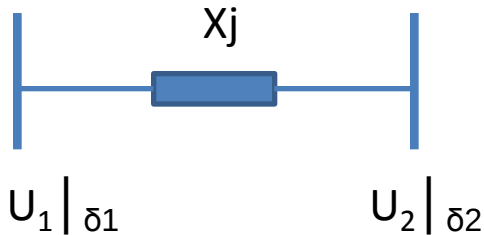


CONDENSADORES VARIABLES. Pérdidas en la red

El consumo de energía reactiva provoca pérdidas por calentamiento de las líneas en la red.

La energía reactiva tiene carácter local, debe generarse cerca de donde se consume.

La energía reactiva en una red depende en gran medida de los módulos de las tensiones en los nudos



Potencia activa del bus 1 al 2

$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{X} \sin \delta$$

Potencia reactiva del bus 1 al 2

$$Q_1 = \frac{U_1^2 - U_1 U_2 \cos \delta}{X}$$

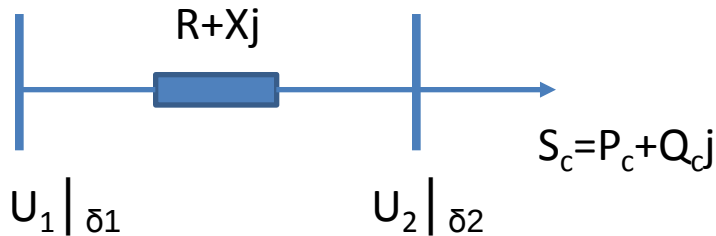
$$Q_2 = \frac{U_1 U_2 \cos \delta - U_2^2}{X}$$

CONDENSADORES VARIABLES. Pérdidas en la red

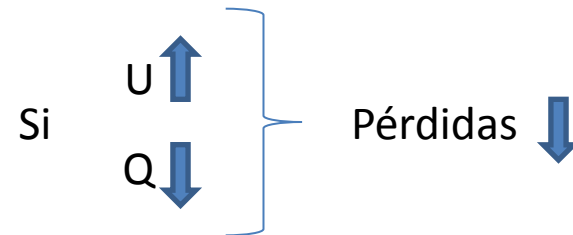
El consumo de energía reactiva provoca pérdidas por calentamiento de las líneas en la red.

La energía reactiva tiene carácter local, debe generarse cerca de donde se consume.

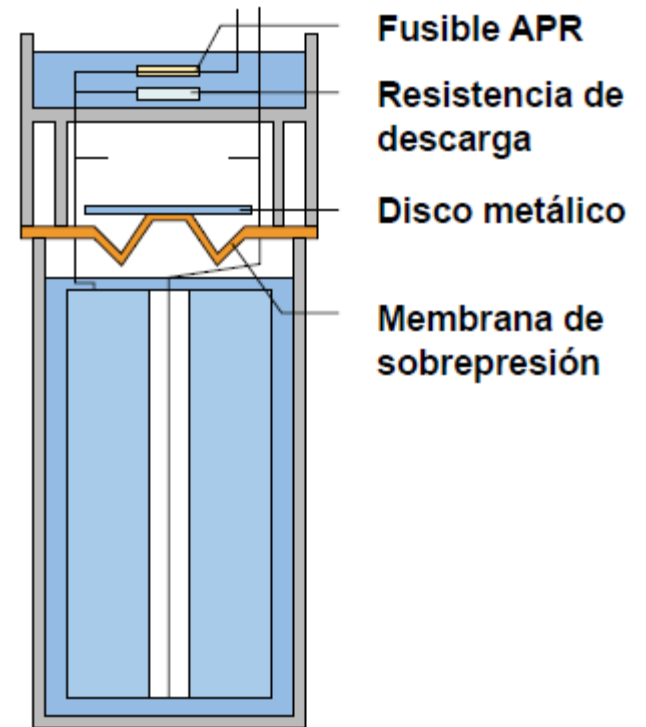
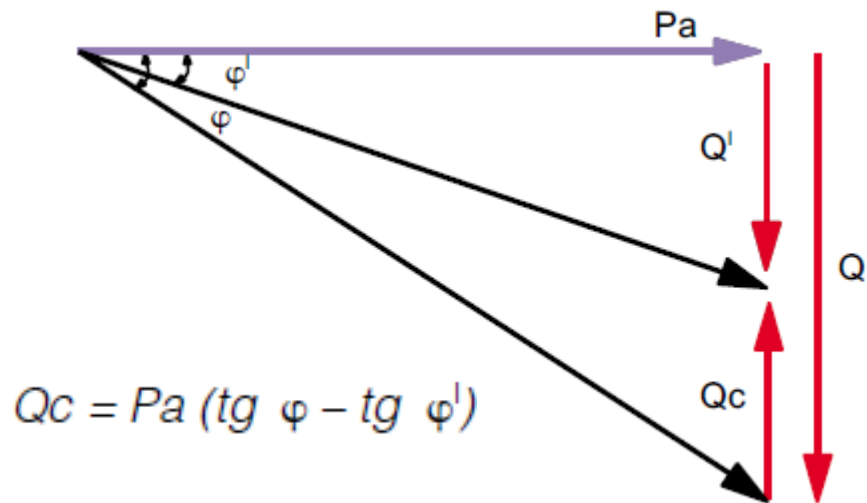
La energía reactiva en una red depende en gran medida de los módulos de las tensiones en los nudos



Pérdidas en la línea: $Perdidas = R \frac{P_c^2 + Q_c^2}{U_2^2}$



COMPENSACIÓN DE REACTIVA



DEMANDA

Del orden del
40% motores
eléctricos



■ Factor de potencia de los aparatos más frecuentes

Aparato		$\cos \varphi$	$\operatorname{tg} \varphi$
□ motor asíncrono ordinario	carga 0%	0,17	5,8
	25%	0,55	1,52
	50%	0,73	0,94
	75%	0,80	0,75
	100 %	0,85	0,62
□ lámparas de incandescencia			$= 1$
□ lámparas de fluorescencia no compensadas		$= 0,5$	$= 1,73$
□ lámparas de fluorescencia compensadas (0,93, a veces, 0,86)		0,93	0,39
□ lámparas de descarga		0,4 a 0,6	2,29 a 1,33
□ hornos de resistencia		$= 1$	$= 0$
□ hornos de inducción con compensación integrada		$= 0,8$	$= 0,62$
□ hornos con calentamiento dieléctrico		$= 0,85$	$= 0,62$
□ máquinas de soldadura con resistencia		0,8 a 0,9	0,75 a 0,48
□ centros estáticos monofásico de soldadura por arco		$= 0,5$	$= 1,73$
□ grupos rotatorios de soldadura por arco		0,7 a 0,9	1,02 a 0,75
□ transformadores-rectificadores de soldadura por arco		0,7 a 0,8	1,02 a 0,75
□ hornos de arco		0,8	0,75

Compensación de la energía reactiva de los transformadores en kVAr

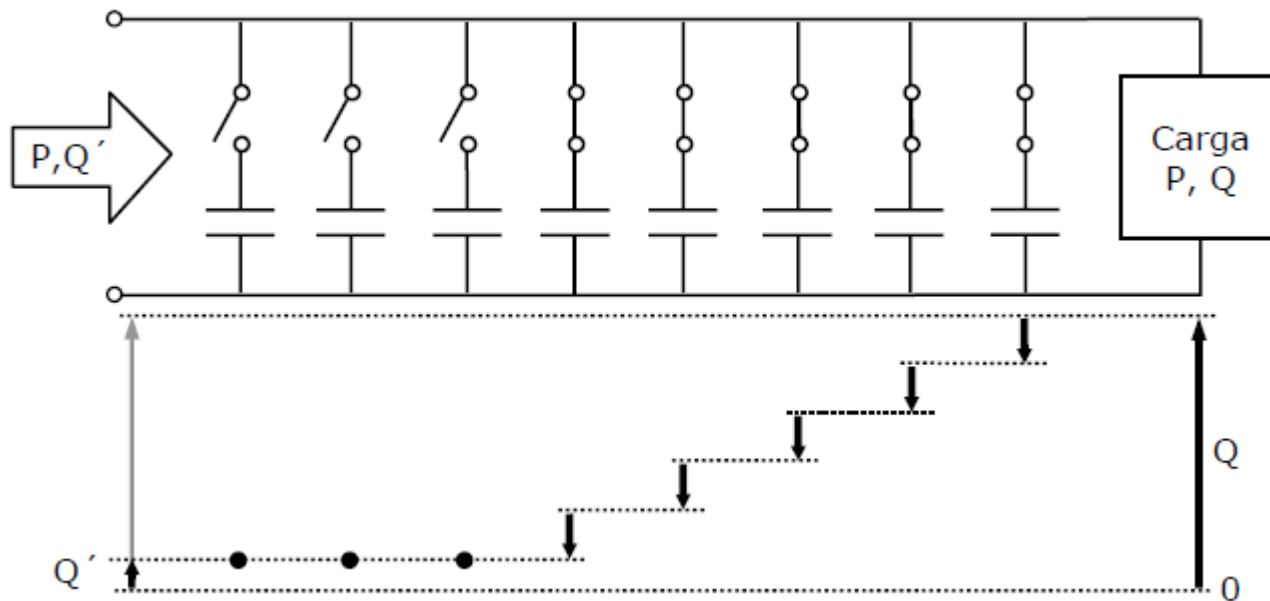
Transformador		En aceite		Seco	
S (kVA)	Ucc (%)	Vacío	Carga	Vacío	Carga
100	4	2,5	5,9	2,5	8,2
160	4	3,7	9,6	3,7	12,9
250	4	5,3	14,7	5	19,5
315	4	6,3	18,3	5,7	24
400	4	7,6	22,9	6	29,4
500	4	9,5	28,7	7,5	36,8
630	4	11,3	35,7	8,2	45,2
800	4	20	66,8	10,4	57,5
1.000	6	24	82,6	12	71
1.250	5,5	27,5	100,8	15	88,8
1.600	6	32	126	19,2	113,9
2.000	7	38	155,3	22	140,6
2.500	7	45	191,5	30	178,2

Tabla E4-006: consumo de potencia reactiva para transformadores de distribución de $V1 = 20 \text{ kV}$.

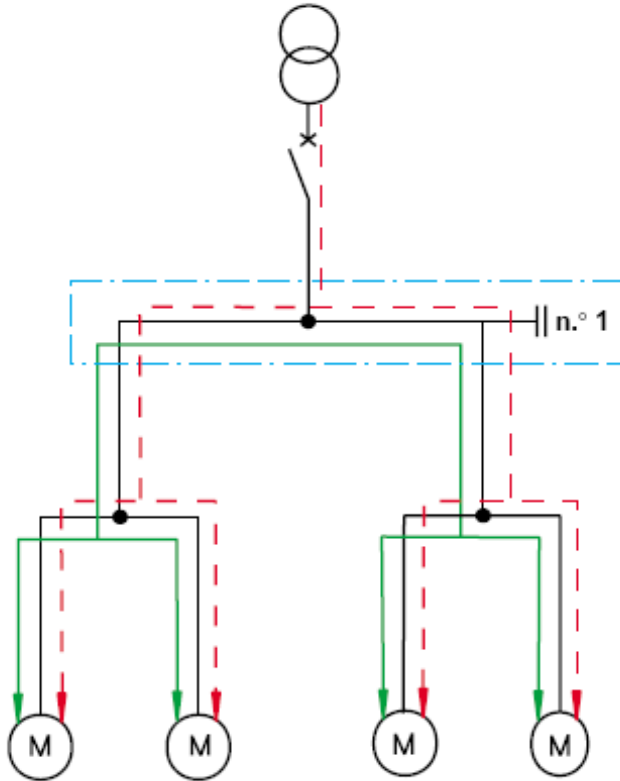
COMPENSACIÓN DE REACTIVA

CONDENSADORES FIJOS

CONDENSADORES VARIABLES



COMPENSACIÓN DE REACTIVA



GLOBAL

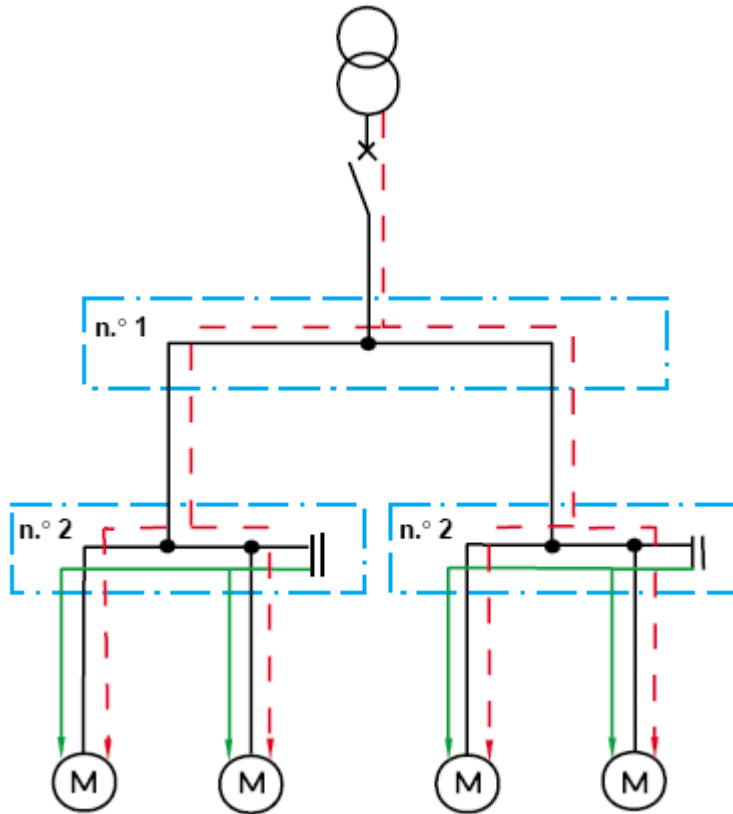
VENTAJAS:

- Dimensión óptima de la batería y máximo de horas de funcionamiento
- Evita la penalización por consumo de reactiva
- Disminuye la potencia aparente
- Optimiza el rendimiento del transformador de la acometida

DESVENTAJAS:

- No disminuye la reactiva en la instalación
- Pérdidas dentro de la instalación

COMPENSACIÓN DE REACTIVA



PARCIAL

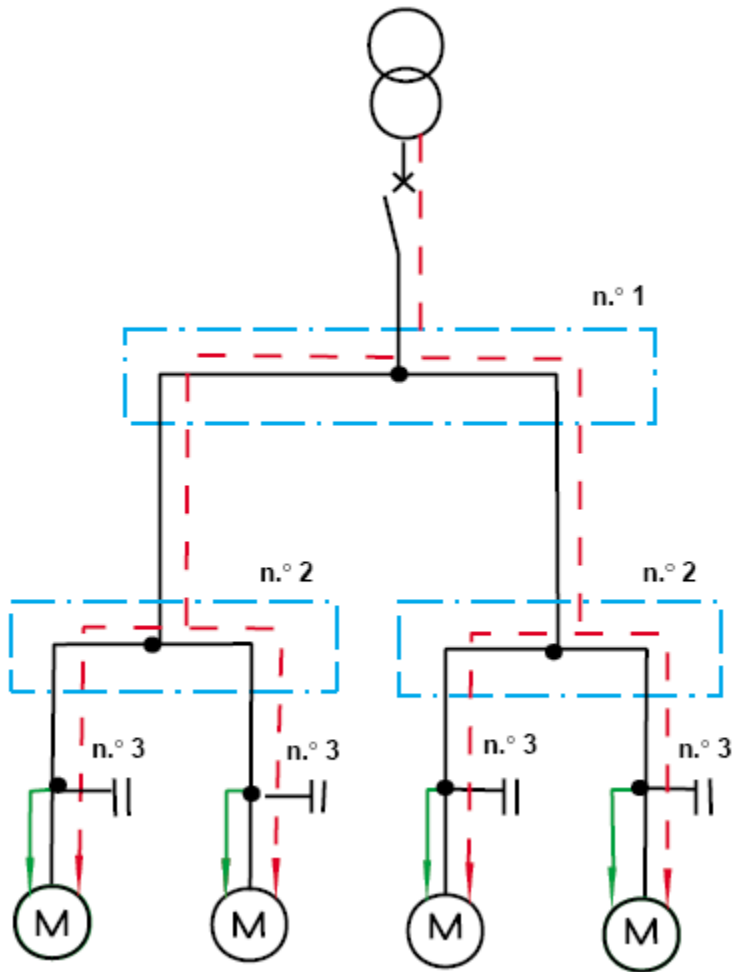
VENTAJAS:

- Optimiza parte de la instalación
- Evita la penalización por consumo de reactiva
- Disminuye la potencia aparente
- Optimiza el rendimiento del transformador de la acometida

DESVENTAJAS:

- No disminuye la reactiva por debajo de la compensación
- Pérdidas dentro de la instalación

COMPENSACIÓN DE REACTIVA



INDIVIDUAL

VENTAJAS:

- Optimiza parte de la instalación
- Evita la penalización por consumo de reactiva
- Disminuye la potencia aparente
- Optimiza el rendimiento del transformador de la acometida

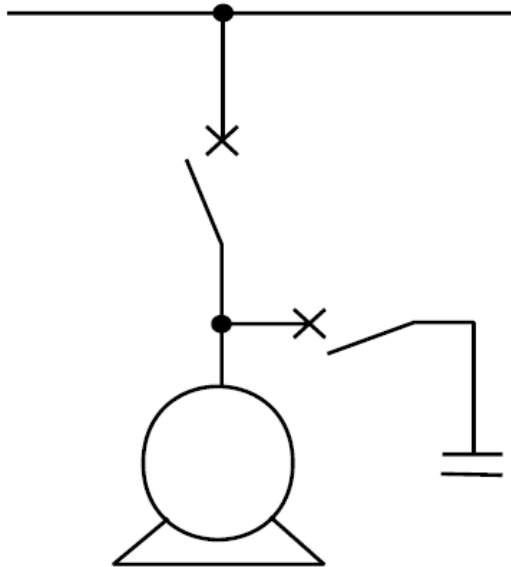
DESVENTAJAS:

- Solo para grandes cargas inductivas. Alto coste

COMPENSACIÓN DE REACTIVA. ESQUEMA DE CONEXIONADO DE UN MOTOR

Hay que evitar la autoexcitación del motor

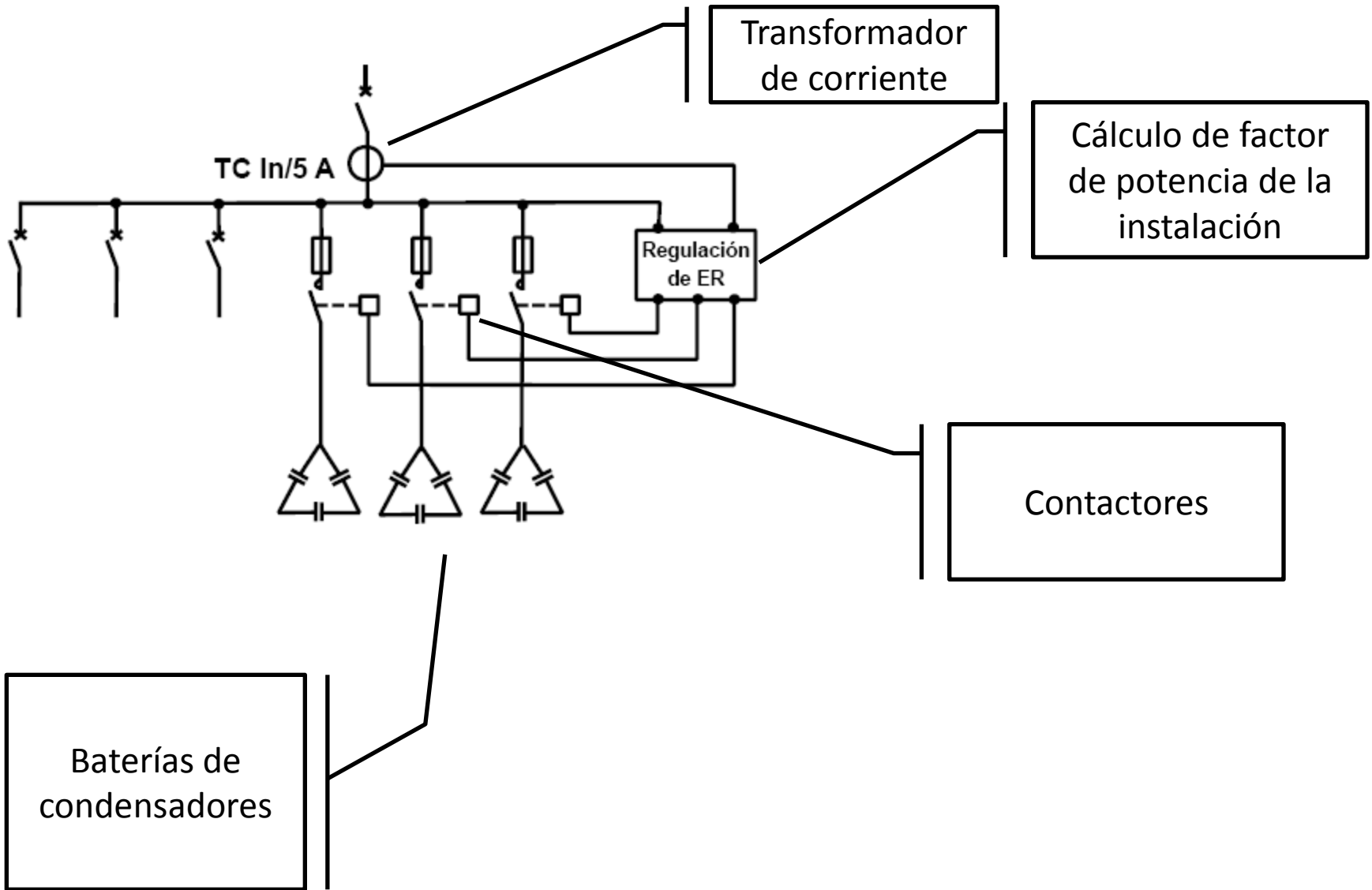
$$Q_c \leq 0,9 \cdot I_0 \cdot U_n \sqrt{3}$$



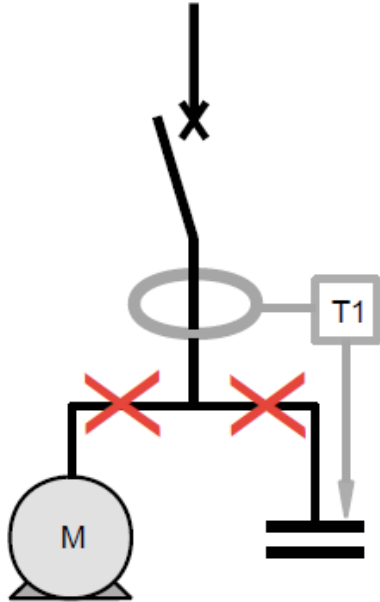
En caso de fallo del suministro la batería de condensadores debe desconectarse del motor para evitar autoexcitación

Máxima potencia a compensar en los motores trifásicos					
Potencia nominal		Potencia máxima en kVAr a instalar			
		Velocidad en rpm			
kW	ch	3.000	1.500	1.000	750
22	30	6	8	9	10
30	40	7,5	10	11	12,5
37	50	9	11	12,5	16
45	60	11	13	14	17
55	75	13	17	18	21
75	100	17	22	25	28
90	125	20	25	27	30
110	150	24	29	33	37
132	180	31	36	38	43
160	218	35	41	44	52
200	274	43	47	53	61
250	340	52	57	63	71
280	380	57	63	70	79
355	482	67	76	86	98
400	544	78	82	97	106
450	610	87	93	107	117

