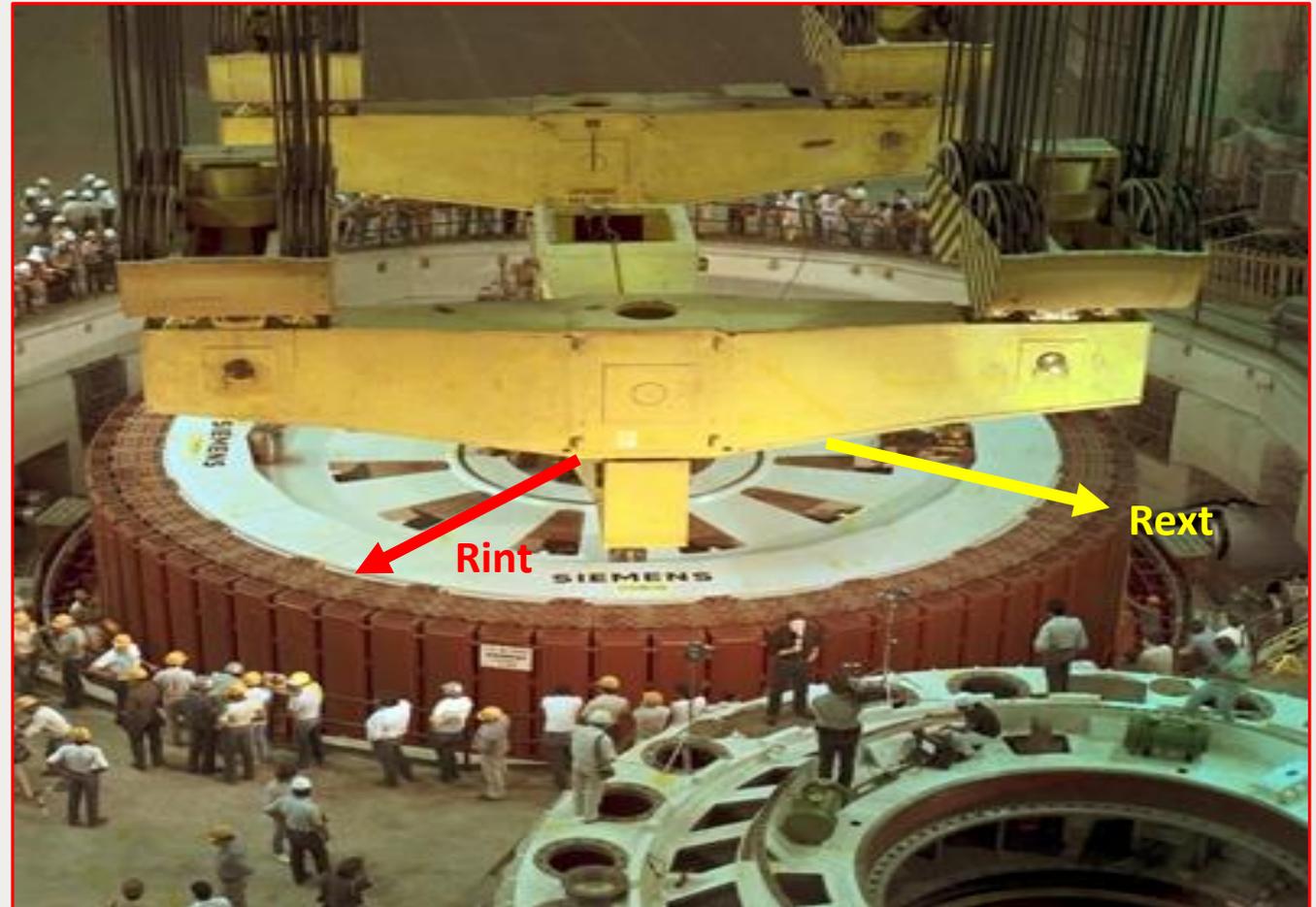
## INERCIA

$$J = \rho \frac{V}{2} (R_{ex}^2 + R_{in}^2)$$

$$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \text{ density , } V [ m^3 ] \text{ Volume}$$

$$\left[ \frac{kg}{m^3} \right] [ m^3 ] [ m^2 ] = [ Kg \cdot m^2 ]$$

El **kilogramo metro cuadrado (kg·m<sup>2</sup>)** es una unidad derivada de momento de inercia en el sistema SI. Es igual al momento de inercia de una sola partícula con una masa de un kilogramo que gira a una distancia de un metro del eje de rotación



## Momento de inercia

$$J = \rho \frac{V}{2} (R_{ex}^2 + R_{int}^2)$$

$$\rho \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad \text{density } V [m^3] \text{ Volume}$$

## CONSTANTE DE INERCIA

$$H = \frac{W_{cinética}}{S} = \frac{1}{2} \frac{J}{S} \omega^2 = \frac{1}{2} \frac{J}{S} \left( 2\pi \frac{n}{60} \right)^2 \quad \left[ \frac{kW \cdot s}{KVA} \right]$$

$n(rpm)$

Cuantos segundos, almacenados en forma de potencia mecánica (energía cinética) para suministrar KVA en un sistema

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - VENTAJAS

## ARREGLO DE ALTA INERCIA

Se puede combinar un compensador síncrono (CS) con un volante de inercia (VI) para incrementar la inercia

Las pérdidas son menores que al instalar un CS con la misma inercia



|       | H (s) | J (Kg.m <sup>2</sup> ) | E (MWs) |
|-------|-------|------------------------|---------|
| CS    | 1.3   | 7.500                  | 91      |
| CS+VI | > 6   | 7.500<br>+30.000       | 450     |

