

Generadores y cargas eléctricas

Juan Alvaro Fuentes Moreno
juanalvaro.fuentes@upct.es

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad Politécnica de Cartagena

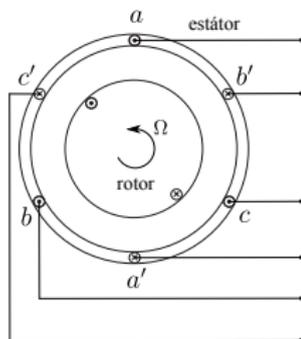
enero 2012

Índice

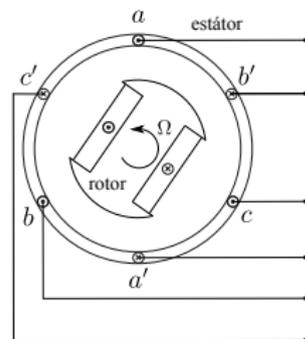
1 Generadores

2 Cargas

La máquina síncrona



Rotor cilíndrico



Rotor de polos salientes

■ Composición:

■ Estátor

- Fijo
- Material ferromagnético de alta permeabilidad
- Ranuras longitudinales \Rightarrow bobinas del devanado por donde circularán intensidades alternas

■ Rotor

- Gira
- Material ferromagnético de alta permeabilidad
- Ranuras longitudinales \Rightarrow bobina del devanado por donde circulará una intensidad continua
- Según su forma:
 - Cilíndrico \Rightarrow \uparrow rpm
 - Polos salientes \Rightarrow \downarrow rpm

La máquina síncrona en vacío

- Se dice que está en vacío si $i_a = i_b = i_c = 0$
- Por el devanado del rotor circula $I_{exc} \Rightarrow$ Crea un campo magnético proporcional a I_{exc}
- Girando el rotor con velocidad Ω este campo magnético induce en el estátor:

$$e_{aa'}^{I_{exc}} = \sqrt{2}E \text{ sen}(\omega t)$$

$$e_{bb'}^{I_{exc}} = \sqrt{2}E \text{ sen}(\omega t - 120)$$

$$e_{cc'}^{I_{exc}} = \sqrt{2}E \text{ sen}(\omega t + 120)$$

■ Donde

- $E = k\omega I_{exc}$
 - k aglutina varias constantes
 - I_{exc} es la intensidad del devanado del rotor
- $\omega = \Omega p$, siendo p el número de pares de polos

- Al estar en carga $i_a, i_b, i_c \neq 0 \Rightarrow$ Se crea un campo magnético adicional al del rotor
 - Como los devanados están desfasados 120° en el espacio y las intensidades 120° en el tiempo \Rightarrow El campo gira con velocidad Ω
- Al girar con velocidad Ω este campo magnético induce en el estátor:

$$e_{aa'}^{i_{abc}} = \sqrt{2}\omega L_{ri} I \sin(\omega t + \phi_{I_a})$$

$$e_{bb'}^{i_{abc}} = \sqrt{2}\omega L_{ri} I \sin(\omega t - 120 + \phi_{I_a})$$

$$e_{cc'}^{i_{abc}} = \sqrt{2}\omega L_{ri} I \sin(\omega t + 120 + \phi_{I_a})$$

- Donde
 - L_{ri} : coeficiente de inducción del devanado del estátor ($\phi_{aa'} = L_{ri} i_a$)
 - El sistema de intensidades es equilibrado y en RES $\Rightarrow i_a$ es $\bar{I}_a = I \angle \phi_{I_a}$
- Este campo magnético y su fem asociada es lo que se conoce como la *reacción del inducido*

- Por lo tanto, la fem resultante será:

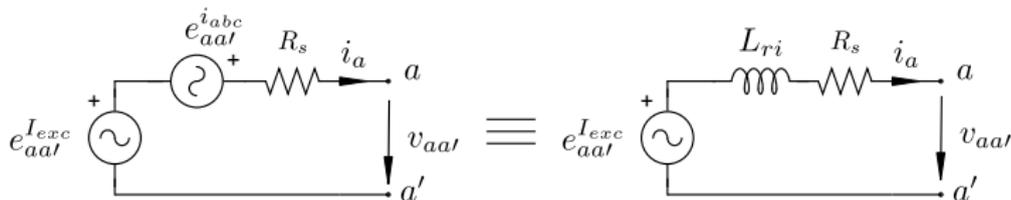
$$e_{aa'}^{res} = e_{aa'}^{exc} + e_{aa'}^{i_{abc}}$$

