

# Experiencia en Argentina sobre el aumento de la potencia de cortocircuito admisible en subestaciones

Cálculos de esfuerzos electrodinámicos y electromecánicos en interruptores y barras.

**Prof. Ing Raúl Bianchi Lastra**

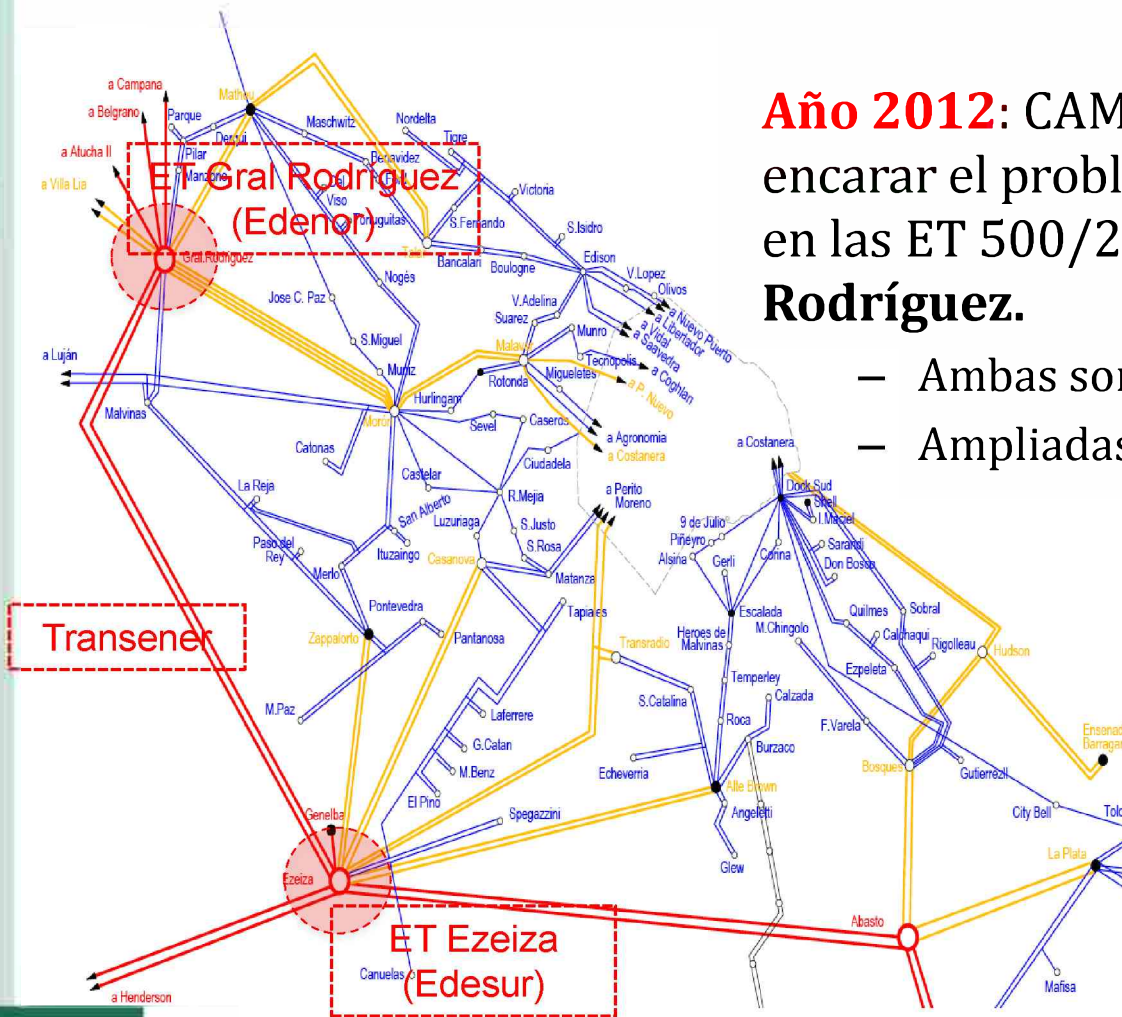
IITREE-LAT, Facultad de Ingeniería - UNLP  
Argentina



