Apuntes

Tecnología Eléctrica y Redes

Temas 1 a 7

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Versión v1.0

Índice general

1 El sistema eléctrico español **2**
1.1 Estructura . . . 2
1.2 Potencia instalada frente a energía producida . . . 2
1.3 La curva de demanda . . . 2

2 Aparamenta eléctrica de media y alta tensión **3**
2.1 Parámetros característicos . . . 3
2.2 Elementos . . . 3
2.3 Protección en baja tensión . . . 3

3 Sistemas trifásicos equilibrados **4**
3.1 Tensiones y secuencia . . . 4
3.2 Circuito monofásico equivalente . . . 4

4 Análisis en valores por unidad **5**
4.1 Bases . . . 5
4.2 Cambio de base . . . 5

5 Transformadores y autotransformadores **5**
5.1 Circuito equivalente y ensayos . . . 5
5.2 Transformadores en paralelo . . . 6
5.3 Autotransformador y tomas . . . 6

6 El generador síncrono **6**
6.1 Modelo conectado a la red . . . 6
6.2 Regulación de tensión con reactiva . . . 7

7 La línea de parámetros distribuidos **7**
7.1 Constantes y ecuaciones . . . 7
7.2 Efecto Ferranti y potencia natural . . . 8

8 Cómo se pregunta en el examen **8**

Resumen

Resumen de los siete temas de la asignatura con la notación habitual (fasores en valor eficaz, secuencia directa, tensiones de línea U y de fase $U/\sqrt{3}$). Para cada tema: ideas clave, ecuaciones y la forma de plantear los problemas. Los números de los ejemplos están calculados con Python; los problemas completos están en el documento de ejercicios resueltos.

1 El sistema eléctrico español

1.1 Estructura

El sistema se divide en **generación**, **transporte** (400 kV y 220 kV, operado por Red Eléctrica como transportista único y operador del sistema), **distribución** (alta tensión de distribución, media tensión (habitualmente 15 o 20 kV) y baja tensión de 400 V/230 V) y **consumo**. Generación y comercialización están en competencia; transporte y distribución son actividades reguladas.

1.2 Potencia instalada frente a energía producida

No es lo mismo cuánta potencia hay instalada de una tecnología que cuánta energía aporta. La relación la da el factor de capacidad:

$$FC = \frac{E_{\text{anual}}}{P_{\text{instalada}} \cdot 8760\ \text{h}}.$$

La nuclear tiene un FC muy alto (alrededor del 85 %): pesa poco en potencia y mucho en energía. La fotovoltaica y los ciclos combinados tienen mucha potencia instalada y un FC bajo (la solar por el recurso, los ciclos por funcionar como respaldo). Saber leer una tabla de potencia frente a una de cobertura de la demanda es una pregunta habitual.

1.3 La curva de demanda

La demanda peninsular tiene un valle nocturno, una subida por la mañana y puntas al mediodía y por la tarde-noche. La generación la sigue en tiempo real: la base la cubren nuclear y renovables, y la modulación, hidráulica, ciclos combinados, bombeo y, cada vez más, baterías. Con mucha fotovoltaica aparece la “curva de pato”: demanda neta baja al mediodía y rampa fuerte al atardecer.

2 Aparamenta eléctrica de media y alta tensión

2.1 Parámetros característicos

- **Tensión nominal** y **corriente nominal**: lo que soporta de forma permanente sin superar la temperatura de norma.
- **Intensidad térmica** y **de cortocircuito** admisibles durante un tiempo dado.
- **Poder de corte**: máxima corriente que puede interrumpir. **Poder de cierre**: máxima que puede establecer.

2.2 Elementos

- **Seccionador**: solo maniobra sin corriente, sin poder de corte; garantiza el aislamiento visible para trabajar.
- **Interruptor**: maniobra en carga; el **interruptor automático** además corta cortocircuitos (protección), por relé o disparo propio.
- **Fusible**: protección barata contra sobreintensidades; se funde y hay que reponerlo.
- **Transformadores de medida** (de tensión y de intensidad) para alimentar relés y contadores.
- **Pararrayos** (autoválvulas) contra sobretensiones.