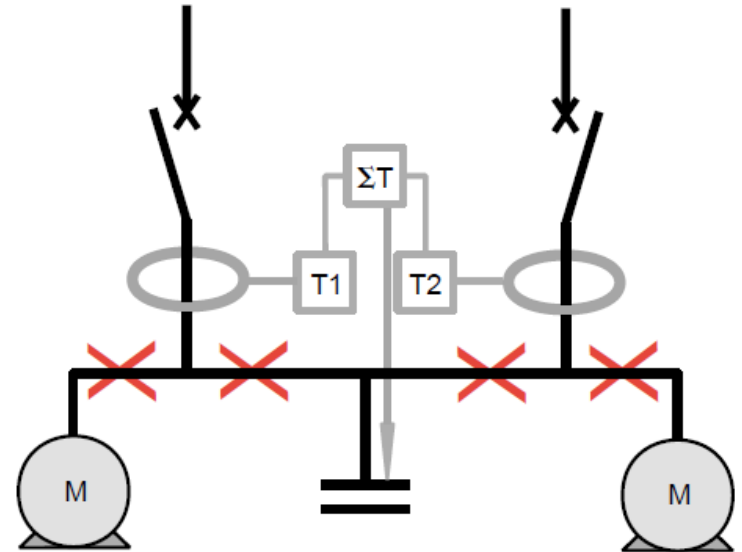
CONDENSADORES VARIABLES



CONDENSADORES VARIABLES. Situación de los TI



Cargas alimentándose de un solo
embarrado



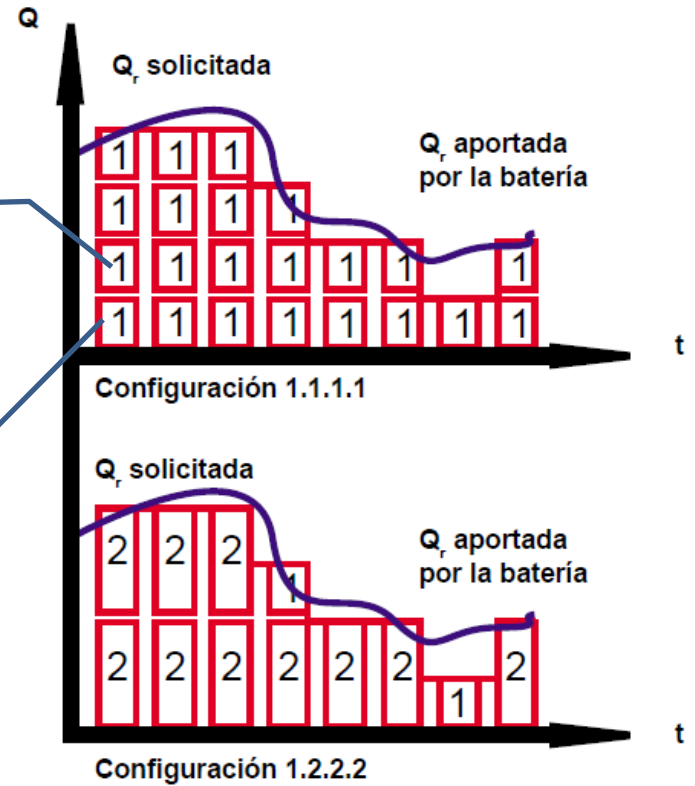
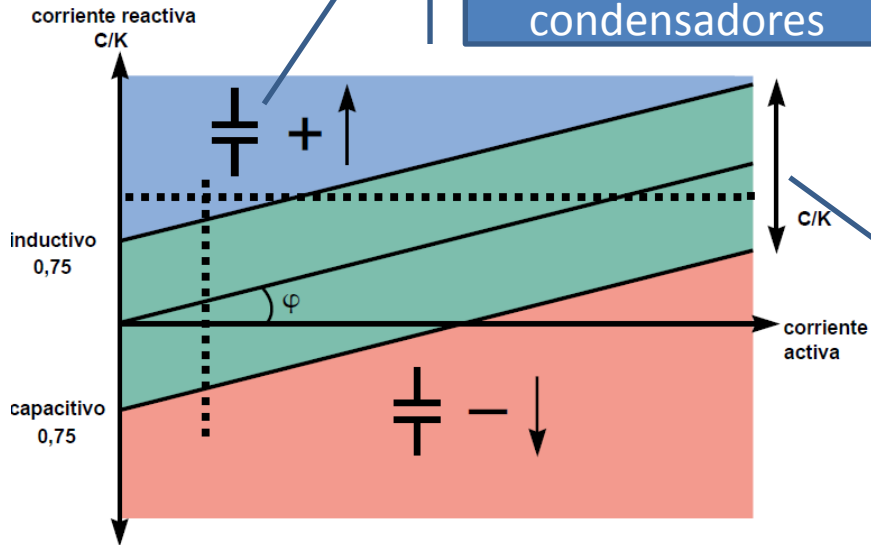
Cargas alimentándose de varios
embarrados

CONDENSADORES VARIABLES. Regulación con escalones

Múltiplos del
escalón base

Escalón
base

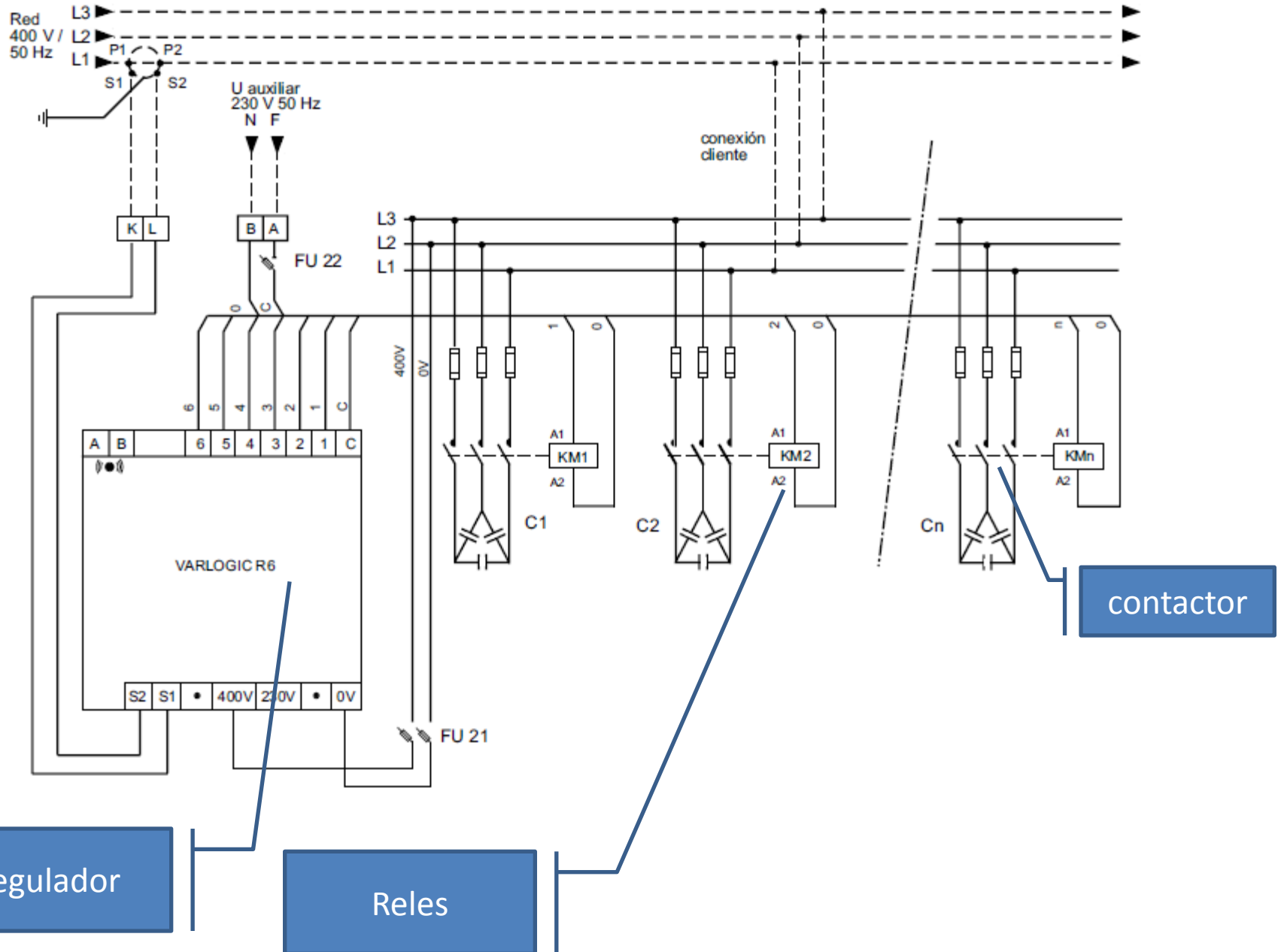
Introducción de un
nuevo escalón de
condensadores



En la regulación con escalones se deja una banda muerta para evitar conexiones – desconexiones de las baterías de condensadores

Banda muerta

CONDENSADORES VARIABLES. Esquema de regulación



Condensadores
Variables

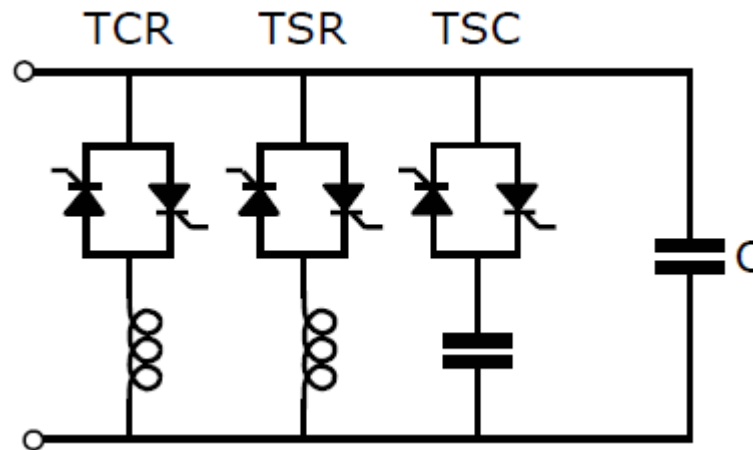
Reactancias
variables



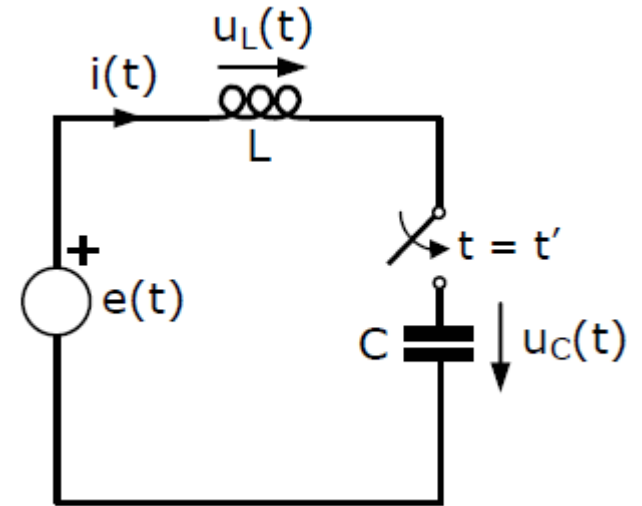
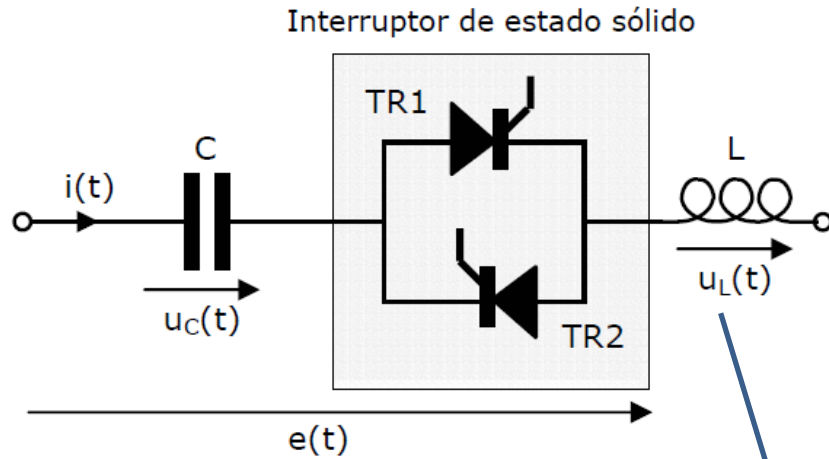
CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua

SVC. Static Var Compensator

Está constituido por baterías de condensadores conmutados (TSC), bobinas conmutadas (TSR) o bobina controladas (TCR)



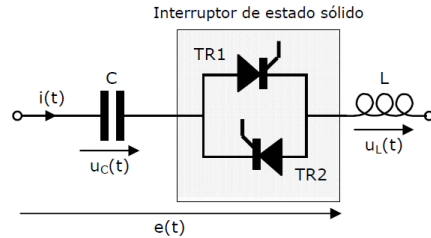
CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