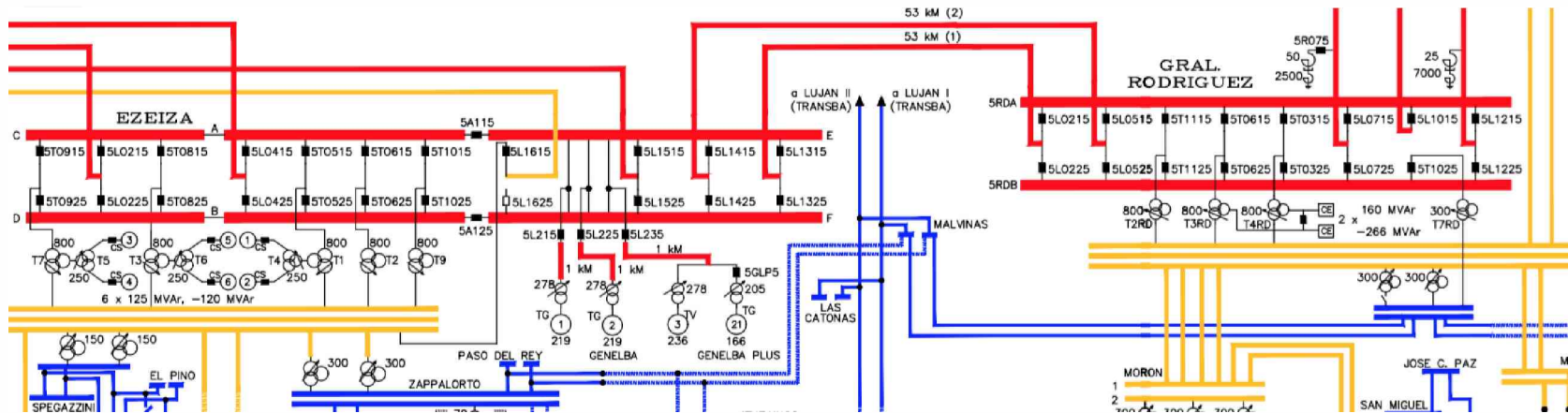
# Detalle del Gran Buenos Aires

**Año 2012:** CAMMESA inicia estudios para encarar el problema del aumento de la Scc en las ET 500/220 kV de **Ezeiza** y **Gral Rodríguez**.

- Ambas son de > 30 años de antigüedad.
- Ampliadas varias veces.



## Detalle de las ET Ezeiza y Gral. Rodríguez



- **Ezeiza:** 4 transformadores de 800 MVA + 1 de reserva.
- **Gral Rodríguez:** 4 transformadores de 800 MVA
- Ambas ET con doble juego de barras en 500 kV y triple en 220 kV

## Objetivo: 25 GVA -> 35 GVA

### Opción A) Reemplazando equipamiento existente ('Uprating').

- Que equipamiento sería necesario reemplazar?
  - Transformadores de potencia?
  - Malla de puesta a tierra?
  - Interruptores? , TI?, Seccionadores?, etc.

La opción A) fue la inicialmente seleccionada por CAMMESA para analizar.

### Opción B) Reducción de los niveles de cortocircuito.

- Limitando la Icc.
  - Instalación de reactores limitadores.
  - Cambio de la topología de la red. (barras separadas)
  - Aplicar restricciones operativas.

### Opción C) HVDC?, Back-to-back?

- Cual sería el costo de cada opción?
- Son factibles técnica y económicamente?



## 'Uprating' -> Es necesario la revisión de todo el equipamiento de la estación

- Capacidad de los transformadores de potencia, tanto para fallas externas como internas.
- Soportabilidad de la mall de tierra. Incrementos de las tensiones de paso y de contacto.
- Soportabilidad de otros equipos de las estaciones:
  - **Cálculo de las corrientes dinámicas y térmicas (actuales y futuras) en interruptores, seccionadores, TI, descargadores, etc.**
  - **Esfuerzos electromecánicos y térmicos en barras.**
- Determinación de niveles de cortocircuito en secundarios/terciarios de transformadores.
- Aumento de la  $S_{cc}$  en estaciones 'aguas abajo' de la ET en estudio.
- Etc., etc.

