



UNIVERSIDAD
CONTINENTAL

SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I

Docentes:

César Chilet León

Celso Espejo Medina

07/05/2020

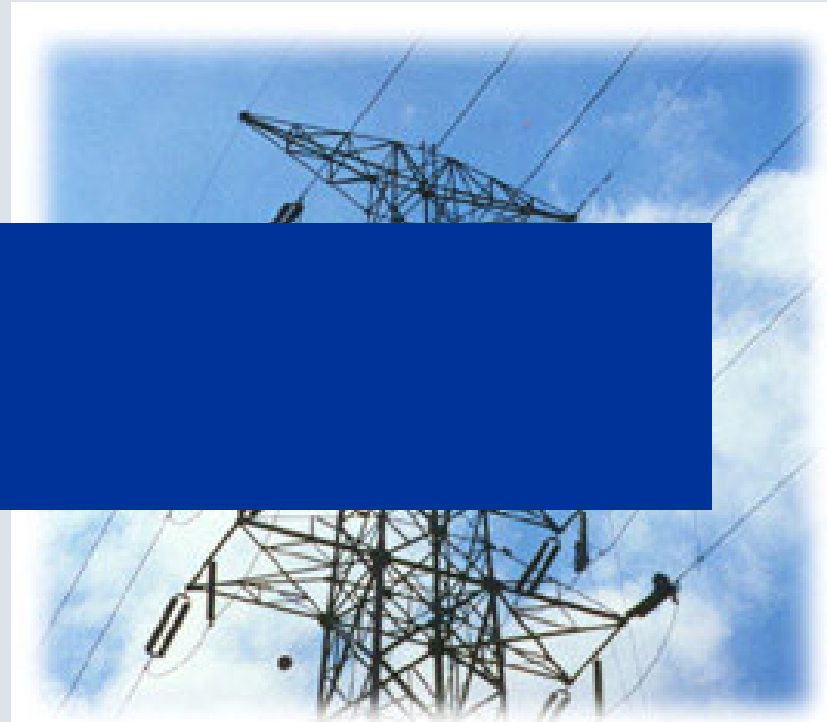
Contenido del curso

- **Modelado y análisis de sistemas eléctricos de potencia operando en estado estacionario: conceptos básicos, modelado y cálculo de parámetros de líneas de transmisión aéreas, relación voltaje-corriente en líneas de transmisión, análisis de flujos de potencia en redes de transmisión.**

1. COMPONENTES DE UN SISTEMA DE POTENCIA

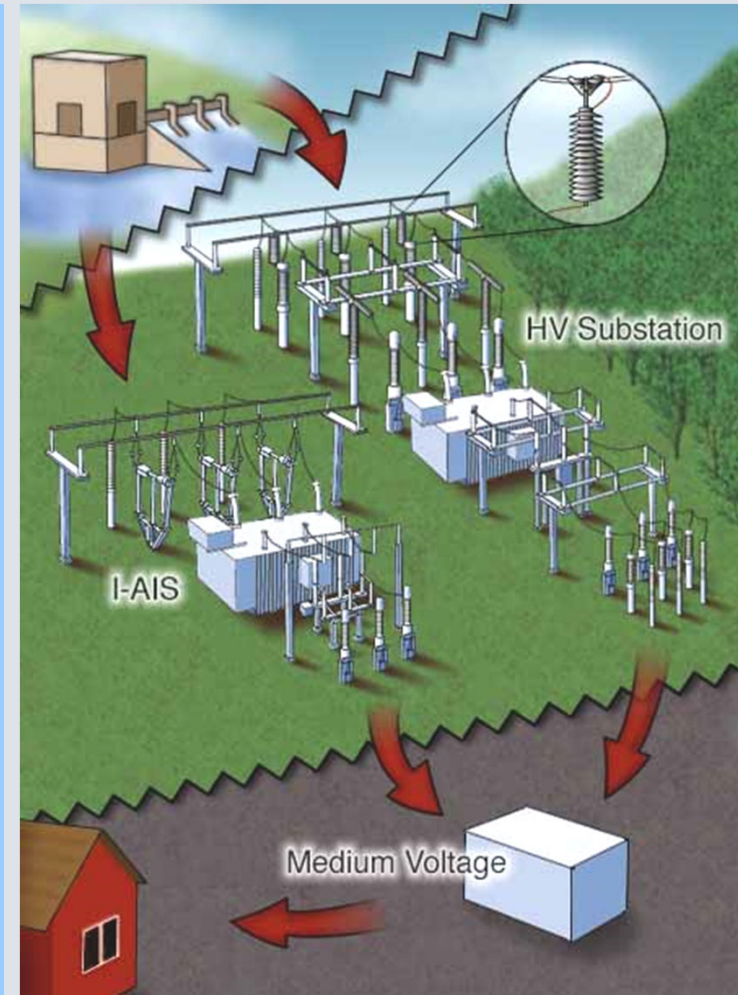


1.1 Introducción



Sistema de potencia

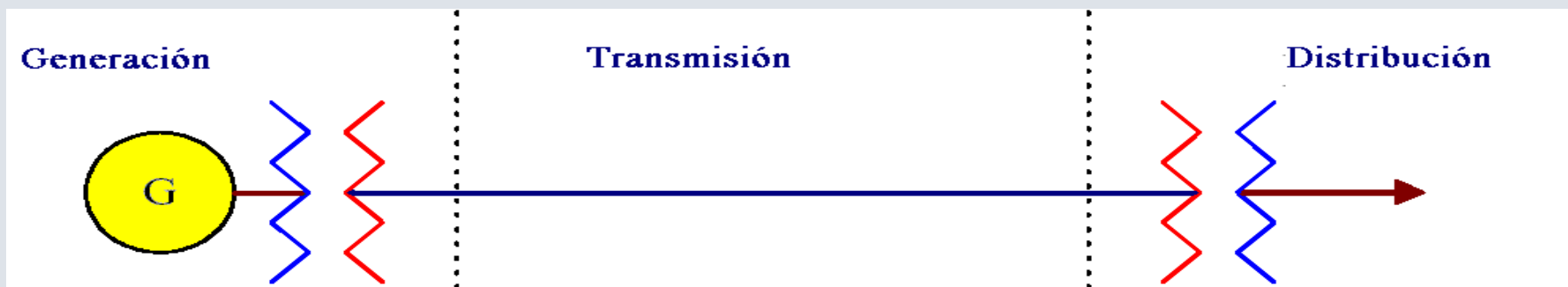
- Es un conjunto de centrales eléctricas, transformadores, dispositivos de maniobra y otros componentes que están interconectados por líneas aéreas y cables de energía para proveer de electricidad a los consumidores



Partes del sistema de potencia

Puede ser dividido en tres subsistemas:

- Generación: *fuentes de energía eléctrica.*
- Transmisión: *Transporta la energía eléctrica desde las fuentes a los centros de carga en altas tensiones (115 kV y superior).*
- Distribución: *Distribuye la energía eléctrica desde subestaciones (22,9kV-10 kV) al usuarios final.*
- *Utilización: los consumidores, desde las grandes cargas hasta los de uso residencial.*



Objetivo de un SEP

- **Generar la energía suficiente, en los lugares apropiados, y transmitirla a los centros de consumo. En estos centros, la energía debe ser distribuida a los consumidores en forma individual, de forma y calidad apropiadas, con los menores costos económico y ecológico con la mayor seguridad posible.**

Estructura SEP

La estructura de un sistema de potencia es grande y compleja. Sin embargo, ella puede ser dividida en los siguientes componentes principales:

- Fuente de energía.
- Convertidor de energía.
- Sistema de transmisión.
- Sistema de distribución.
- Carga.

Requisitos

- Durante las etapas de planeamiento y operación de los sistemas eléctricos se debe de observar algunos requisitos:
 - Las demandas de potencia activa y reactiva deben ser íntegramente satisfechas.
 - La calidad del servicio, la cual implica en:
 - Pequeñas variaciones de las magnitudes: de tensión ($\pm 5\%$ en torno al valor nominal) y de frecuencia ($\pm 0,05$ Hz en torno al valor nominal de 60 Hz).
 - Alta confiabilidad (continuidad del suministro).

Límite de operación

Producción energía eléctrica

Eólica

Nuclear

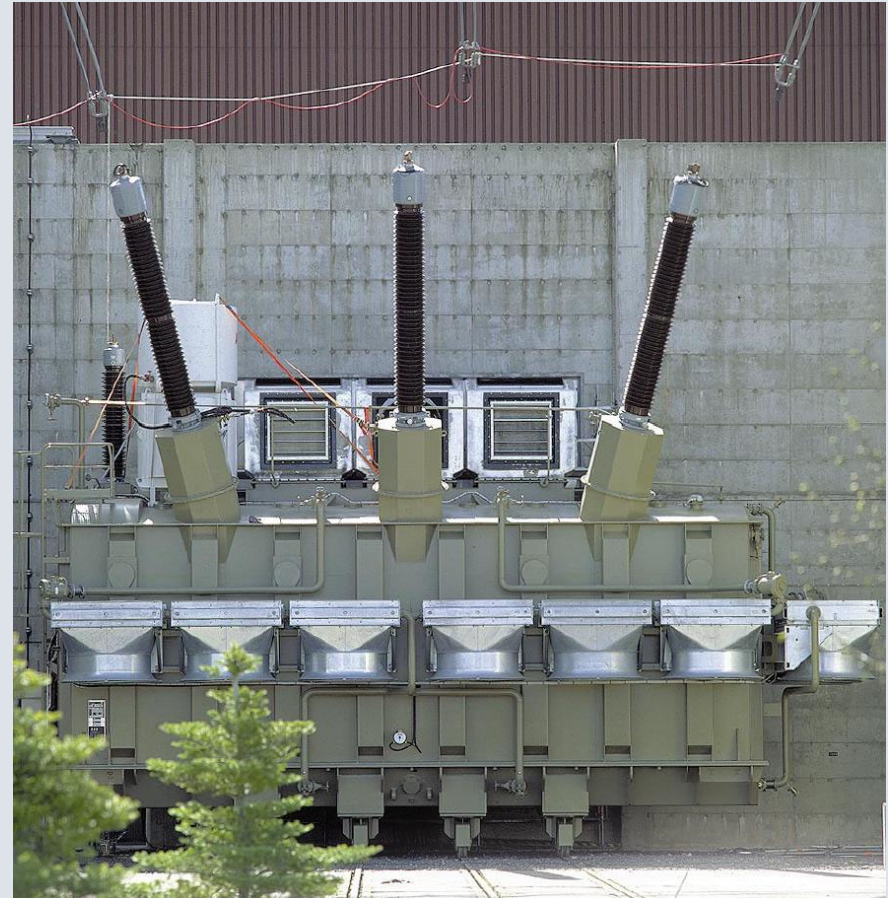


**Combustibles
fósiles**

Hidráulica

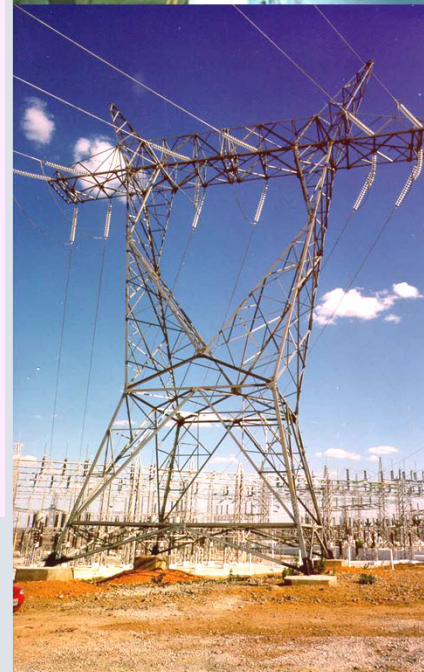
Rol de los transformadores

- Gran ventaja de la energía eléctrica es que se puede generar en BT en un generador AC y ser elevado a AT para ser transmitida a una distancia mucho mayor.