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS



**CONSIDERACIONES AL REALIZAR  
ADAPTACIONES Y CONVERSIONES DE  
GENERADORES A COMPENSADORES**

Considerar el límite de calentamiento  
del rotor

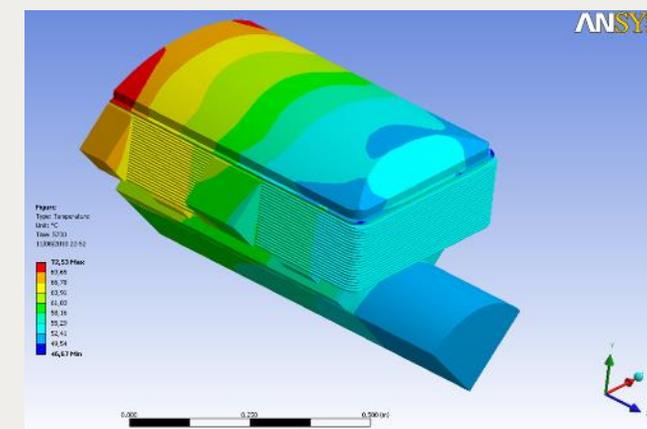
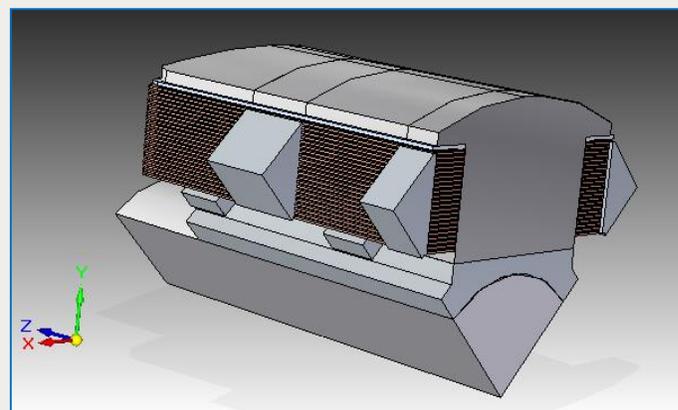


**EL SEPARADOR EN V  
DISMINUYE LA  
TRANSFERENCIA DE CALOR**

Fuente: Propia

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## MODELAMIENTO – MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS



Fuente:  
Propia

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

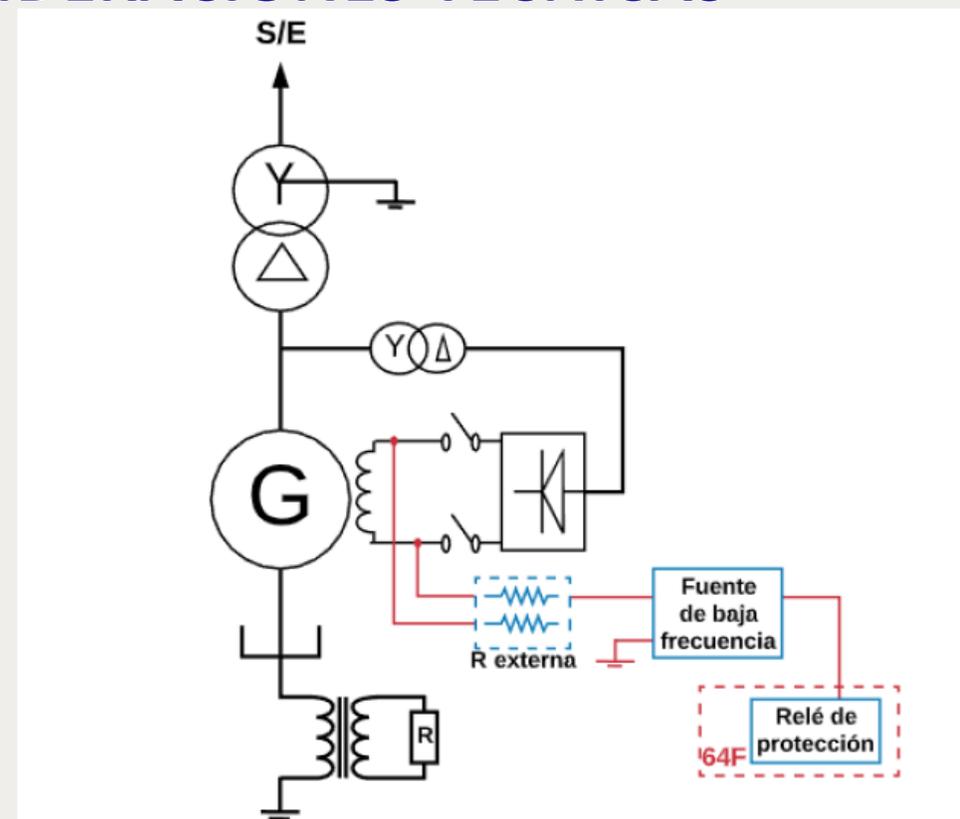
CORTO ENTRE  
ESPIRAS Y  
FALLAS A  
TIERRA DEL  
ROTOR



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## Protección de falla a tierra del rotor (ANSI 64F)

La función de protección de falla a tierra del rotor detecta fallas a tierra en el devanado de campo del generador a través del cálculo de la resistencia de aislamiento a tierra en el rotor. Esta protección inyecta una tensión a baja frecuencia en el circuito de excitación del generador mediante una fuente de tensión de 1 a 3 Hz y una resistencia externa de acoplamiento. La resistencia de aislamiento calculada disminuye cuando ocurre una falla a tierra en el rotor causando la operación del relé de protección. Esta protección permanece habilitada cuando el generador esta fuera de servicio [5].



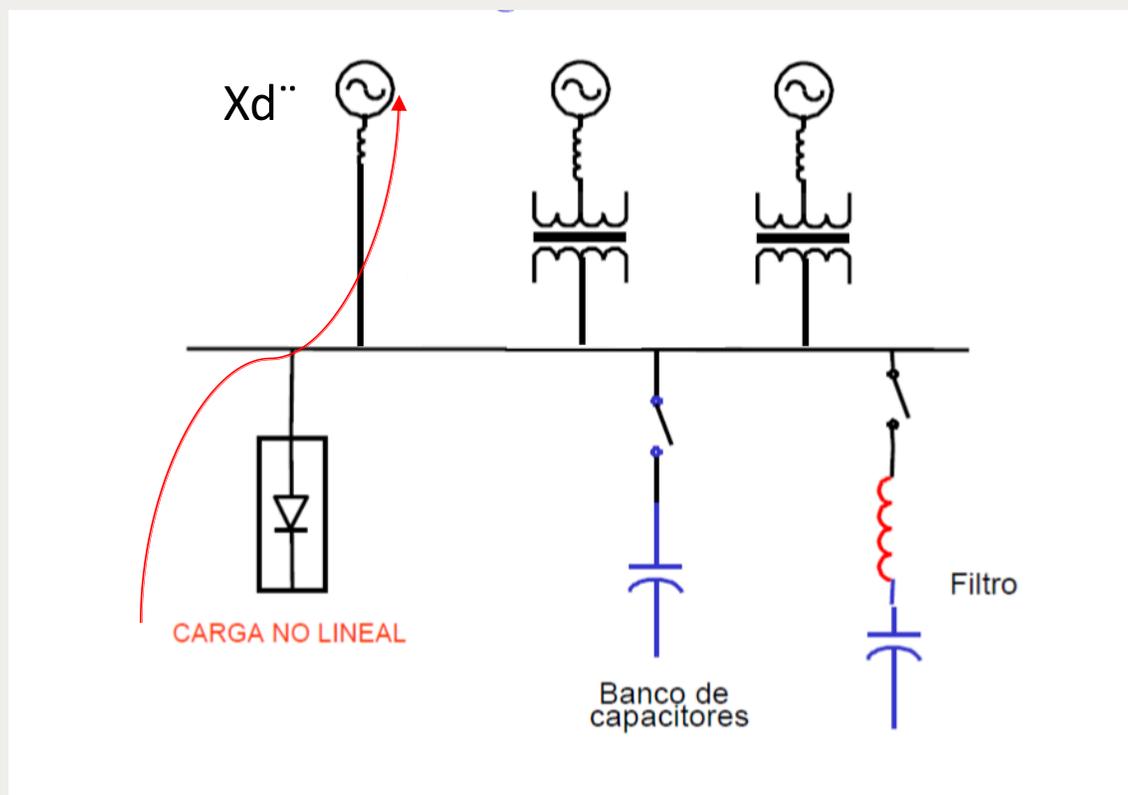
Fuente: INSTRUCTIVO OPERATIVO DE ACTUACIÓN ANTE LA ACTIVACIÓN DE LAS PROTECCIONES ELÉCTRICAS EN UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA.