$$e_{bb'}^{res} = e_{bb'}^{exc} + e_{bb'}^{i_{abc}}$$

$$e_{cc'}^{res} = e_{cc'}^{exc} + e_{cc'}^{i_{abc}}$$

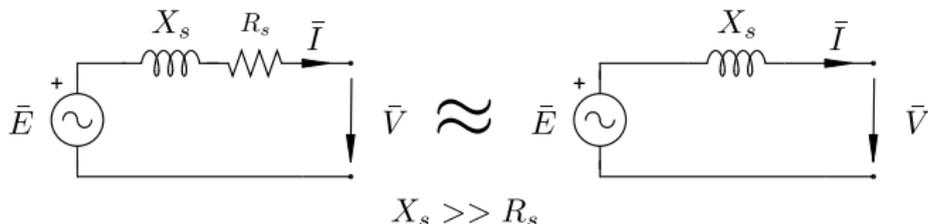
■ Circuito eléctrico equivalente

- Igualando el trabajo total al trabajo de las fuerzas conservativas y no conservativas



- Añadiendo el flujo de dispersión $\Rightarrow L_s = L_{ri} + L_{dispersion}$

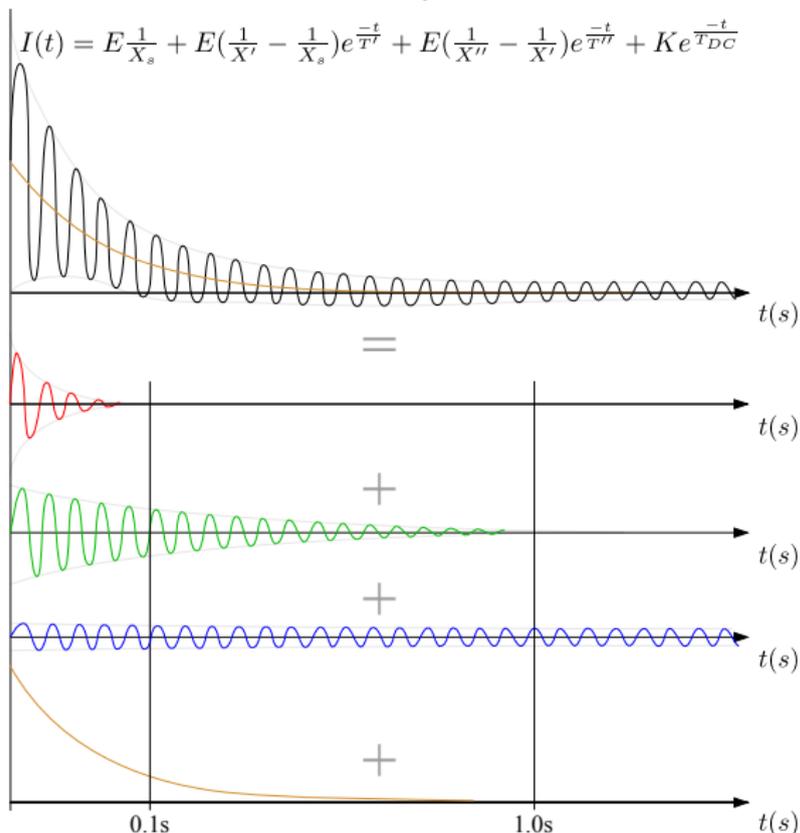
- En RES



- R_s = resistencia por fase del devanado del estátor
- X_s = reactancia síncrona que se obtiene del ensayo de cortocircuito
- $E = k\omega I_{exc}$ = fem que se obtiene del ensayo de vacío
- Como $X_s \gg R_s$ utilizaremos el circuito equivalente aproximado

La máquina síncrona: comportamiento en cortocircuito

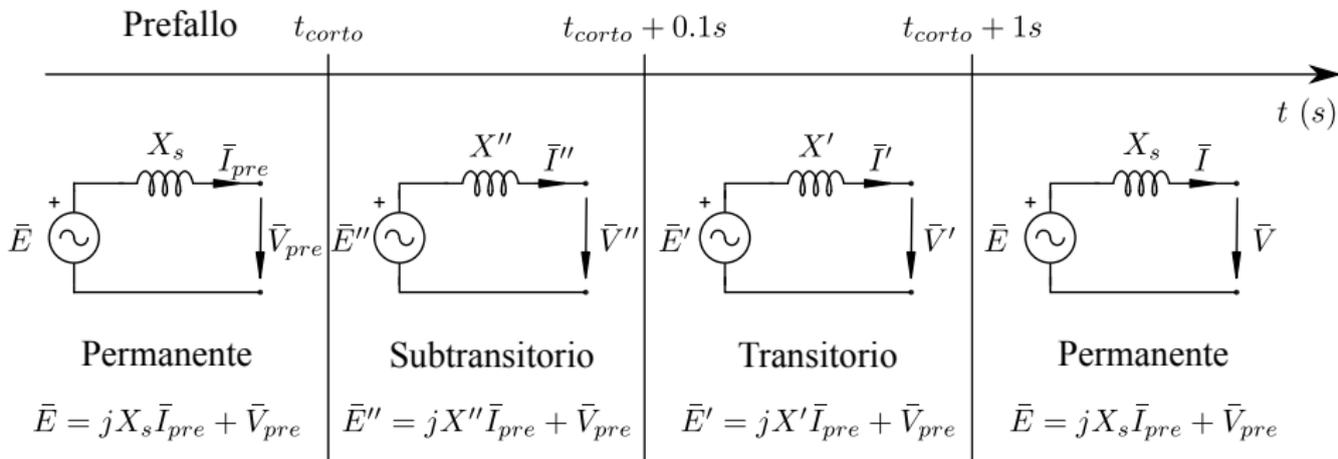
■ Intensidad de fase en bornes de una máquina síncrona durante un cortocircuito