2.3 Protección en baja tensión

El **pequeño interruptor automático** (PIA) tiene disparo térmico (sobrecargas, tiempo inverso) y magnético (cortocircuitos, instantáneo). La curva fija el umbral magnético en múltiplos de I_n:

Curva	Disparo magnético	Uso típico
B	3–5 I_n	Cargas resistivas, líneas largas
C	5–10 I_n	Uso general, alumbrado y tomas
D	10–20 I_n	Motores y transformadores con arranques fuertes

Por encima del umbral superior el disparo es seguro e instantáneo; por debajo del inferior solo actúa el térmico. Entre ambos, puede actuar o no.

El **interruptor diferencial** mide la suma de corrientes de fase y neutro (corriente de fuga a tierra). Dispara seguro si la fuga supera su sensibilidad $I_{\Delta n}$, no dispara por debajo de $I_{\Delta n}/2$ y entre ambos valores puede hacerlo o no. Los de 30 mA protegen a las personas; los de 300 mA, a la instalación.

3 Sistemas trifásicos equilibrados

3.1 Tensiones y secuencia

Con secuencia directa, $\underline{U}_{ab} = \sqrt{3}\,\underline{U}_{an}\angle 30°$. En un sistema equilibrado todas las magnitudes son de la misma secuencia y el neutro de la carga está al potencial del neutro del generador.

3.2 Circuito monofásico equivalente

Se pasa todo a estrella (una carga en triángulo Z_Δ equivale a $Z_Y = Z_\Delta/3$), se dibuja una fase entre fase y neutro y se resuelve como un circuito monofásico con $E = U/\sqrt{3}$. Al final se recuperan las magnitudes de línea y, si hace falta, las de fase del triángulo ($I_\Delta = I/\sqrt{3}$).

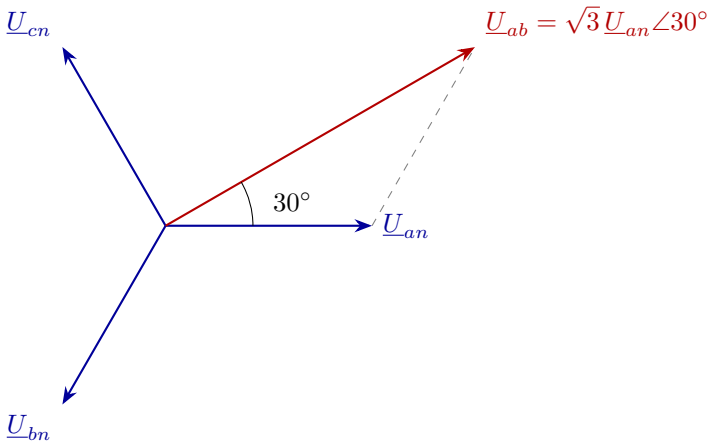


Figura 1. Secuencia directa: las tensiones de fase van desfasadas 120° y la tensión de línea $\underline{U}_{ab}$ adelanta 30° a $\underline{U}_{an}$.

Fórmulas clave

$\underline{S} = 3\,\underline{U}_{fase}\,\underline{I}^{*} = \sqrt{3}\,U\,I\angle\varphi \qquad P = \sqrt{3}UI\cos\varphi \qquad Q = \sqrt{3}UI\sin\varphi$

Pérdidas en una línea de resistencia R por fase: $P_p = 3RI^2$.

4 Análisis en valores por unidad

4.1 Bases

Se eligen dos bases, normalmente S_b (trifásica, la misma en todo el sistema) y U_b (de línea, una por zona de tensión, relacionadas por las relaciones de transformación). Las demás se deducen:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}\,U_b}, \qquad Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}, \qquad M_{pu} = \frac{M}{M_b}.$$

En por unidad las ecuaciones trifásicas pierden los $\sqrt{3}$ y el 3: $\underline{S}_{pu} = \underline{U}_{pu}\underline{I}^*_{pu}$.

4.2 Cambio de base

Las impedancias de placa vienen en por unidad (o en %) sobre los valores nominales de la máquina. Para pasarlas a la base del sistema:

$$Z_{pu,\text{nueva}} = Z_{pu,\text{vieja}}\,\frac{S_{b,\text{nueva}}}{S_{b,\text{vieja}}}\left(\frac{U_{b,\text{vieja}}}{U_{b,\text{nueva}}}\right)^2.$$

> **Idea clave**
>
> Si las bases de tensión de cada zona siguen las relaciones de transformación nominales, los transformadores ideales desaparecen del circuito por unidad: queda un circuito monofásico de impedancias en serie. Esa es la gran ventaja del método.