Julián Estiben Mesa Calle

[5] Protección Multifuncional de Máquinas 7UM62. SIPROTEC. Manual. V4.6

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## Armónicos de corriente



## Límite de calentamiento del rotor



Los armónicos de corriente tienen un efecto “similar” en el cuerpo del rotor al de las corrientes de secuencia inversa (armónico segundo, 120 hz).

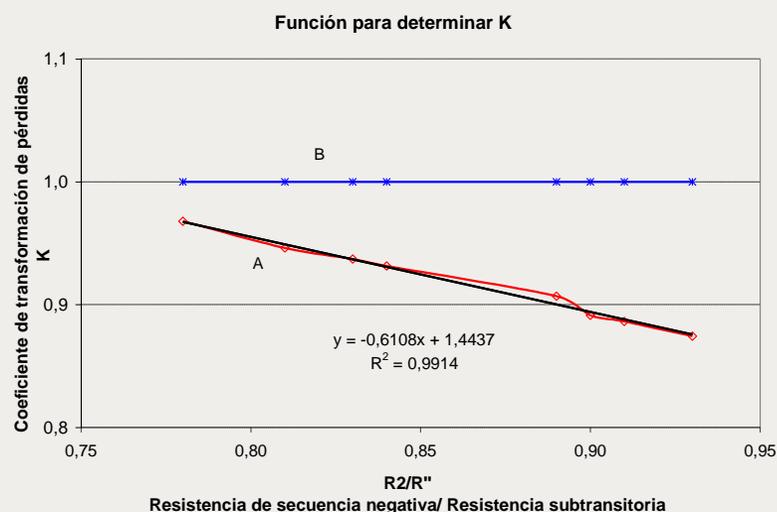
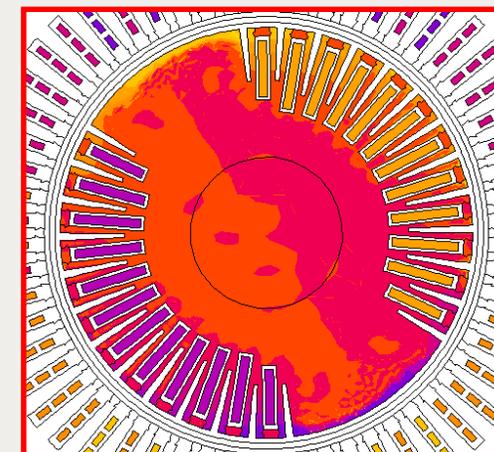
La protección es el relé ANSI función 46

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## CORRIENTE DE ARMÓNICOS EQUIVALENTE A LA CORRIENTE DE SECUENCIA NEGATIVA

Se determina una corriente de armónicos equivalente a la corriente de secuencia negativa de las normas ANSI C50. 13 e IEC60034-1

$$I_{2eq} = K \sqrt{(i_5^2 + i_7^2) \sqrt{3} + (i_{11}^2 + i_{13}^2) \sqrt{6} + (i_{17}^2 + i_{19}^2) \sqrt{9} \dots}$$



R2 : Resistencia de secuencia negativa determinada con rotor móvil. IEC 60034-4 numeral 49.

R'': Resistencia subtransitoria determinada con rotor parado. IEC 60034-4 numeral 45.

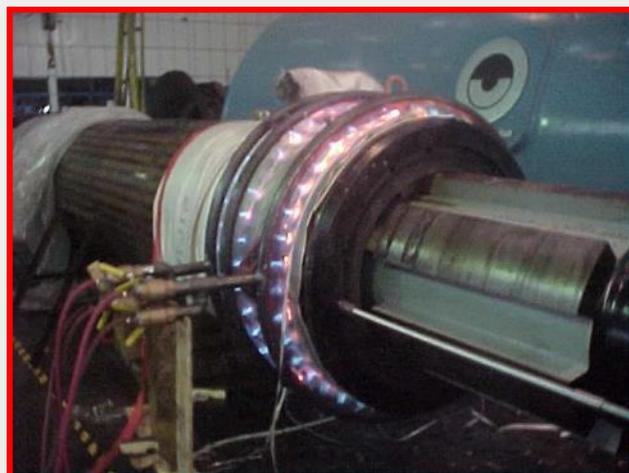
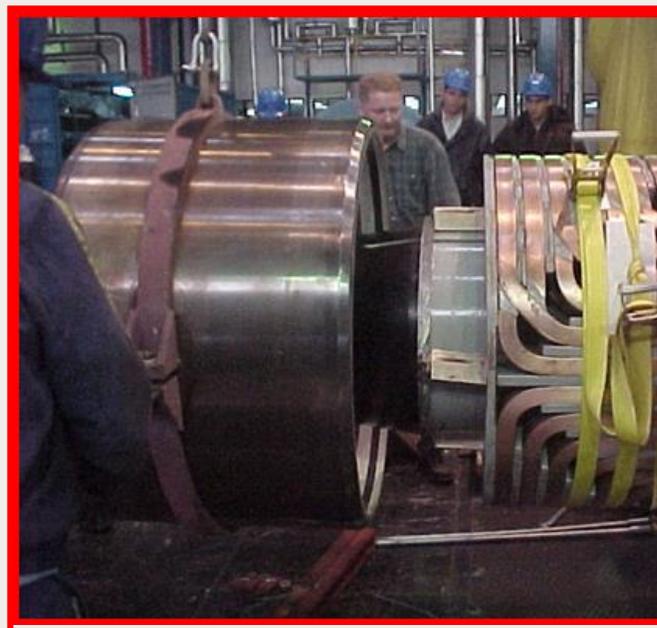
La función se determinó con datos de ensayo ocho turbogeneradores entre 22 MVA y 1500MVA