## Estudios realizados por el IITREE-LAT

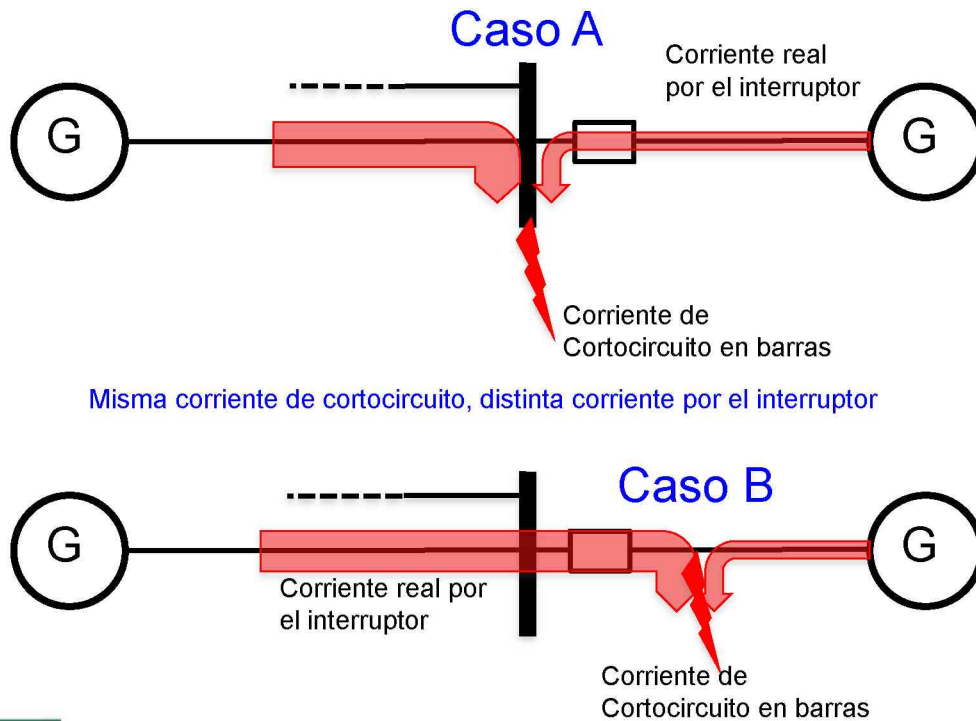
1. Verificación del poder de cierre y apertura de los interruptores de 500 kV, considerando la corriente de cortocircuito 'real' que puede circular por los mismos ante fallas en bornes.
2. Verificación de que el diseño de las barras de 220 y 500 kV de las ET en estudio permite el incremento de la corriente de cortocircuito deseado, desde el punto de vista de los esfuerzos electrodinámicos y térmicos soportados.
3. Mediciones de las mallas de puestas a tierra de las ET en estudio.