Circuito equivalente

Controla la derivada de la corriente y protege los semiconductores

CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



$$u_a(t) = K_1 \cos \omega_0(t - t') + K_2 \sin \omega_0(t - t')$$

$$u_p(t) = \sqrt{2}U_c \cos \omega t$$

$$i(t) = i_a(t) + i_p(t)$$

$$i_a(t) = -\omega_0 C K_1 \sin \omega_0(t - t') + \omega_0 C K_2 \cos \omega_0(t - t')$$

$$i_p(t) = -\omega C \sqrt{2}U_c \sin \omega t$$

$$U_c = E \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2}$$

$$K_1 = U_0 - \sqrt{2}U_c \cos \theta$$

$$K_2 = \frac{\omega}{\omega_0} \sqrt{2}U_c \sin \theta$$

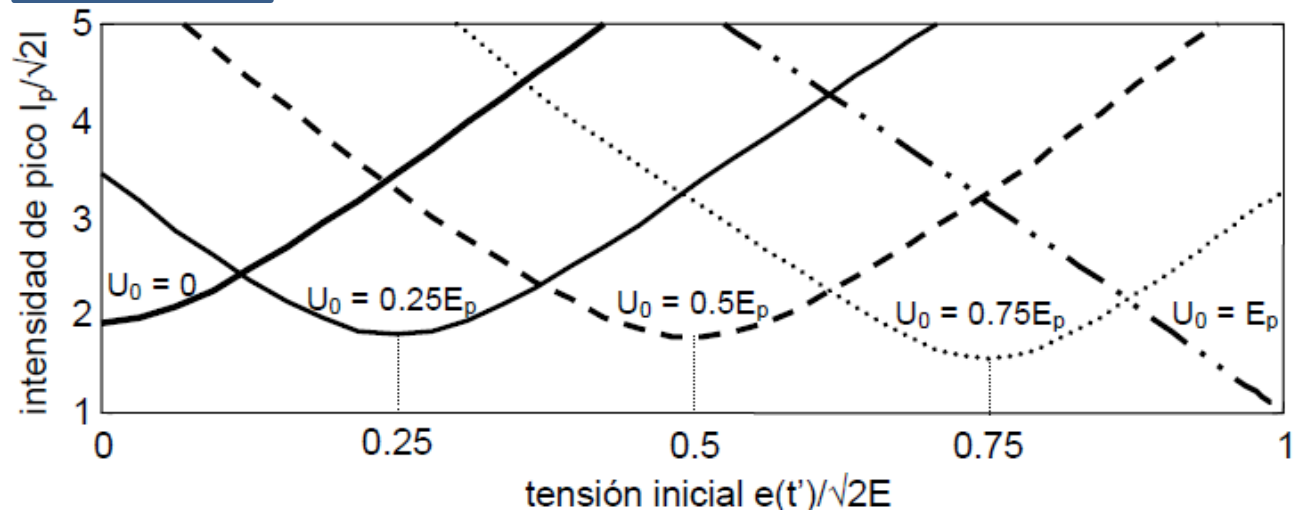
Ángulo de disparo
tiristores

Para evitar sobrecorrientes en el transitorio de conexión se debe cumplir:

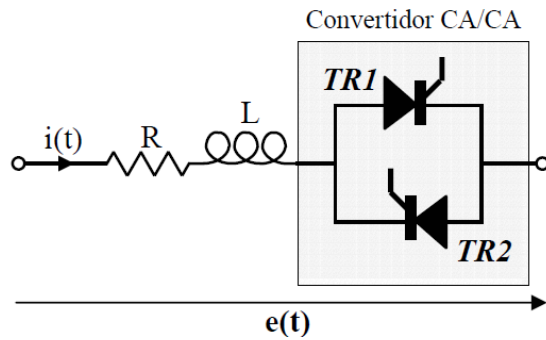
-Ángulo de disparo de los tiristores sea 0 o π $\theta = 0 \text{ ó } \pi$

-La tensión residual en el condensador sea igual al valor de pico de su tensión en régimen permanente

$$U_0 = \pm \sqrt{2}E \frac{1}{1 - \omega^2/\omega_0^2} \quad \omega_0 = 1/\sqrt{LC}$$

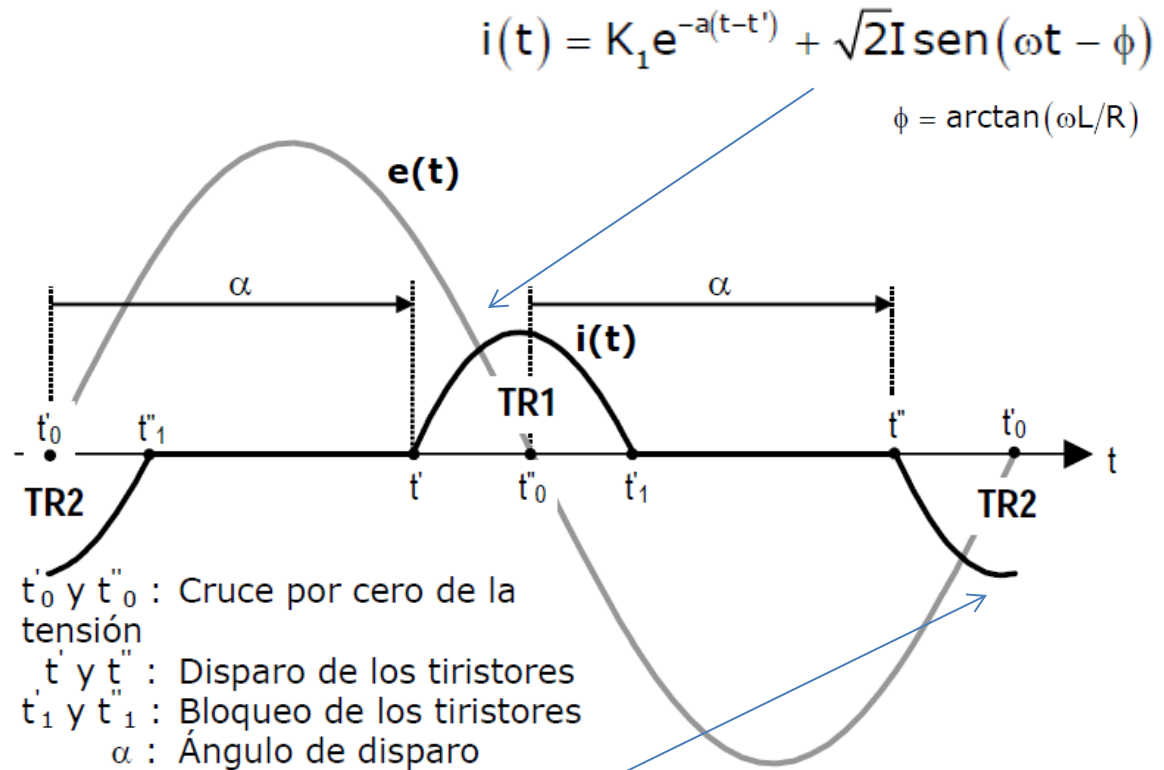


CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



Límites del ángulo de disparo

$$\phi \leq \alpha \leq \pi$$

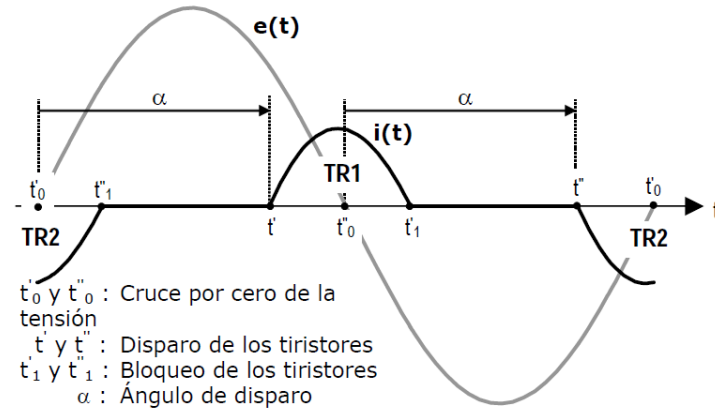
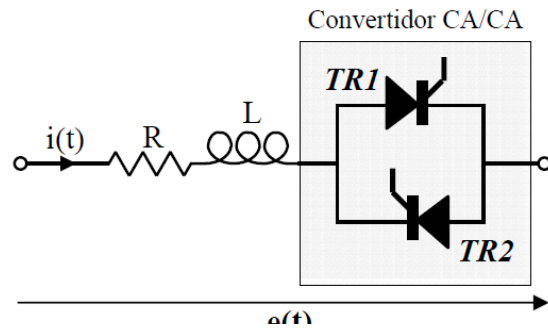


$$i(t) = K_2 e^{-a(t-t'')} + \sqrt{2}I \sin(\omega t - \phi)$$

$$K_1 = -\sqrt{2}I \sin(\omega t' - \phi) = -\sqrt{2}I \sin(\alpha - \phi)$$

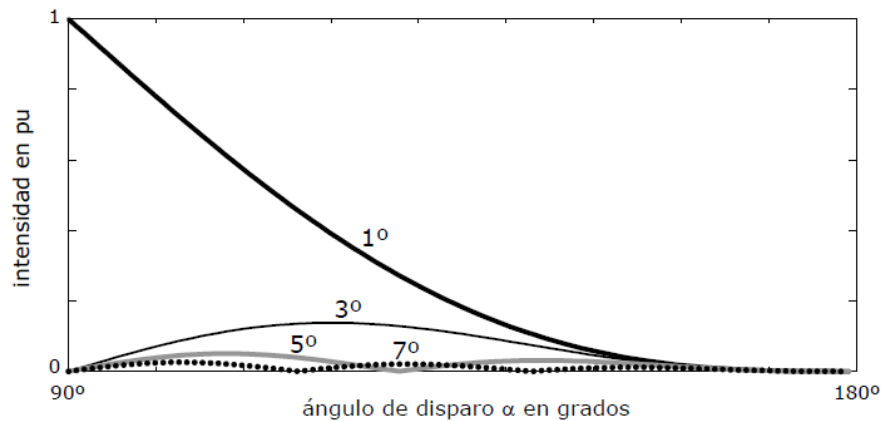
$$K_2 = -\sqrt{2}I \sin(\omega t'' - \phi) = -\sqrt{2}I \sin(\pi + \alpha - \phi)$$

CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua. Análisis armónico

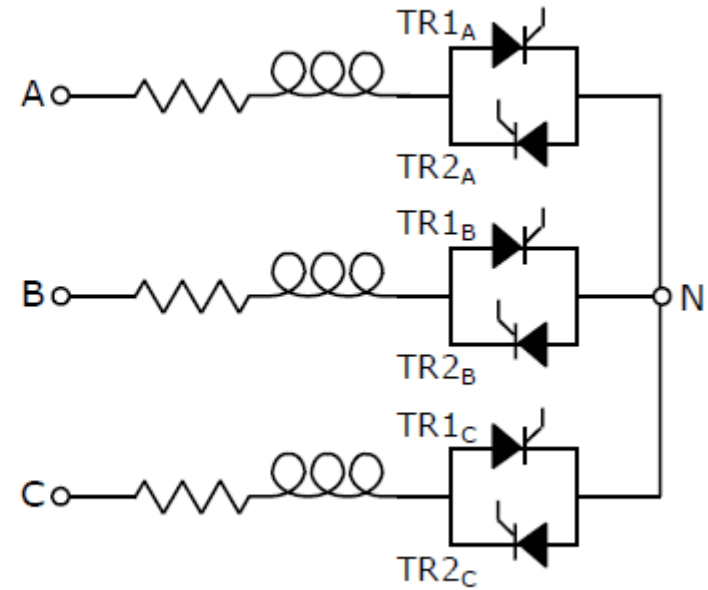
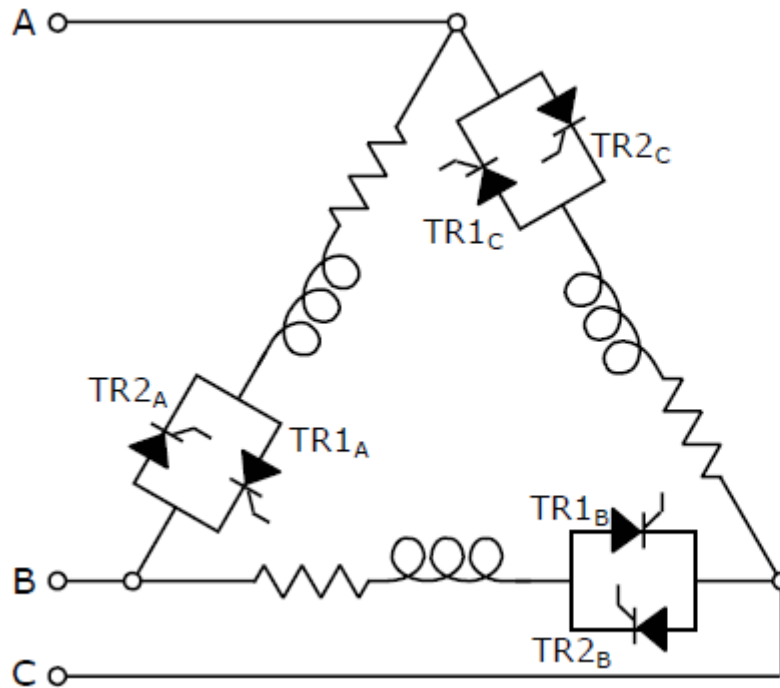


$$I_1 = \frac{2}{\pi} \frac{E}{\omega L} \left(\pi - \alpha - \frac{\sin(2\alpha - \pi)}{2} \right)$$

$$I_h = \frac{4E}{\pi \omega L} \left[\frac{\sin(h+1)\alpha}{2(h+1)} + \frac{\sin(h-1)\alpha}{2(h-1)} - \cos \alpha \frac{\sinh \alpha}{h} \right]$$



CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



Límites de funcionamiento

$$\phi(\approx \pi/2) < \alpha < \pi$$

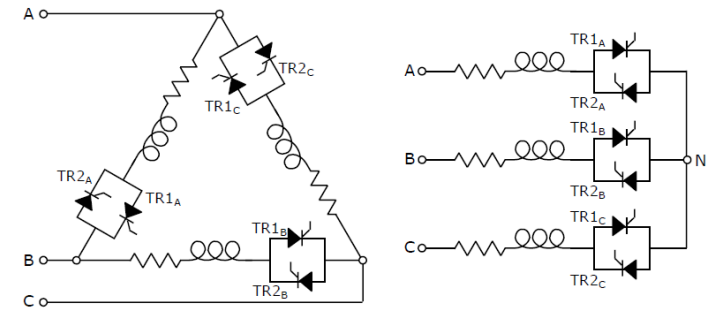
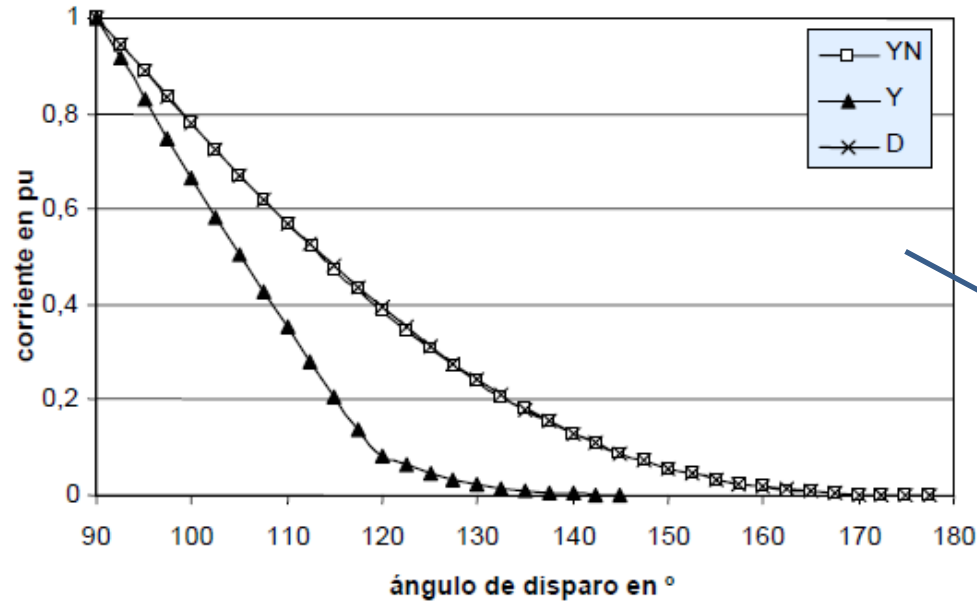
Límites de funcionamiento YN

$$\phi(\approx 90^\circ) < \alpha < 5\pi/6 (150^\circ)$$

Solo hay armónicos de orden impar

Configuración en triángulo no hay armónicos 3, 9, 15, ... (Componente homopolar)

CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



Evolución de la componente fundamental

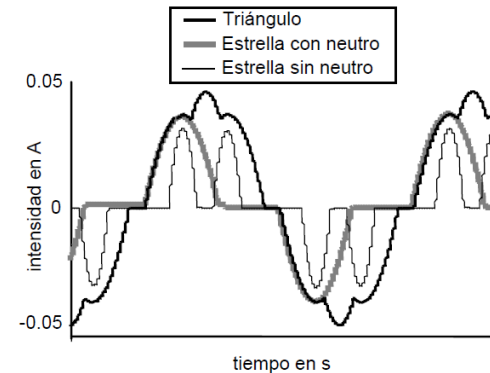
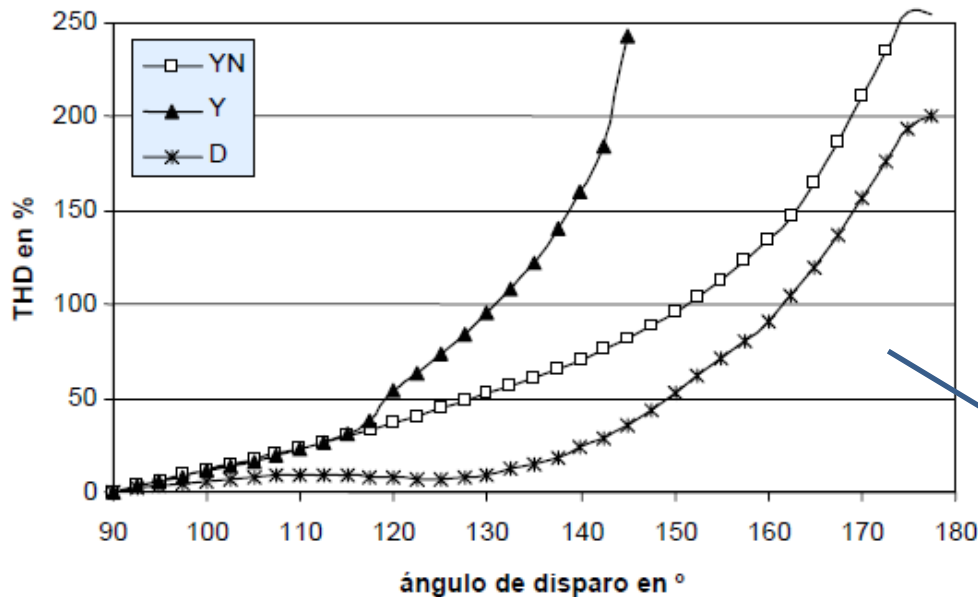


Ilustración 18: Intensidades de línea en un TCR trifásico para un ángulo de disparo $\alpha = 160^\circ$

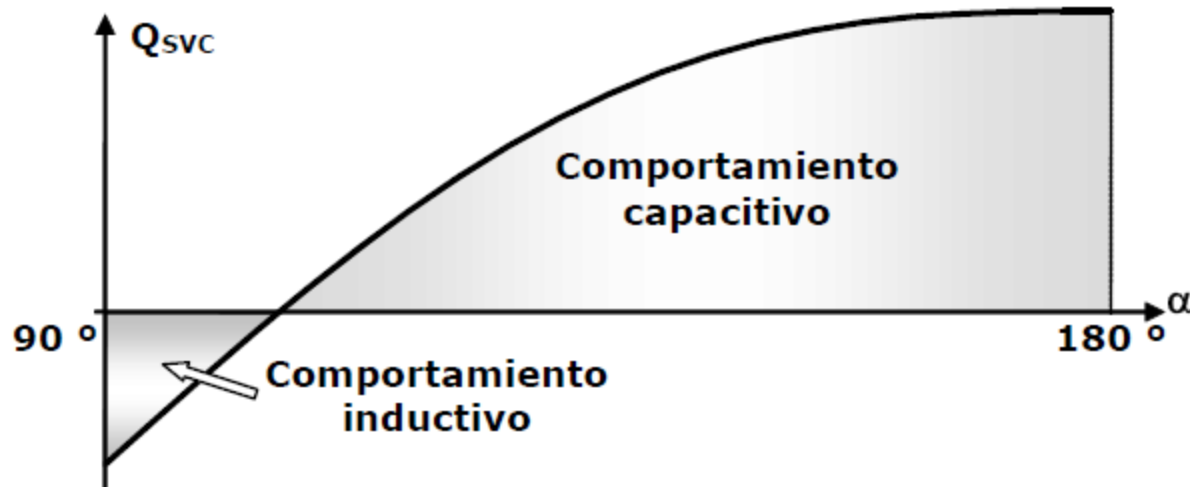
Evolución de la distorsión armónica

CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua

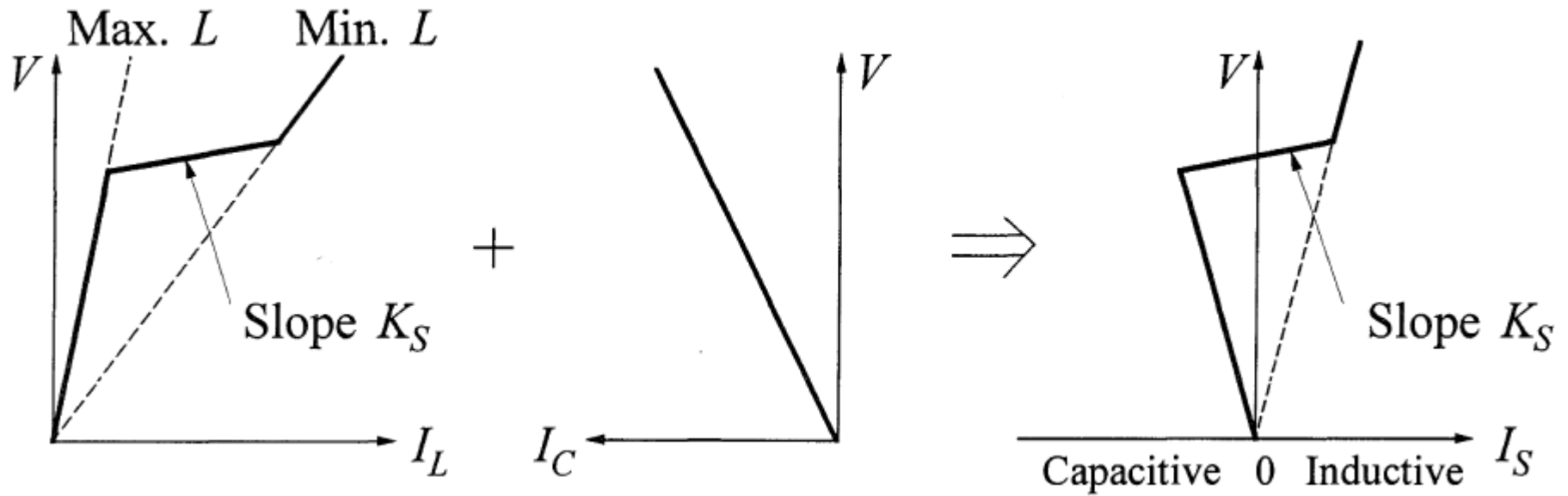
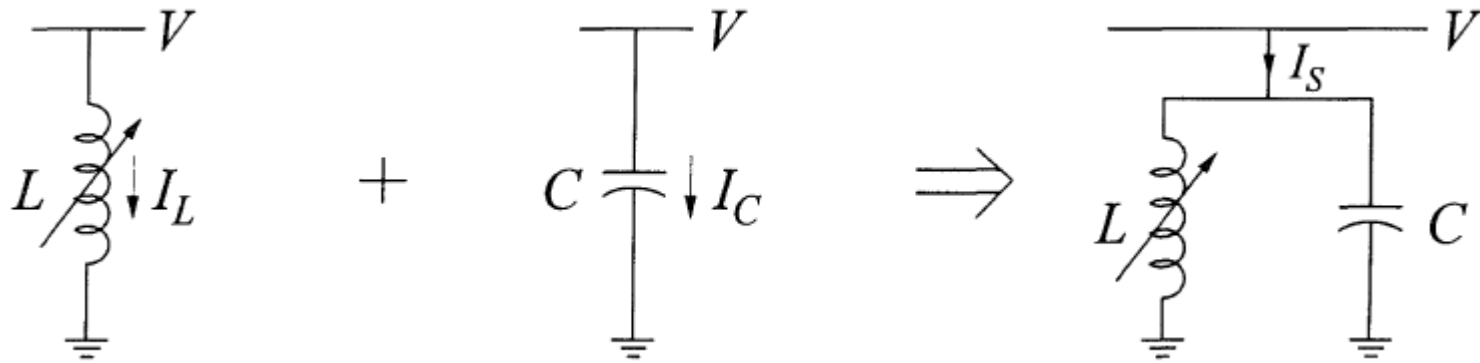
$$I_1 = \frac{2}{\pi} \frac{E}{\omega L} \left(\pi - \alpha - \frac{\sin(2\alpha - \pi)}{2} \right) \longrightarrow \text{Inductancia ficticia} \quad L_\alpha = \frac{\pi L}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha}$$

$$\text{Potencia reactiva} \longrightarrow Q_{L_\alpha} = E^2 / \omega L_\alpha \quad \text{ó} \quad Q_{L_\alpha} = B_\alpha E^2$$