**Factor K incluido en la norma NTC-IEC 60034-1**

Fuente: Propia

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## *PROBLEMAS EN LA CAPERUZA DEL ROTOR DE GENERADOR DE POLOS LISOS 415MVA 20KV 50HZ*



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

*Efectos del salto de corriente en la caperuza*

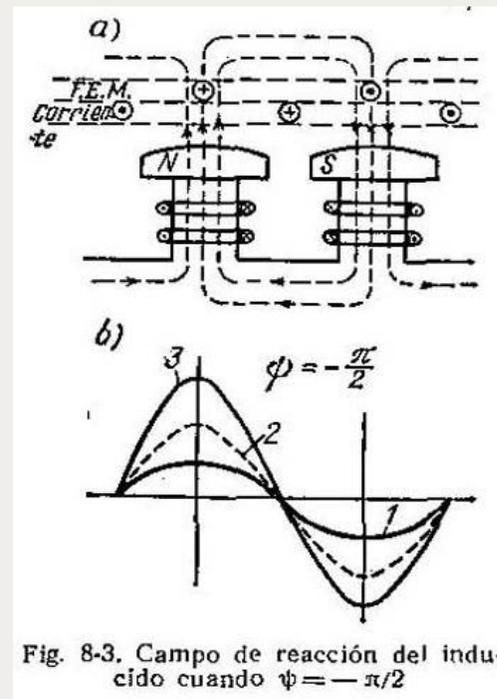
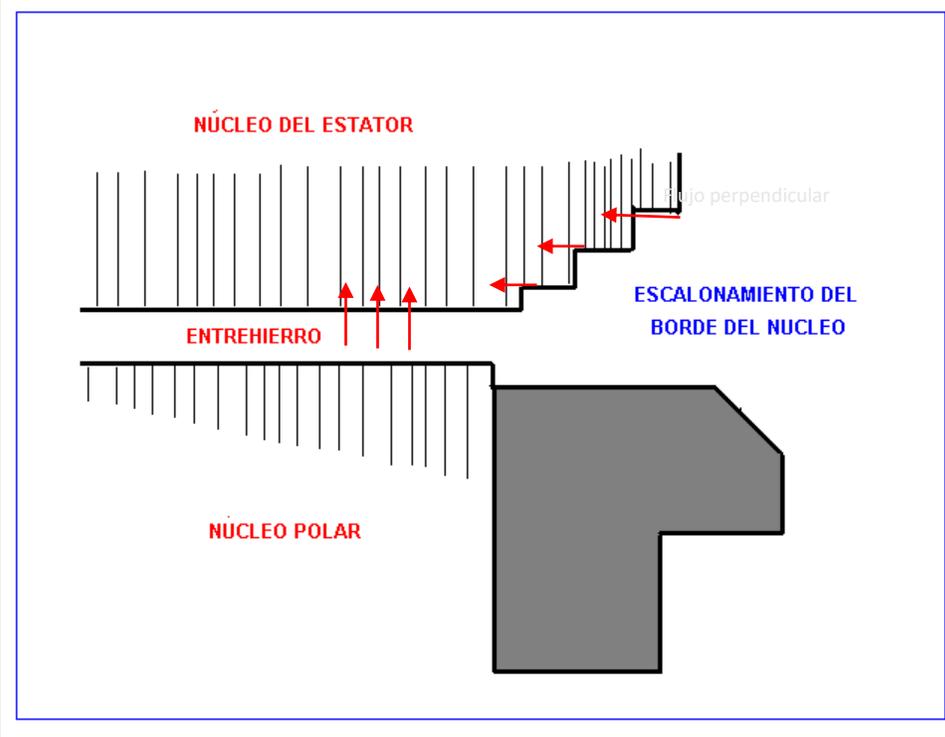
**GENERADOR POLOS LISOS 415 MVA 20KV**

*-Puede causar tensocorrosión con la humedad y progresar a una fisuras*

**Causa: Corrientes armónicas +Corrientes de secuencia inversa**



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS



## LÍMITE DE CALENTAMIENTO DEL BORDE DEL NÚCLEO

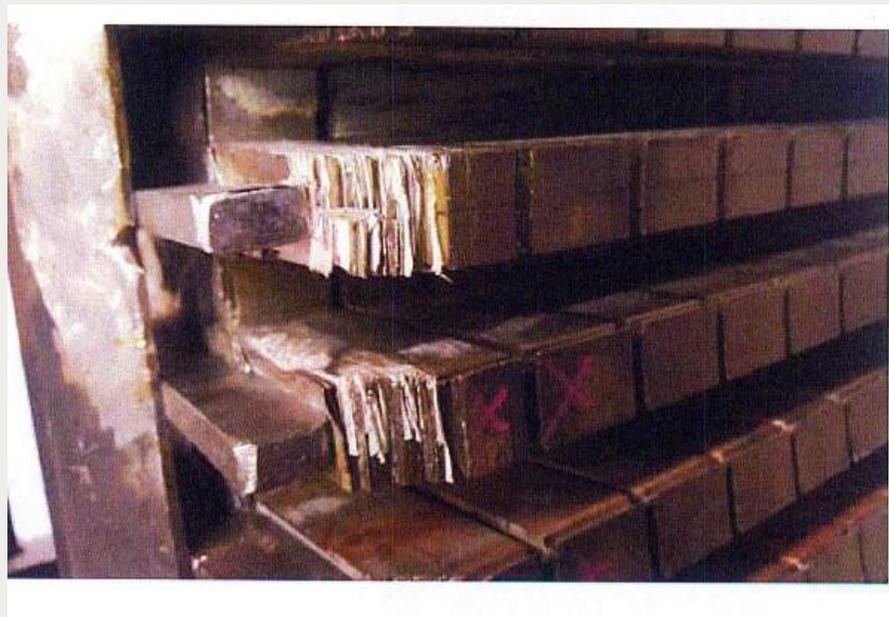
*Cuando se subexcita el generador, se incrementa el flujo que entra perpendicular a la laminación y calienta excesivamente el borde del núcleo.*