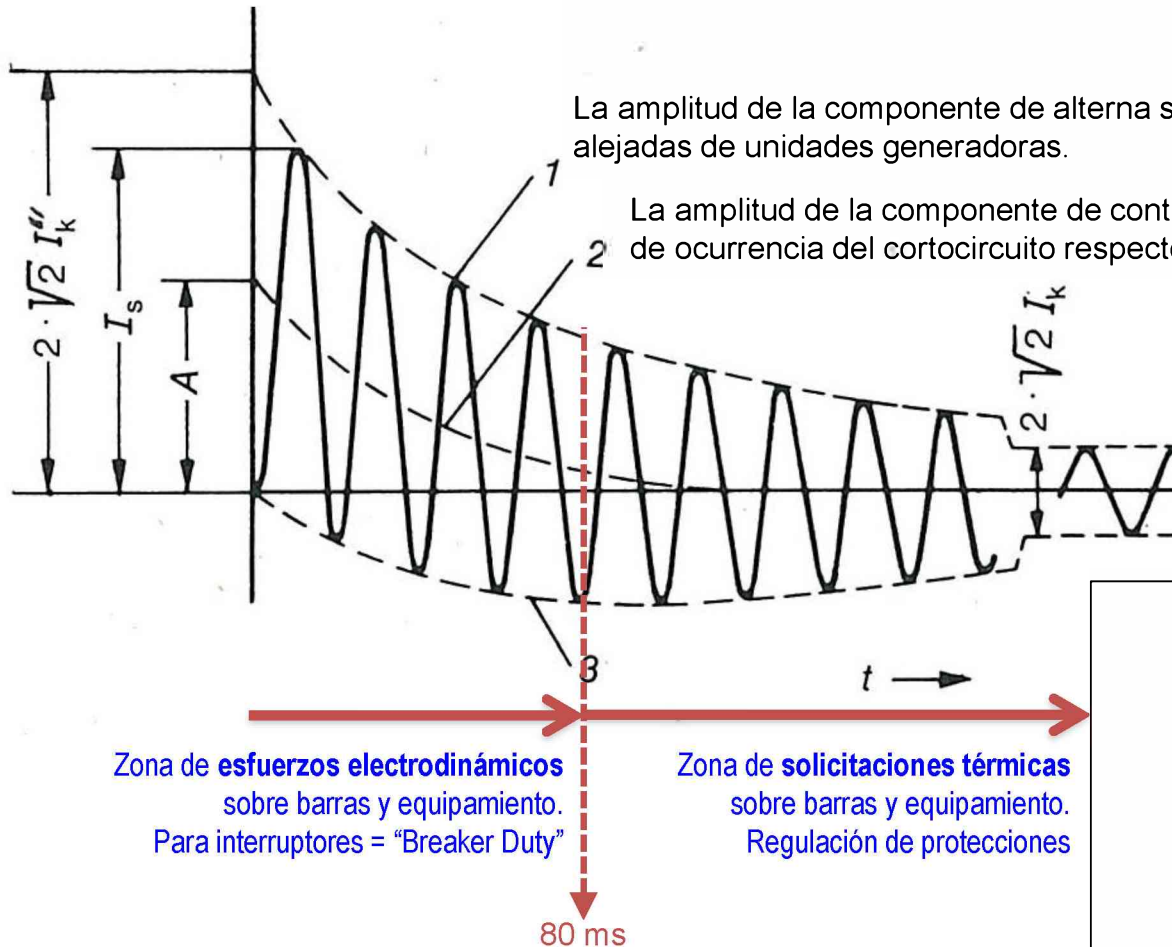
# Corriente 'real' por los interruptores

ET Ezeiza y Gral Rodríguez: Dado que a ambos lados de los interruptores de línea hay 'fuentes activas', No toda la corriente de cortocircuito circula por el interruptor



El programa PSS/E calcula la  $I_{cc}$  en barras, no la 'real' por el interruptor

# 'Anatomía' de la corriente de falla



La amplitud de la componente de alterna sólo es constante en barras alejadas de unidades generadoras.

La amplitud de la componente de continua  $I_{DC}$  depende del instante de ocurrencia del cortocircuito respecto de la onda de tensión.

**IEC 62271:** Si en el instante de apertura la  $I_{DC}$  es menor al 20% de la componente de alterna, el poder de apertura queda sólo determinado por la componente de alterna.

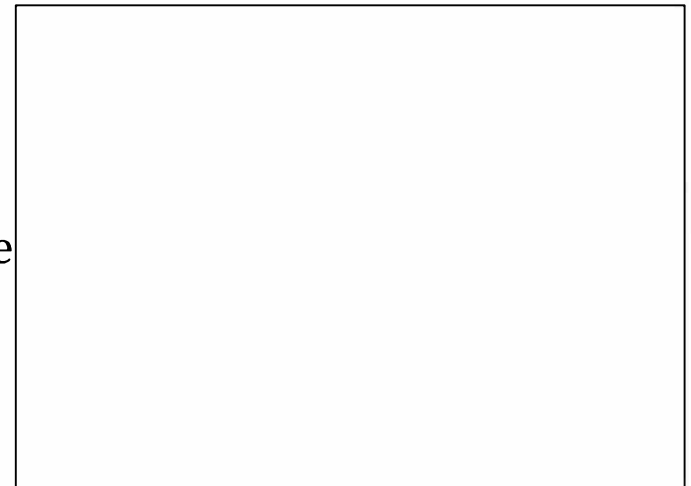
Zona de **esfuerzos electrodinámicos** sobre barras y equipamiento.  
Para interruptores = "Breaker Duty"