5 Transformadores y autotransformadores

5.1 Circuito equivalente y ensayos

El transformador real se representa con la impedancia de cortocircuito $Z_{cc} = R_{cc} + jX_{cc}$ en serie (pérdidas en el cobre y flujo de dispersión) y, si se quiere, la rama de vacío en paralelo (pérdidas en el hierro y magnetización).

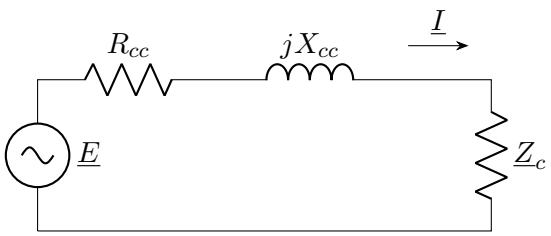


Figura 2. Circuito monofásico equivalente de un transformador visto desde un lado (rama de vacío despreciada): fuente, impedancia de cortocircuito y carga en serie.

- **Ensayo de vacío**: a tensión nominal da P_0 (pérdidas en el hierro) y la corriente de vacío.
- **Ensayo de cortocircuito**: a corriente nominal da P_{cc} (pérdidas en el cobre a plena carga) y la tensión de cortocircuito ε_{cc}.

Fórmulas clave

$\varepsilon_{cc} = Z_{cc,pu} \qquad \varepsilon_{Rcc} = \dfrac{P_{cc}}{S_n} \qquad \varepsilon_{Xcc} = \sqrt{\varepsilon_{cc}^2 - \varepsilon_{Rcc}^2}$

Caída de tensión aproximada con índice de carga $c = S/S_n$: $\varepsilon_c \approx c\,(\varepsilon_{Rcc}\cos\varphi + \varepsilon_{Xcc}\sin\varphi)$

Rendimiento: $\eta = \dfrac{c\,S_n\cos\varphi}{c\,S_n\cos\varphi + P_0 + c^2 P_{cc}}$, máximo cuando $c = \sqrt{P_0/P_{cc}}$

Valores típicos de ε_{cc}: 4–7 % en distribución y 10–13 % en grandes transformadores de alta tensión.

5.2 Transformadores en paralelo

Con la misma relación de transformación y el mismo índice horario, la carga se reparte en proporción inversa a su ε_{cc}:

$$\frac{S_1}{S_{n1}}\,\varepsilon_{cc1} = \frac{S_2}{S_{n2}}\,\varepsilon_{cc2}.$$

El de menor ε_{cc} se carga antes; limita la potencia total que se puede dar sin sobrecargar ninguno.

5.3 Autotransformador y tomas

El autotransformador comparte un devanado entre primario y secundario: con relaciones cercanas a 1 es más pequeño y barato, pero no aísla. El transformador con tomas (en vacío o en carga) cambia la relación de transformación unos puntos porcentuales para regular la tensión; en por unidad aparece como un transformador ideal de relación $t : 1$ en serie con Z_{cc}.

6 El generador síncrono

6.1 Modelo conectado a la red

En régimen permanente el generador es una fuerza electromotriz $\underline{E}$ (controlada por la excitación) detrás de la reactancia síncrona X_s. Conectado a una red de tensión $\underline{V}$:

$$\underline{E} = \underline{V} + jX_s\underline{I}, \qquad P = \frac{EV}{X_s}\sin\delta, \qquad Q = \frac{EV\cos\delta - V^2}{X_s}.$$

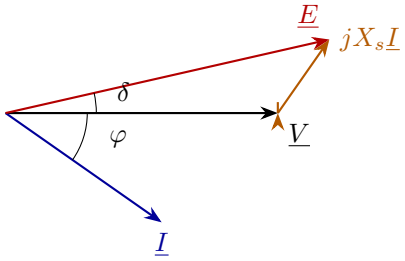


Figura 3. Diagrama fasorial del generador: $\underline{E} = \underline{V} + jX_s\underline{I}$. El ángulo δ entre $\underline{E}$ y $\underline{V}$ fija la potencia activa, y $|\underline{E}|$ (la excitación) fija la reactiva.