La máquina síncrona: modelos eléctricos durante el cortocircito

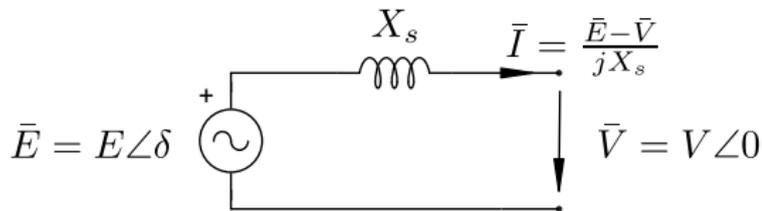
■ Modelos eléctricos utilizados durante el cortocircito

- El tiempo de validez de cada periodo depende de la máquina síncrona
- Tomaremos como referencia 0.1 s para el subtransitorio y 1 s para el transitorio



La máquina síncrona: potencia suministrada

- Utilizando el circuito equivalente en régimen permanente con $R_s \approx 0$



$$\bar{S}_{gen} = \bar{V} \bar{I}^* \implies \bar{S}_{gen} = \bar{V} \left(\frac{\bar{E} - \bar{V}}{j X_s} \right)^* \left\{ \begin{array}{l} P_{gen} = \frac{EV}{X_s} \sin \delta \\ Q_{gen} = \frac{V(E \cos \delta - V)}{X_s} \end{array} \right.$$

- Control de activa y reactiva: Actuando sobre el par mecánico, T_m , y sobre I_{exc}

- Control de activa: Varía T_m pero no $I_{exc} \Rightarrow P_{gen}$ *si varía y E no varía*

Si varía $P_{gen} = \frac{EV}{X_s} \sin \delta \Rightarrow \delta$ varía y $Q_{gen} = \frac{V(E \cos \delta - V)}{X_s}$ *también*

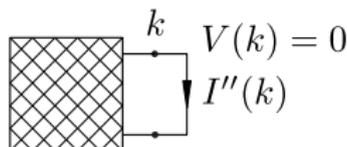
- Solución: $\delta \downarrow$

- Control de reactiva: No varía T_m pero si $I_{exc} \Rightarrow P_{gen}$ *no varía y E si varía*

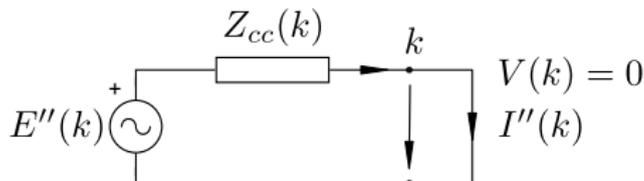
Si no varía $P_{gen} = \frac{EV}{X_s} \sin \delta \Rightarrow E \sin \delta = \text{cte}$ y $Q_{gen} = \frac{V(E \cos \delta - V)}{X_s}$ varía

Equivalentes de Thevenin: potencia de cortocircuito

SEP en k durante el corto



Equivalente Thevenin del SEP en k durante el corto



■ Definición de cortocircuito

- Camino conductor accidental o intencionado entre dos o más partes conductoras, que provoca entre estas partes conductoras unas diferencias de potencial nulas o muy próximas a cero

■ Potencia de cortocircuito en k : $S_{cc}(k) \triangleq \sqrt{3}V_n(k)I''(k)$

- $V_n(k)$ es la tensión nominal, de línea, del nivel de tensión del punto k
- $I''(k)$ es la intensidad inicial de un cortocircuito trifásico en un punto k de un SEP
- $S_{cc}(k)$ es una magnitud ficticia

- Si hay corto en k la tensión será nula o próxima a cero

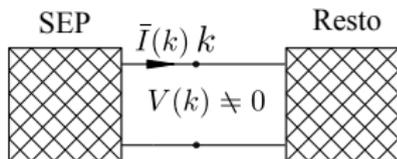
- $$Z_{cc}(k) = \frac{1.1V_n(k)}{I''(k)} = \frac{1.1V_n(k)}{\frac{1.1V_n(k)}{\frac{S_{cc}(k)}{\sqrt{3}V_n(k)}}} = \frac{1.1V_n^2(k)}{S_{cc}(k)}$$