Zona de **solicitaciones térmicas** sobre barras y equipamiento.  
Regulación de protecciones



## Verificación del poder de cierre y apertura de los interruptores – Caso ET Ezeiza 500 kV

- Norma de aplicación IEC 62271-100
- Hay generación cercana en la ET Ezeiza.
- Como el PSS/E calcula la  $I_{cc}$  en barras, y no la 'real' por el interruptor, hay que:
  - Calcular la  $I_{cc}$  en barras con actividad BKDY del PSS/E (Se necesitan los datos dinámicos de unidades generadoras)
  - Procesar estos resultados con Matlab para restar el aporte por la línea donde se encuentra el interruptor en análisis, determinando así la corriente de cortocircuito real por el interruptor.
- Interruptores críticos:
  - Los más antiguos de la estación con 28,8 kA de poder de apertura y 72 kA de poder de cierre.



# Ejemplo de resultados obtenidos (escenario 2017)

FAULT DUTY TIME IS 0.080 SECONDS - ALL BREAKERS

AT	3000 [EZEIZA]	500.00]	INITIAL RMS	DECREMENTED RMS	/DECREMENTED CURRENTS/						
X-----	FROM	-----X	CKT ALTERNATING CURNT	ALTERNATING CURNT	PEAK DC	TOT RMS	TOT PEAK				
2006	HENDERS2	500.0	A	1732.3	-39.83	1715.4	-38.77	98.3	1718.3	2524.3	
2060	25MAYO	500.0	B	1849.9	-42.68	1819.9	-41.32	98.2	1822.5	2671.9	
3002	ABASTO	500.0	A	3198.9	-61.13	3036.6	-55.56	575.8	3090.7	4870.3	
3002	ABASTO	500.0	B	3198.9	-61.13	3036.6	-55.56	575.8	3090.7	4870.3	
3004	RODRGUEZ	500.0	A	6103.8	-79.06	5530.6	-75.01	1889.4	5844.4	9710.8	
3004	RODRGUEZ	500.0	B	5492.8	-79.09	4976.9	-75.04	1719.8	5265.7	8758.3	
3009	PI MPZ.EZE	500.0	1	5982.9	-76.56	5480.5	-73.05	1507.8	5684.1	9258.4	
3641	GEBATG01	15.0	1	871.1	-74.01	717.6	-62.75	578.7	921.9	1593.6	
3642	GEBATG02	15.0	2	871.1	-74.01	717.6	-62.75	578.7	921.9	1593.6	
3643	GEBACV03	15.0	3	923.2	-78.01	771.6	-67.89	633.4	998.3	1724.6	
3647	GEBATG04	15.8	4	799.0	-77.53	595.7	-57.64	1130.0	1277.4	1972.4	
3913	EZE.NEU1	1.0	1	1385.7	-89.94	1171.5	-91.01	1007.2	1545.0	2664.0	
3914	EZE.NEU2	1.0	2	1385.7	-89.94	1171.5	-91.01	1007.2	1545.0	2664.0	
3915	EZE.NEU3	1.0	3	1109.9	-88.83	952.7	-89.28	769.1	1224.5	2116.5	
3947	EZE.NEU7	1.0	7	1411.5	-89.80	1196.7	-90.80	1618.8	2013.1	3311.2	
<b>FAULT CURRENT (AMPS)</b>			<b>35339.2</b>	-73.15	31877.5	-68.52	13600.4	34657.6	58882.0		
THEVENIN IMPEDANCE:			0.00023	0.00374	V: 1.0000	0.00	10702.9	33626.3	55784.5		
Cta de tiempo = Xth/(w*Rth) =			51.8 ms								

Notas:

**Iini**= componente de alterna por el interruptor, valor eficaz en t = 0 ms  
**Irms**= componente de alterna por el interruptor, valor eficaz en t = 80 ms  
**Idc**= componente de continua por el interruptor en t = 80 ms  
**TOTrms**=  $\sqrt{Irms^2 + Idc^2}$   
**TOTpeak**= valor cresta en t = 80 ms =  $Irms \cdot \sqrt{2} + Idc$   
**%DC**= Porcentaje de continua en t = 80 ms =  $Idc / (Irms \cdot \sqrt{2}) \cdot 100$   
**Idyn**= Corriente cresta en t=0 ms (Poder de cierre) =  $Iini \cdot 2.7$