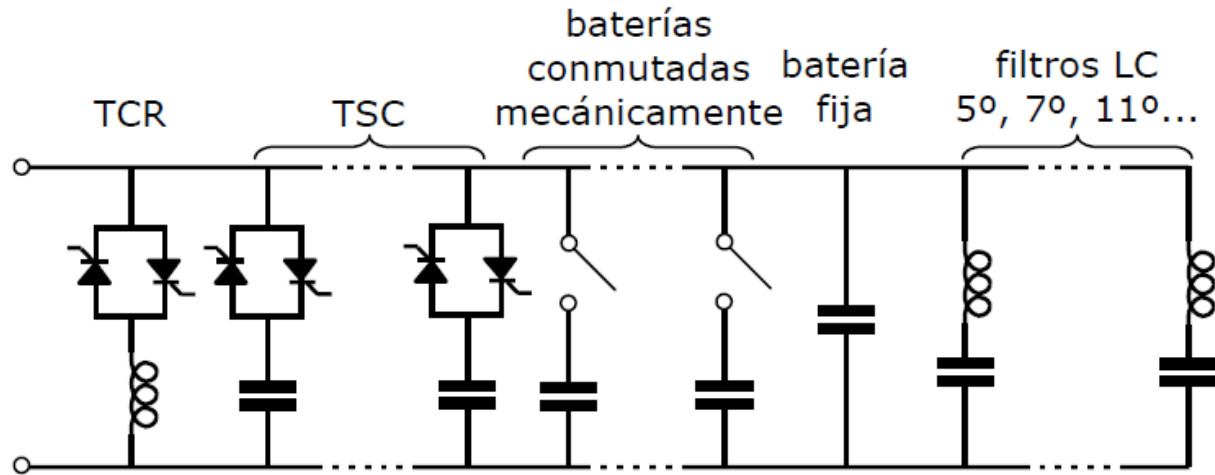
$$\text{Potencia reactiva SVC} \longrightarrow \begin{aligned} Q_{SVC} &= Q_C - Q_{L_\alpha} \\ B_{SVC} &= \omega C - 1 / \omega L_\alpha \end{aligned}$$



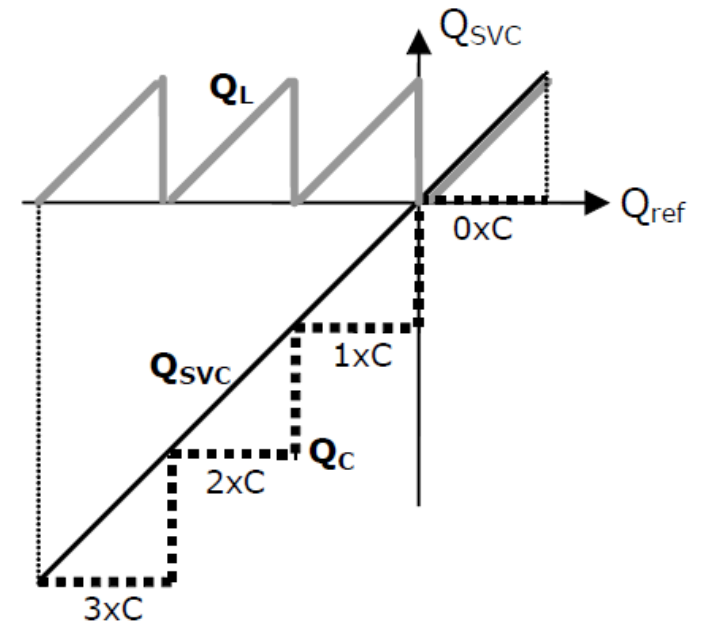
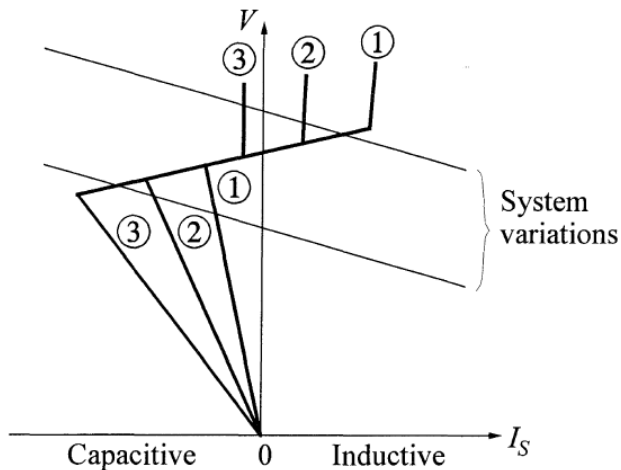
CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua



CONDENSADORES VARIABLES. Regulación continua. Configuración



Los TCR y TSC permiten la regulación fina entre los escalones de las baterías de condensadores

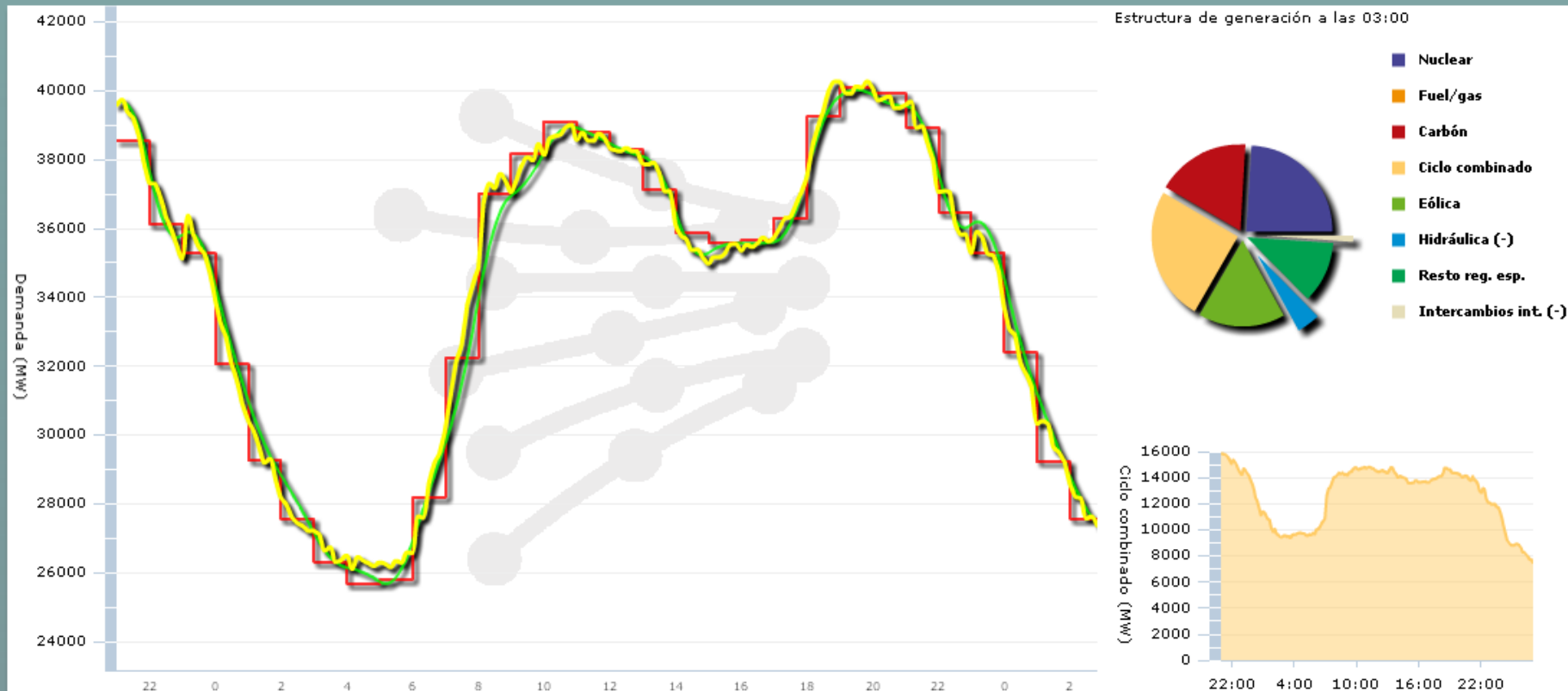


Bibliografía:

- C. Carrillo González , J. Cidrás Pidre, “compensadores estáticos de potencia Reactiva (SVC)”, 2003, <http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/SVC.pdf>
- T.J.E. Miller, “Reactive power control in electric systems”, ed. John Wiley & sons, 1982
- P. Kundur, “Power system stability and control”, McGraw Hill, 1994
- P. Ledesma, “Control de tensión”, Universidad Carlos III, 2008, OCW, <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemas-electricos>
- “La compensación de la energía reactiva”, Manual práctico Schneider

CONSUMO INVIERNO

Demanda de energía eléctrica en tiempo real y estructura de generación



Valores de demanda (MW) a las 03:00 del 11/01/2008 Real = 27045 Prevista = 27202 Programada = 26540

© RED ELECTRICA DE ESPAÑA - www.ree.es • Todos los derechos reservados

2008-01-10

[Consultar otra fecha](#)

Máximo diario

40561 a las 10/01/2008 18:53

Mínimo diario

25817 a las 10/01/2008 04:45

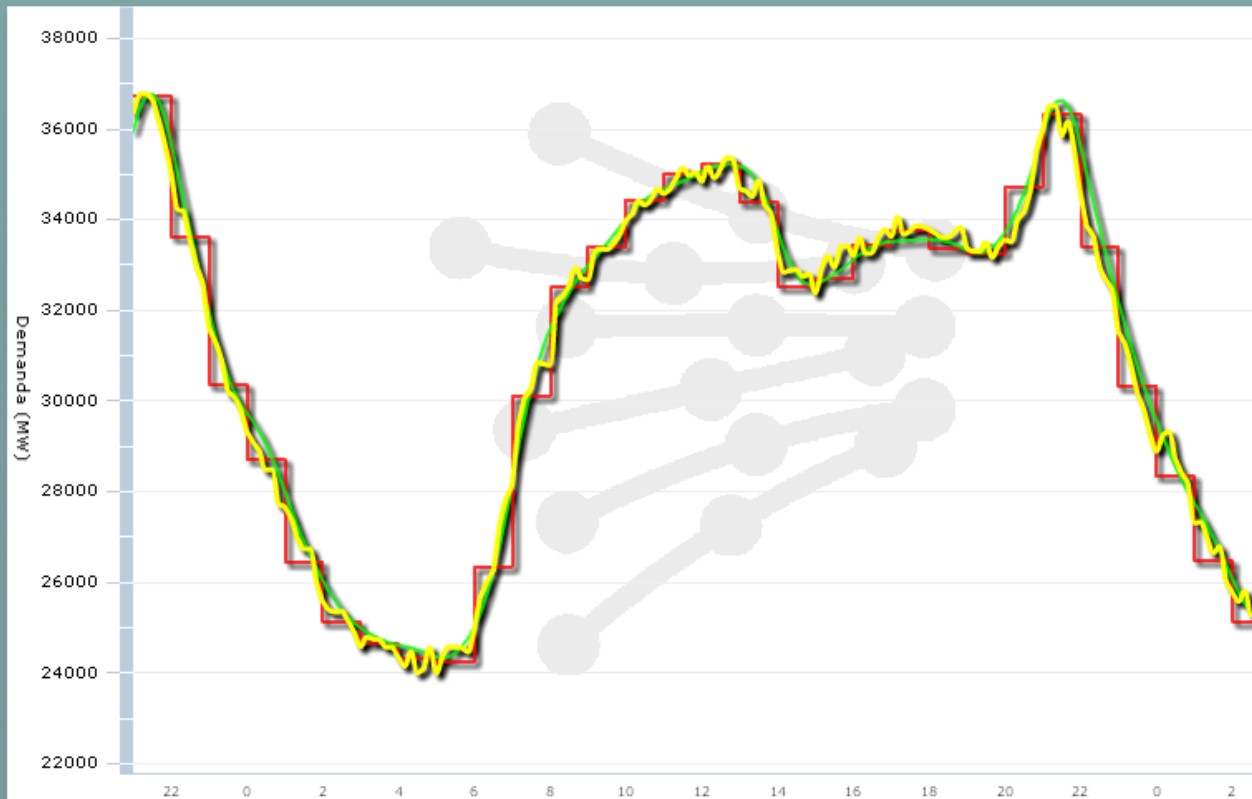
[Solo curva](#)