- Si $S_{cc}(k) = \infty \Rightarrow Z_{cc}(k) = 0$

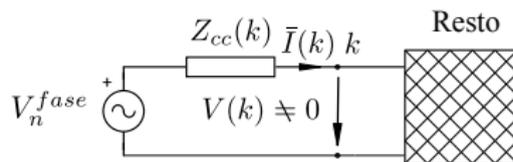
- $\bar{Z}_{cc}(k) = R_{cc}(k) + jX_{cc}(k)$ pero supondremos que $R_{cc} \approx 0 \Rightarrow X_{cc} = Z_{cc}$

Equivalentes de Thevenin: potencia de cortocircuito (II)

SEP en k en RES



Equivalente Thevenin del SEP en k en RES



- En la práctica, se utiliza el valor obtenido de impedancia de cortocircuito, $Z_{cc}(k)$, válido durante el cortocircuito, para cálculos en RES
 - Como tensión del equivalente Thevenin en RES utilizaremos la tensión nominal
 - S_{cc} en función de V_n

$V_n(kV)$	$S_{cc}(MVA)$
400	34e3
380	20-50e3
220	15e3
132	1.6-3.2e3
110	2-5e3
20	433
10	100-500
0.4	2-50

Índice

1 Generadores

2 Cargas

■ Definición de carga

- Dispositivo destinado a absorber potencia suministrada por otro dispositivo o un SEE
- Potencia (activa/reactiva) consumida por un dispositivo o conjunto de dispositivos que absorben energía de la red
- Ambas definiciones se suelen utilizar de manera indistinta

■ La demanda de potencia activa de la carga varía con el tiempo en función de:

- Condiciones ambientales
 - Temperatura
 - Humedad
 - Iluminación
- Horarios de trabajo
- Precio de la energía
- Tensión (V)
- Frecuencia (f)
- ...

- Si nos centramos en las magnitudes eléctricas $\Rightarrow P=P(V,f)$ y $Q=(V,f)$
 - Ante pequeñas variaciones de tensión o frecuencia

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f$$
$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial V} \Delta V + \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f$$

- Las derivadas parciales son difíciles de obtener, sobre todo en el caso de cargas agregadas, y se deben determinar de forma experimental
- Tabla de valores obtenidos de las derivadas parciales para determinadas cargas

Carga	fdp	$\frac{\partial P}{\partial V}$	$\frac{\partial P}{\partial f}$	$\frac{\partial Q}{\partial V}$	$\frac{\partial Q}{\partial f}$
Aire acondicionado 3ph	0.90	0.088	2.5	0.98	-1.3
Acumulador de agua	1	2	0	0	0
Lavavajillas	0.99	1.8	3.6	0	-1.4
Frigorífico	0.8	0.77	2.5	0.53	-1.5
Tubo fluorescente	0.9	0.96	7.4	1.0	-2.8
Residencial (invierno)	0.99	1.5	3.2	1.0	-1.5
Comercial (invierno)	0.9	1.3	3.1	1.5	-1.1
Industrial	0.85	0.1	1.6	2.9	1.8

■ Modelo de cargas estático

- Expresa las características de las cargas en cualquier instante como una función algebraica del módulo de la tensión y de la frecuencia
- Modelo estático exponencial

$$P = P_o \left(\frac{V}{V_n} \right)^{np}$$

$$Q = Q_o \left(\frac{V}{V_n} \right)^{nq}$$

- Modelo estático polinomial (ZIP)

$$P = P_o \left[Z_p \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + I_p \left(\frac{V}{V_n} \right) + P_p \right]$$

$$Q = Q_o \left[Z_q \left(\frac{V}{V_n} \right)^2 + I_q \left(\frac{V}{V_n} \right) + Q_q \right]$$

- ZIP \Rightarrow Z, impedancia, I, intensidad, P, potencia
- Además se verifica que: $Z_p + I_p + P_p = 1$ y $Z_q + I_q + P_q = 1$
- En estos modelos la dependencia con la frecuencia se desprecia debido al pequeño rango de frecuencias que suele permitirse

Modelos de carga eléctrica: modelos estáticos (II)