Deben ser reemplazados

Corriente maxima por interruptores de lineas, en [A]:

Salida a:	KV	ckt	Iini	Irms	Idc	TOTrms	TOTpeak	%DC	Idyn	
2006	HENDERS2	500.0	A	33905.0	<b>30400.1</b>	13502.1	33263.7	56494.3	31.4	<b>91544</b>
2060	25MAYO	500.0	B	33757.8	<b>30270.3</b>	13502.2	33145.1	56310.8	31.5	<b>91146</b>
3002	ABASTO	500.0	A	32217.3	<b>28926.3</b>	13024.6	31723.3	53932.5	31.8	<b>86987</b>
3002	ABASTO	500.0	B	32217.3	<b>28926.3</b>	13024.6	31723.3	53932.5	31.8	<b>86987</b>
3004	RODRGUEZ	500.0	A	29274.6	26389.7	11711.0	28871.5	49031.7	31.4	<b>79041</b>
3004	RODRGUEZ	500.0	B	29881.3	26938.7	11860.6	29442.2	49977.7	31.2	<b>80680</b>
3009	PI MPZ.EZE	500.0	1	29389.0	26417.7	12092.6	29083.8	49452.8	32.4	79296
3641	GEBATG01	15.0	1	34468.2	31163.6	13021.7	33774.8	57093.7	29.5	93064
3642	GEBATG02	15.0	2	34468.2	31163.6	13021.7	33774.8	57093.7	29.5	93064
3643	GEBACV03	15.0	3	34419.4	31105.9	12967.0	33700.5	56957.6	29.5	92932
3647	GEBATG04	15.8	4	34542.6	31292.7	12470.4	33686.0	56725.0	28.2	93265
3913	EZE.NEU1	1.0	1	34014.9	30798.4	12593.2	33273.5	56148.7	28.9	91840
3914	EZE.NEU2	1.0	2	34014.9	30798.4	12593.2	33273.5	56148.7	28.9	91840
3915	EZE.NEU3	1.0	3	34271.9	30988.6	12831.3	33540.0	56655.7	29.3	92534
3947	EZE.NEU7	1.0	7	33989.3	30773.5	11981.6	33023.7	55501.9	27.5	91771

## Comentarios

- Se observa que, para el caso mostrado, en el año 2017 algunos interruptores (los de mayor antigüedad) verán sobrepasado su poder de cierre y/o apertura, y por lo tanto deberán ser reemplazados.
- La componente de continua ( $I_{DC}$ ) supera el 20% de la componente de alterna, en el tiempo de apertura considerado (80 ms).  
Sin embargo, este resultado es pesimista, dado que no se ha considerado en el modelo todas las resistencias existentes en el circuito, dado que no es habitual el ingresar en el PSS/E los datos de resistencia de transformadores y otros elementos de la red.



# Esfuerzos Electromecánicos y Térmicos en Barras

- Para barra rígidas y flexibles, de 500 y 220 kV, según norma **IEC 60865**
- Gran dificultad para obtener todos los datos necesarios.
- Se desarrollo de un script con Matlab para realizar el cálculo de los esfuerzos, de acuerdo con la IEC 60865.
  - Se validó el script con los ejemplos disponibles en la norma IEC 60865
  - Luego se verificaron las memorias de cálculo de esfuerzos en barras disponibles.
  - Finalmente se hizo el recálculo de dichos esfuerzos, para uns  $I_{cc} = 40 \text{ kA}$  ( $S_{cc} = 35 \text{ GVA}$ ).