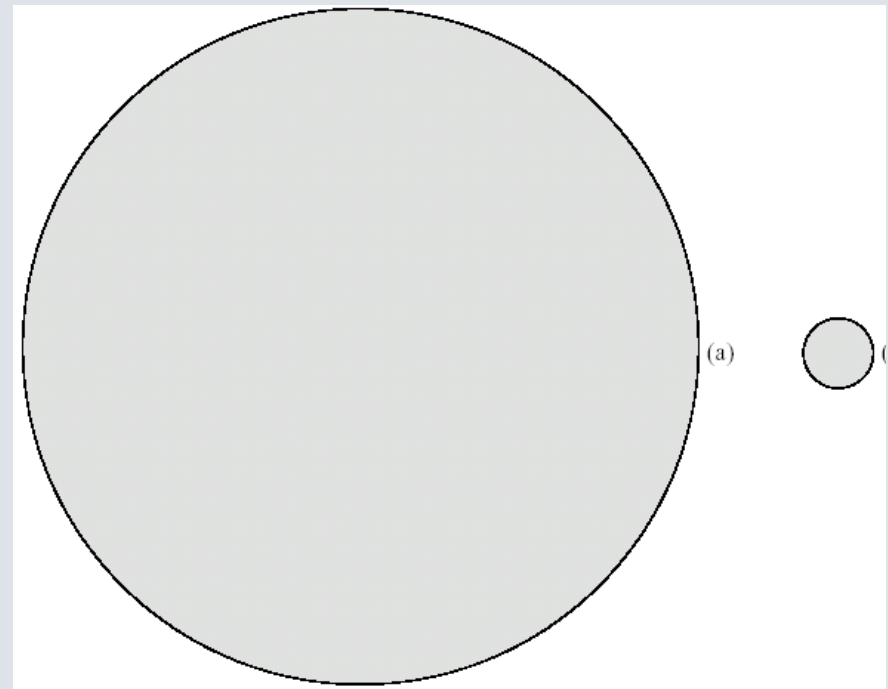
Rol de los transformadores

- Esto significa que cada parte del sistema de potencia puede funcionar a una tensión óptima:
 - Generadores (11-22 kV)
 - Las cargas (10kV, 4.16 kV, 440V, 220V, etc.)
 - Transmisión (110 kV, 220 kV, 500 kV, o superior).



Rol de los transformadores

- Las altas Tensiones son esenciales para elevar la eficiencia de la transmisión de la energía eléctrica:
 - la tensión se eleva en el transformador en un número de veces, la corriente es reducida en la misma proporción.



Ejemplo

- ¿Cómo transmitir la potencia de 50 MW con factor de potencia de 0,85, por medio de una línea de transmisión trifásica con conductores de aluminio, desde una central hidroeléctrica, cuya tensión nominal del generador es de 13,8 kV, hasta el centro de consumo situado a 100 km?, admitiéndose una pérdida óhmica (I^2R) de 2,5 % en la línea, determine el diámetro del cable para una transmisión en: a) 13,8 kV, y en b) 138 kV.

Considerando a transmissão em 13,8 kV:

A corrente de linha é calculada pela fórmula $I = \frac{P}{\sqrt{3}V \cos\varphi}$.

Substituindo os valores de P, V e $\cos\varphi$ resulta uma corrente de 2.461,0 A.

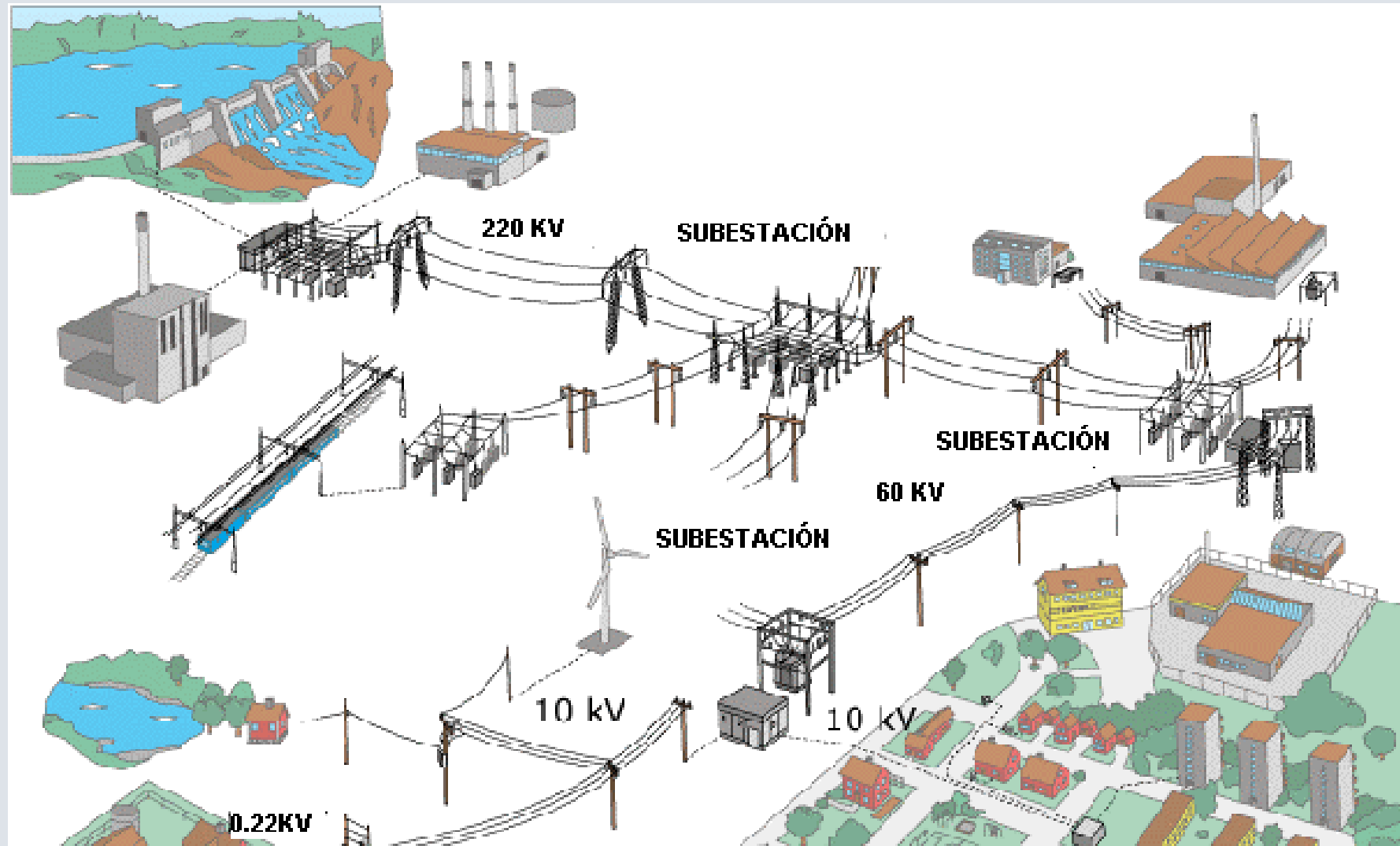
A perda de 2,5% significa uma potência dissipada de 1.250 kW. Tendo-se a corrente e a potência dissipada podemos determinar a resistência do condutor pela fórmula $R = \frac{P_l}{3I^2}$, obtendo-se o valor de 0,2064 Ω .

Tendo-se a resistência, a resistividade do alumínio ($0,02688 \Omega \frac{mm^2}{m}$) e o comprimento, podemos determinar a seção reta do condutor pela fórmula $S = \rho \frac{l}{R}$, obtendo-se 39.069,8 mm^2 . Esta seção corresponde a um cabo cujo diâmetro é de **223,0 mm**.

Considerando a transmissão em 138 kV:

Seguindo-se os mesmos passos obtém-se um cabo com diâmetro de **22,3 mm**.

Sistemas de entrega de la energía eléctrica



07/05/2020

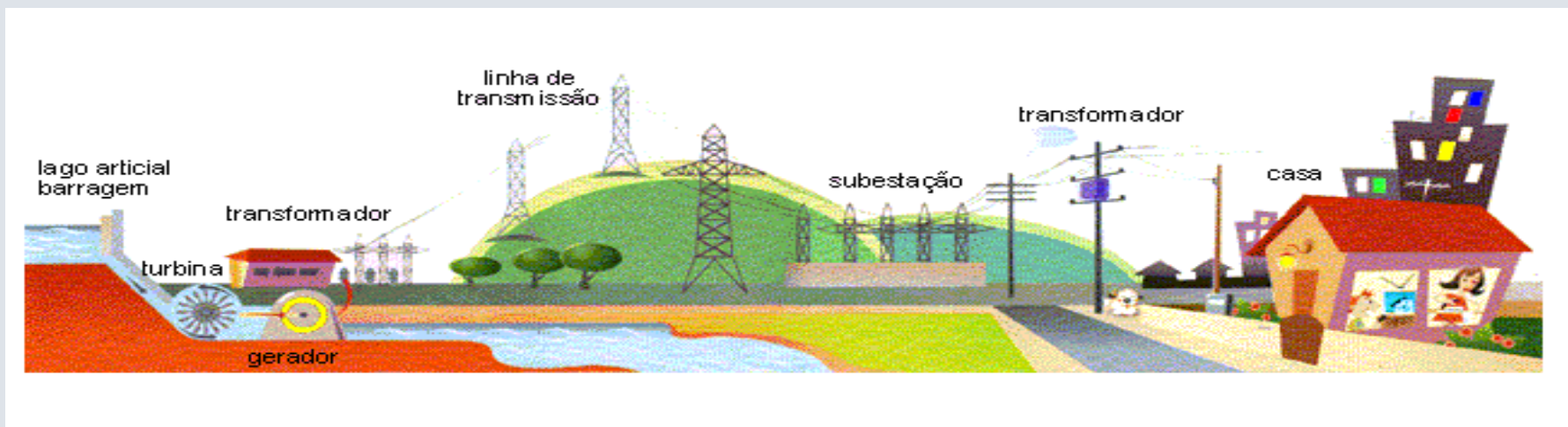
Sistemas de entrega de la energía eléctrica

Este sistema de la entrega de energía se refiere al sistema de transmisión y distribución (T&D)

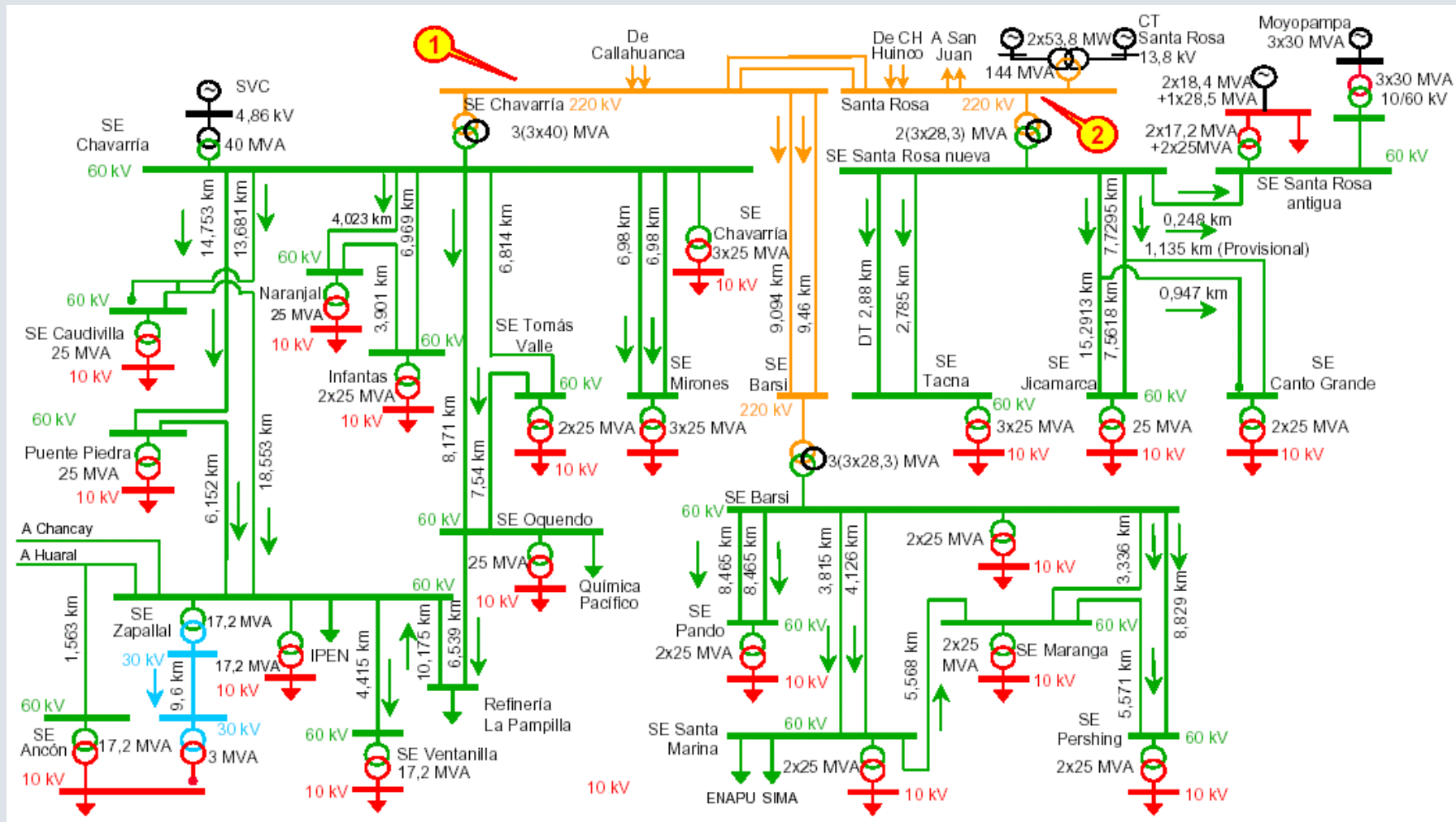
- Miles de km de L.T. y distribución.
- Cientos de SE, transformadores y otros equipos.
- Gran área geográfica.
- Interconectados.
- Operando adecuadamente.
- Satisfaciendo necesidades del cliente.