*El núcleo se escalona para reducir el efecto del flujo de dispersión.*

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

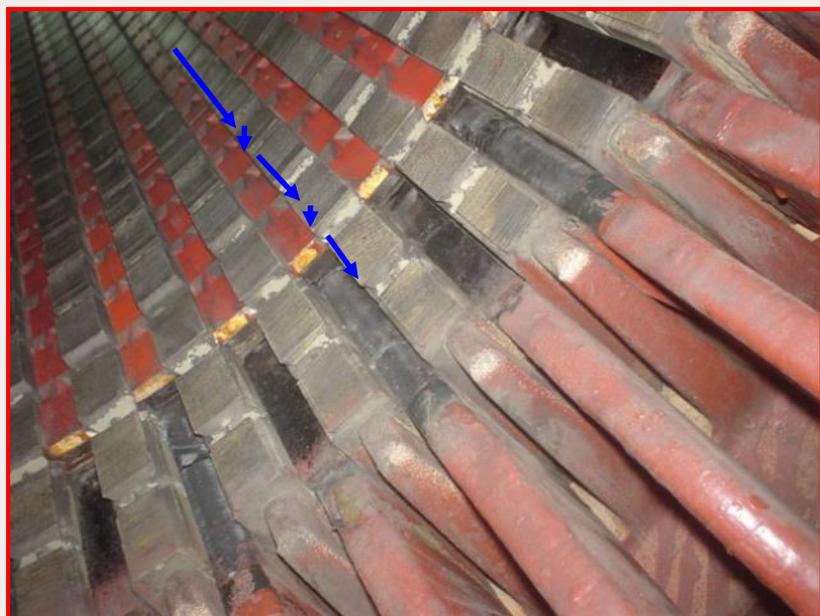
**LÍMITE DE  
CALENTAMIENTO  
DEL BORDE DEL  
NÚCLEO**

***Fallas en el borde  
del núcleo***

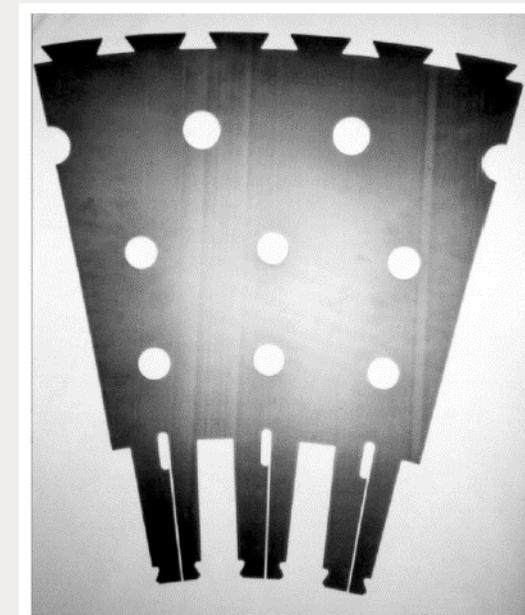


# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## LÍMITE DE CALENTAMIENTO DEL BORDE DEL NÚCLEO



*Borde del núcleo escalonado turbogenerador de 22 MVA*



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - CONSIDERACIONES TÉCNICAS

## LÍMITE DE CALENTAMIENTO DEL BORDE DEL NÚCLEO

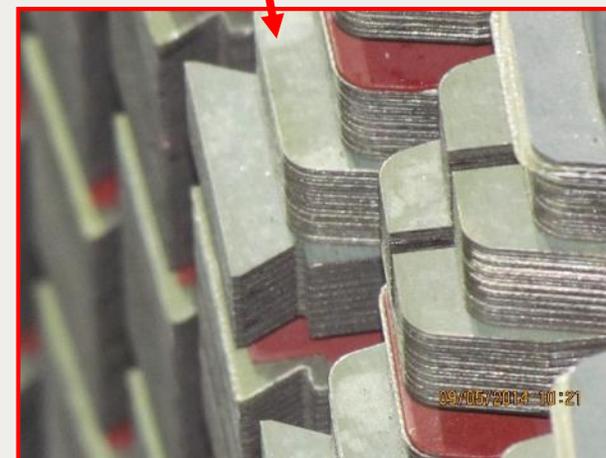


**DEBE REVISARSE EL ESTADO DURANTE  
EL MANTENIMIENTO**

Fuente: Propia



**ESCALONAMIENTO  
DEL BORDE DEL  
NÚCLEO**



# COMPENSADORES SÍNCRONOS - PROYECTOS FUTUROS



HVDC Transmission Assessment for Expansion of Renewable Energy in La Guajira, Colombia

## Task 1 - Selection of HVDC or HVAC Transmission

WORLD BANK

### Problemas con la línea de transmisión LCC-HVDC

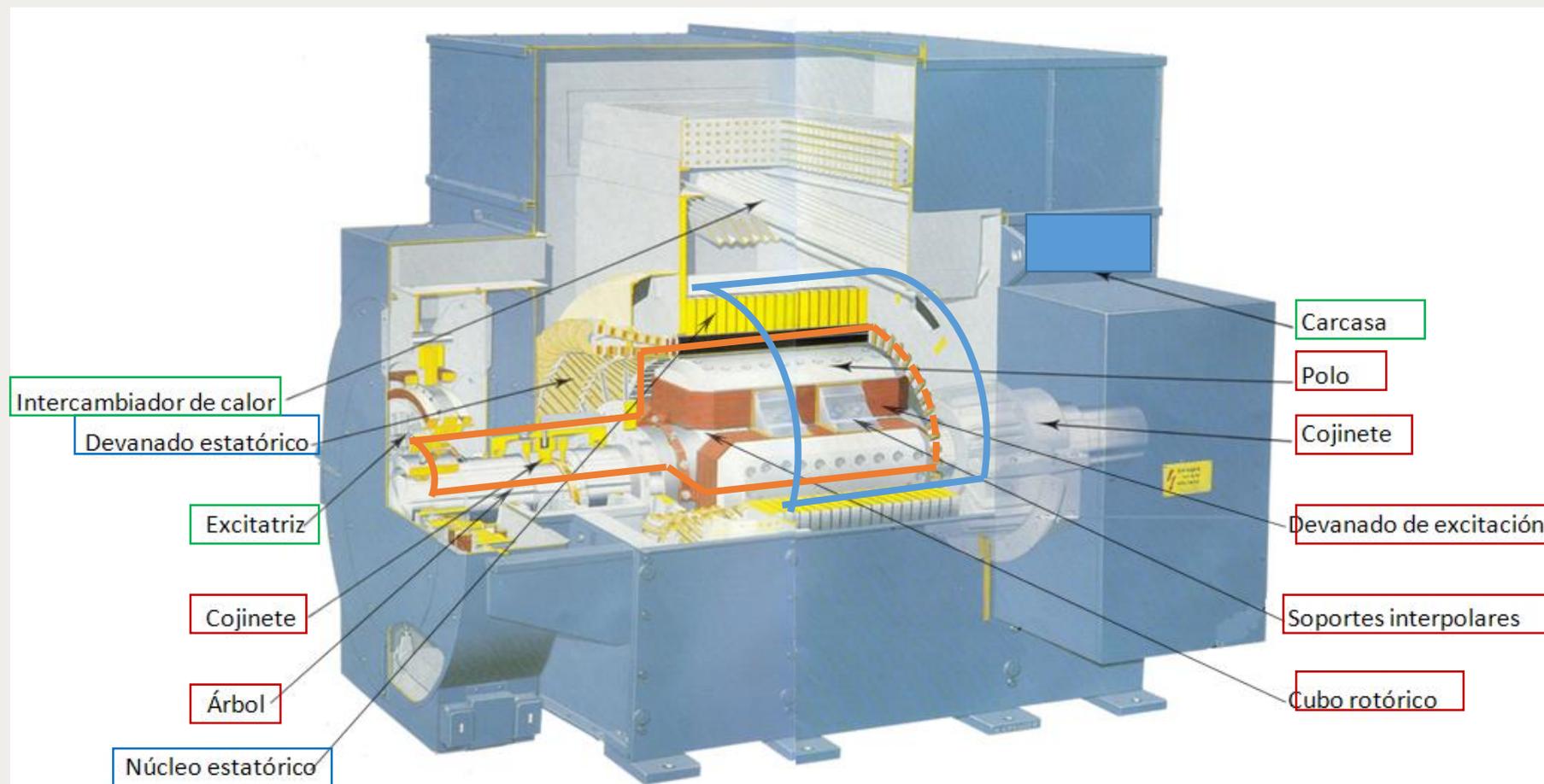
Requiere algunos condensadores síncronos (mínimo 650 MVA) para soporte de la red C.A