# Datos necesarios para barras rígidas (tubos) y flexibles

## - IEC 60865 -

### Datos necesarios para conductores flexibles

Parámetro	Descripción
$i''k_3$	Corriente de CC trifásica simétrica (kA)
k	Factor kappa
Tk1	Duración del cortocircuito (s)
l	Distancia entre soportes (m)
lc	Longitud del conductor (m)
li	Longitud de la cadena de aisladores (m)
a	Distancia entre conductores de fase (m)
S	Módulo elástico de los soportes (N/mm)
As	Secc. transv. de un subconductor (mm <sup>2</sup> )
ms	Masa/unidad de long. de un subcond. (kg/m)
E	Modulo de Young (N/m <sup>2</sup> )
Fst	Fuerza estática de tensión conductor (N)
nc	Nro. de masas pendientes en el vano
mc	Peso de cada masa (kg)
n	Número de subconductores
as	Separación entre subconductores (m)
ls	Distancia entre separadores (m)
ds	Diámetro del subconductor (m)

### Datos necesarios para barras rígidas

Parámetro	Descripción
$i_2k_3$	Corriente de cortocircuito simétrica valor eficaz en (kA)
k	Factor kappa
nv	Número de vanos
l	Distancia entre soportes, la mayor de cada vano (m)
a	Distancia entre ejes de conductores (m)
h1	Altura del aislador c/anclaje (m)
h2	Altura del soporte + aislador (m)
mp	Masa del conductor (kg/m)
D	Diámetro exterior (mm)
s	Espesor del tubo (mm)
E	Modulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )
Rp02	Tensión mecánica correspondiente al límite elástico (N/mm <sup>2</sup> )
Smax	Esfuerzo admisible en borne. Aislador soporte interno (N)
SmaxA	Esfuerzo admisible en borne. Equipos extremos (N)

# Esfuerzos Electromecánicos en Barras

Caso A – Recálculo para una  $I_{cc} = 40 \text{ kA}$

$i_{p3} = 107.5 \text{ kA}$   
 $F_{m3} = 3544.4 \text{ N}$

De la Tabla 3 (IEC 60865), para:  
Viga continua con soportes equidistantes. Dos vanos  
resulta:  
 $\alpha_A = 0.375$ ,  $\alpha_B = 1.250$   
 $\beta = 0.730$   
 $\gamma = 2.450$

$J = \text{Momento de inercia} = 3.5e-06 \text{ m}^4$   
 $f_c = \text{Frecuencia propia} = 3.25 \text{ Hz}$

Para una relación  $f_c/f = 0.065$  y  $k = 1.90$ ,  
de Fig.4 y 5 surge que:  
 $V_f = 0.47$   
 $V_s = 0.42$   
 $V_r = 1.00$  (Sin recierre)  
 $V_r = 1.73$  (Con recierre)

$Z = 5.834e-05 \text{ m}^3$   
 $q = \text{factor de plasticidad} = 1.34$

a) Sin recierre:

$V_s \times V_r = 0.420$   
 $Stot = \text{Tension maxima de flexion} = 28.9 \text{ N/mm}^2$   
 $Stot \leq 227.7 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{Las barras soportan la } I_{cc}$

Fuerza en los soportes,

$V_f \times V_r = 0.473$   
a) Extremos =  $F_{dA} = 0.63 \text{ kN}$ , Coef seg =  $7.02 > 2$  (VERIFICA)  
b) Internos =  $F_{dB} = 2.09 \text{ kN}$ , Coef seg =  $4.78 > 2$  (VERIFICA)

b) Con recierre:

$V_s \times V_r = 0.727$   
 $Stot = \text{Tension maxima de flexion} = 50.0 \text{ N/mm}^2$   
 $Stot \leq 227.7 \text{ N/mm}^2 \Rightarrow \text{Las barras soportan la } I_{cc}$

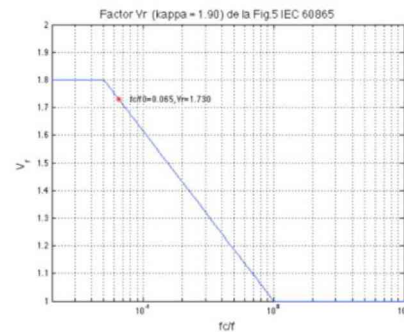
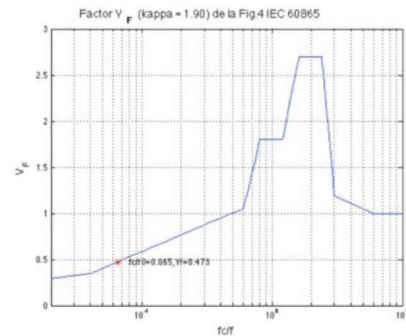
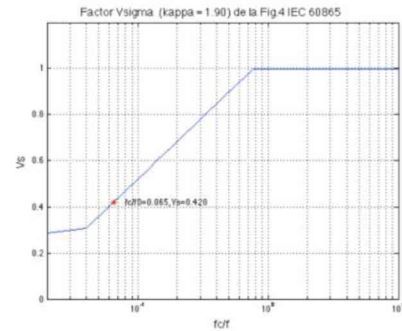
Fuerza en los soportes,