[Ayuda](#)

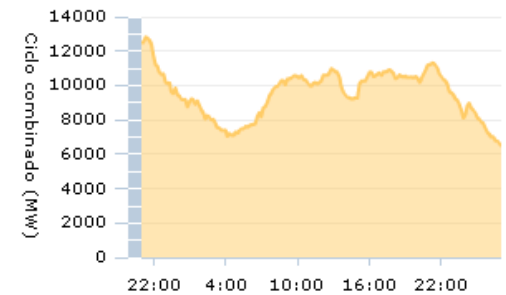
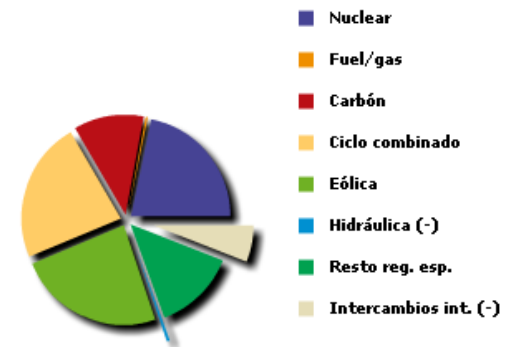
[Imprimir](#)

CONSUMO PRIMAVERA

Demanda de energía eléctrica en tiempo real y estructura de generación



Estructura de generación a las 03:00



Valores de demanda (MW) a las 03:00 del 11/04/2008 Real = 24704 Prevista = 24924 Programada = 24534

© RED ELECTRICA DE ESPAÑA - www.ree.es • Todos los derechos reservados

2008-04-10

[Consultar otra fecha](#)

Máximo diario 37115 a las 09/04/2008 21:25 Mínimo diario 23916 a las 10/04/2008 04:29

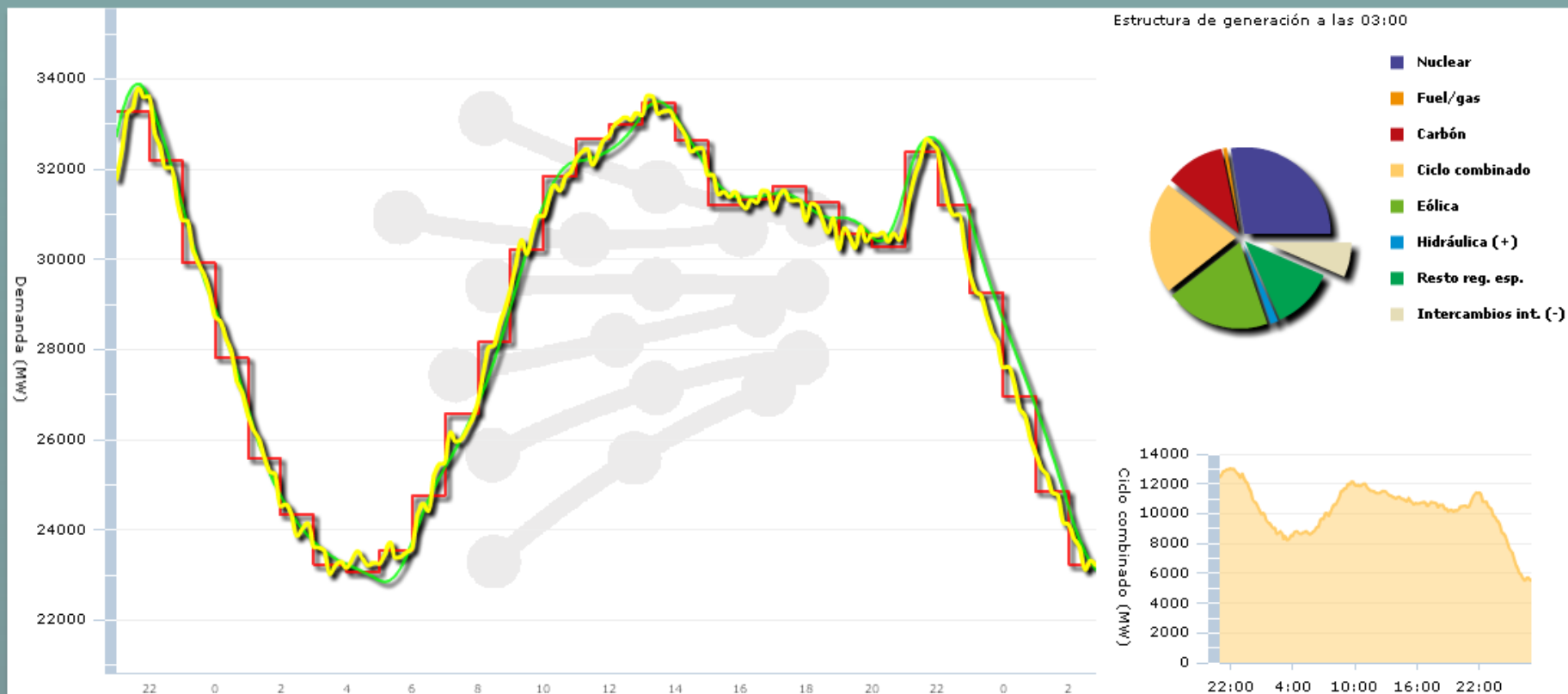
[Solo curva](#)

[Ayuda](#)

[Imprimir](#)

CONSUMO VERANO

Demanda de energía eléctrica en tiempo real y estructura de generación



2008-08-14

[Consultar otra fecha](#)

Máximo diario

33809 a las 14/08/2008 13:11

Mínimo diario

22928 a las 14/08/2008 03:30

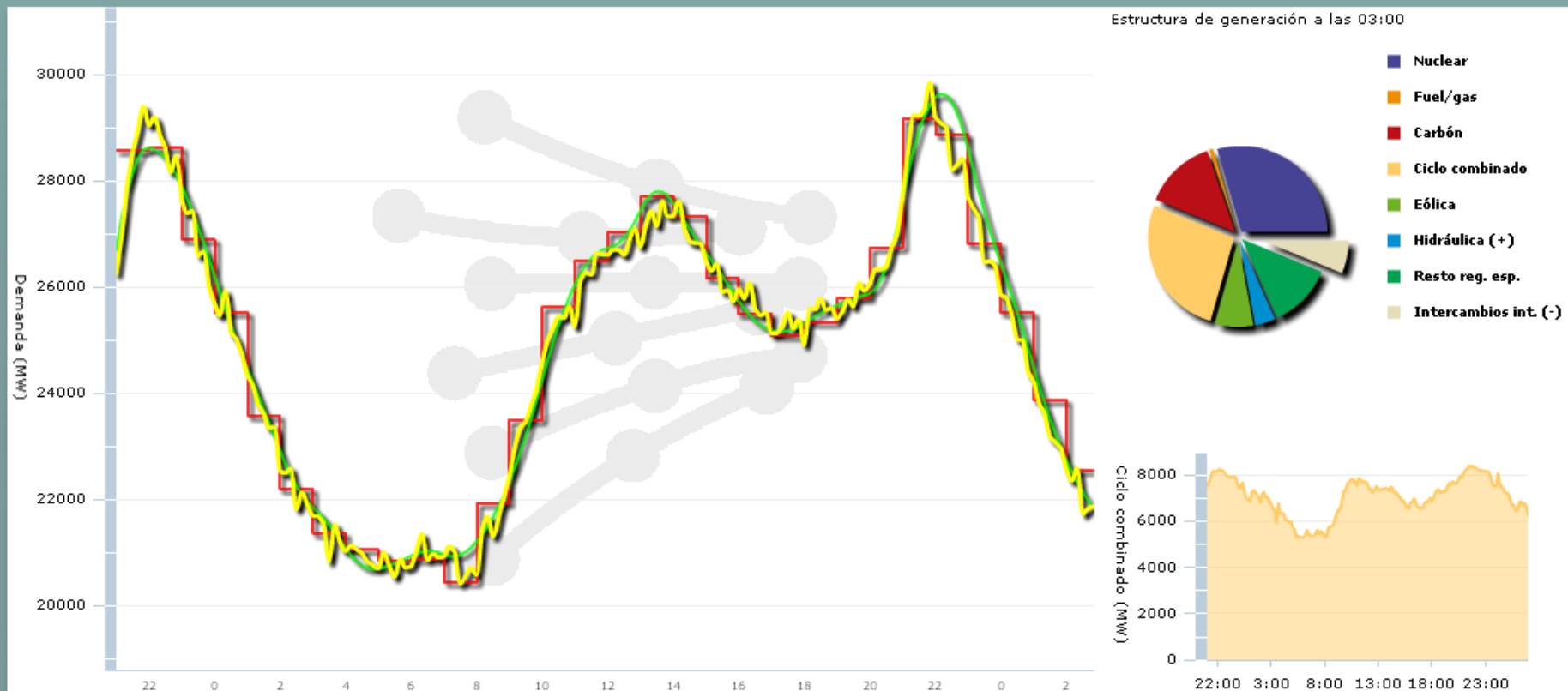
[Solo curva](#)

[Ayuda](#)

[Imprimir](#)

CONSUMO SABADO

Demanda de energía eléctrica en tiempo real y estructura de generación



Valores de demanda (MW) a las 03:00 del 17/08/2008 Real = 21346 Prevista = 21700 Programada = 21316

© RED ELECTRICA DE ESPAÑA - www.ree.es • Todos los derechos reservados

2008-08-16

[Consultar otra fecha](#)

Máximo diario

29888 a las 16/08/2008 21:49

Mínimo diario

20144 a las 16/08/2008 07:41

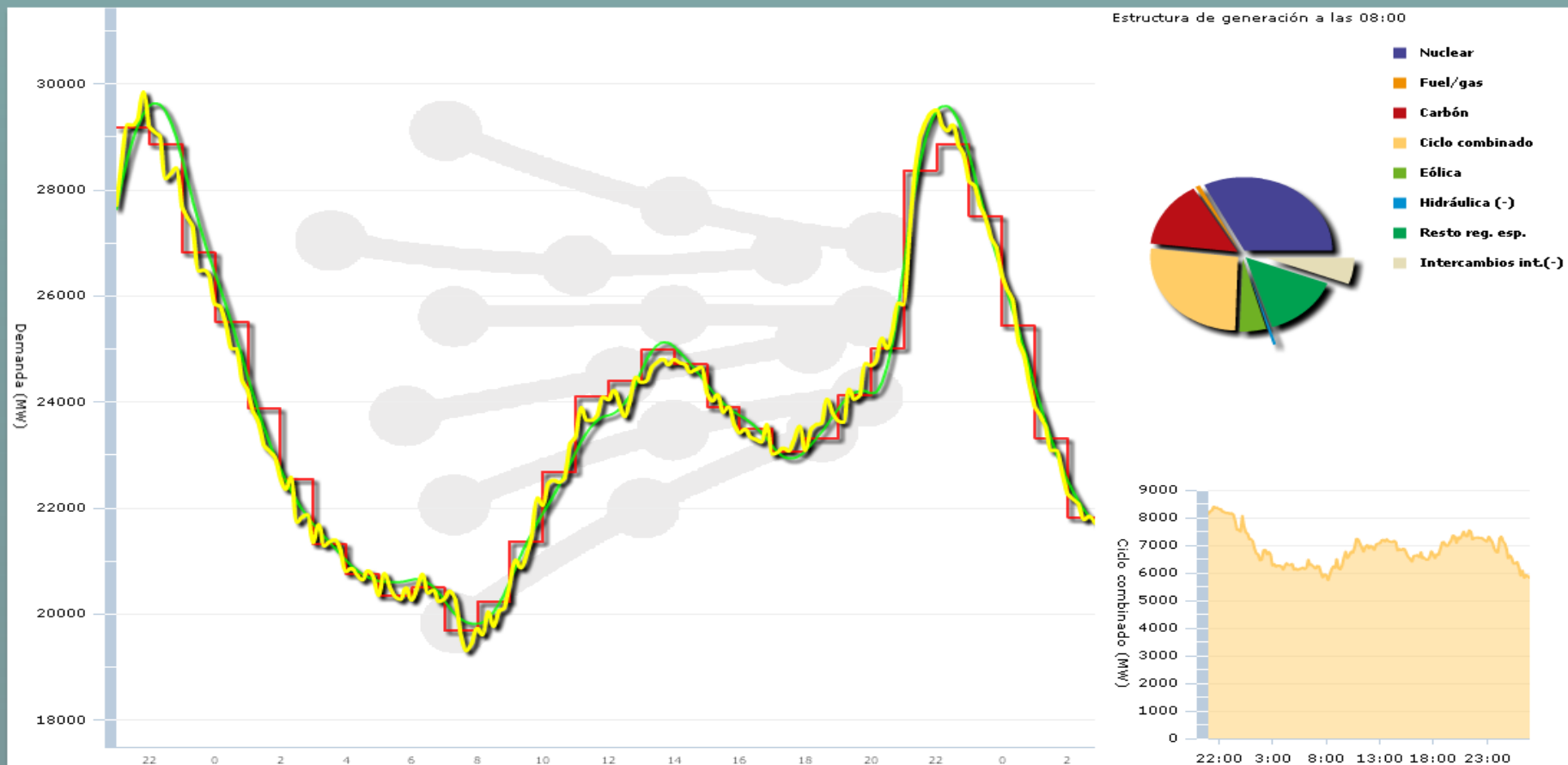
[Solo curva](#)