### PROVIDENCIA ISLAND HIGH-LEVEL POWER SYSTEM CAPACITY EXPANSION ANALYSES

Se requieren condensadores síncronos como solución de bajo costo para aumentar la corriente de cortocircuito disponible en la red de San Andrés ante integración de energías renovables

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - FUTURO

COMPENSADOR MÁS OPCIONADO PARA USO EN LA INDUSTRIA EN COLOMBIA



## COMPENSADORES SÍNCRONOS - BENEFICIOS

- Los compensadores tienen una alta capacidad de sobrecarga en términos de corta duración, lo que puede mejorar la relación de cortocircuito (SCR) y contribuir en la estabilidad de la red ante una falla.
- Contribuye en la inercia del sistema ante variaciones de frecuencia.
- Mejora el factor de potencia inyectando energía reactiva a la red, así evitando penalizaciones.
- Al descargar los generadores existentes de la potencia reactiva, aumentan la cantidad de excedentes disponibles para la venta.
- Al obtener una red más robusta crece la posibilidad de implementar nuevas fuentes de energía renovables sin comprometer la estabilidad del sistema.

# COMPENSADORES SÍNCRONOS - FUTURO

RECOMENDACIÓN : RETOMAR EN COLOMBIA LA CONSTRUCCIÓN GENERADORES Y MOTORES - CONSTRUIR COMPENSADORES SÍNCRONOS  
**! SEGURIDAD ENERGÉTICA NACIONAL!**

*General Electric Canada Inc.* **distral**  
 DISTRAL S.A.

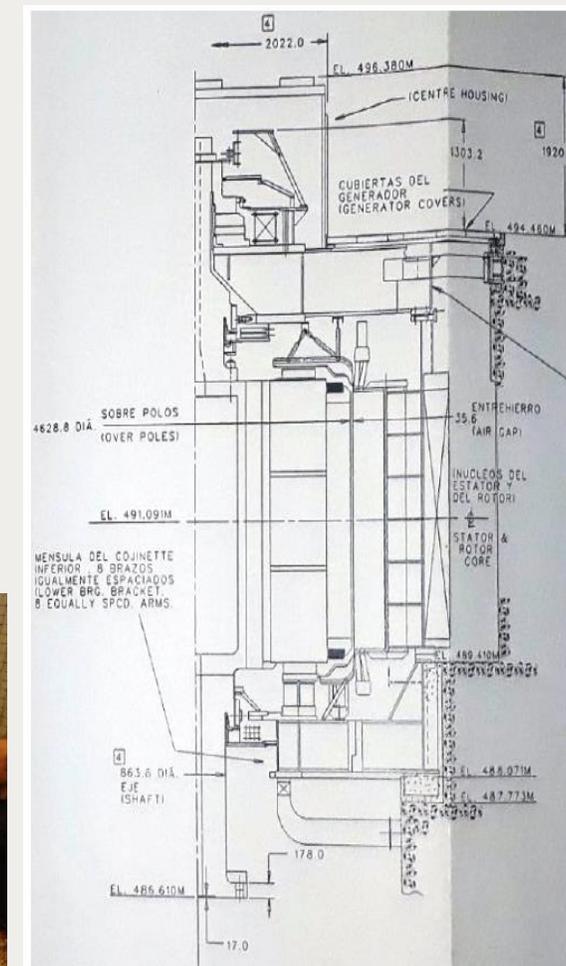
GENERADOR DE CORRIENTE ALTERNA

NO **0610954405** 3 PASES Hz **60**  
 POLOS **16** kV **13.8** RPM **450**  
 EXCITACION VOLTAJE **208**

ROTACION VISTA DESDE ARRIBA

| AUMENTO DE TEMPERATURA °C |        |     |          |                    |         |       |
|---------------------------|--------|-----|----------|--------------------|---------|-------|
| kV A                      | kW     | FP  | AMPERIOS | AMPS DE EXCITACION | ESTATOR | ROTOR |
| 235000                    | 199750 | .85 | 9832     | 1658               | 60      | 60    |
| 270000                    | 229500 | .85 | 11296    | 1780               | 80      | 80    |

ATENCIÓN! ANTES DE INSTALAR U OPERAR LEA LAS INSTRUCCIONES **PGEI-11875**  
 FABRICADO EN BARRANQUILLA COLOMBIA Y PETERBOROUGH, CANADA - 1990



# ! GRACIAS !

## Grupo WG A 1.2 Compensadores síncronos en redes de alta penetración de renovables

- Nombre: Ana Julieth Marin Hurtado
- E-mail: : [anaj@utp.edu.co](mailto:anaj@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira
  
- Nombre: Andrés Escobar Mejía
- E-mail: : [andreses1@utp.edu.co](mailto:andreses1@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira
  
- Nombre: Francisco José Salazar
- E-mail: : [francisco.salazar1@utp.edu.co](mailto:francisco.salazar1@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira

- Nombre: José Luis Oslinger
- E-mail: [jose.oslinger@correounivalle.edu.co](mailto:jose.oslinger@correounivalle.edu.co)
- Empresa: Universidad del Valle
  
- Nombre: Jairo Arcesio Palacios
- E-mail: : [jairo.palacios@correounivalle.edu.co](mailto:jairo.palacios@correounivalle.edu.co)
- Empresa: Universidad del Valle