$V_f \times V_r = 0.818$   
a) Extremos =  $F_{dA} = 1.09 \text{ kN}$ , Coef seg =  $4.06 > 2$  (VERIFICA)  
b) Internos =  $F_{dB} = 3.62 \text{ kN}$ , Coef seg =  $2.76 > 2$  (VERIFICA)

Ejemplo de los  
resultados obtenidos



# Esfuerzos Electromecánicos en Barras



Ejemplo de los resultados obtenidos

# Esfuerzos Térmicos en Barras

i2k3= Corriente simétrica inicial de CC .. = 40.00 kA  
ik3 = Corriente permanente de CC trifásico = 40.00 kA  
k = Factor kappa ..... = 1.90  
Tk = Duración de la Icc ..... = 1.000 s  
Tkr = Tiempo de corta duración asignado .. = 1.000 s  
A = Sección transversal conductor ..... = 2150.0 mm<sup>2</sup>  
ti = Temperatura conductor al inicio .... = 60.0 C  
tf = Temperatura conductor al final ..... = 200.0 C

Material: Al, Al/Al o Al/Al

c = 910 J/(kg-C)  
rho = 2700 kg/m<sup>3</sup>  
k20 = 34.80e6 1/ohm-m  
a20 = 0.0040 1/C

Densidad de Iterm asignada de corta duración:

Sthr = 91.76 A/mm<sup>2</sup>

Factores m = 0.095, n = 1.000

Iterm equivalente = Ith = 41.86 kA

**Densidad de Iterm equivalente = Sth = 19.47 A/mm<sup>2</sup>**

**Sth <= 91.76 A/mm<sup>2</sup> (= Sthr\*sqrt(Tkr/Tk))**

**El conductor tiene suficiente resistencia térmica**

Ejemplo de los  
resultados obtenidos

## Conclusiones Generales

- Los estudios aquí presentados son sólo una parte de los necesarios para determinar la factibilidad de 'uprating' de las estaciones estudiadas.
- Se encontraron muchas dificultades para obtener los datos necesarios para los estudios.
- De los cálculos de cortocircuitos, surge que los interruptores de 500 kV de mayor antigüedad de las ET analizadas deberán ser reemplazados.
- Los cálculos de esfuerzos mecánicos y térmicos en las barras de las estaciones analizadas muestran que las mismas soportarían la nueva  $I_{cc}$  deseada.



## Bibliografía / Referencias

- IEC 62271-100. “High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating current circuit-breakers”, *IEC International Standard*, 2001.
- G. Tremouille, A. Parisot, y H. Imagawa, “Short circuit uprating, methodology throughout the diversity of required skills”, paper B3-209, CIGRE Session 2012. París, Francia.
- IEC 60865-1:1993 “*Short-circuit currents. Calculation of effects. Part 1: Definitions and calculation methods*”.
- IEC 60865-2:1994 “*Short-circuit currents. Calculation of effects. Part 2: Examples of calculations*”.
- WG 02 of SC 23, ‘**TB 006 The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations**’, *CIGRE Technical Brochure*, 1987.
- CIGRE Study Committee 23, ‘**TB 105 The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (Rigid and Flexible Bus-Bars)**’, *CIGRE Technical Brochure*, 1996.
- Working Group 23.03, ‘**TB 214 The Mechanical Effects of Short-Circuit Currents in Open Air Substations (part II)**’, *CIGRE Technical Brochure*, n.º 214, oct. 2002.
- T. Kawamura, S. Kobayashi, H. Takagi, y Y. Aoshima, “RAISING THE SHORT-CIRCUIT CURRENT AT EXISTING 500kV SUBSTATIONS”, paper 23-110, *CIGRE Session*, París, Francia, 1996.