■ Tabla de valores obtenidos para modelos estáticos

Carga	S_o	fdp	Z_p	l_p	P_p	Z_q	l_q	P_q	n_p	n_q
Bomba calor	1160	0.93	0.72	-0.98	1.25	14.78	-23.72	9.93	0.34	4.12
Lavadora	654	0.61	0.05	0.31	0.63	-0.56	2.20	-0.65	0.34	1.55
Frigorífico	1030	0.84	1.19	-0.26	0.07	0.59	0.65	-0.24	2.11	1.89
Fluorescente	151	0.49	0.34	1.31	-0.65	3.03	-2.89	0.86	2.07	3.21
Secadora	5400	1.00	0.96	0.05	-0.01	0	0	0	1.95	0

■ Es difícil utilizar estos modelos

- Las cargas del mismo tipo no tienen por qué comportarse igual que las medidas
- En cargas compuestas (lavadora) su comportamiento depende del tiempo
- La composición de cargas eléctricas en una agregación es función del tiempo
- Siempre se introducen nuevas cargas cuyos parámetros se desconocen

■ De impedancia constante:

$$P(V) = P_0 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2$$

$$Q(V) = Q_0 \left(\frac{V}{V_n} \right)^2$$

- Es equivalente a $\bar{Z}_{carga} = R_{carga} + jX_{carga} = V^2 / (P(V) - jQ(V))$

■ De potencia constante

$$P(V) = P_0$$

$$Q(V) = Q_0$$

- Si conocemos V_{carga} se puede sustituir por $\bar{Z}_{carga} \Rightarrow \bar{Z}_{carga} = \frac{V_{carga}^2}{P_0 - jQ_0}$

- Problema: Dicho equivalente sólo es válido para esa tensión \Rightarrow Solución

- 1 Suponemos $V^i = V^0$ para todas las cargas
- 2 Obtenemos $P^i = P(V^i)$ y $Q^i = Q(V^i) \Rightarrow \bar{Z}_{carga}^i = V_{carga}^i{}^2 / (P^i - jQ^i)$ para las cargas
- 3 Resolvemos el problema utilizando teoría de circuitos
- 4 Obtenemos las nuevas tensiones en los nudos de las cargas, V^{i+1}
- 5 Si ha convergido terminamos y si no volvemos al paso 2

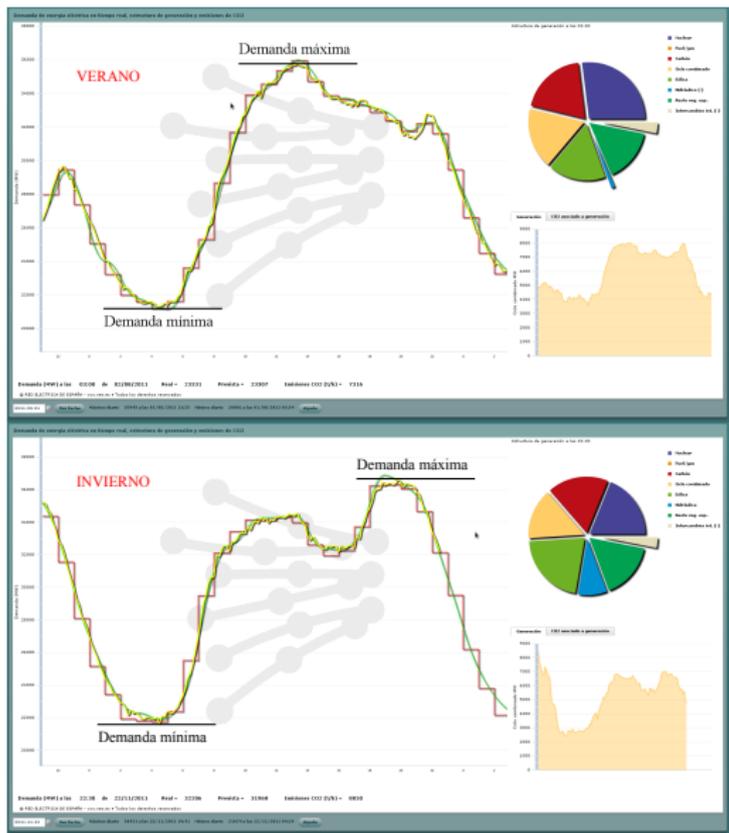
- Normalmente sólo realizaremos un paso de la iteración: $1 \rightarrow 3$

Caracterización de la demanda

- Demanda
 - Se habla de demanda de energía eléctrica y demanda de potencia eléctrica
 - Si la potencia varía mucho se suaviza promediando en un periodo de tiempo: 15', 30', 1h
- Curva de carga (diaria, semanal, anual, . . .)
 - Representa la potencia en función del tiempo durante el periodo considerado
- Demanda máxima, punta o pico
 - La mayor demanda durante el periodo considerado
- Demanda mínima o carga base
 - La menor demanda durante el periodo considerado
- Energía demandada
 - Es el área bajo la curva de carga
- Curva monótona de carga
 - Representa el tiempo para el cual la demanda es mayor que la potencia correspondiente a su ordenada
 - Se construye ordenando la curva de carga de mayor a menor
 - El área bajo esta curva es también la energía demandada
- Factor de carga
 - Cociente entre la demanda media y la máxima medido en un periodo de tiempo
- Factor de diversidad
 - Cociente entre la suma de las demandas máximas individuales y la demanda máxima del conjunto