Universidad  
Tecnológica  
de Pereira

Organizan:



Apoya:



# Casos de estudio

# EFFECTO DE UN COMPENSADOR SINCRÓNICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE UNA RED SUDÁFRICA

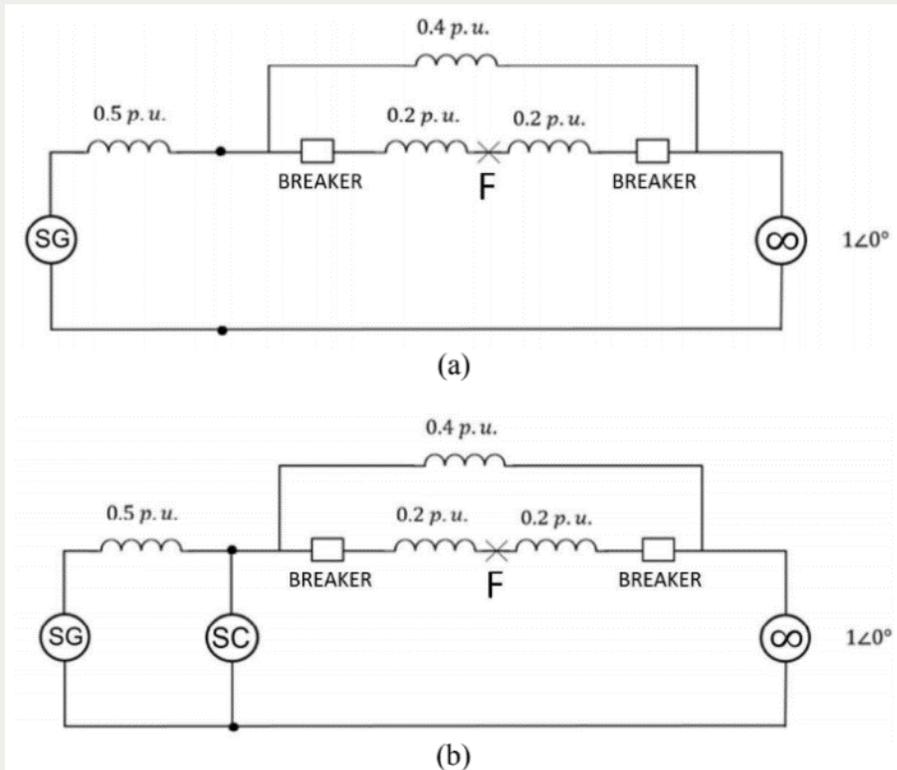


Fig. 1: Single-line diagram of the studied system: (a) without synchronous compensator, and (b) with synchronous compensator.

TABLE I PARAMETERS OF 50 MVA SYNCHRONOUS GENERATOR

|                        |           |
|------------------------|-----------|
| Inertia constant       | 2 MJ/MVA  |
| Frequency              | 50 Hz     |
| Damping constant       | 20.19     |
| Mechanical input power | 0.8 p. u. |

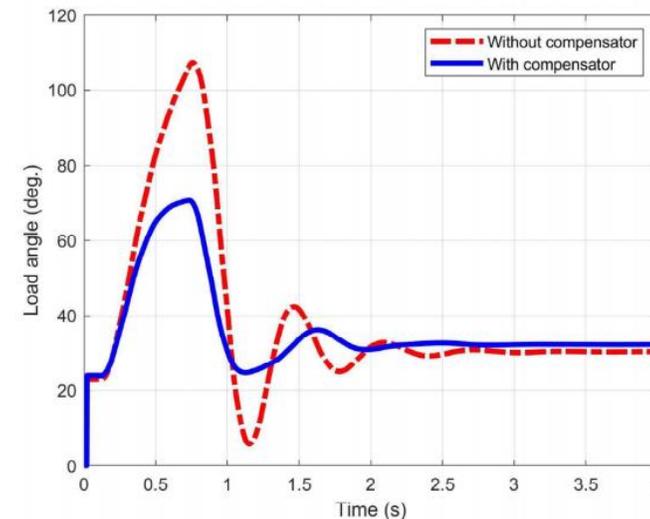


Fig. 6: Synchronous generator load angle under three-phase short-circuit to ground fault.

Fuente: Bringing Back the Synchronous Compensator for the South African Power Network

# EFECTO DE UN COMPENSADOR SINCRÓNICO SOBRE LA ESTABILIDAD DE UNA RED SUDÁFRICA

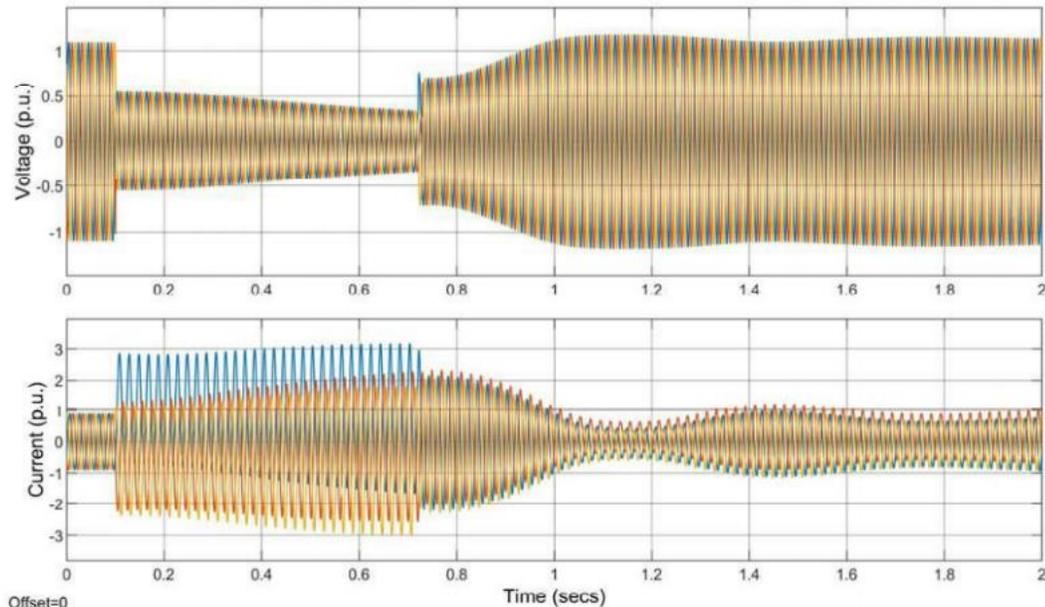


Fig. 4: Line voltages and current after balanced three-phase short-circuit fault (without synchronous compensator).