Función de T&D

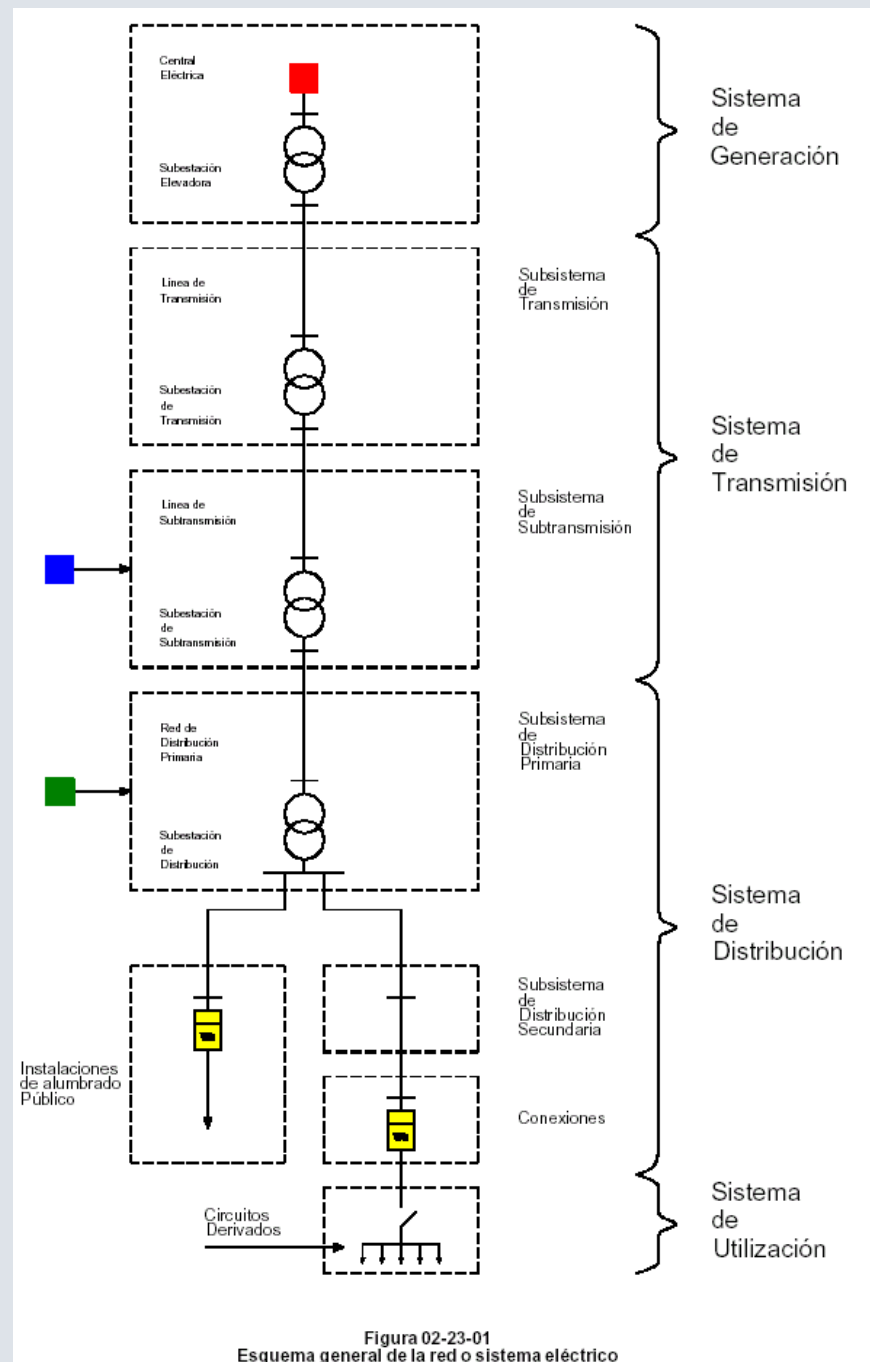
- Entregar energía eléctrica confiable a los consumidores de electricidad en el lugar de consumo y lista para ser usado.



Transporte de energía eléctrica



Esquema general del sistema eléctrico



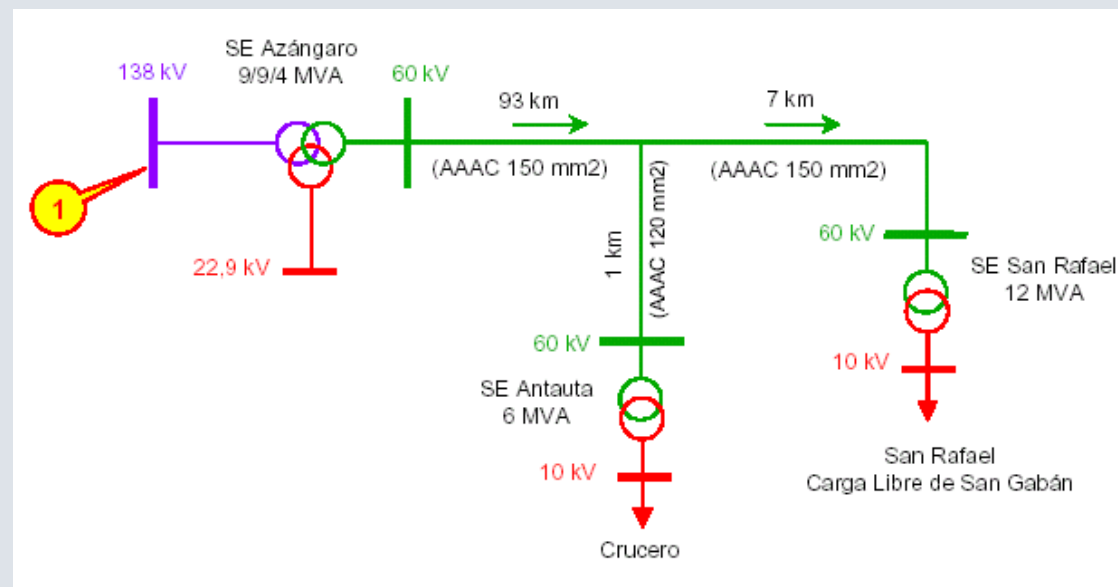
Niveles de tensión

Los valores normalizados en muchos países son:

- a) Transmisión: 750; 500; 220; 138; 69 kV.
- b) Subtransmisión: 138; 110; 60; 34,5 kV.
- c) Distribución Primaria: 34,5; 22,9; 10 kV.
- d) Distribución Secundaria: 380/220V, 220V.

Según la topología

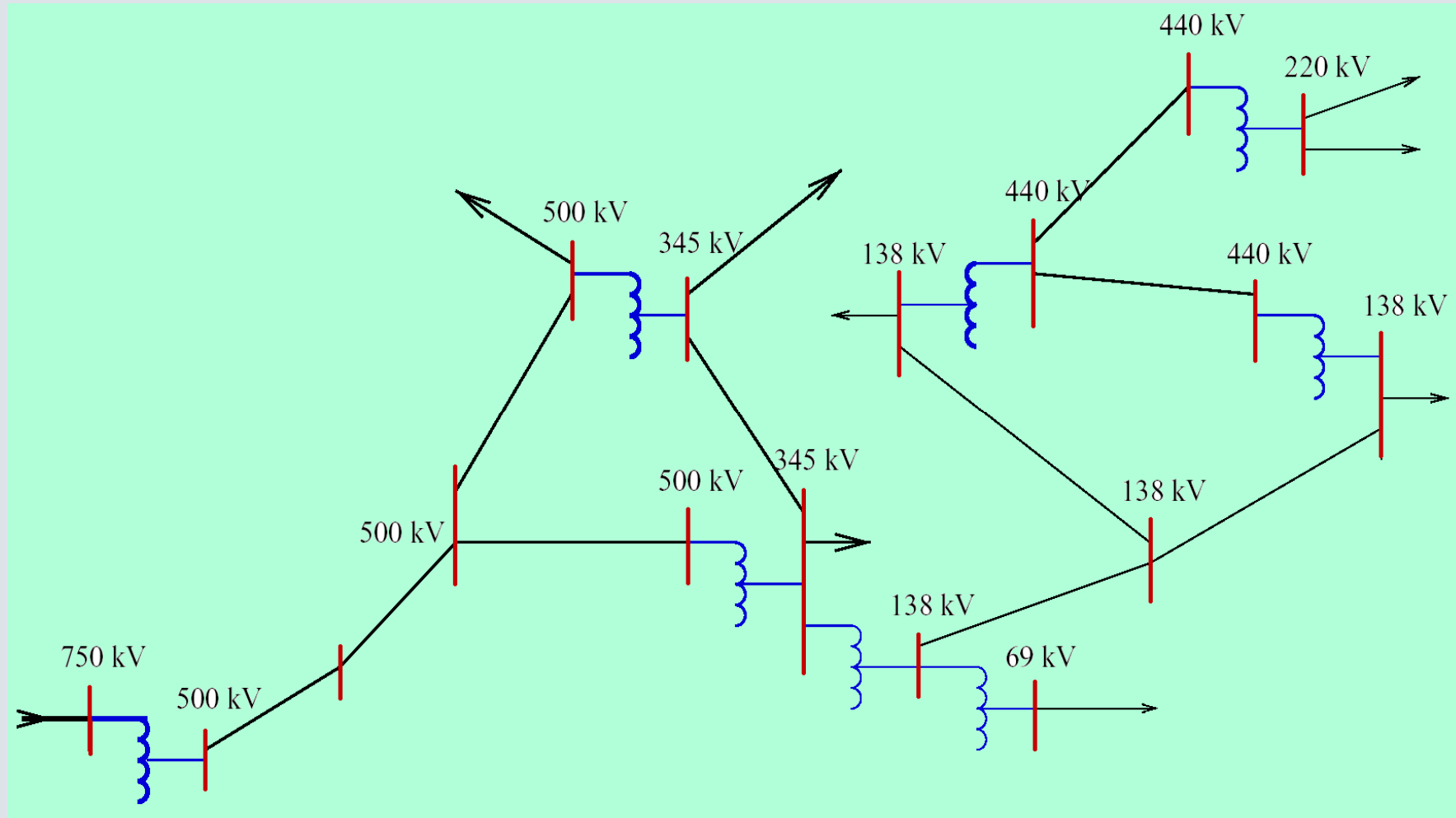
- Radial .
- En anillo (mallado).