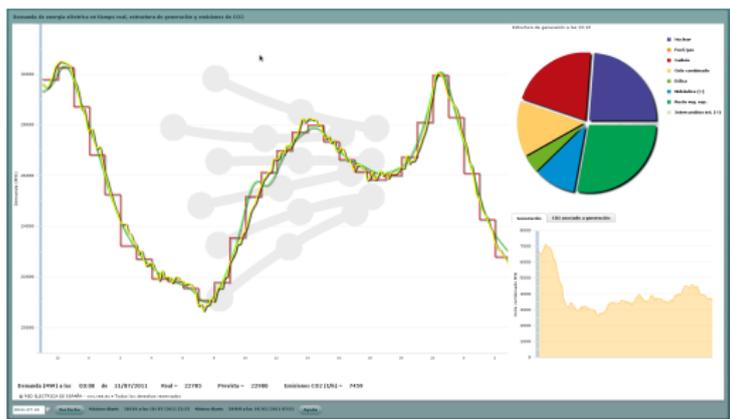
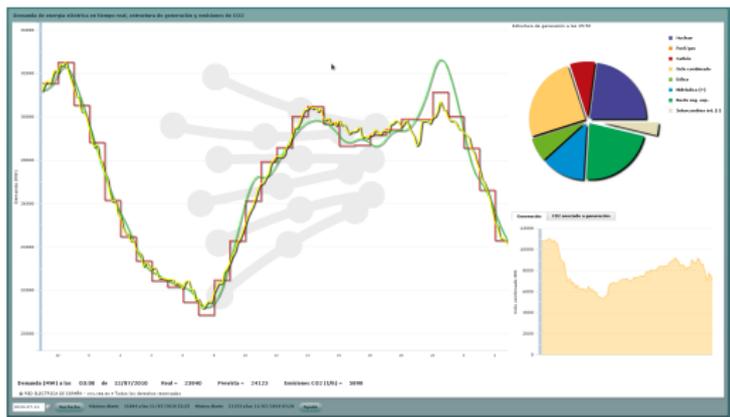
Caracterización de la demanda: curvas de carga diarias

Fuente: <http://www.ree.es/>



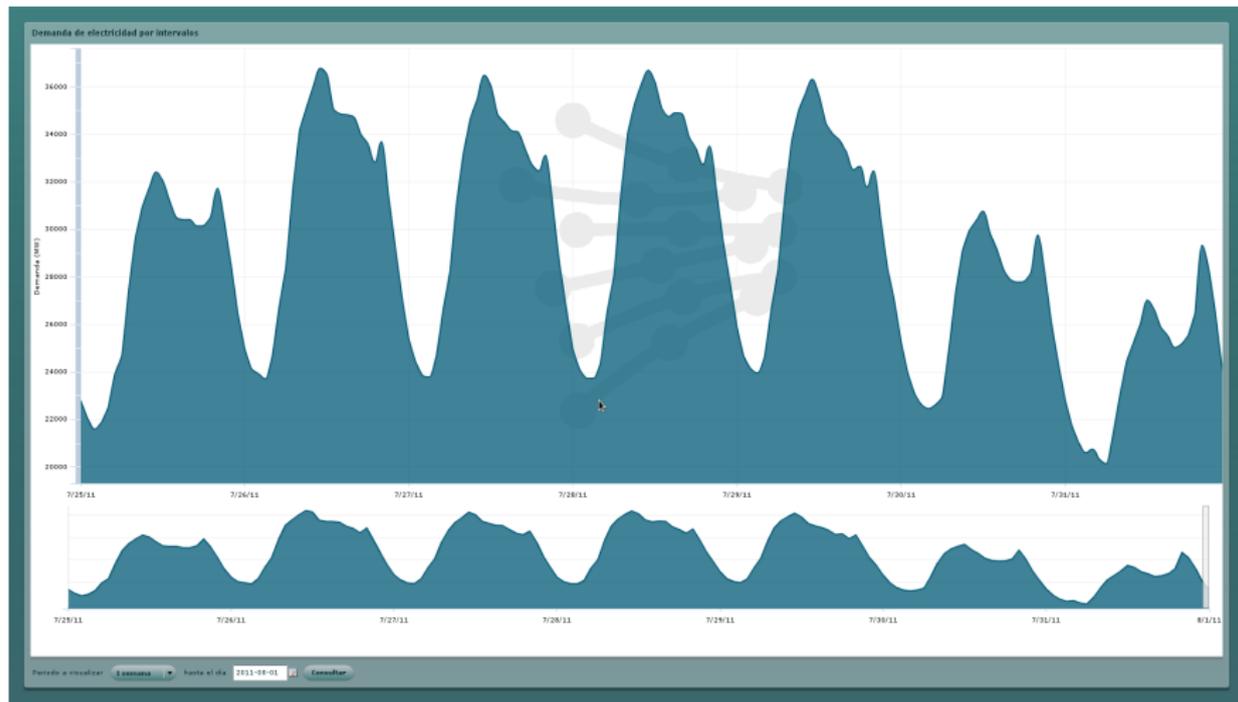
Caracterización de la demanda: curvas de carga y acontecimientos

Fuente: <http://www.ree.es/>



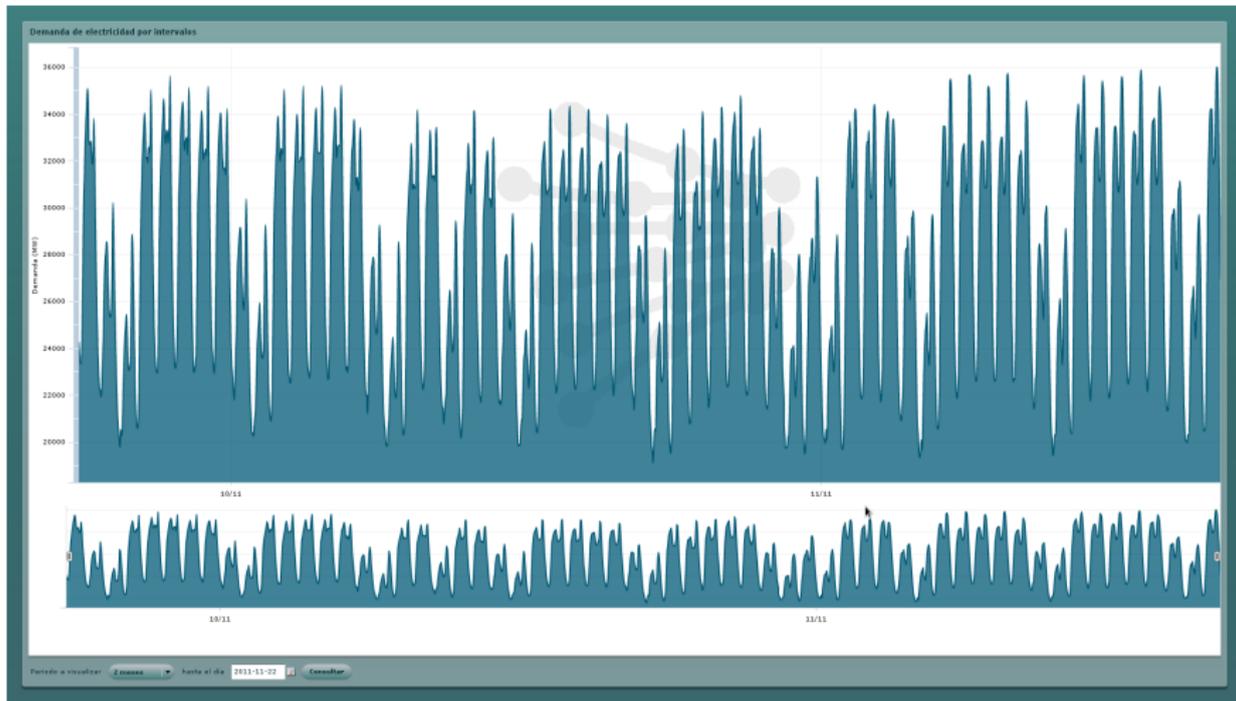
Caracterización de la demanda: curva de carga semanal

Fuente: <http://www.ree.es/>



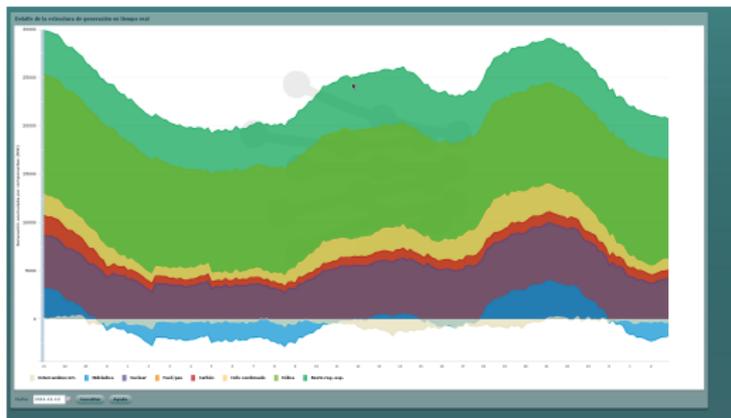
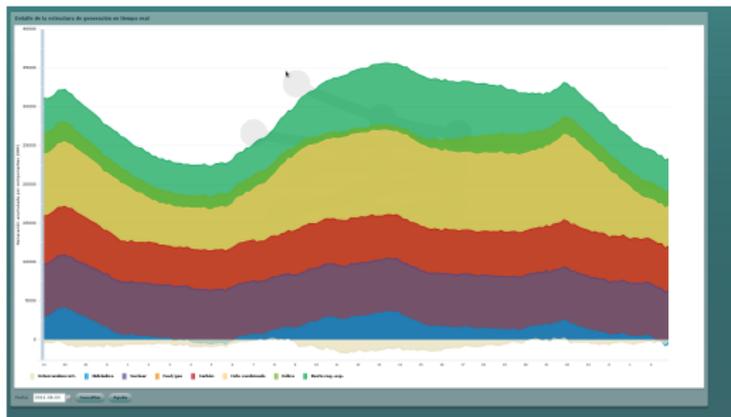
Caracterización de la demanda: curva de carga bimestral

Fuente: <http://www.ree.es/>



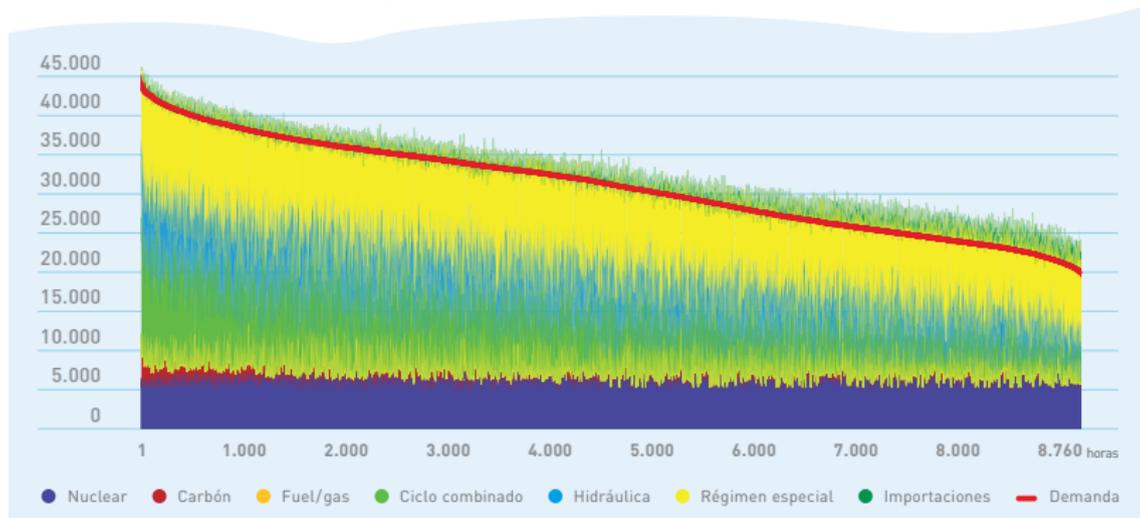
Caracterización de la demanda: curvas de carga y estructura de generación

Fuente: <http://www.ree.es/>



Caracterización de la demanda: curva monótona de carga 2010

Curva monótona de carga (MW)



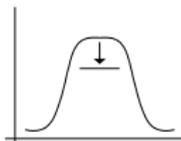
Fuente: <http://www.ree.es/>

■ Definición de gestión de la demanda

- Es la planificación e implementación de distintas medidas destinadas a influir en el modo de consumir energía para que se modifique el perfil de consumo diario

■ **Objetivos** de modificación de la curva de carga y **políticas** para conseguirlos

Servicio de interrumpibilidad
Control de cargas



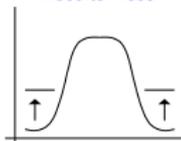
Recorte Picos

Mejora en la eficiencia de equipos y procesos
Concienciación sobre el ahorro energético

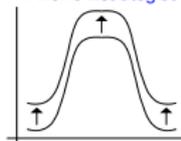


Ahorro Estratégico

Centrales de bombeo
Tecnologías de almacenamiento
Recarga de vehículos eléctricos

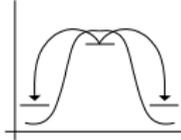


Llenado Valles

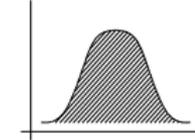


Crecimiento Estratégico

Discriminación horaria
Respuesta a los precios de mercado
Tarifas en tiempo real



Desplazamiento Cargas



Flexibilidad Curva de Carga

- Las políticas pueden tener efecto sobre varios objetivos