Idea clave

La potencia activa se controla con la turbina (ángulo δ); la reactiva, con la excitación (módulo de E). Sobreexcitado ($E\cos\delta > V$) entrega reactiva y sostiene la tensión; subexcitado la absorbe. El límite de estabilidad estática es $\delta = 90°$, con $P_{\max} = EV/X_s$.

6.2 Regulación de tensión con reactiva

En una línea de impedancia $R + jX$ la caída de tensión aproximada es

$$\Delta U \approx \frac{RP + XQ}{U}.$$

Como en alta tensión $X \gg R$, la tensión depende sobre todo de la reactiva: compensar con condensadores (o con generadores sobreexcitados) sube la tensión y reduce la corriente y las pérdidas. La batería necesaria para pasar de $\cos\varphi_1$ a $\cos\varphi_2$ es

$$Q_c = P\,(\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2), \qquad C_Y = \frac{Q_c}{\omega U^2}, \qquad C_\Delta = \frac{Q_c}{3\,\omega U^2}.$$

7 La línea de parámetros distribuidos

7.1 Constantes y ecuaciones

Con parámetros por unidad de longitud $z = r + jx$ e $y = g + jb$:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{z}{y}}, \qquad \gamma = \sqrt{zy} = \alpha + j\beta.$$

Las tensiones y corrientes en los extremos se relacionan con las constantes de transmisión:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_S \\ \underline{I}_S \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\gamma l & \underline{Z}_c \sinh\gamma l \\ \dfrac{\sinh\gamma l}{\underline{Z}_c} & \cosh\gamma l \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}_R \\ \underline{I}_R \end{pmatrix}, \qquad AD - BC = 1.$$

Para líneas cortas (menos de unos 80 km) basta la impedancia serie; para medias, el modelo en π nominal; para largas, el π equivalente con estas constantes.

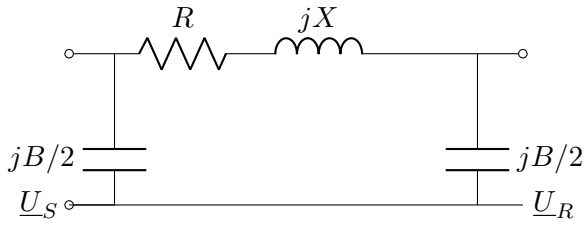


Figura 4. Línea media en π nominal. La impedancia serie recoge R y X de toda la línea y la admitancia transversal se reparte en los dos extremos.

7.2 Efecto Ferranti y potencia natural

En vacío $\underline{U}_R = \underline{U}_S/A$ con $|A| < 1$: la tensión en el extremo receptor *sube*. Ejemplo: una línea de 400 kV y 300 km tiene $|A| = 0{,}949$ y llega a unos 422 kV en vacío.

La **potencia natural** (SIL) es la que transporta la línea cargada con su impedancia característica: $P_{SIL} = U^2/|Z_c|$. A esa carga la reactiva que genera la capacidad iguala a la que consume la inductancia y el perfil de tensión es plano. Por debajo de la SIL la línea genera reactiva y la tensión sube; por encima la consume y la tensión cae.

8 Cómo se pregunta en el examen

1. **Lectura del sistema eléctrico**: distinguir potencia instalada de energía producida con el factor de capacidad.
2. **Protecciones**: elegir curva de PIA a partir de la corriente de arranque o de cortocircuito; decir si dispara un diferencial con una fuga dada.
3. **Trifásica**: pasar a estrella, monofásico equivalente, potencias y pérdidas.
4. **Por unidad**: bases por zona, cambio de base de las placas, circuito serie y vuelta a valores reales.
5. **Transformador**: parámetros de ensayos, caída de tensión, rendimiento y reparto en paralelo.
6. **Generador síncrono**: E y δ para un punto de funcionamiento; efecto de cambiar la excitación.
7. **Líneas**: constantes, tensión en vacío, compensación de reactiva y SIL.

Errores típicos

Mezclar tensión de línea y de fase. Olvidar el $Z_\Delta/3$ al pasar a estrella. Usar una base de tensión que no respeta la relación del transformador. Dar el resultado en por unidad cuando se pide en amperios o kilovoltios.