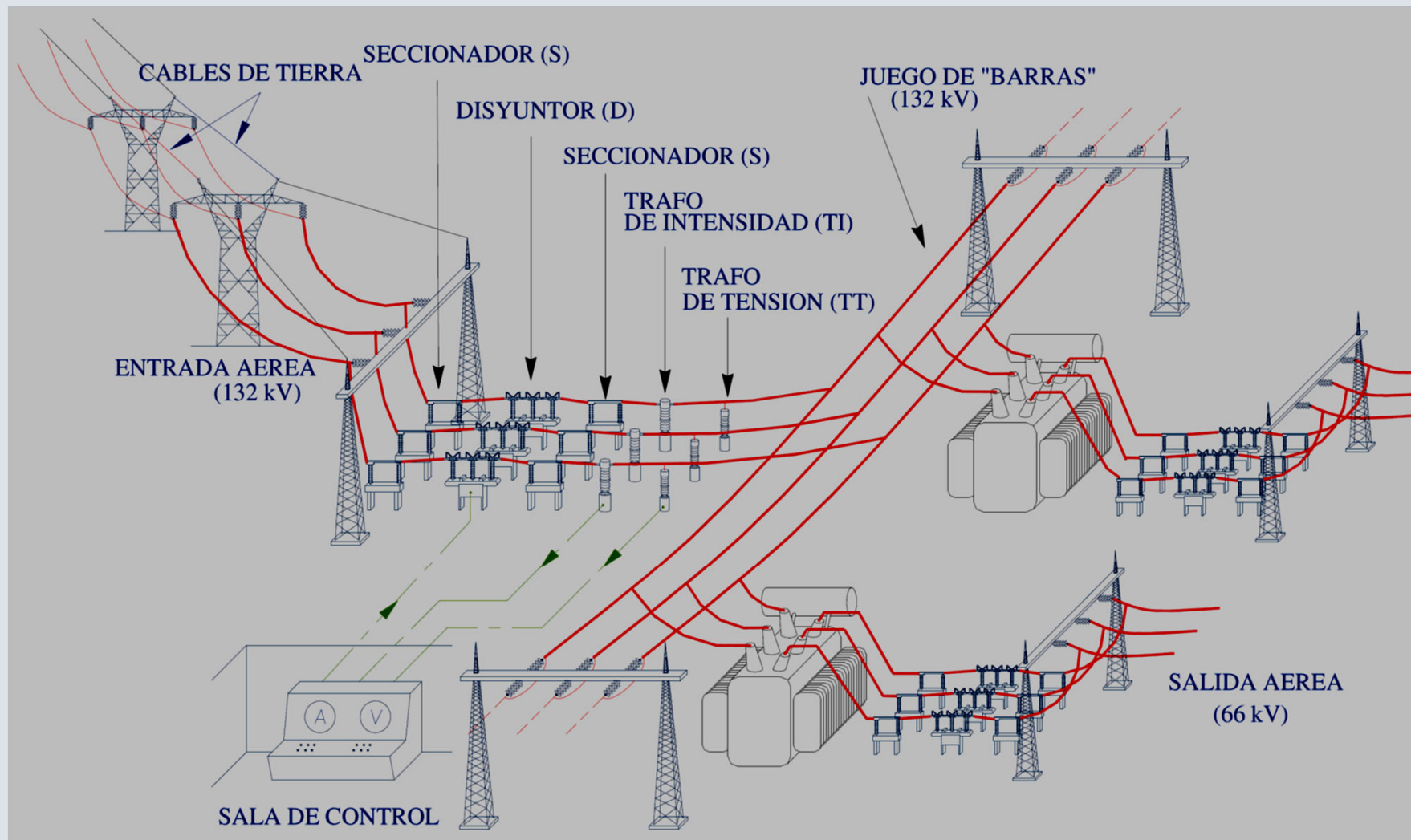


Interconexión

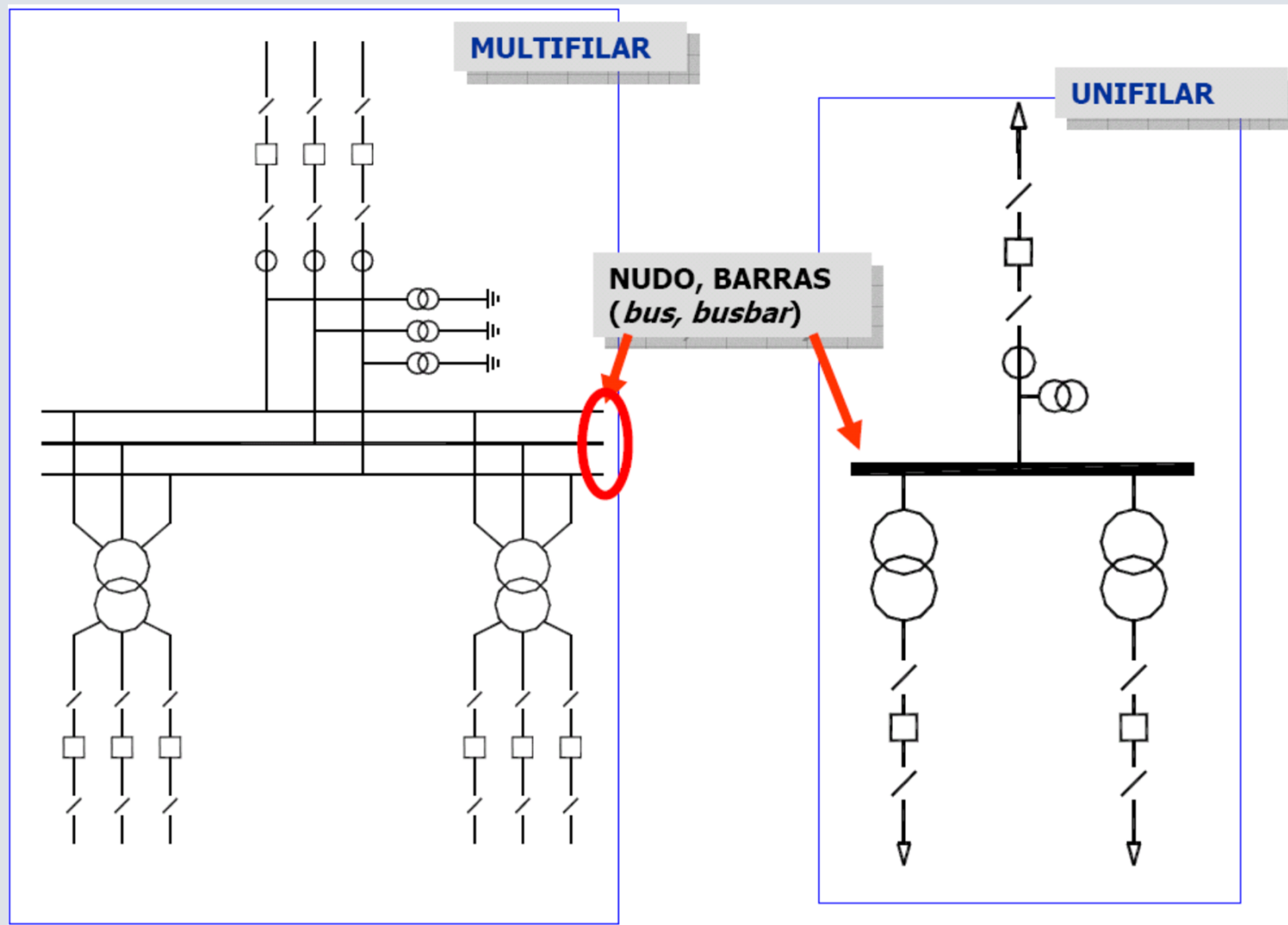
- **Ventajas.**
 - Economía;
 - Confiabilidad;
 - Mejor utilización de los recursos
- **Problemática:**
 - Incremento del nivel de corriente de falla.
 - Propagación de los disturbios a otros sistemas.
 - Mayor dificultad en satisfacer el requisito en cuanto a la frecuencia de operación.

Interconexión

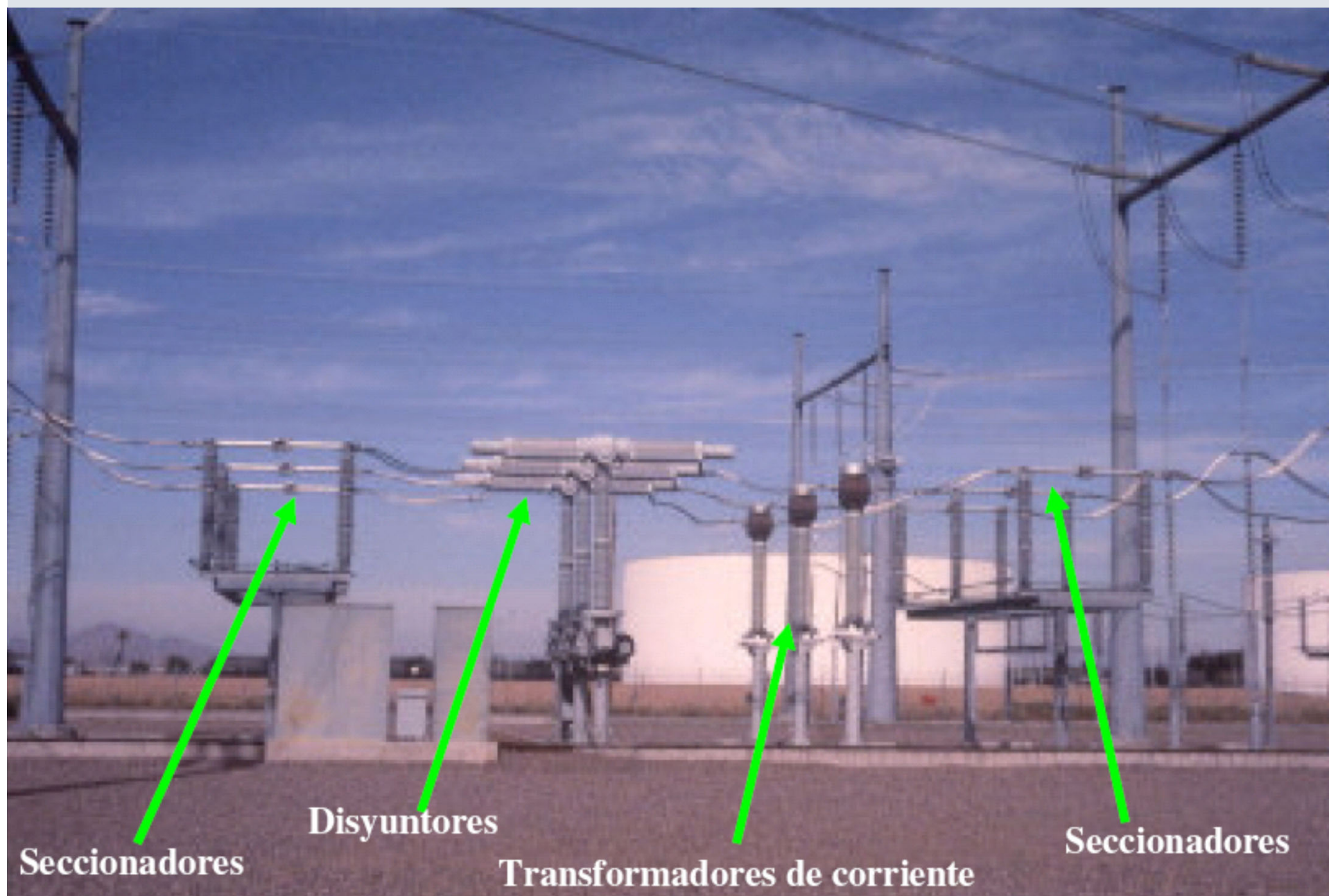




Esquema de unidades basicas SE







Seccionadores

Disyuntores

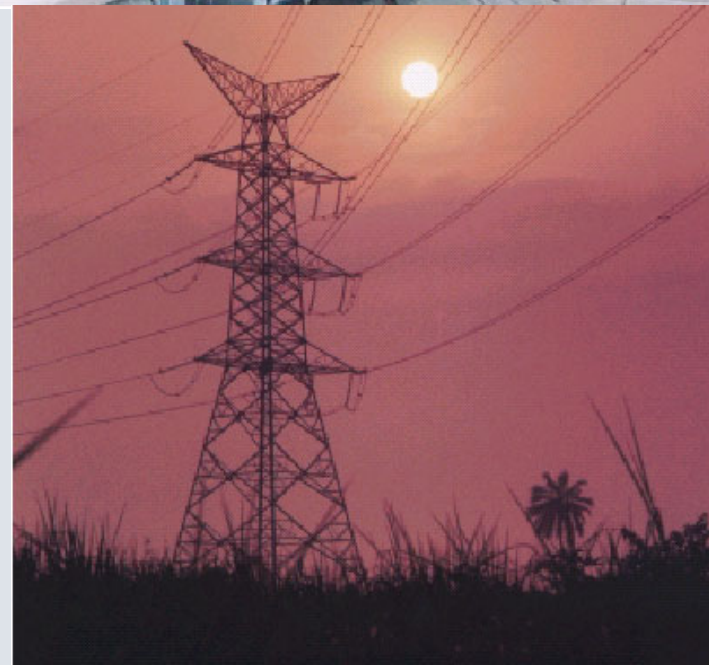
Transformadores de corriente

Seccionadores

07/05/2020

Sistema de transmisión

- Se extiende desde la fuente de generación.
- Consiste de cables subterráneos y conductores aéreos de conductores separados.



Subestaciones de distribución



- Sirve a su propia área de carga.
- Reduce la tensión de subtransmisión.
- Consiste de uno o más bancos de transformadores de potencia con el equipo de regulación de tensión necesaria, barras y equipos de protección, control y maniobra

Transformadores de distribución



Reduce la tensión de distribución de MT al nivel de utilización de BT.

Distribución en BT



Distribución en BT

- Funciona desde la barra de baja tensión a los centros de carga donde se ramifica los alimentadores trifásicos y laterales monofásicos



1.2 CONCEPTOS DE POTENCIA

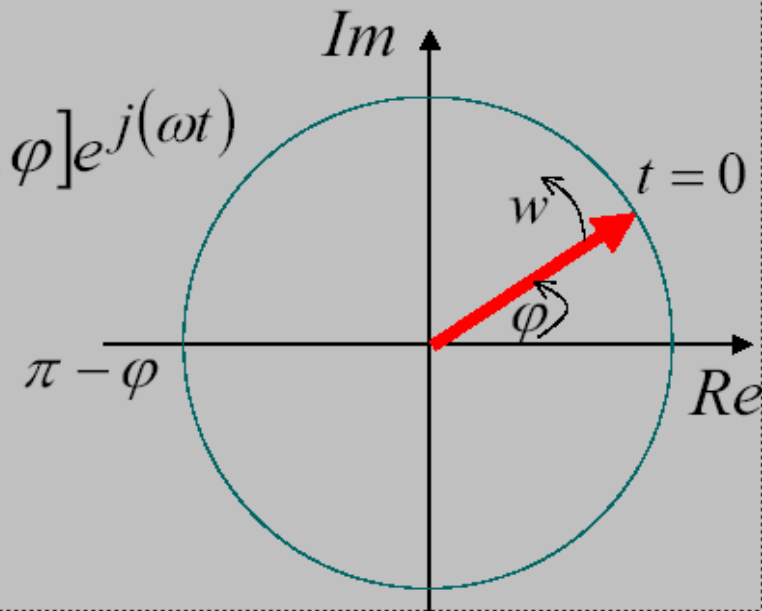
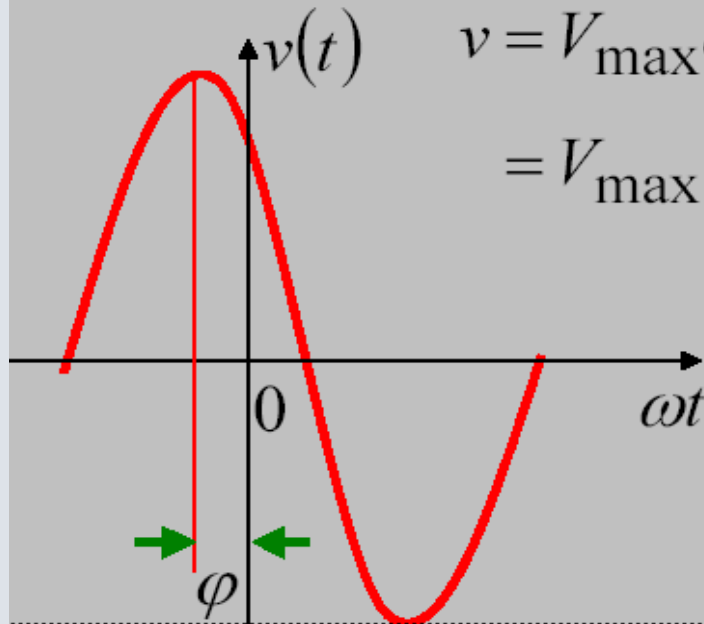
Introducción

Representación sinusoidal y fasorial de corrientes y voltajes

$$v(t) = V_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\bar{v} = V_{\max} e^{j(\omega t + \varphi)}$$

$$= V_{\max} [\cos \varphi + j \sin \varphi] e^{j(\omega t)}$$



ω = velocidad angular , φ = ángulo de fase, $V_{\max}$ = amplitud

Valor eficaz

Concepto de Valor Efectivo o RMS

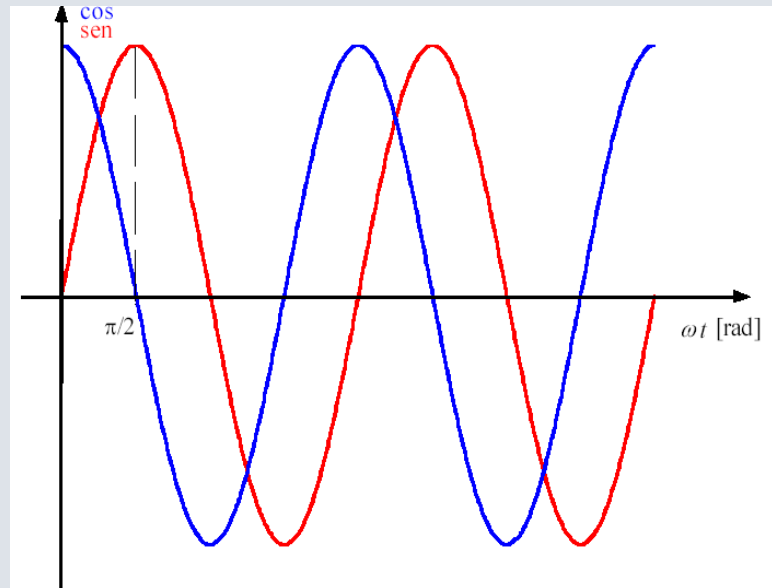
$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \frac{V_{\max}}{\sqrt{2}}$$

Representación fasorial a través de Valor Efectivo

$$\bar{V} = V e^{j\varphi} = V [\cos \varphi + j \sin \varphi]$$

- La suma de dos funciones sinusoidales en el tiempo corresponde con la suma de vectores en el plano complejo
- Derivadas y/o integrales de funciones del tiempo (capacidades, inductancias) se traducen en el plano complejo en giros de fasores. Ecuaciones diferenciales comunes se transforman en ecuaciones algebraicas.

Seno y Coseno



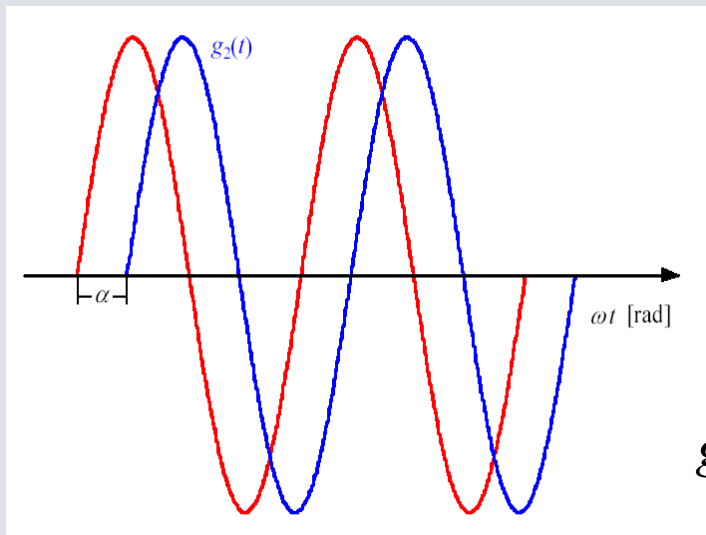
- Un ángulo de fase $\phi = -\pi/2$, transforma la función coseno en seno.

$$\text{Sen } \omega t = \text{Cos} \left[\omega t - \frac{\pi}{2} \right]$$

$$\text{Cos } \omega t = \text{Sen} \left[\omega t + \frac{\pi}{2} \right]$$

Desfasaje

Desfasaje es la diferencia entre los ángulos de fase de las funciones de tipo senoidal de la misma frecuencia angular ω .



Siendo $g_1(t) = G_1 \cdot \cos(\omega t + \phi_1)$

$$g_2(t) = G_2 \cdot \cos(\omega t + \phi_1 - \alpha)$$

$$\phi_2 = \phi_1 - \alpha$$

El desfase entre $g_1(t)$ y $g_2(t)$ es

$$\phi_1 - \phi_2 = \phi_1 - (\phi_1 - \alpha) = \alpha$$

$g_1(t)$ está adelantada respecto a $g_2(t)$ un ángulo α .

$g_2(t)$ está atrasada respecto a $g_1(t)$ un ángulo α .

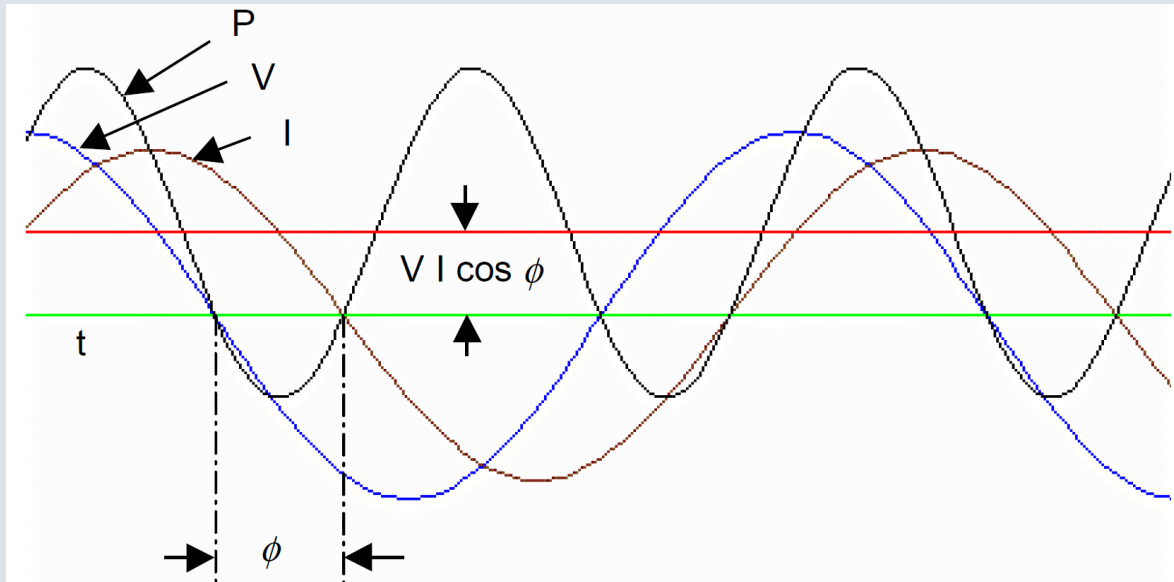
1.2.1 Sistemas monofásicos

$$v(t) = V_m \cos(\omega t)$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t - \phi)$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

$$p(t) = V_m \cos(\omega t) \cdot I_m \cos(\omega t - \phi)$$



Potencia Instantánea

$$p(t) = \frac{V_m I_m}{2} [\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi)]$$

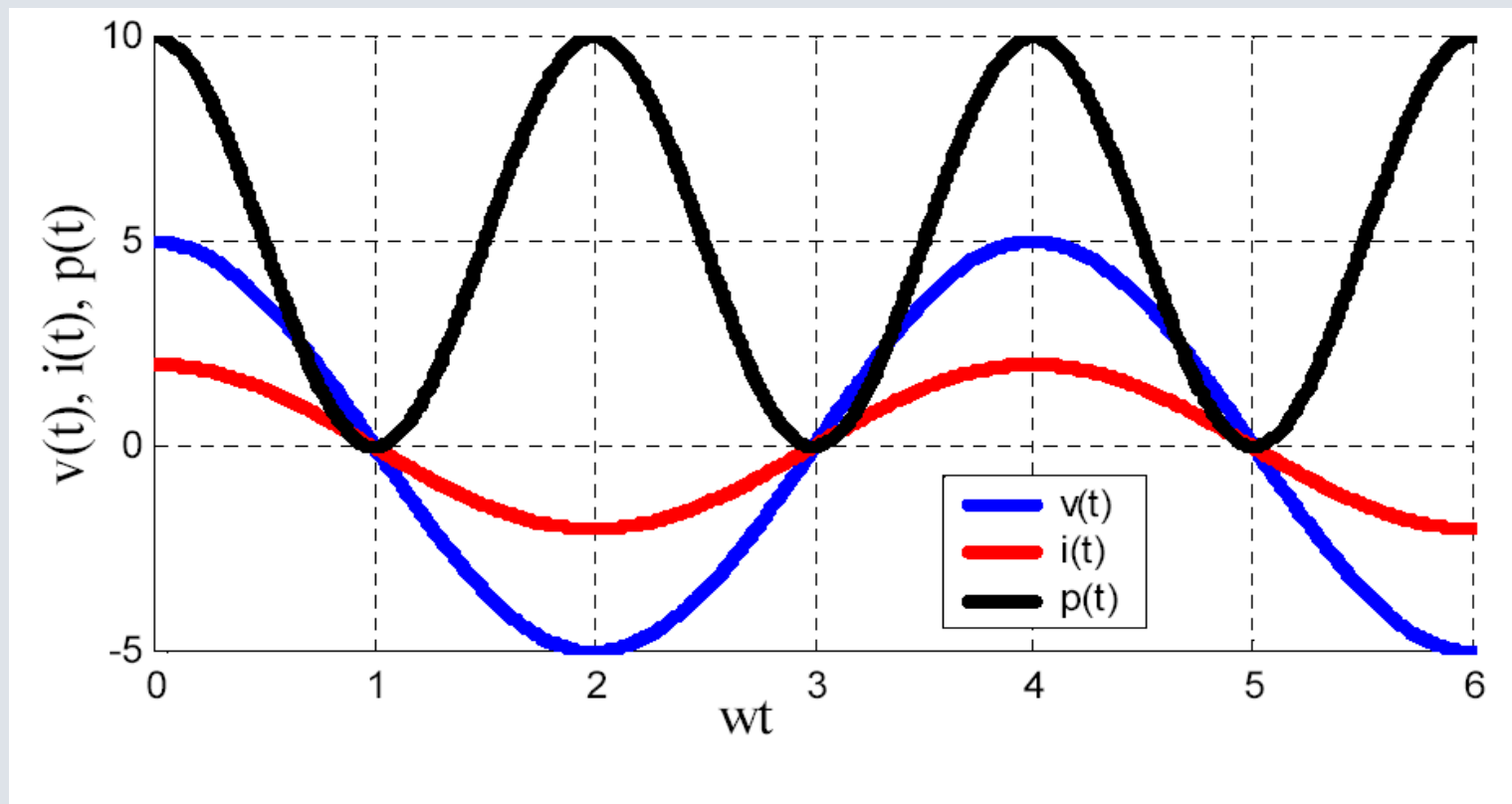
Potencia promedio

- Dado que el promedio de $\cos(2\omega t - \phi) = 0$.
- Entonces:

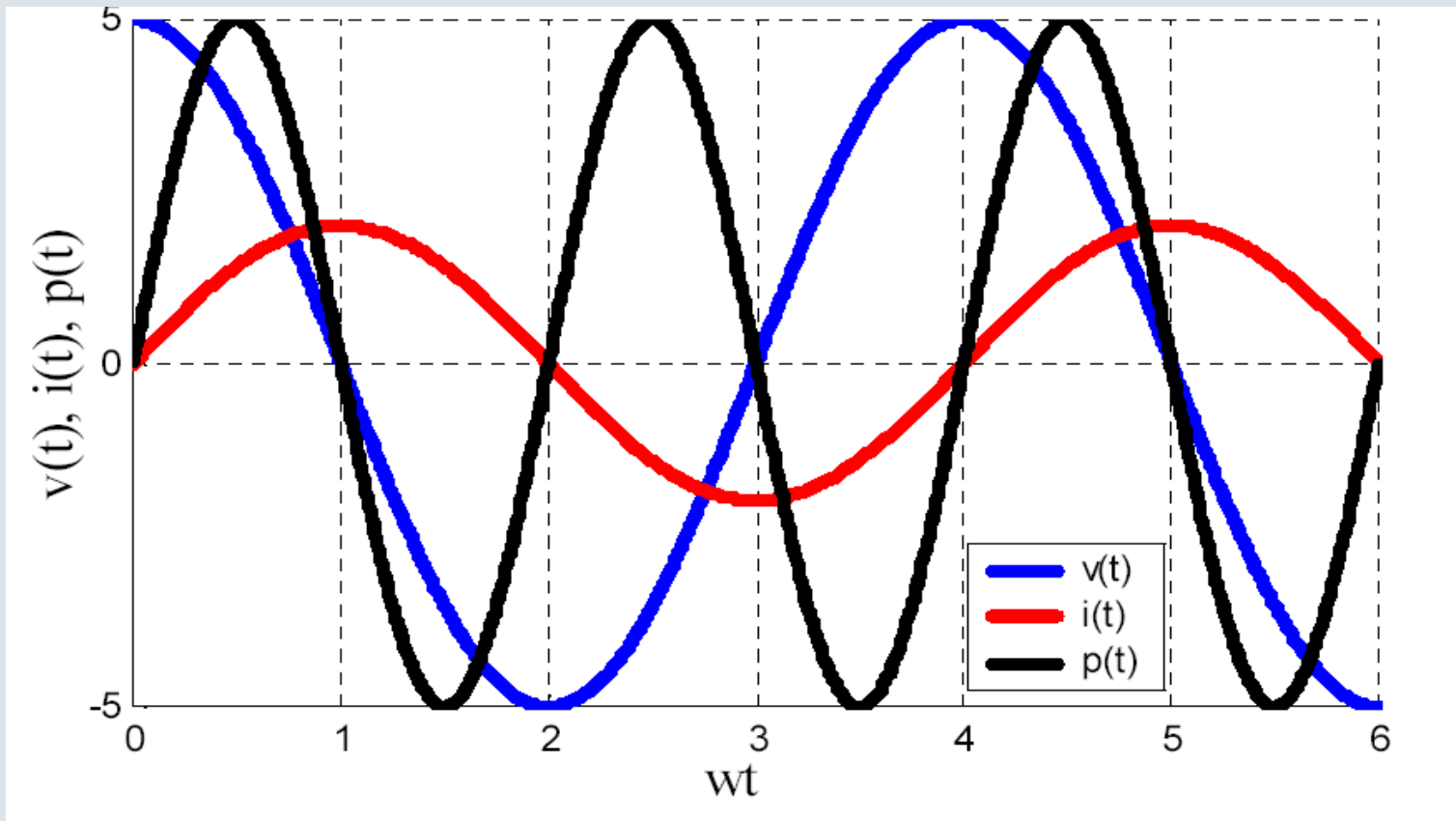
$$P = \frac{V_m I_m}{2} \cos \phi$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos \phi$$

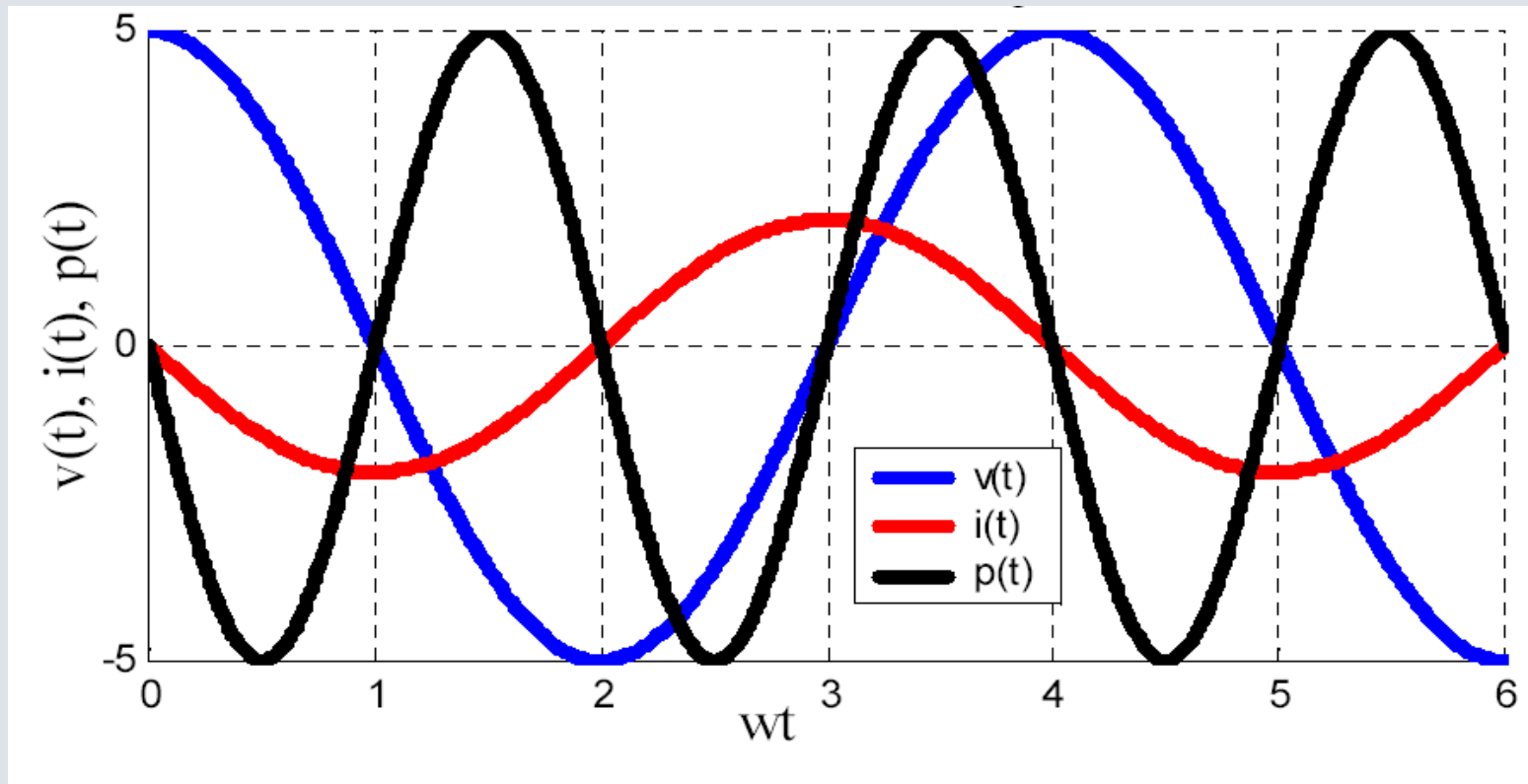
Corriente en fase con la tensión



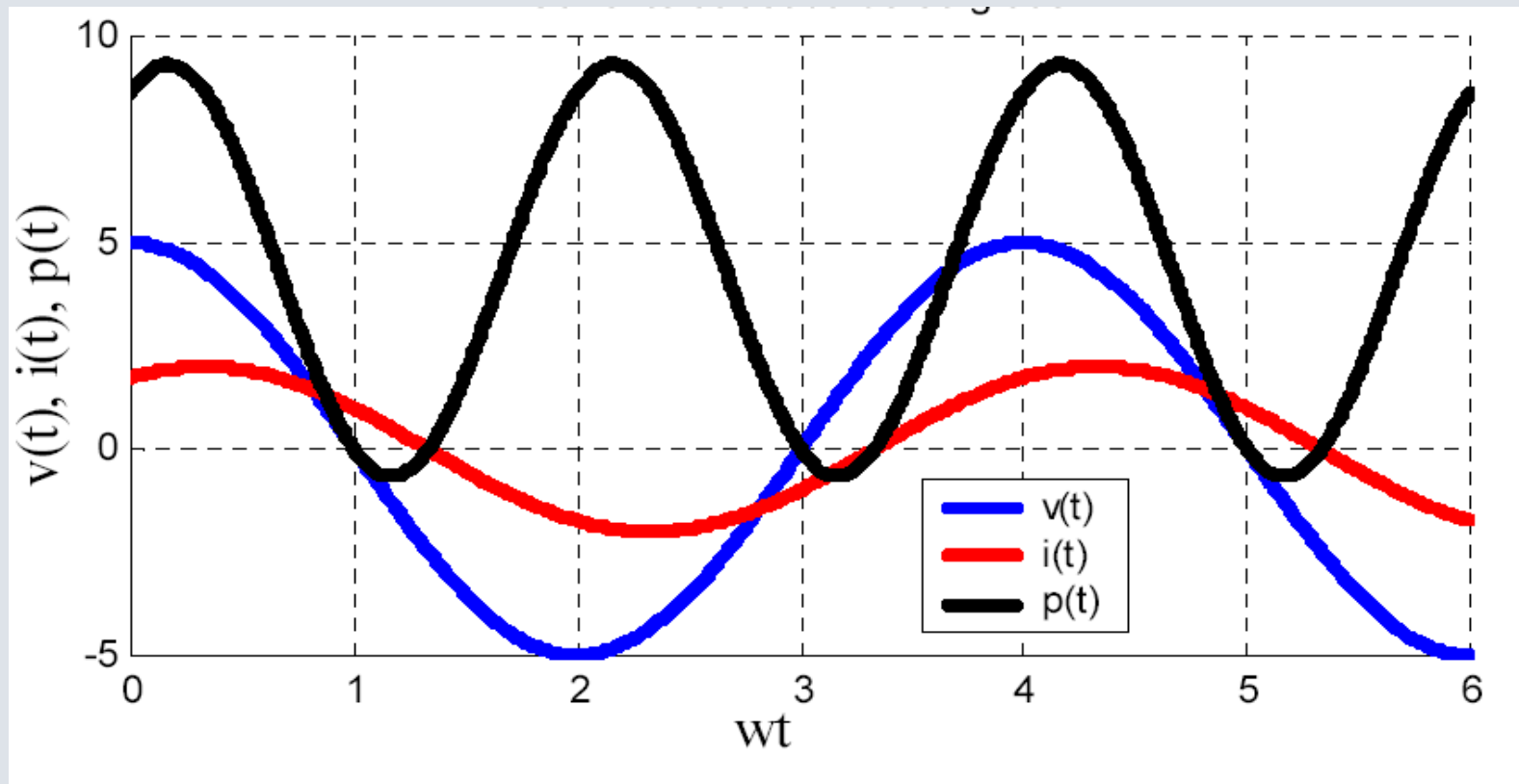
Corriente atrasada en 90°



Corriente adelantada 90°



Corriente atrasada 30°



Potencia compleja

Magnitudes fasoriales de Tensión y corriente conocidas

$$V = |V| \angle 0^\circ \quad \text{and} \quad I = |I| \angle -\phi$$

La potencia compleja o la potencia aparente S es definida como el producto de la tensión por la conjugada de la corriente:

$$S = V \cdot I^* = |V| \cdot |I| \angle \phi$$

$$S = |V| \cdot |I| \cos \phi + j |V| \cdot |I| \sin \phi$$

Donde el ángulo ϕ es el ángulo entre la tensión y la corriente. La ecuación anterior puede ser escrita como:

$$S = P + jQ \quad (VA)$$

Potencia activa y reactiva

- **Potencia activa** (eficaz, útil, que produce trabajo): valor medio de la potencia instantánea.

$$P \triangleq \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T [VI \cos \theta [1 + \cos(2\omega t + 2\phi)] + VI \sin \theta \sin(2\omega t + 2\phi)] dt$$
$$P = VI \cos \theta \quad [W]$$

- **Potencia reactiva** corresponde al valor máximo de la parte en $\sin(2\omega t + 2\phi)$ de la potencia instantánea.

Convención: INDUCTOR: “consume” potencia reactiva.

CAPACITOR: “genera” potencia reactiva.

Fasor

Número complejo que tiene como variable a su argumento

$$U = 220V\angle 0^\circ$$

$$I = 20A\angle -30^\circ$$

$$S = U \cdot I^* = 4400VA\angle 30^\circ$$

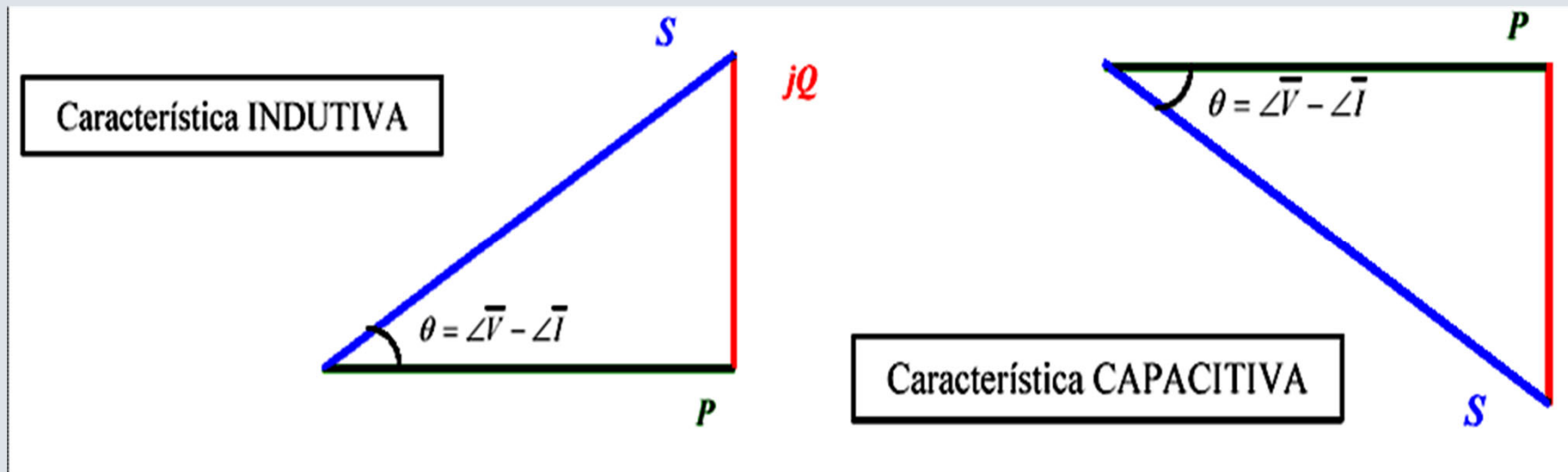
$$P = 4400 \cos 30^\circ = 3810,51W$$

$$Q = 4400 \sin 30^\circ = 2200 VAR$$

Triángulo de potencias

- Los signos de P y Q son importantes en el conocimiento de la dirección del flujo de potencia

$$S = V \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}]$$



Factor de potencia

- Es obtenido por la relación entre las potencias activa y aparente

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{VI} = \cos \theta$$

Potencia compleja

$$P = |V| \cdot |I| \cos(\phi) \quad (W)$$

$$Q = |V| \cdot |I| \sin(\phi) \quad (VAr)$$

$$\cos \phi = \cos \left[\arctan \left(\frac{Q}{P} \right) \right] = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{P}{|S|}$$

Impedancia

- Sirve para modelar la carga.
- Se puede emplear un número complejo. Lo puede representar en un plano complejo.
- Unidad: Ohmios

Características:

- Resistiva.
- Inductiva
- capacitiva

Resistencia (R)= 10 Ω

Reactancia inductiva

$$X_L = (jX_L) = j \omega L$$

$$\omega = 2\pi \cdot f \text{ (rad/s)}$$

$$f = 60 \text{ Hz}$$

$$L = 120 \text{ mH.}$$

$$X_L = j\omega L = j 376,99 \times 120 \times 10^{-3} \Omega$$

$$X_L = j\omega L = j 45,24 \Omega$$

Impedancia

- Reactancia Capacitiva
(jX_C) = $-1/j \omega C$
- $f = 60 \text{ Hz}$
- $C = 100 \mu\text{F}$
- $X_C = -j 26,526 \Omega$

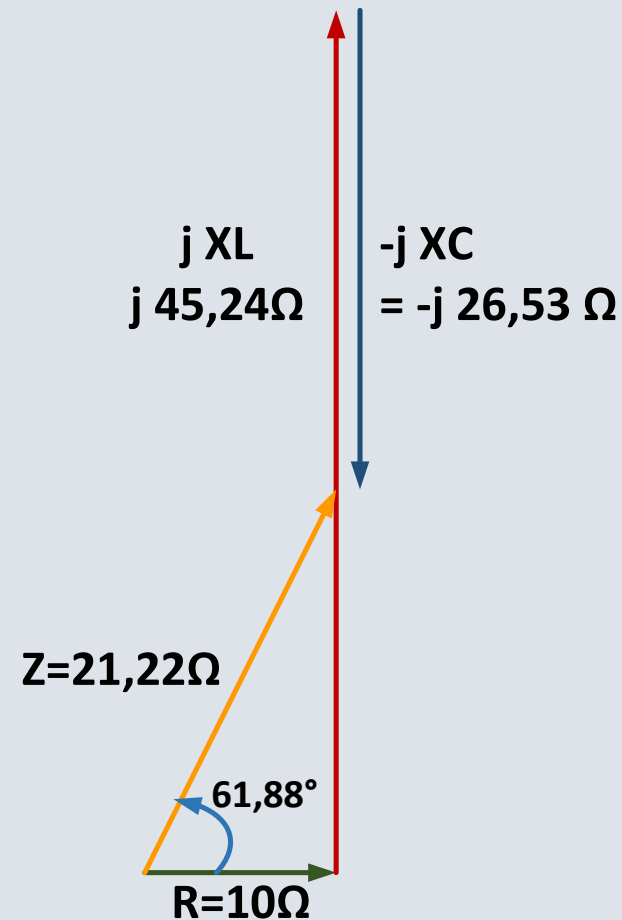
Conexión serie (Z_L)

$$Z_L = R + j(X_L - X_C)$$

$$Z_L = 10 + j(45,24 - 26,526) \Omega$$

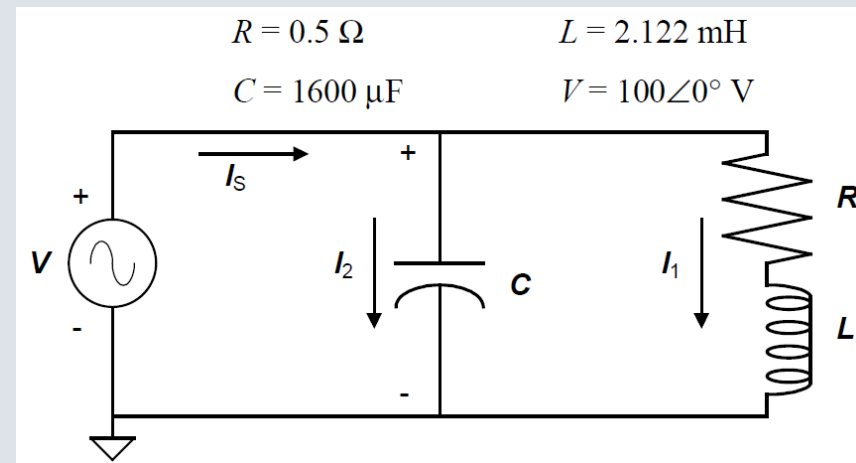
$$Z_L = 10 + j(45,24 - 26,526) \Omega$$

$$Z_L = 21,22 \angle 61,88^\circ \Omega$$



Ejemplo 1

- En el circuito mostrado hallar:
 - a. La corriente de entrada (I_s)
 - b. Las potencias suministrada por la fuente: P, Q y S.
 - c. El factor de potencia del circuito.



Ejemplo 1

$$I_1 = \frac{V}{R + j\omega L} = \frac{100\angle 0^\circ \text{ V}}{0.5 \, \Omega + j(377 \text{ r/s})(2.122 \times 10^{-3} \text{ H})} = 106.0\angle -58.0^\circ \text{ A}$$

$$I_2 = V \cdot (j\omega C) = j(100 \text{ V})(377 \text{ r/s})(1.6 \times 10^{-3} \text{ F}) = 60.3\angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_s = I_1 + I_2 = 106.0\angle -58.0^\circ \text{ A} + 60.3\angle 90^\circ \text{ A} = 63.5\angle -27.8^\circ \text{ A}$$

$$S = V \cdot I^* = (100\angle 0^\circ \text{ V})(63.5\angle 27.8^\circ \text{ A}) = 6350\angle 27.8^\circ \text{ VA}$$

$$S = 5617 + j2962 \text{ VA}$$

$$P = 5617 \text{ W}$$

$$Q = 2962 \text{ Var}$$

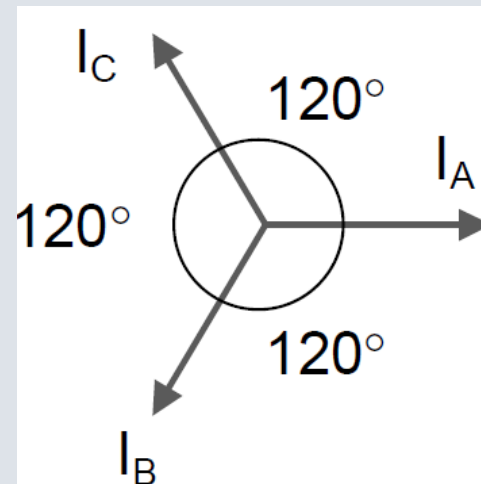
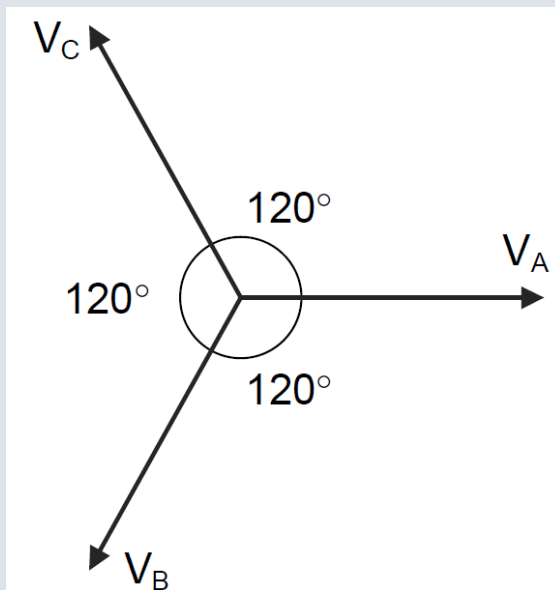
$$\phi = 27.8^\circ$$

$$PF = \cos(\phi) = \cos(27.8^\circ) = 0.88 \quad \text{lagging}$$

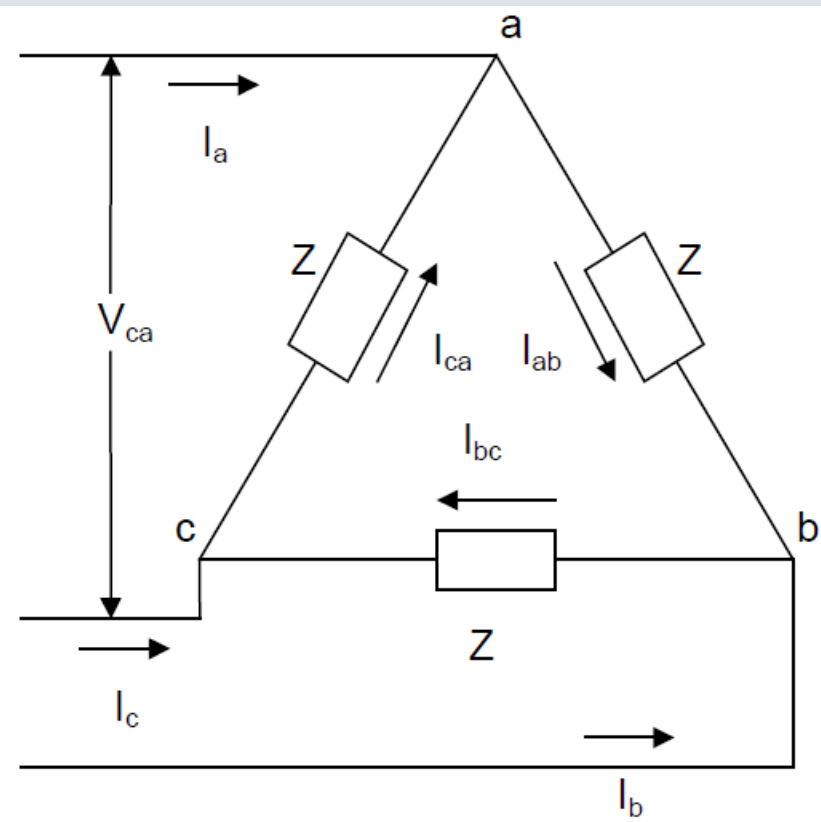
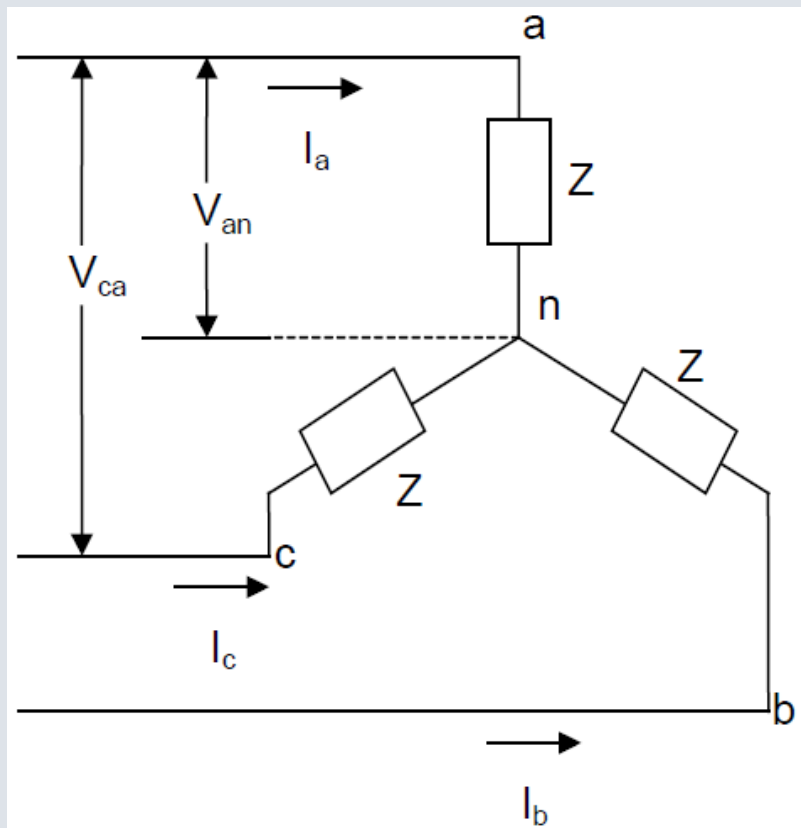
1.2.2 Sistemas trifásicos

Se asume: potencia eléctrica generada, transmitida, y distribuida usando un sistema trifásico balanceado.

Sistema trifásico balanceado: constituido de tres fuentes monofásicas de la misma magnitud y frecuencia, pero desfasadas 120° entre si.

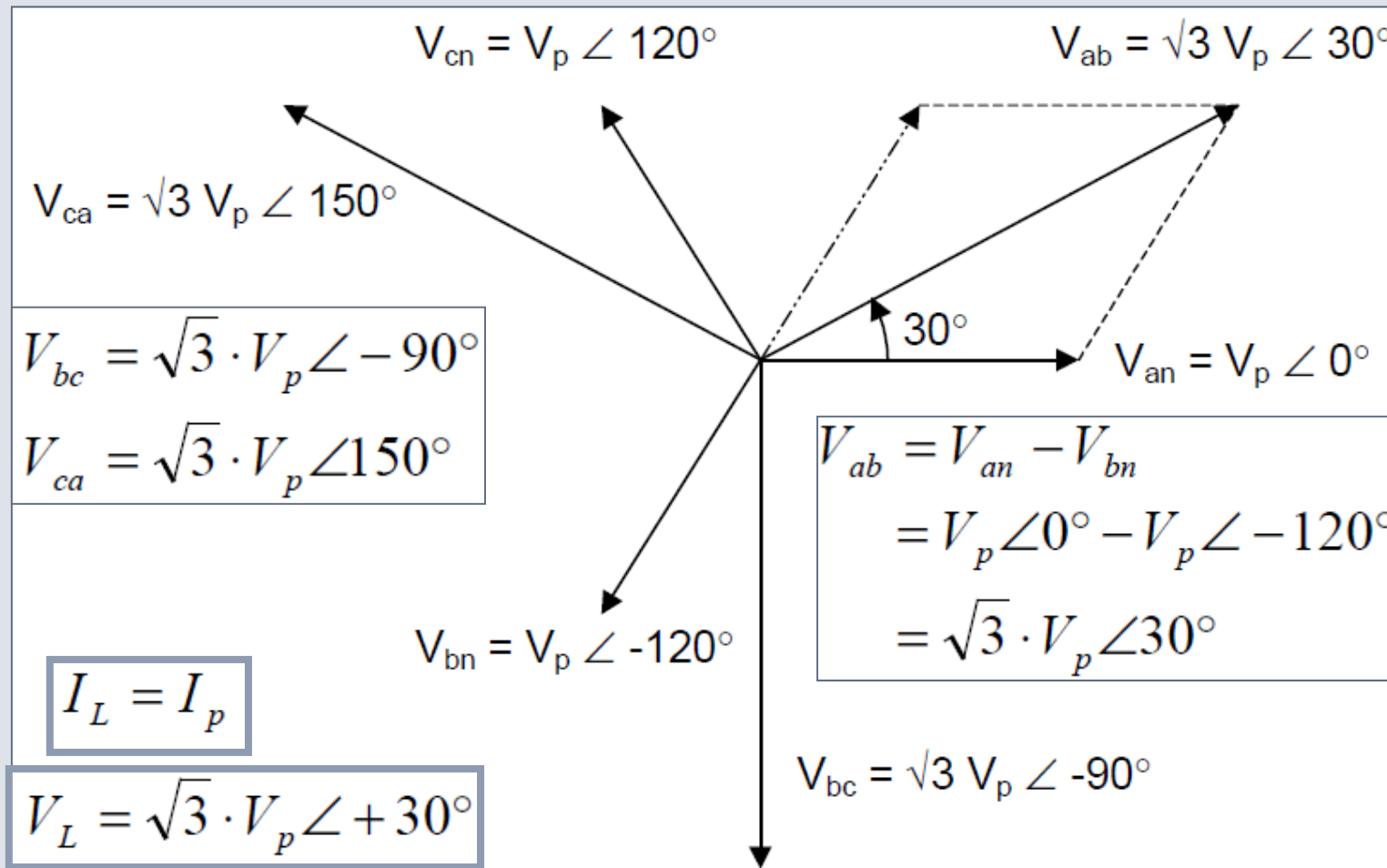


Conexión Y o Δ



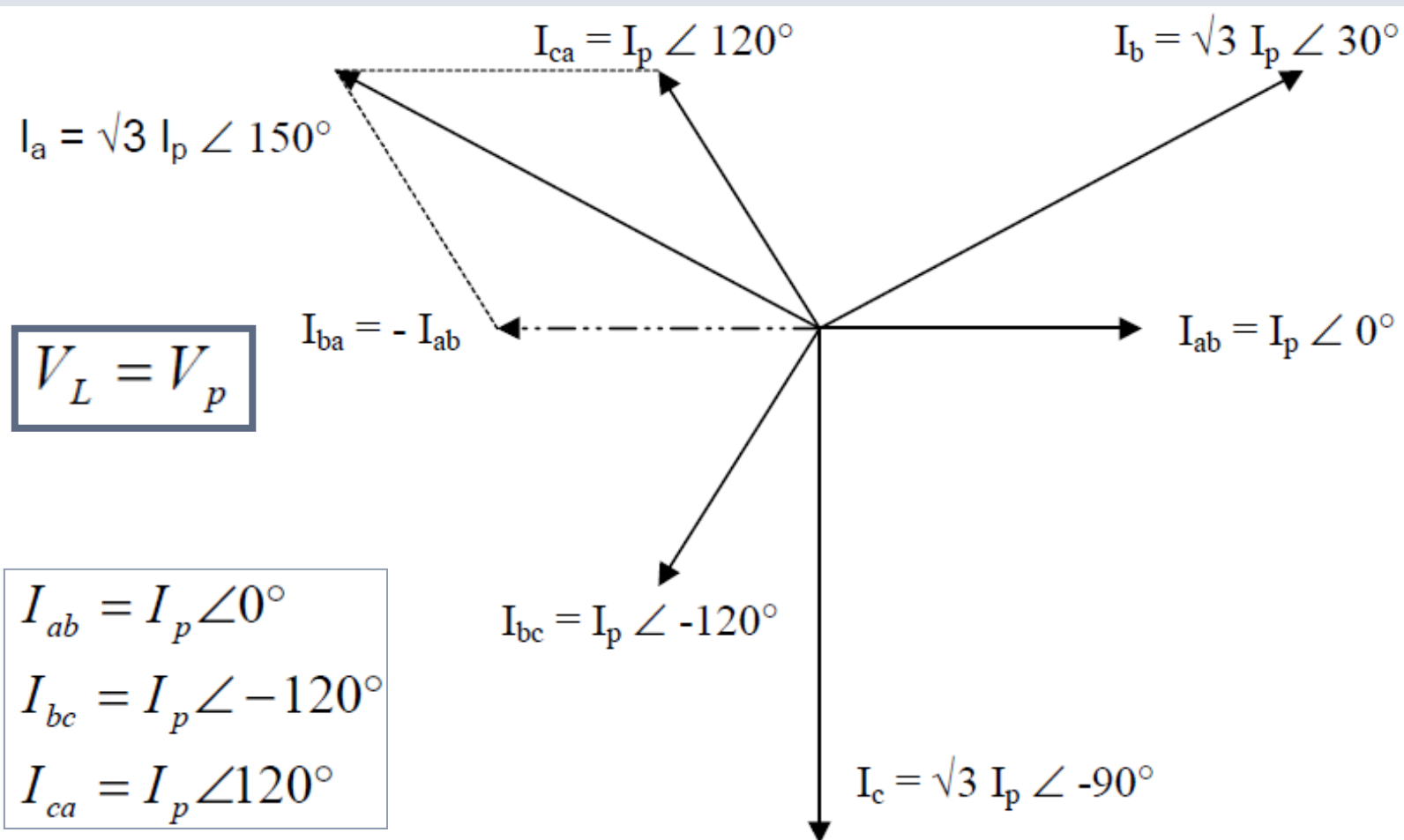
Relación entre Tensiones y corrientes

Conexión Y



Relación entre Tensiones y corrientes

Conexión Δ



Relación entre Tensiones y corrientes

Conexión Δ

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ca} - I_{ab} = I_p \angle 120^\circ - I_p \angle 0^\circ \\ &= \sqrt{3} \cdot I_p \angle 150^\circ \end{aligned}$$

$$I_b = \sqrt{3} \cdot I_p \angle 30^\circ$$

$$I_c = \sqrt{3} \cdot I_p \angle -90^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_p \angle +30^\circ$$

Relación entre potencias

Asumiendo que la fuente trifásica balanceada suministra energía a una carga trifásica balanceada.

$$V_a(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t)$$

$$V_b(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$V_c(t) = \sqrt{2} \cdot V_p \sin(\omega t + 120^\circ)$$

$$I_a(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t - \phi)$$

$$I_b(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t - 120^\circ - \phi)$$

$$I_c(t) = \sqrt{2} \cdot I_p \sin(\omega t + 120^\circ - \phi)$$

Potencia activa trifásica

$$P_{3\phi} = V_a \cdot I_a \cdot \cos \phi + V_b \cdot I_b \cdot \cos \phi + V_c \cdot I_c \cdot \cos \phi$$

$$P_{3\phi} = V_p I_p \{3 \cos \phi - [\cos(2\omega t - \phi) + \cos(2\omega t - 240 - \phi) + \cos(2\omega t + 240 - \phi)]\}$$

$$P_{3\phi} = 3 \cdot V_p I_p \cos(\phi)$$

$$P_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot V_L I_L \cos(\phi)$$

Potencia compleja

$$S_{3\phi} = 3 \cdot V_p \cdot I_p^*$$

$$= \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L^*$$

$$\text{If } V_p = |V_p| \angle 0^\circ \text{ and } I_p = |I_p| \angle -\phi$$

$$S_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \angle \phi$$

$$\begin{aligned} S_{3\phi} &= 3|V_p||I_p|(\cos \phi + j \sin \phi) \\ &= P_{3\phi} + jQ_{3\phi} \end{aligned}$$

$$P_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \cos \phi = \sqrt{3}|V_L||I_L| \cos \phi$$

$$Q_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \sin \phi = \sqrt{3}|V_L||I_L| \sin \phi$$

Link

- <https://www.youtube.com/watch?v=HonwOVt0zvo>