[Ayuda](#)

[Imprimir](#)

CONSUMO DOMINGO

Demanda de energía eléctrica en tiempo real y estructura de generación



Valores de demanda (MW) a las 03:00 del 18/08/2008 Real = 21440 Prevista = 21653 Programada = 21220

© RED ELECTRICA DE ESPAÑA - www.ree.es • Todos los derechos reservados

2008-08-17

[Consultar otra fecha](#)

[Máximo diario](#)

29888 a las 16/08/2008 21:49

[Mínimo diario](#)

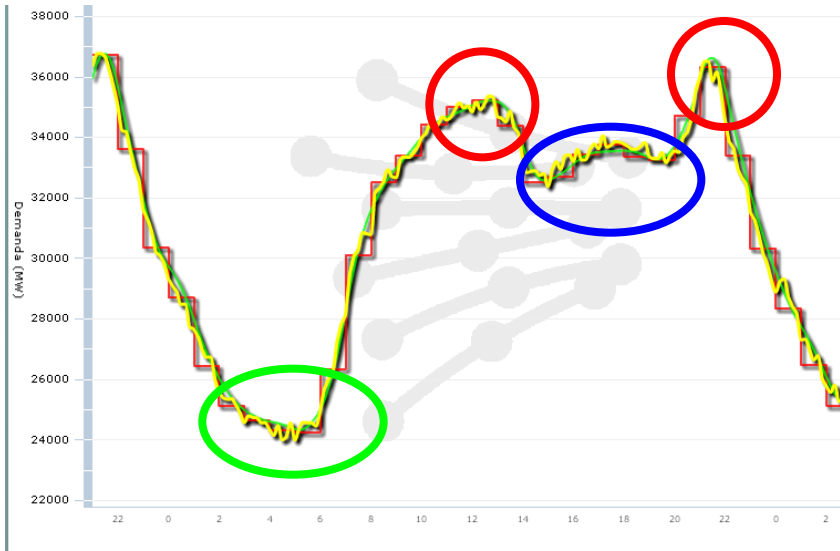
19143 a las 17/08/2008 07:41

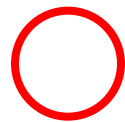
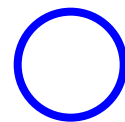
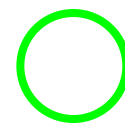
[Solo curva](#)

[Ayuda](#)

[Imprimir](#)

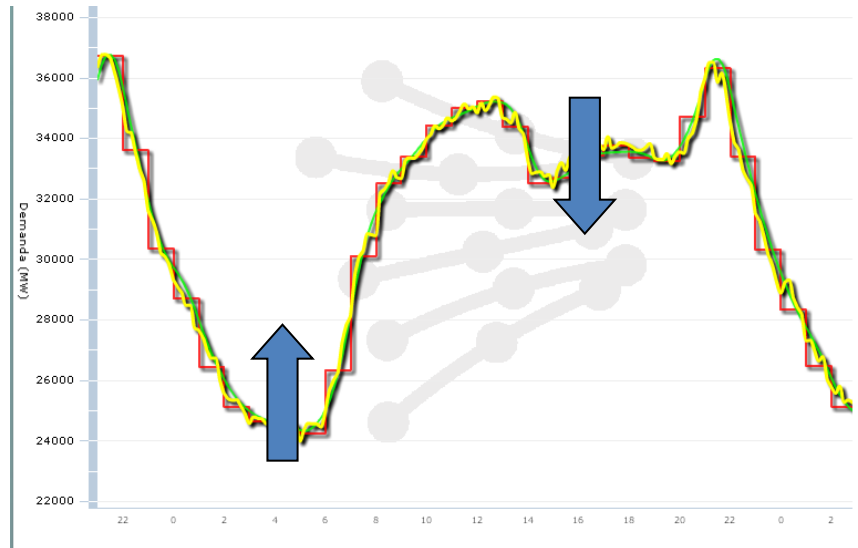
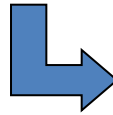
DISCRIMINACIÓN HORARIA



-  HORAS PUNTA
-  HORAS LLANO
-  HORAS VALLE

LO IDEAL PARA EL SISTEMA SERÍA
APLANAR LA CURVA DE CARGA

PARA MEJORAR EL PERFIL DE LA
CURVA DE CARGA, EL SISTEMA
INCENTIVA QUE SE CONSUMA EN
HORAS VALLE Y SE PENALIZA EL
CONSUMO EN HORAS PUNTA
(**DISCRIMINACIÓN HORARIA**)



Tarifas de acceso

Baja tensión (< 1 kV) :

- 2.0A – 1 periodos tarifario
- 2.0DHA – 2 periodos tarifarios
- 3.0 A – 3 periodos tarifarios

Alta tensión (≥ 1 kV) :

- 3.1A 1 – 36 kV (3 periodos tarifarios)
- 6.1 1 – 36 kV (6 periodos tarifarios)

- 6.2 36 – 72.5 kV (6 periodos tarifarios)
- 6.3 72.5 – 145 kV (6 periodos tarifarios)
- 6.4 $\geq$ 145 kV (6 periodos tarifario)

- 6.5 Conexiones Internacionales

TARIFAS DE ACCESO BAJA TENSIÓN

- Tarifa 2.0A:

Tp: 19,708260 €/kW y año.

Te: 0,034957 €/kWh.

1. Tarifa 2.0.DHA:

Tp: 19,708260 €/kW y año.

Te: €/kWh	Período 1	Período 2
	0,043997	0,007177

Invierno		Verano	
Punta	Valle	Punta	Valle
12-22	0-12 22-24	13-23	0-13 23-24

TARIFAS DE ACCESO BAJA TENSIÓN

2. Tarifa 3.0A:

	Período tarifario 1	Período tarifario 2	Período tarifario 3
Tp: €/kW y año	21,240000	21,240000	21,240000
Te: €/kWh	0,046370	0,032431	0,012592

Zona	Invierno			Verano		
	Punta	Llano	Valle	Punta	Llano	Valle
1	18-22	8-18 22-24	0-8	11-15	8-11 15-24	0-8
2	18-22	8-18 22-24	0-8	18-22	8-18 22-24	0-8
3	18-22	8-18 22-24	0-8	11-15	8-11 15-24	0-8
4	19-23	0-1 9-19 23-24	1-9	11-15	9-11 15-24 0-1	1-9

Zona 1: Península.
 Zona 2: Baleares.
 Zona 3: Canarias.
 Zona 4: Ceuta y Melilla.

TARIFAS DE ACCESO ALTA TENSIÓN 3.1 A

1. Tarifa 3.1A:

	Período tarifario 1	Período tarifario 2	Período tarifario 3
Tp: €/kW y año	15,090975	9,306199	2,134018
Te: €/kWh	0,025591	0,022769	0,015201

Zona	Invierno			Verano		
	Punta	Llano	Valle	Punta	Llano	Valle
1	17-23	8-17 23-24	0-8	10-16	8-10 y 16-24	0-8
2	17-23	8-17 23-24	0-8	17-23	8-17 23-24	0-8
3	17-23	8-17 23-24	0-8	10-16	8-10 16-24	0-8

Zona	Invierno			Verano		
	Punta	Llano	Valle	Punta	Llano	Valle
4	18-24	0-1 9-18	1-9	10-16	9-10 19-24 0-1	1-9

Invierno		Verano	
Llano	Valle	Llano	Valle
18-24	0-18	18-24	0-18

Sábados, domingos y festivos

Períodos horarios	Duración
1 = Punta	6 horas de lunes a viernes.
2 = Llano	10 horas de lunes a viernes de los días laborables y 6 horas de sábados, domingos y días festivos de ámbito nacional.
3 = Valle	8 horas de lunes a viernes de los días laborables y 18 horas de sábados, domingos y días festivos de ámbito nacional.

TARIFAS DE ACCESO ALTA TENSIÓN (3.1 A)

2. Tarifa de alta tensión de 6 periodos tarifarios (6.):

Términos de potencia €/KW y año

Tarifa	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1	10,092239	5,050488	3,696118	3,696118	3,696118	1,686408
6.2	8,691805	4,349664	3,183232	3,183232	3,183232	1,452396
6.3	8,162049	4,084557	2,989218	2,989218	2,989218	1,363874
6.4	7,581139	3,793852	2,776470	2,776470	2,776470	1,266805
6.5	7,581139	3,793852	2,776470	2,776470	2,776470	1,266805

Términos de energía €/KWh

Tarifa	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Período 5	Período 6
6.1	0,035714	0,029635	0,016988	0,009645	0,006229	0,004290
6.2	0,011914	0,009886	0,005668	0,003217	0,002078	0,001431
6.3	0,009613	0,007977	0,004572	0,002595	0,001676	0,001155
6.4	0,007544	0,006258	0,003588	0,002037	0,001315	0,000906
6.5	0,007544	0,006258	0,003588	0,002037	0,001315	0,000906

TARIFAS DE ACCESO ALTA TENSIÓN (3.1 A). ITC 2794/2007

Zona 1: Península:

Período tarifario	Tipo de día					
	Tipo A	Tipo A1	Tipo B	Tipo B1	Tipo C	Tipo D
1	De 10 a 13 h. De 18 a 21h	De 11a 19 h.	---	---	---	---
2	De 8 a 10 h. De 13 a 18h. De 21 a 24 h.	De 8 a 11 h. De 19 a 24 h.	---	---	---	---
3			De 9 a 15 h.	De 16 a 22 h.	---	---
4			De 8 a 9 h. De 15 a 24 h.	De 8 a 16 h. De 22 a 24 h.	---	---
5			---	---	De 8 a 24 h.	---
6	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 24

Zonas 2 y 3: Baleares y Canarias:

Periodo tarifario	Tipo de día					
	Tipo A	Tipo A1	Tipo B	Tipo B1	Tipo C	Tipo D
1	De 11 a 14 h. De 18 a 21h	De 11a 19 h.	---	---	---	---
2	De 8 a 11 h. De 14 a 18h. De 21 a 24 h.	De 8 a 11 h. De 19 a 24 h.	---	---	---	---
3			De 9 a 15 h.	De 16 a 22 h.	---	---
4			De 8 a 9 h. De 15 a 24 h.	De 8 a 16 h. De 22 a 24 h.	---	---
5			---	---	De 8 a 24 h.	---
6	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 8	De 0 a 24

COSTE DEL CONSUMO DE REACTIVA, PARA TARIFAS (R.D. 1634/2006)

- Para $1 \geq \cos \varphi > 0,95$:

$$Kr(\%) = \frac{37,026}{\cos^2 \varphi} - 41,026$$

- Para $0,95 \geq \cos \varphi \geq 0,90$

$$Kr(\%) = 0$$

- Para $\cos \varphi < 0,90$

$$Kr(\%) = \frac{29,16}{\cos^2 \varphi} - 36, \text{ con un máximo de } 50,7\% \text{ de recargo.}$$

Cos φ	Recargo %	Descuento %
1,00	–	4,0
0,97	–	1,7
0,95	–	0,0
0,90	0,0	0,0
0,85	4,4	–
0,80	9,6	–
0,75	15,8	–
0,70	23,5	–
0,65	33,0	–
0,60	45,0	–
0,58	50,7	–

COSTE DEL CONSUMO DE REACTIVA, PARA TARIFAS DE ACCESO

Cos Φ	Euro/kVArh
Cos $\Phi < 0,95$ y hasta cos $\Phi = 0,90$	0,000013
Cos $\Phi < 0,90$ y hasta cos $\Phi = 0,85$	0,013091
Cos $\Phi < 0,85$ y hasta cos $\Phi = 0,80$	0,026182
Cos $\Phi < 0,80$	0,039274