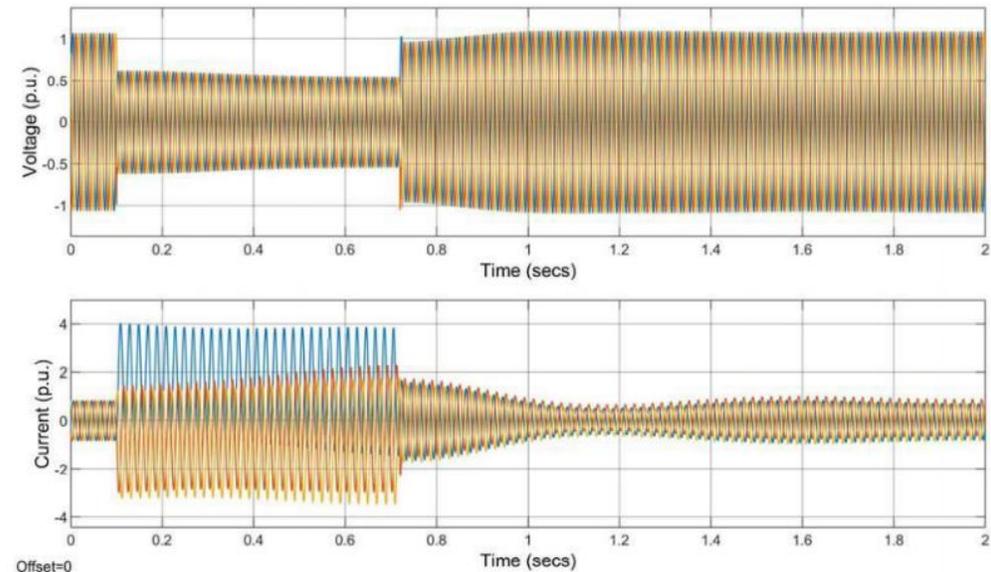


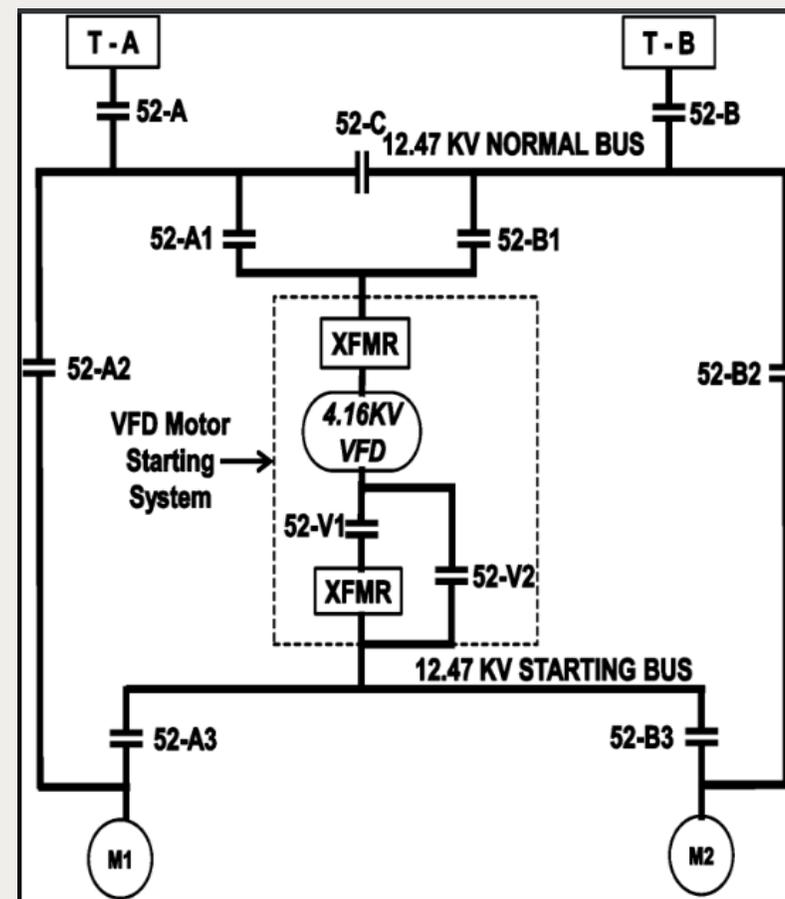
Fig. 5: Line voltages and current after balanced three-phase short-circuit fault (with synchronous compensator).

Fuente: Bringing Back the Synchronous Compensator for the South African Power Network

## CASO: PETROLERA EN EL ESTE DE TEXAS

### Restricciones

- Corriente de cortocircuito limitada 7459 A (3 $\phi$ ) a 138kV
- Requisitos estrictos de parpadeo de voltaje 1,5%
- Capacidad de línea de transmisión limitada 63 MW a un FP = 0,9



Fuente: (Ledoux, Visser, Hulin, & Nguyen)

## **CASO PETROLERA EN TEXAS**

### **ALTERNATIVAS DE MÉTODOS DE ARRANQUE**

- Arranque por medio de motor auxiliar:  
Altos requerimientos de equipos de campo y confiabilidad comprometida
- Arranque asíncrono a tensión reducida:  
Problema de calentamiento del rotor por un mayor tiempo de aceleración
- Arranque por frecuencia:  
Alto par de arranque sin calentamiento del rotor

#### **SE ELIGIÓ ARRANCAR CON UN VARIADOR DE FRECUENCIA**

- Se redujo la corriente de arranque a menos del 40%.
- No se produce parpadeo de voltaje.
- No se producen tensiones en el motor ni sobrecalentamiento.
- No se requiere tiempo de espera entre arranques para que el motor se enfríe.

# ! GRACIAS !

## Grupo WG A 1.2 Compensadores síncronos en redes de alta penetración de renovables

- Nombre: Ana Julieth Marin Hurtado
- E-mail: : [anaj@utp.edu.co](mailto:anaj@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira
  
- Nombre: Andrés Escobar Mejía
- E-mail: : [andreses1@utp.edu.co](mailto:andreses1@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira
  
- Nombre: Francisco José Salazar
- E-mail: : [francisco.salazar1@utp.edu.co](mailto:francisco.salazar1@utp.edu.co)
- Empresa: Universidad Tecnológica de Pereira

- Nombre: José Luis Oslinger
- E-mail: [jose.oslinger@correounivalle.edu.co](mailto:jose.oslinger@correounivalle.edu.co)
- Empresa: Universidad del Valle
  
- Nombre: Jairo Arcesio Palacios
- E-mail: : [jairo.palacios@correounivalle.edu.co](mailto:jairo.palacios@correounivalle.edu.co)
- Empresa: Universidad del Valle



Universidad  
Tecnológica  
de Pereira

Organizan:



Apoya:

