

AGENDA

Introducción

Definición de Factor de Potencia

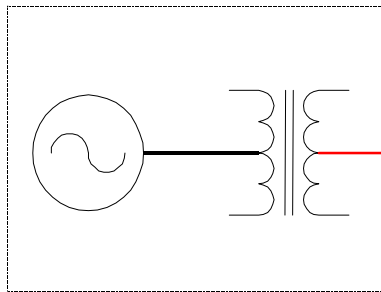
Penalización por bajo factor de potencia

Beneficios de la corrección de factor de potencia

Localización de bancos de capacitores

Sistema de Potencia

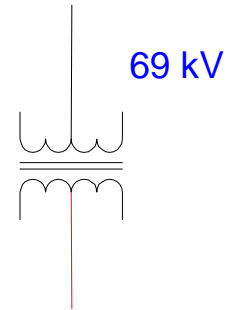
Planta Generadora



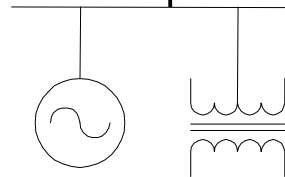
13.2 - 20 kV

Sistema de Transmisión

115 - 400 kV

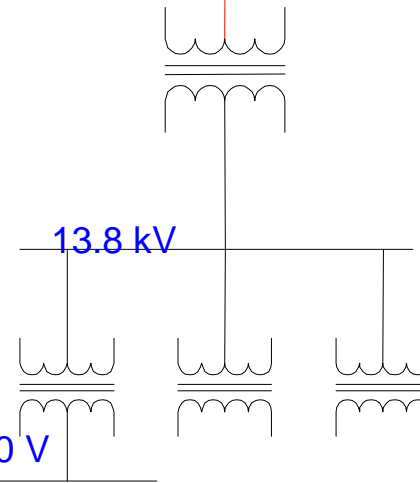


13.8 kV



Consumidores Industriales

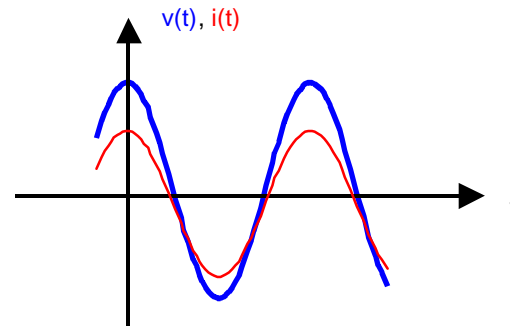
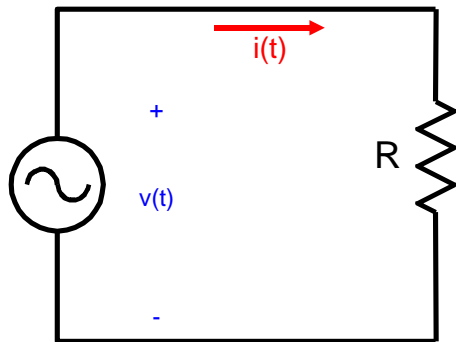
13.8 kV



220 - 440 V

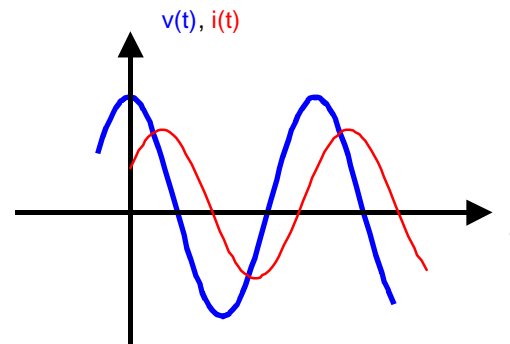
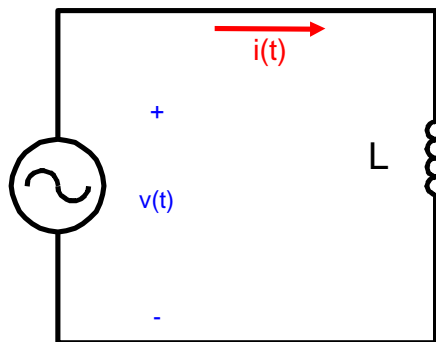
Consumidores Residenciales y comerciales

Desfasamiento entre corriente y voltaje

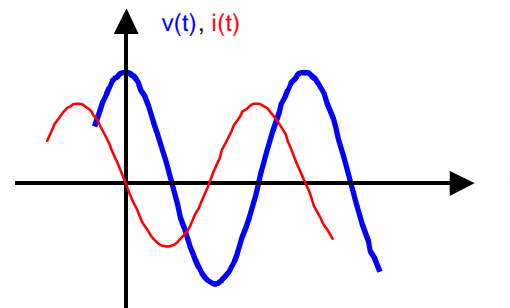
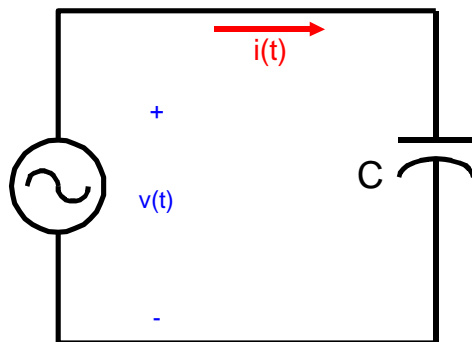


— voltaje
— corriente

Corriente y voltaje
en fase

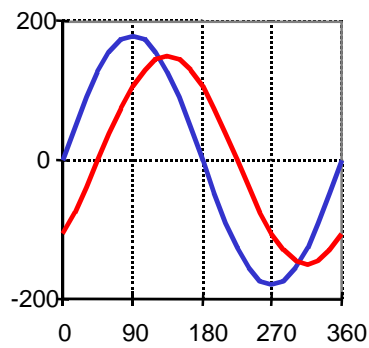
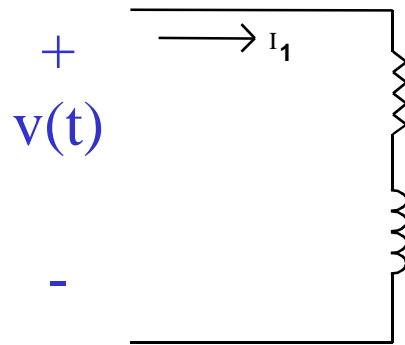
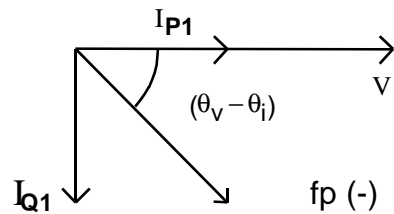


Corriente atrasa al
voltaje por 90 grados

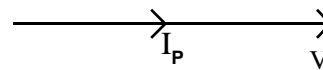


Corriente adelanta al
voltaje por 90 grados

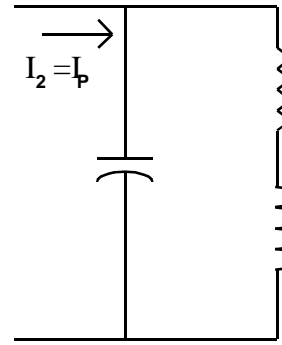
Corrección de factor de potencia (Efecto en la corriente)



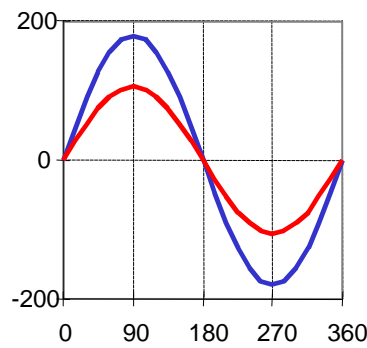
(a)



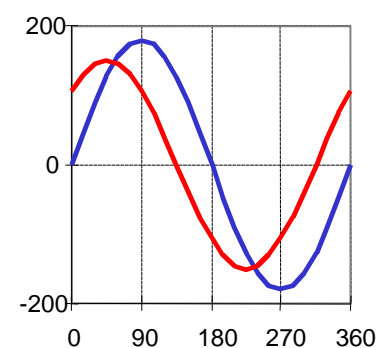
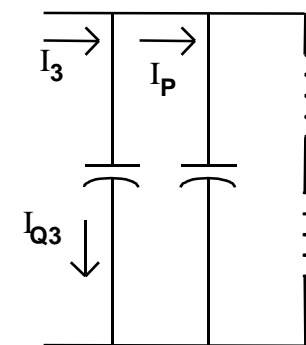
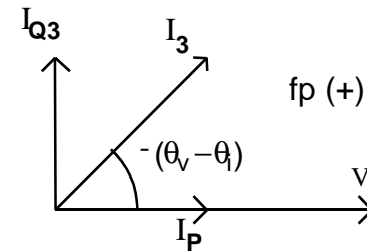
$fp = 1$



— I — V

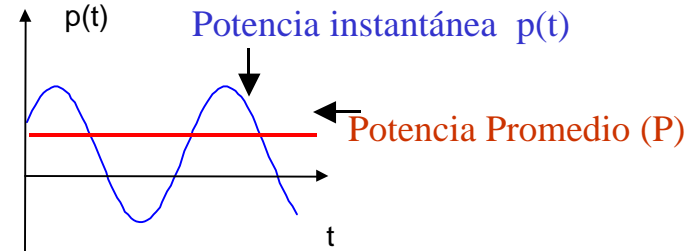
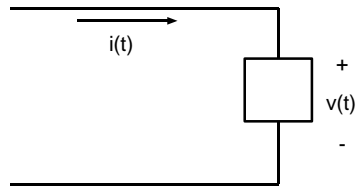


(b)



(c)

Potencia (Estado estable senoidal)



$$p(t) = V_m \cos(\omega t + \mathbf{q}) I_m \cos(\omega t + \mathbf{f}) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f}) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \mathbf{q} + \mathbf{f})$$

Potencia Promedio: $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f})$ Watts (W)

Potencia Reactiva: $Q = \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\mathbf{q} - \mathbf{f})$ Volt-ampere reactivos (VAR)

Potencia Aparente: $S = \frac{1}{2} V_m I_m$ Volt-amperes (VA)

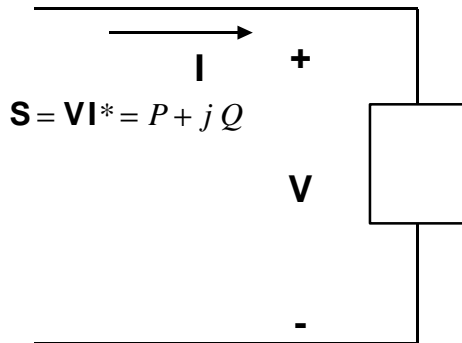
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}; I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f})$$

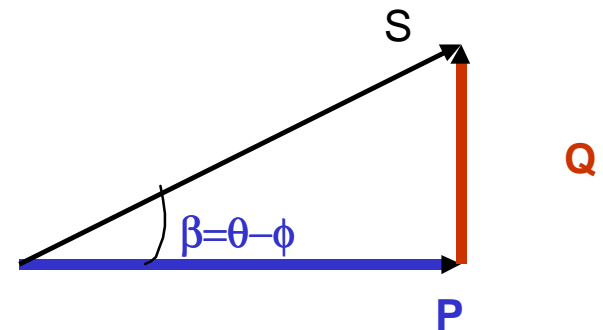
$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin(\mathbf{q} - \mathbf{f})$$

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{V I}^* = S \angle \mathbf{b} = S \cos(\mathbf{b}) + j S \sin(\mathbf{b}) = P + j Q$$

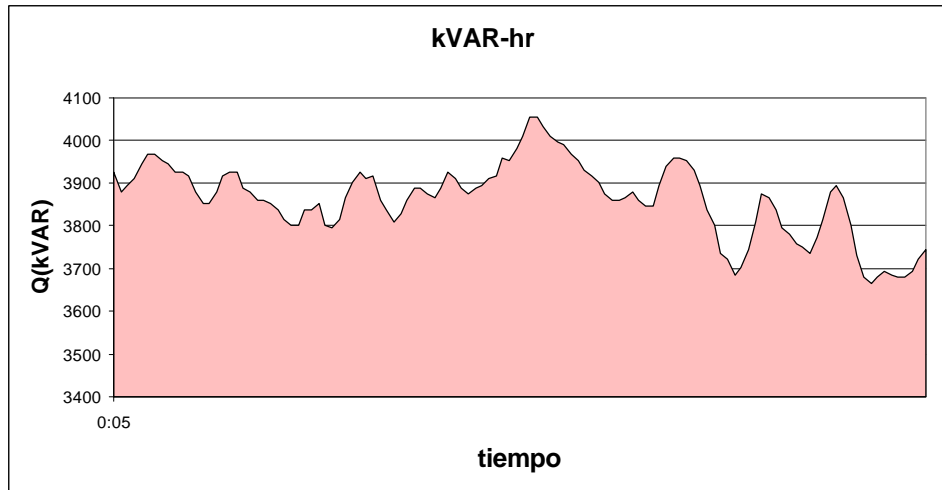
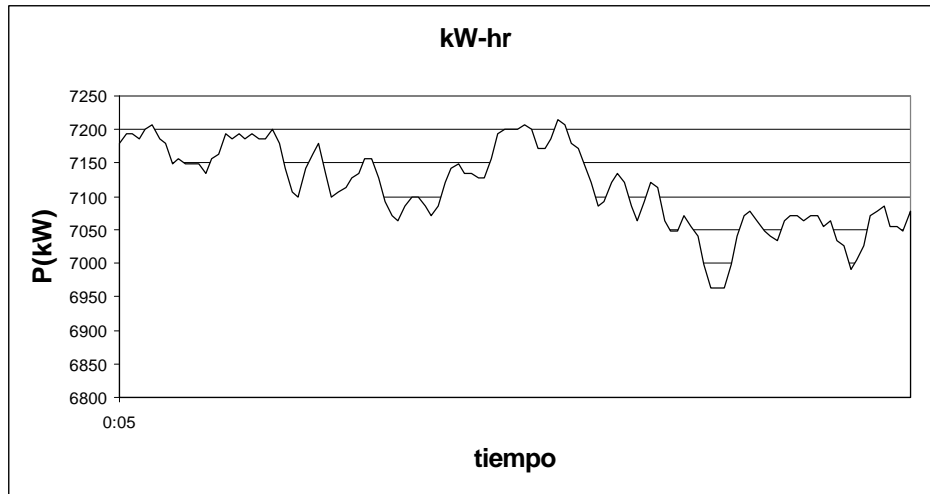


- Si $P > 0$, el elemento consume Potencia Real
- Si $P < 0$, el elemento produce potencia real
- Si $Q > 0$, el elemento consume pot. reactiva
- Si $Q < 0$, el elemento produce pot. reactiva



V e I expresados en valores RMS

Cálculo de factor de potencia



$$f_p = \frac{\text{kWhr}}{\sqrt{[\text{kWhr}]^2 + [\text{kVARhr}]^2}}$$

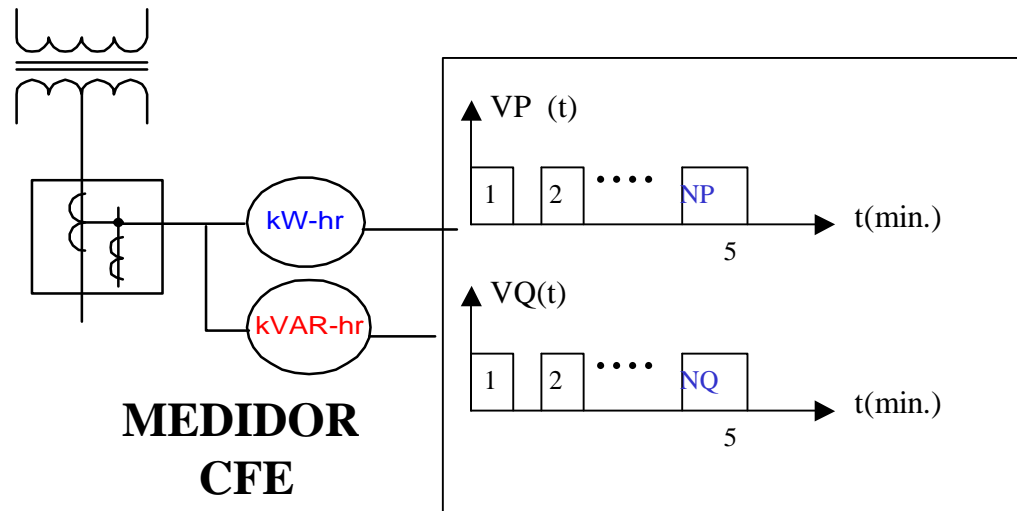
$$\% \text{ Rec.} = 60 \left[\frac{0.9}{fp} - 1 \right]$$

$$\% \text{ Bonif.} = 25 \left[1 - \frac{0.9}{fp} \right]$$

$$C_{\text{arg o}} = (CE + CD) * \% \text{ Rec arg o}$$

$$\text{Bonif.} = (CE + CD) * \% \text{ Bonif.}$$

Cálculo de factor de potencia



kW-hr \propto [NP]

kVAR-hr \propto [NQ]

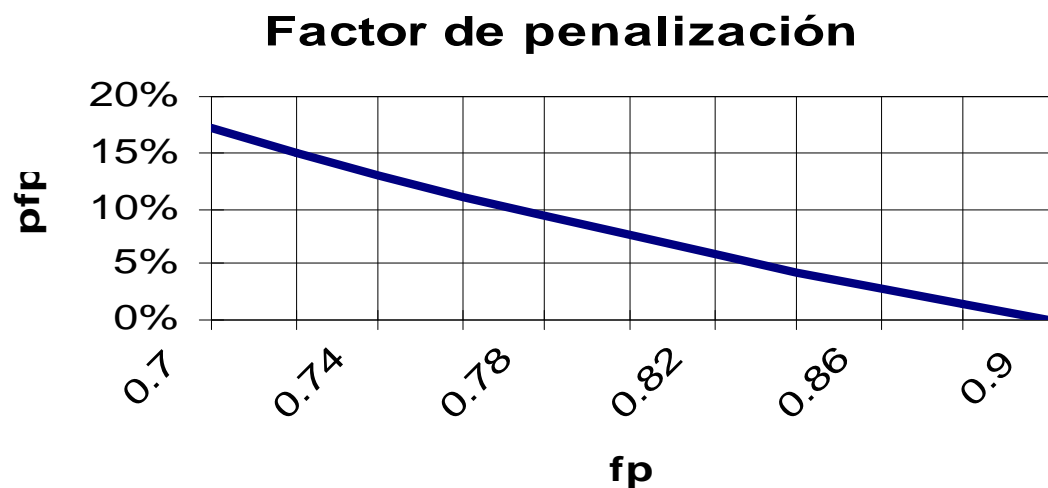
$$fp = \frac{kW - hr}{\sqrt{kW - hr^2 + kVAR - hr^2}} = \frac{NP}{\sqrt{NP^2 + NQ^2}}$$

NP: Número de pulsos proporcionales a kW-hr

NQ: Número de pulsos proporcionales a kVAR-hr

Beneficios de la corrección del factor de potencia

1) Eliminar penalización

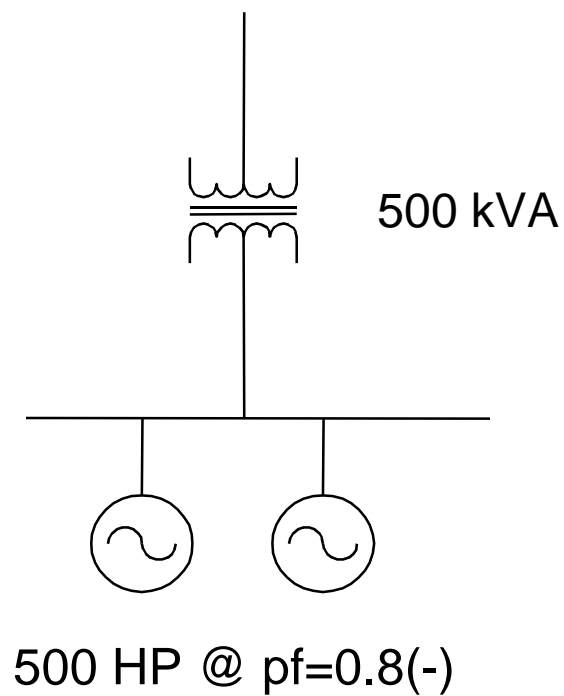


fp corregido

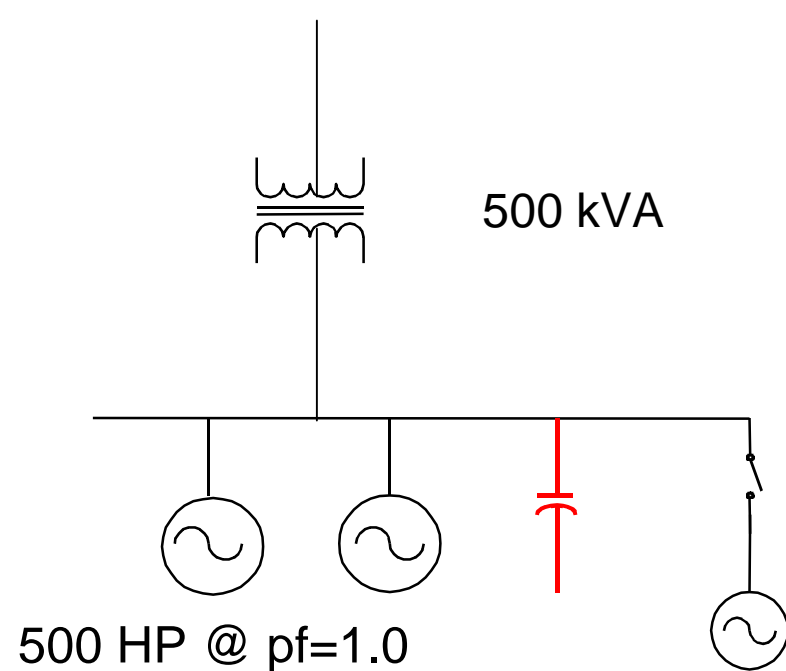
fp original

	0.7	0.8	0.9	1
0.7	*	9.6%	17.1%	19.6%
0.8	*	*	7.5%	10.0%
0.9	*	*	*	2.5%

2) Recuperación de la Capacidad Instalada



Opera a plena carga !

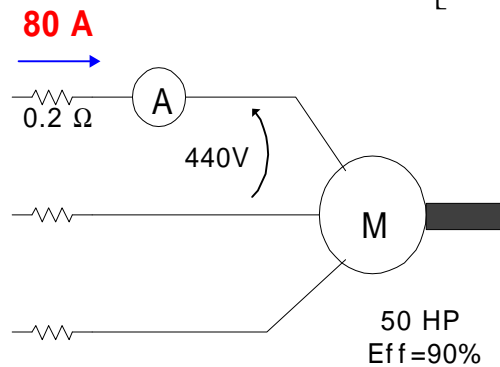


**Opera al 80% de su capacidad
Se recupera un 20% que puede
utilizarse para alimentar otra carga**

3) Reducción de pérdidas

Reducción de pérdidas

$$\% \Delta P = 100 \left[1 - \left[\frac{fp}{fp'} \right]^2 \right]$$

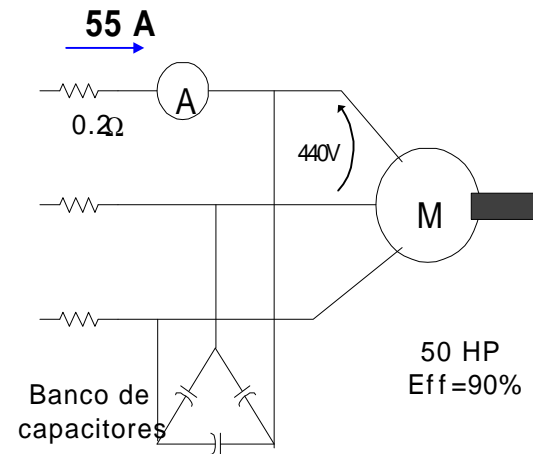


factor de potencia =0.69

Corriente ~ 80 A

Pérdidas en cable

3840 Watts



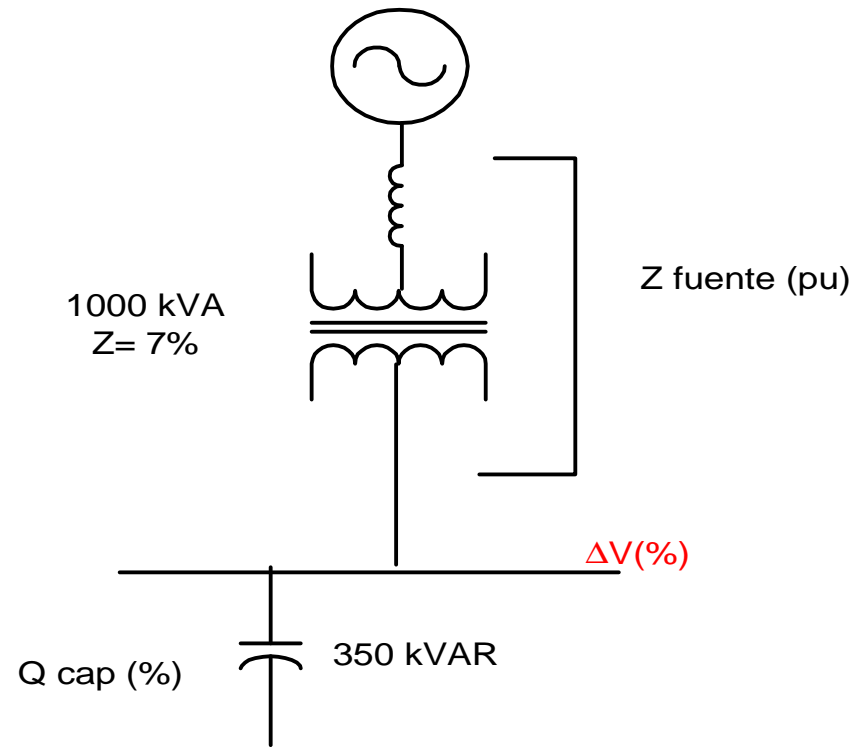
factor de potencia =1.0

Corriente ~ 55 A

Pérdidas en cable

1815 Watts

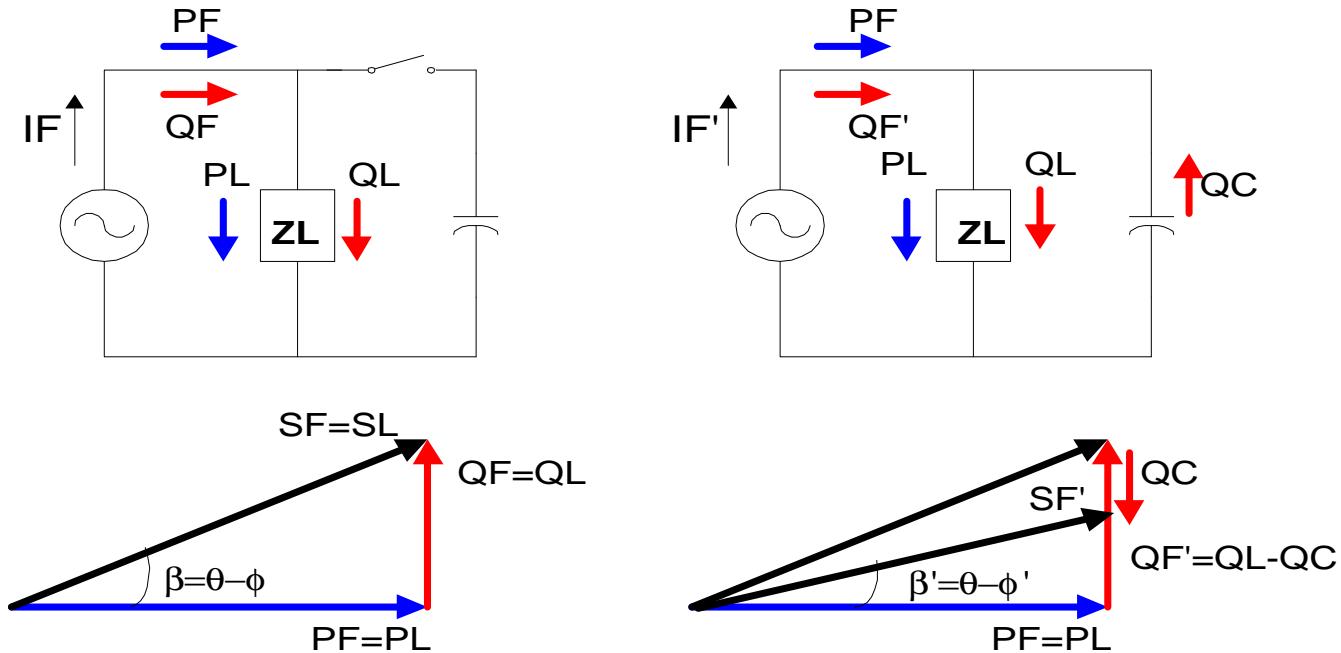
4) Mejor Regulación de Voltaje



$$\Delta V (\%) = Q_{\text{cap}} (\%) [Z_{\text{fuente}} (pu)]$$

$$\Delta V (\%) \approx 35 \% * (0.07) \approx 2.5 \%$$

Corrección del factor de potencia

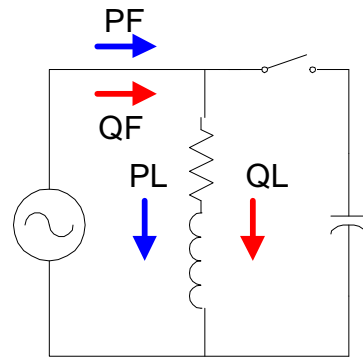


$$QC = PL [\tan(\beta) - \tan(\beta')] = PL [\tan(\cos^{-1}(fp)) - \tan(\cos^{-1}(fp'))]$$

$$PF=PL, QF'=QL - QC \implies QF' < QF \quad \beta' < \beta \implies fp' > fp$$

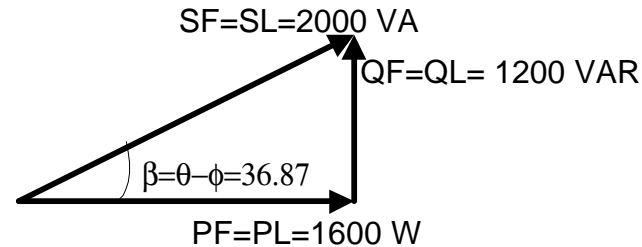
$IF' < IF \implies$ Reducción de pérdidas !!

Corrección de factor de potencia (Ejemplo)



$$V_s(t) = 100 \cos(100t)$$

$$R = 2.0 \ ; \ L = 15 \text{ mH}$$



$$I_F = \frac{100 \angle 0}{2 + j1.5} = 40 \angle -36.87 \text{ A}$$

$$S = V I^* = \frac{100}{\sqrt{2}} \angle 0 \left[\frac{40}{\sqrt{2}} \angle -36.87 \right]^* = 1600 + j1200 = 2000 \angle 36.87 \text{ VA}$$

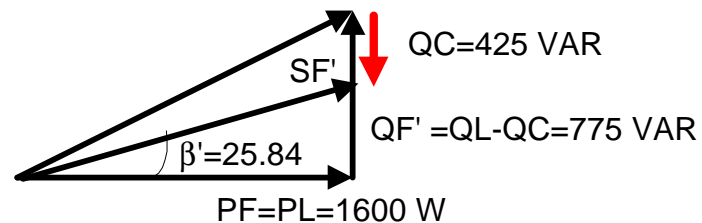
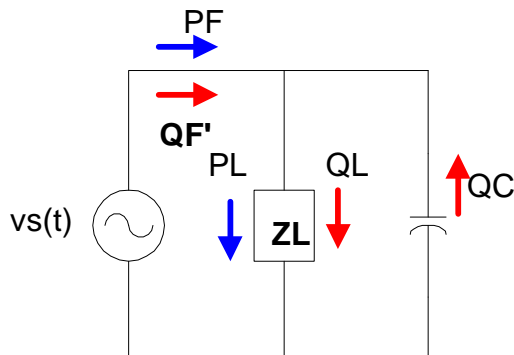
$fp = (1600/2000) = 0.8 \text{ (-) Current lags the voltage}$

$$Q_C = Q_F - P_L \tan(\beta') = P_L (\tan \beta - \tan \beta')$$

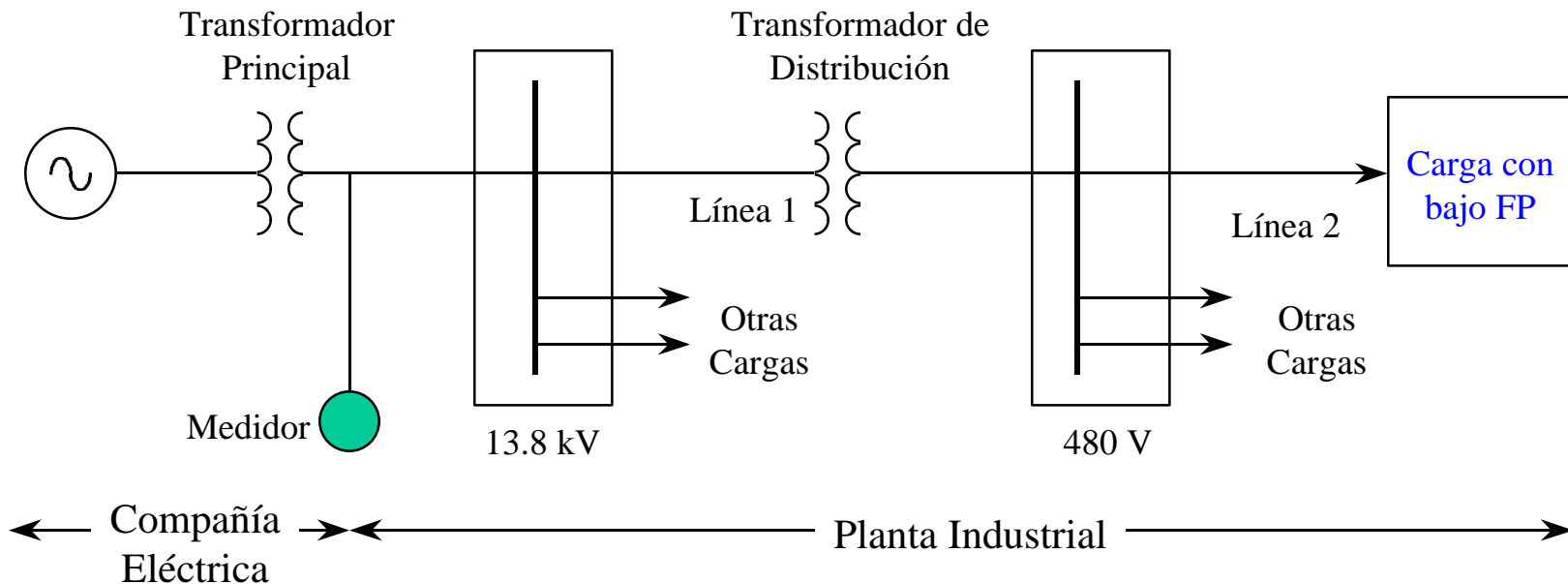
$$Q_C = 1600 (\tan 36.87 - \tan 25.84) = 425 \text{ VAR}$$

$I_F = 40 \text{ A}; (28.28 \text{ Arms})$

$I_F' = 35.56 \text{ A}; (25.14 \text{ Arms})$



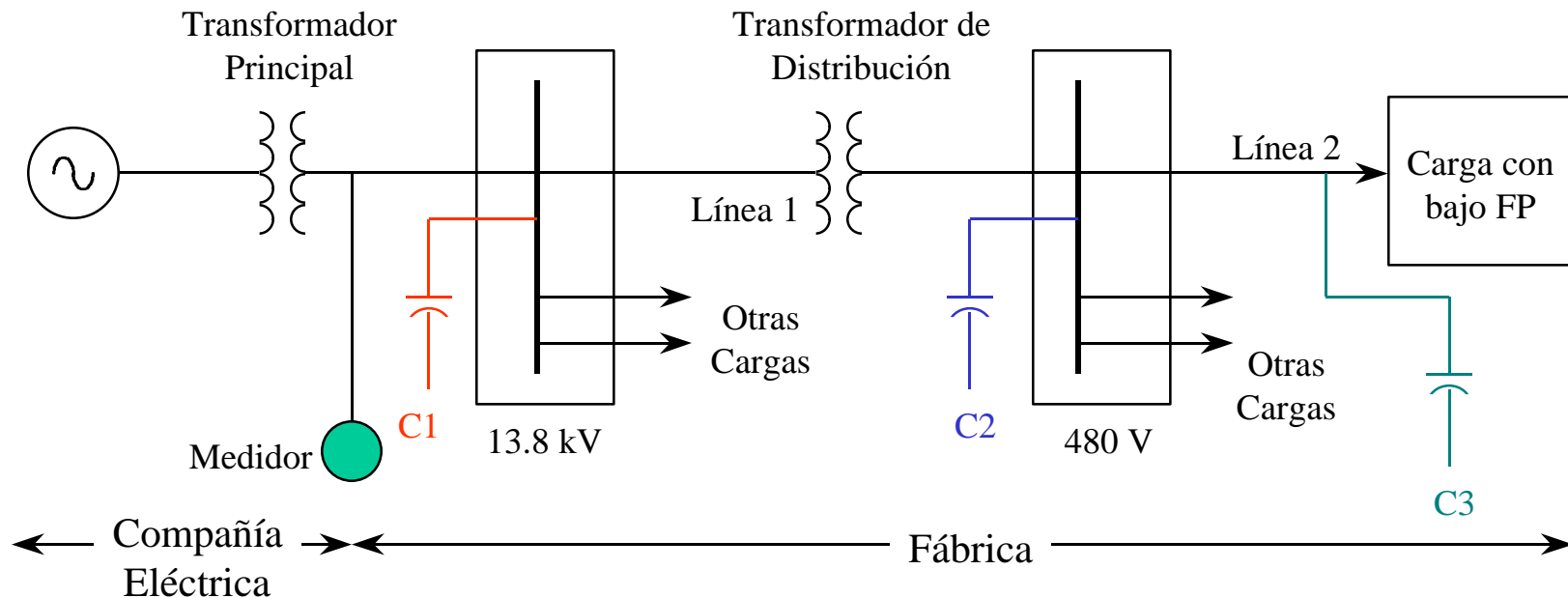
Sistema de Potencia con cargas que tienen bajo FP



Problemas Presentes

- Penalización por bajo FP
- Mala utilización de la capacidad instalada(transformadores y líneas)
- Pérdidas de potencia
- Regulación de Voltaje

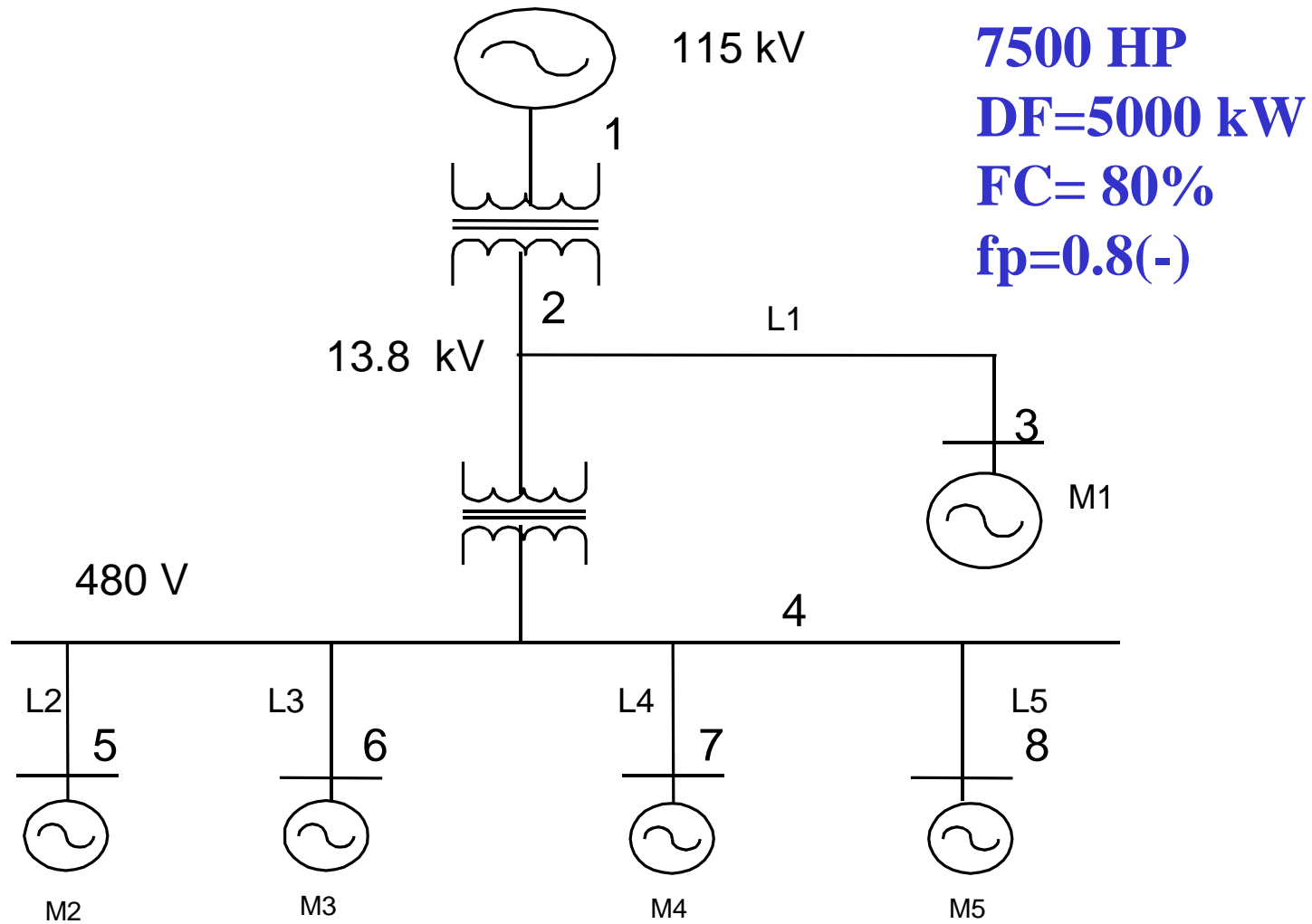
Localización de los capacitores



Beneficios de corregir el factor de potencia

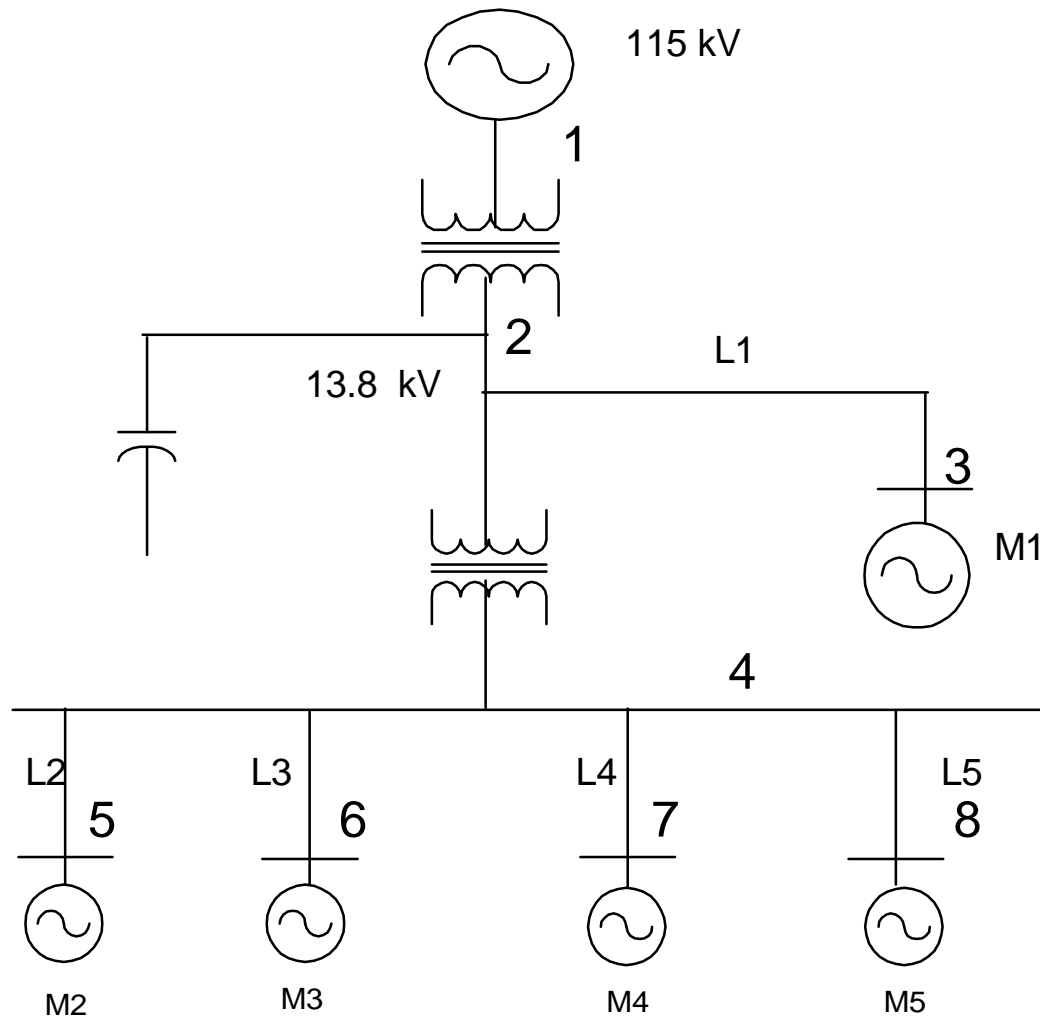
	Eliminación de Penalización o Bonificación	Recuperación de Capacidad Instalada del Transformador Principal	Recuperación de Capacidad Instalada del Transformador de Distribución	Reducción de Pérdidas en Línea 1	Reducción de Pérdidas en Línea 2
C1	Si	Si			
C2	Si	Si	Si	Si	
C3	Si	Si	Si	Si	Si

Corrección de factor de potencia(Caso de estudio)



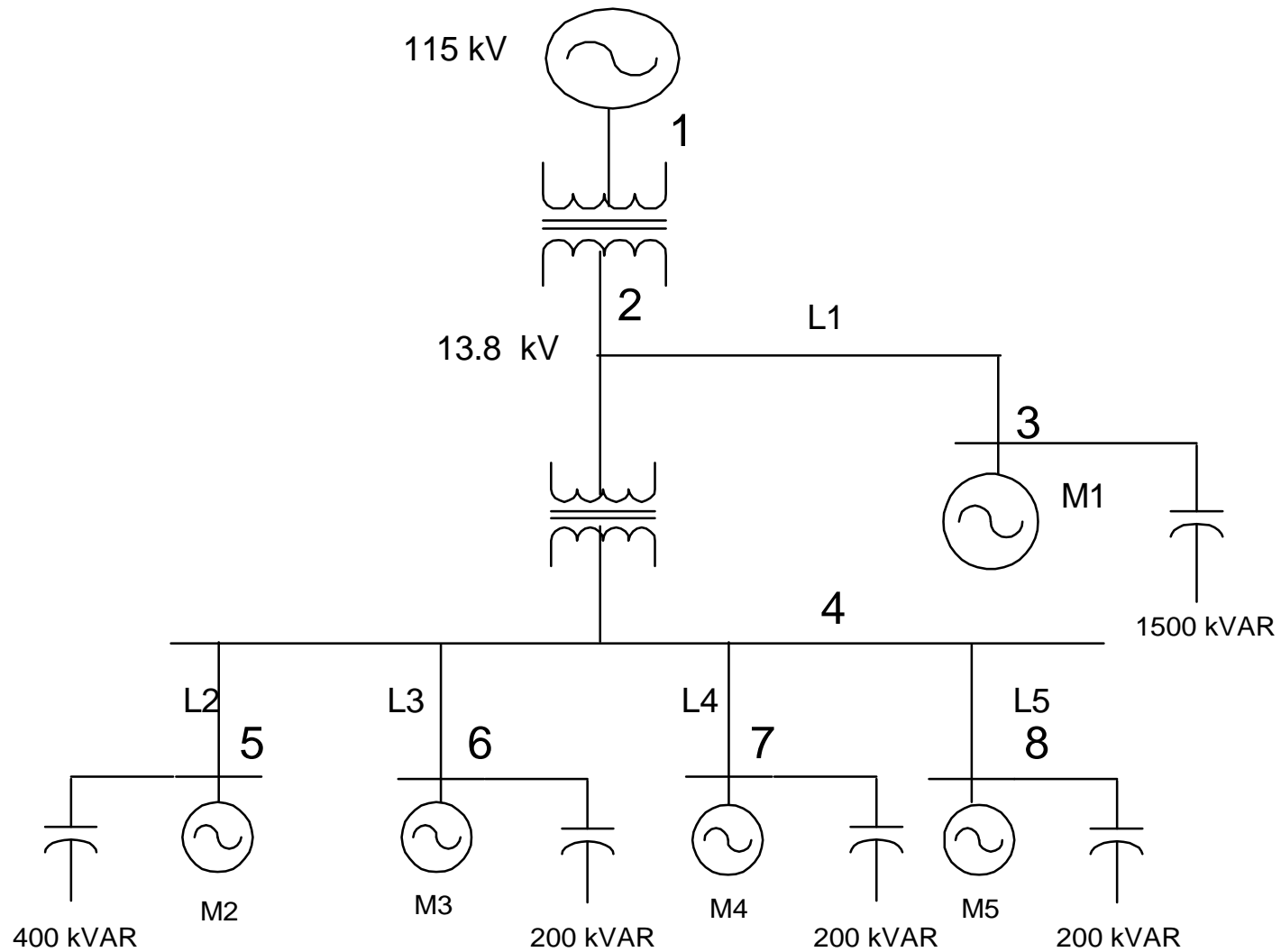
Comparación de alternativas(localización de capacitores)

Alternativa 1: Conectar banco de 2.5 MVAR en bus de 13.8 kV



Comparación de alternativas(localización de capacitores)

Alternativa 2: Distribuir los 2.5 MVAR en 5 bancos



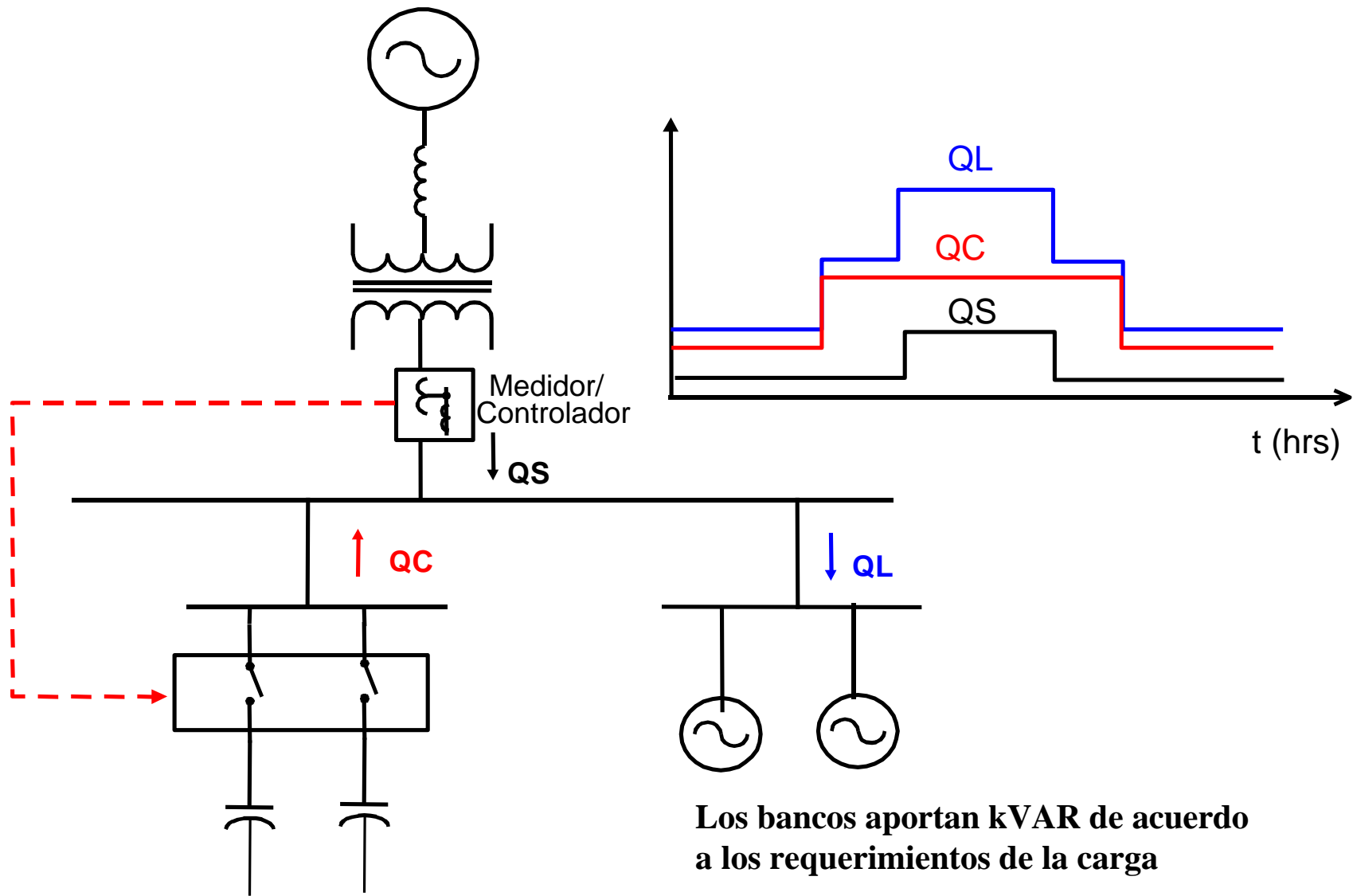
Ahorro debido a reducción de pérdidas

Nodo	Base	Cap. 13.8 kV	Cap. Distr.
	Voltaje (pu)		
1	1	1	1
2	0.9596	0.9784	0.9796
3	0.9039	0.9239	0.9418
4	0.9362	0.9555	0.9698
5	0.8929	0.9132	0.95
6	0.9064	0.9263	0.9518
7	0.9064	0.9263	0.9518
8	0.9064	0.9263	0.9518
Pérdidas(kW)	234	215	154
Disminución	0	19	80
Energía(Año)	0	166440	700800
Ahorro(\$)	\$ -	\$ 66,576	\$ 280,320

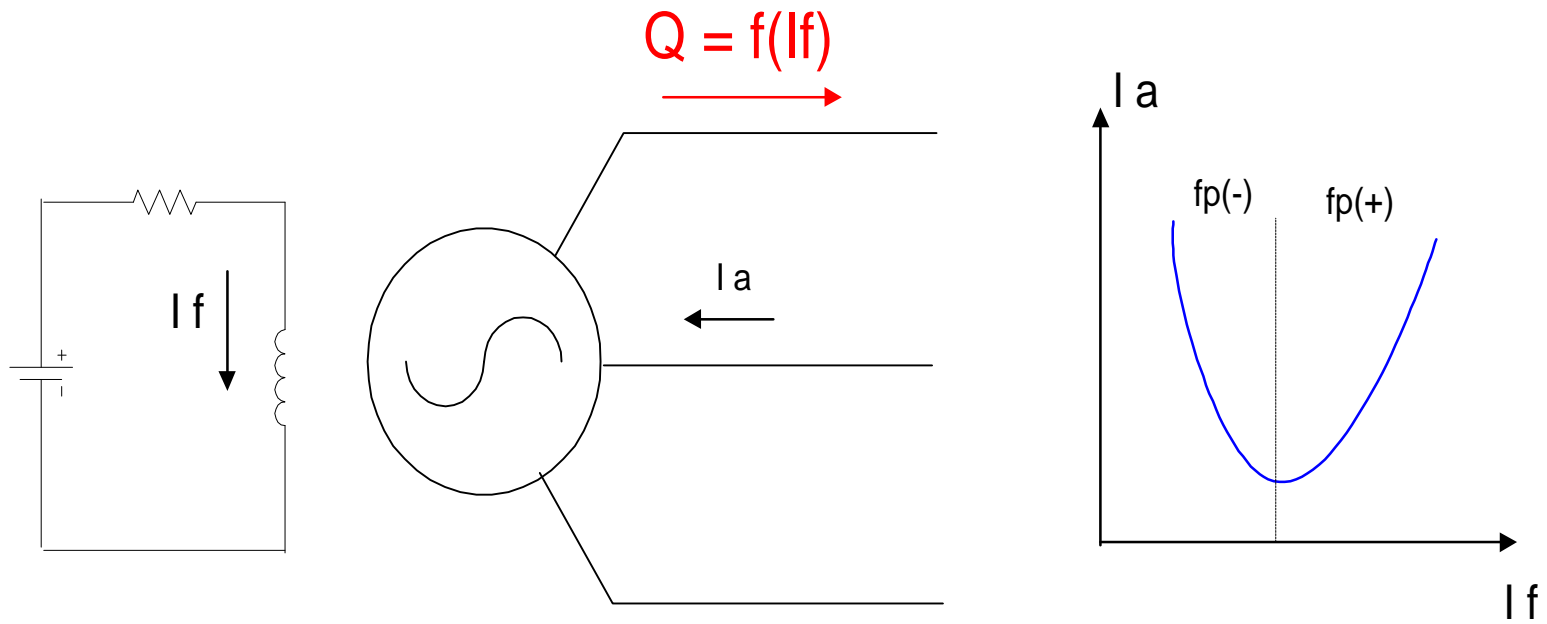
Puntos a considerar al hacer un estudio de fp

- Motores de Inducción (especialmente los subutilizados)
- Cargas no lineales (hornos, variadores de velocidad)
- Bancos de capacitores (Revisar si operan a su valor nominal)

Banco Automático de Capacitores



Corrección utilizando condensadores sincrónicos

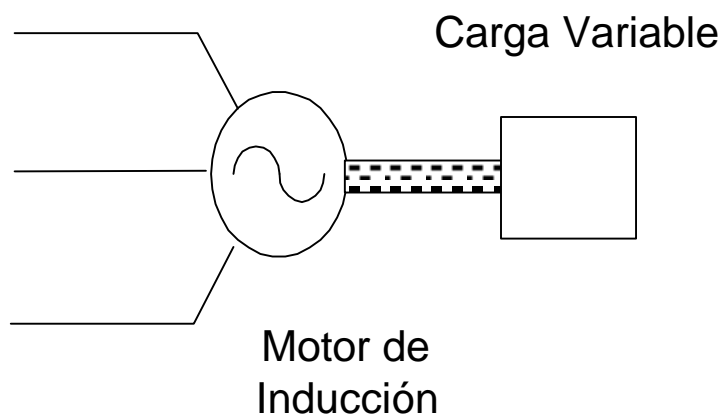


Guía para corregir el factor de potencia en motores individuales a 0.95, el motor y capacitor son conectados como una sola unidad

	n(RPM)			
HP	3600	1800	1200	900
10	4	4	5	6
20	6	6	7.5	9
100	23	30	30	35
150	30	42	50	53
200	35	50	50	65
400	75	80	100	130
500	100	120	150	160

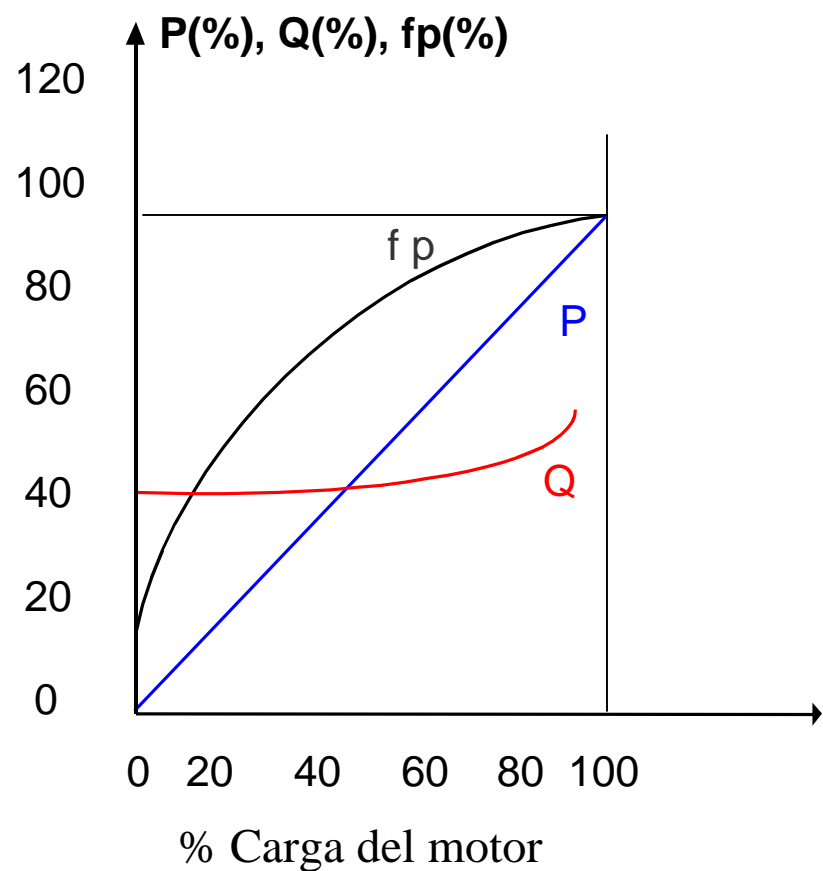
TABLA 6.1 ANSI/NEMA (Armazón T)

Variación del factor de potencia en función de la carga que entrega el motor

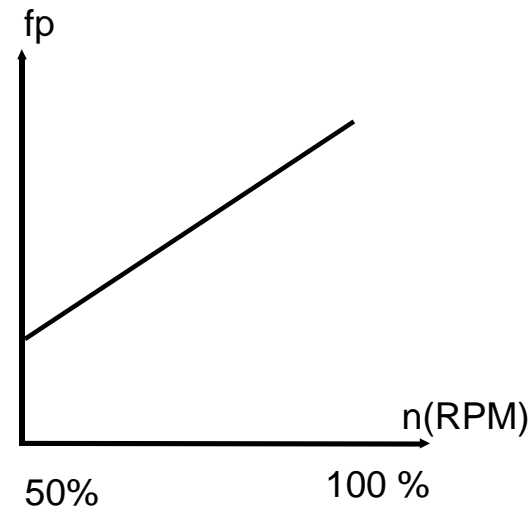
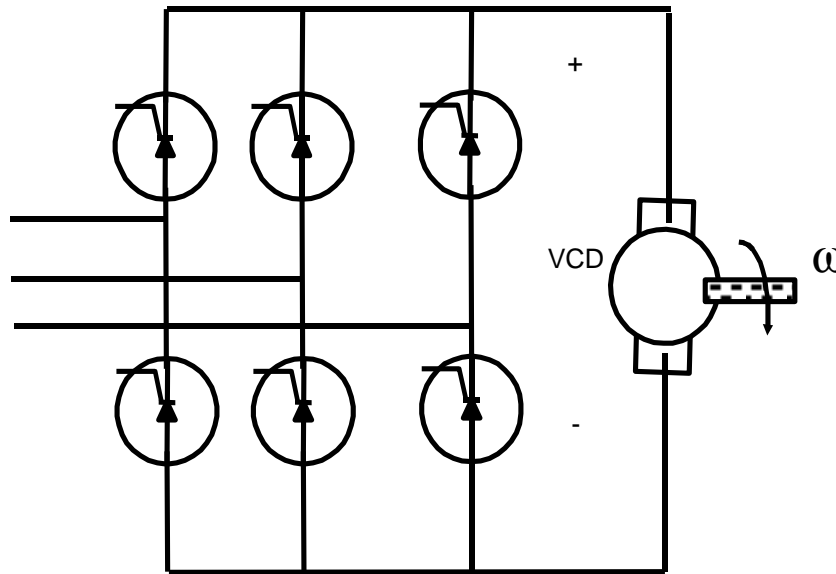


Los requerimientos de reactivos no varían de manera significativa con la carga del motor

**Para cargas bajas el fp es pobre
A mayor carga mejora el fp**



Factor de potencia en variadores de DC



$$w = f(V_{CD})$$

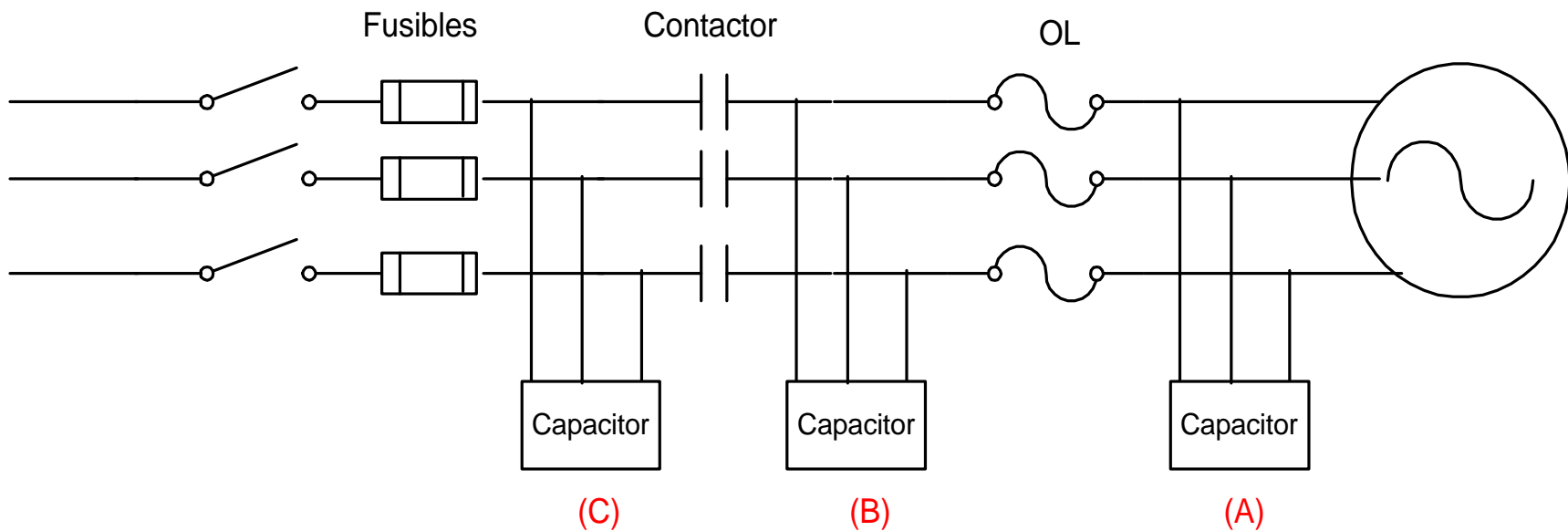
$$V_{CD} = f(\alpha)$$

$$w \downarrow \Rightarrow \alpha \uparrow \Rightarrow fp \downarrow$$

A bajas velocidades el fp es bajo, debido al retraso en el ángulo de disparo.

Para aumentar la velocidad, se requiere aumentar el voltaje promedio, lo cual se logra al reducir el ángulo de disparo. El factor de potencia mejora

Instalación de capacitores en motores

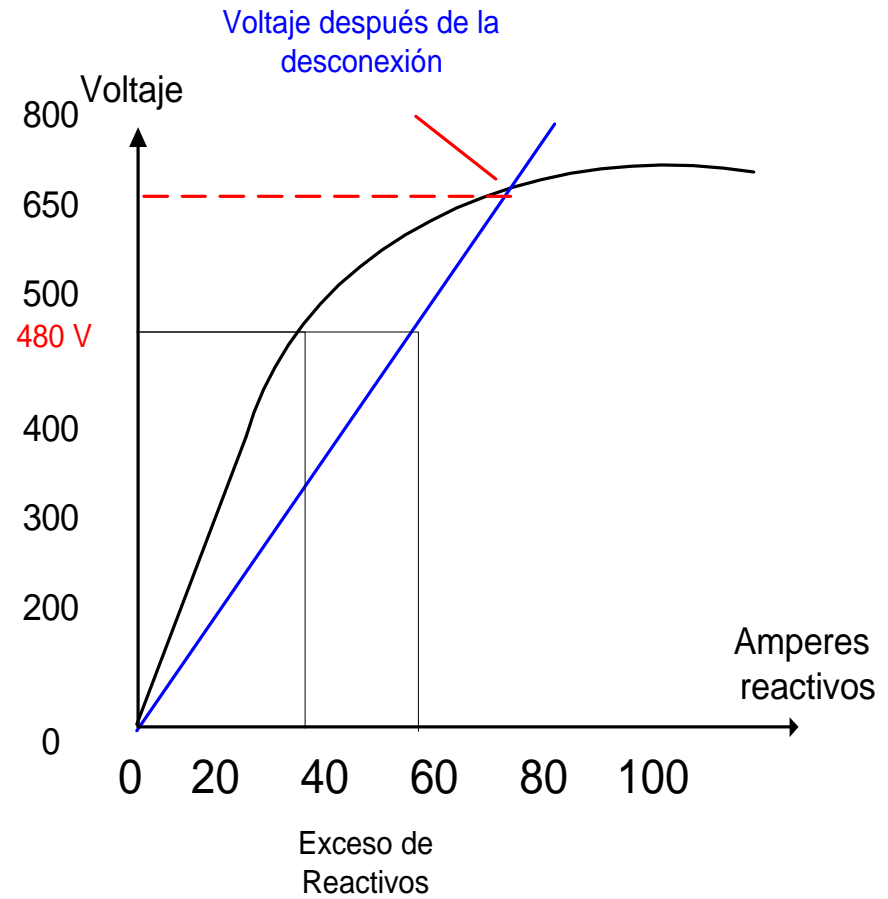
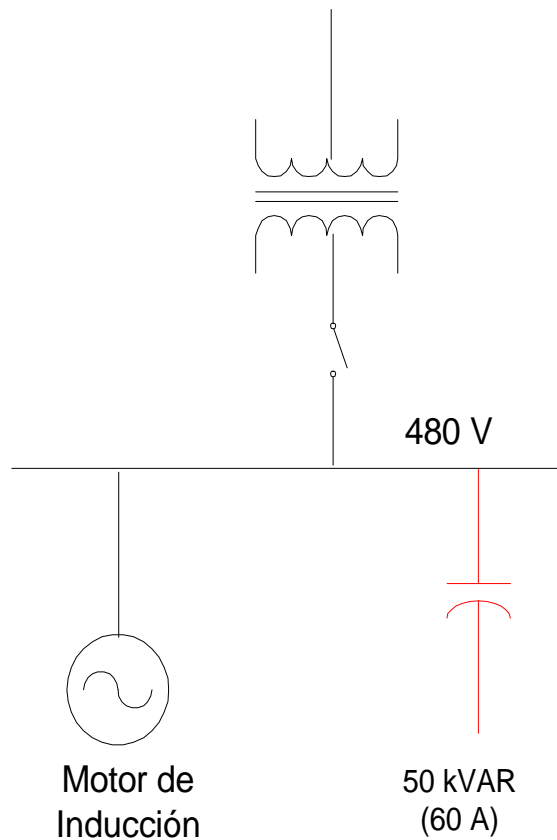


(A) Instalación Nueva y el elemento de sobrecarga puede dimensionarse para una corriente reducida

(B) Es un motor existente y el elemento de sobrecarga excedería el código si el capacitor se instalara del lado del motor

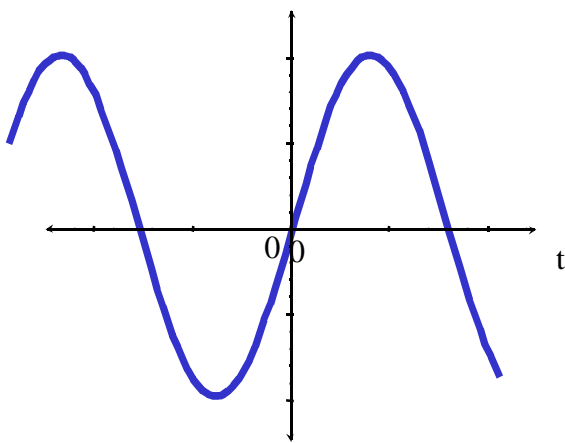
(C) Si se maneja frenado por inversión de fase, "jogging" y cargas de inercia elevada

Fenómeno de Autoexcitación (Sobrevoltaje)



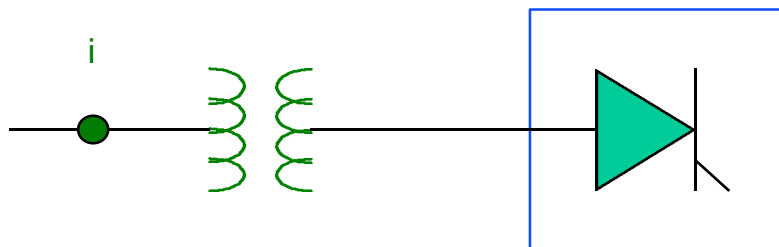
Cargas no lineales (variador de velocidad)

Voltaje



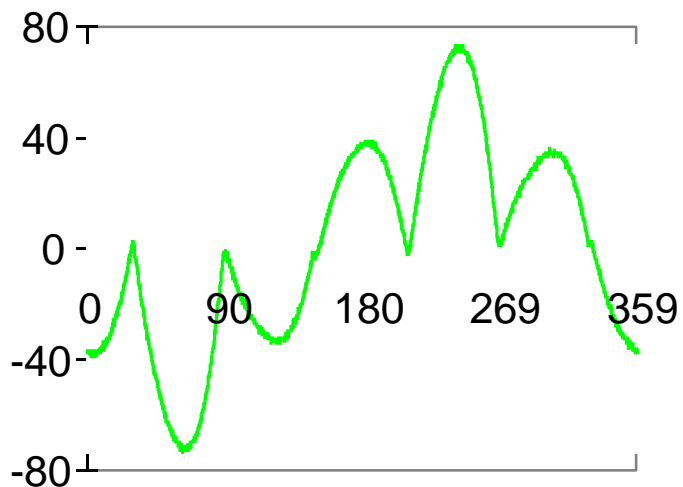
1200 kVA
5.5 % seco

Square wave - VSI

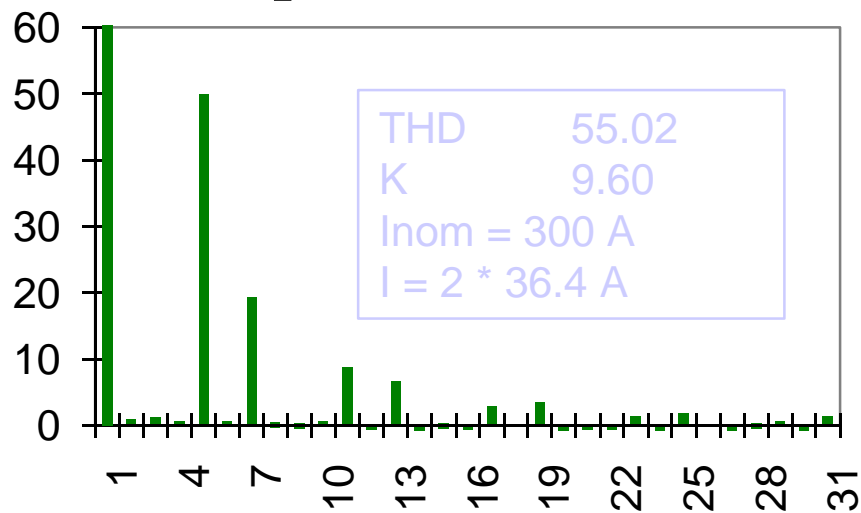


2.3 kV Δ : 460 V Y

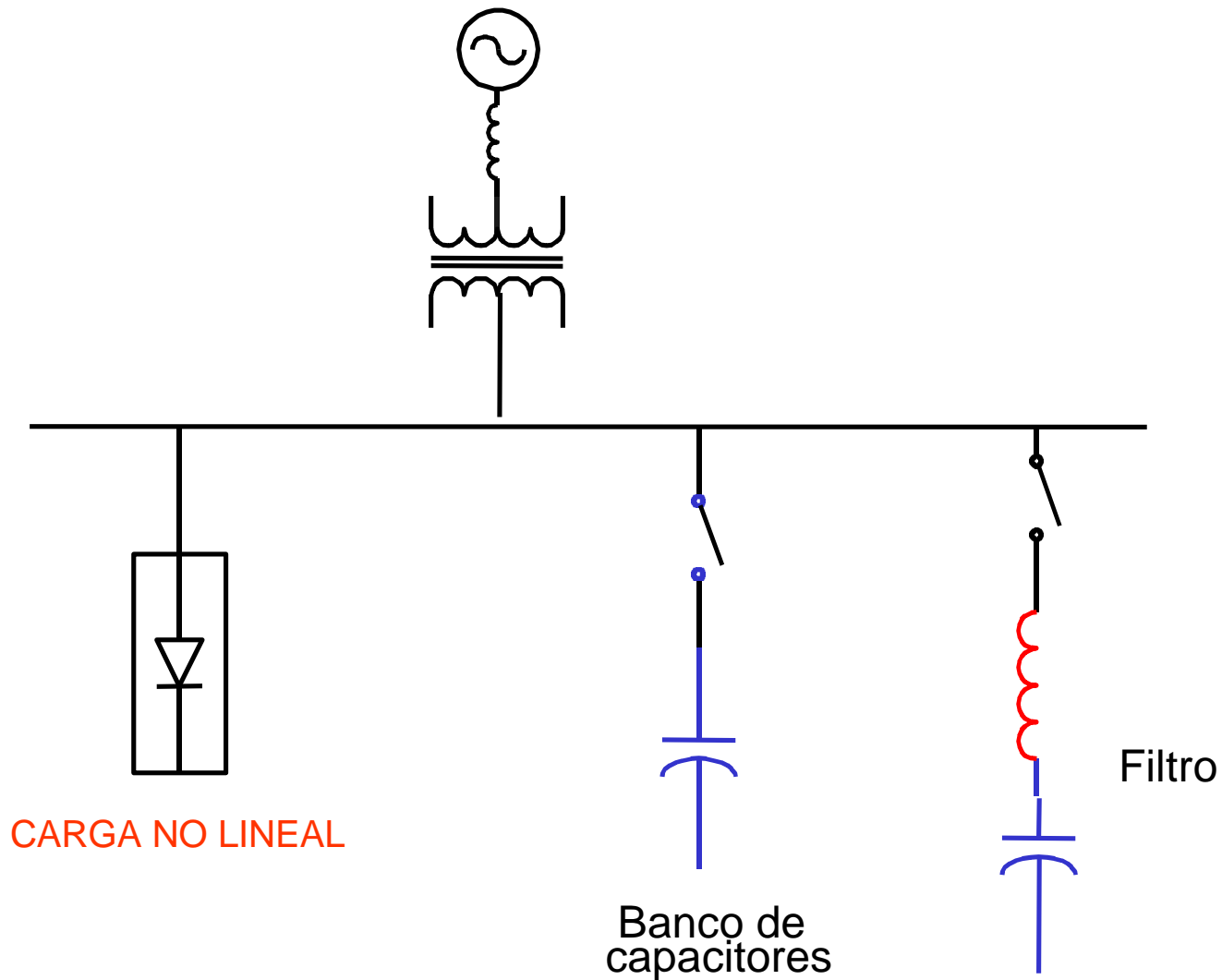
Corriente



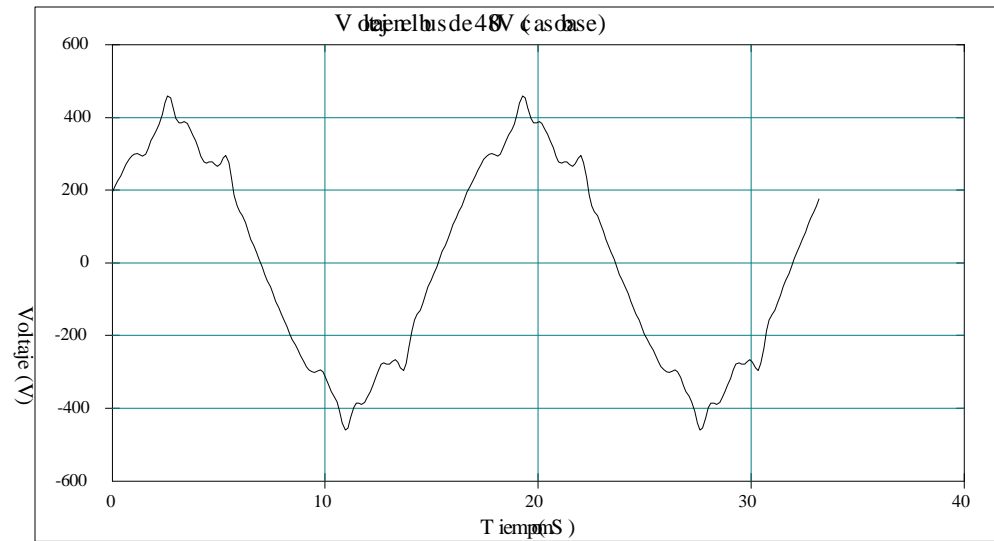
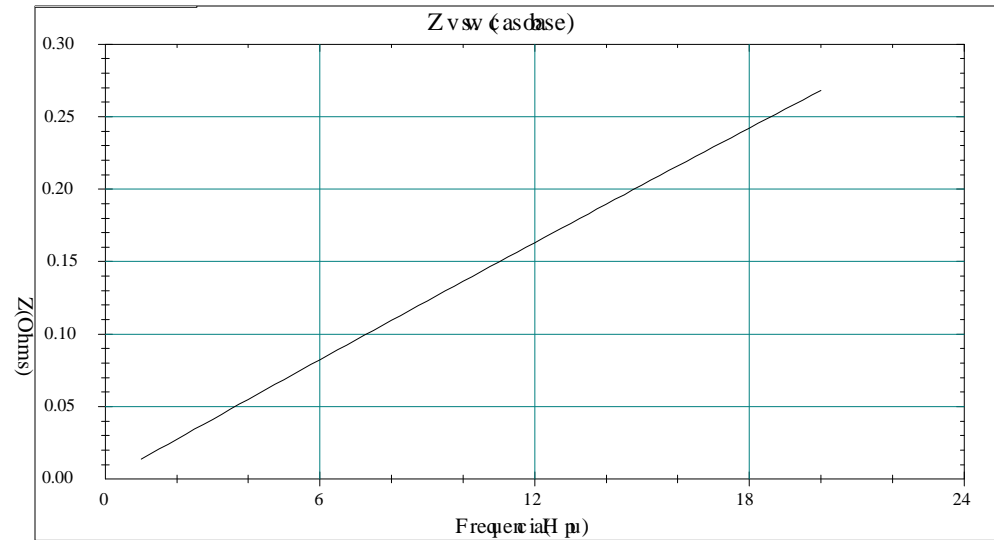
Espectro (armónicas)



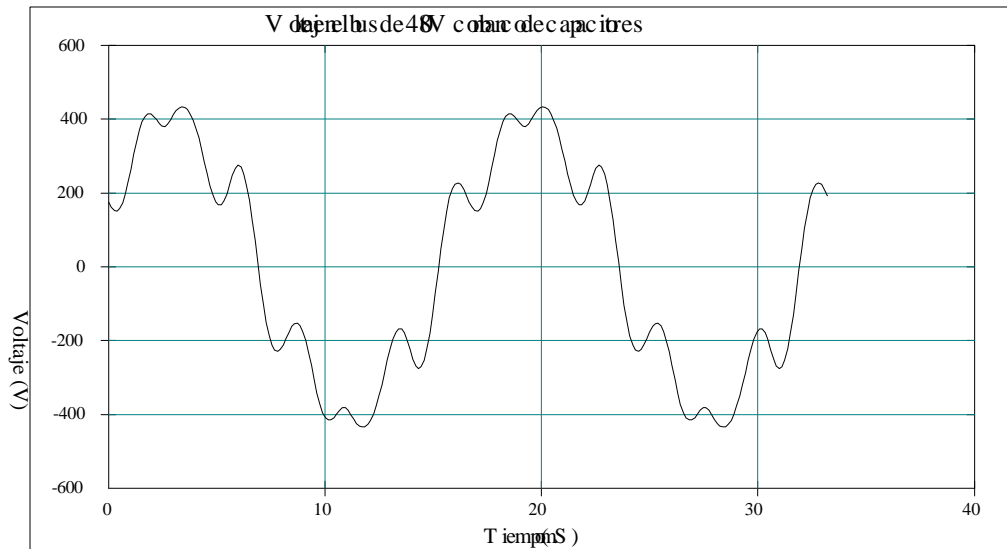
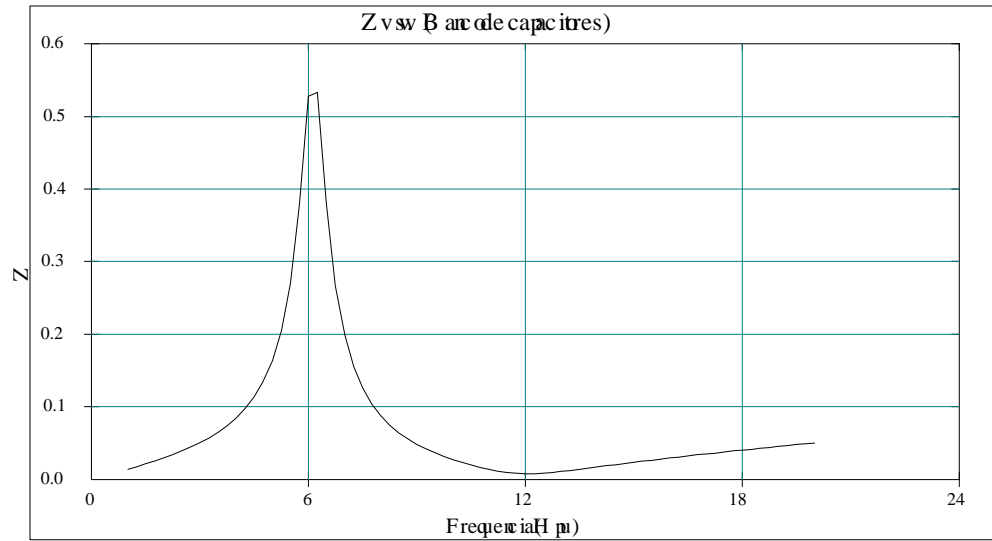
Corrección de factor de potencia ante la presencia de cargas no lineales



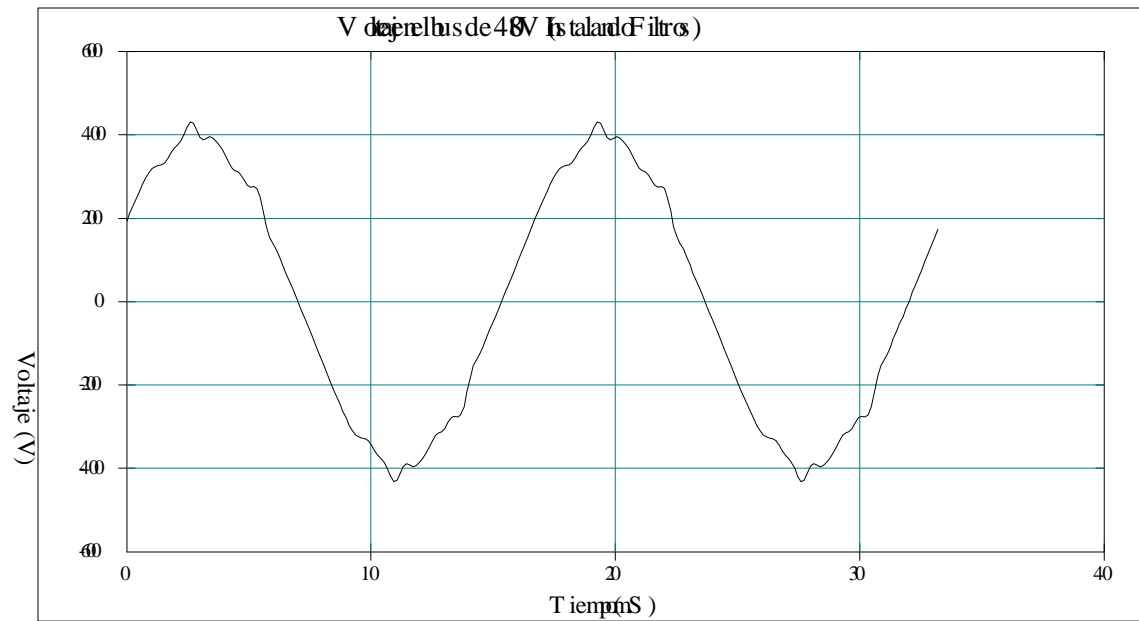
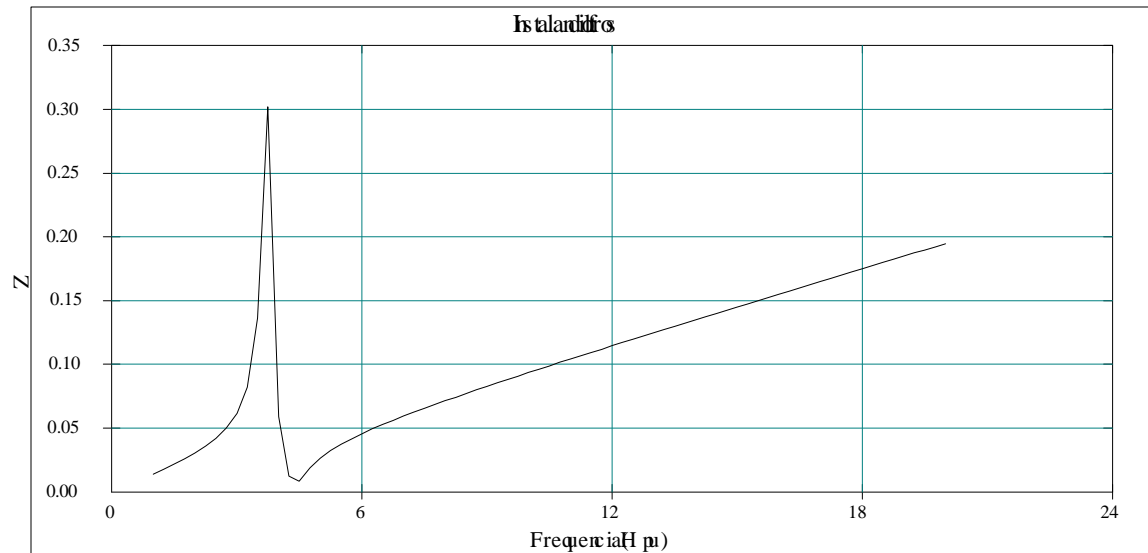
Condición Original (480V)



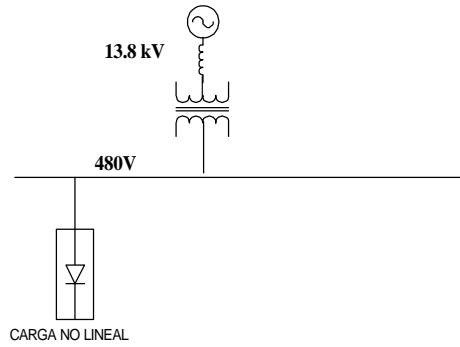
Conectando banco de capacitores (480V)



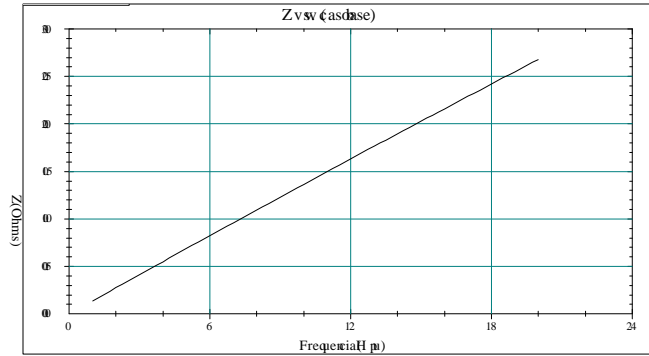
Instalando filtros (480V)



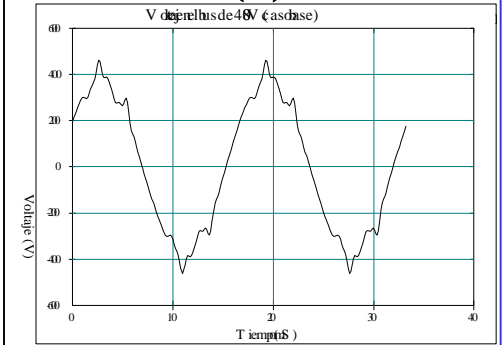
Sin corrección



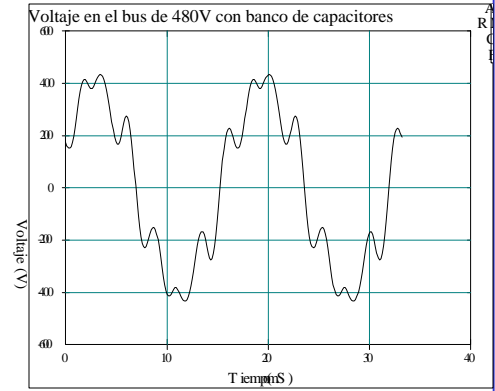
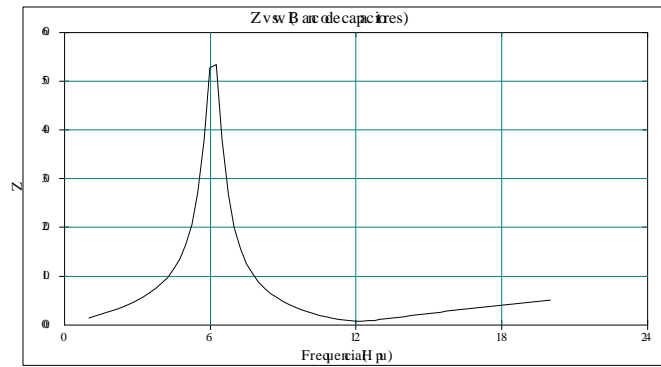
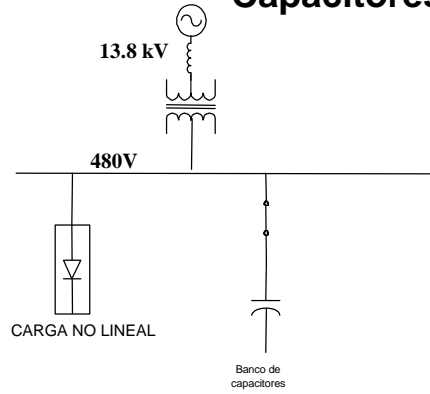
Z vs ω



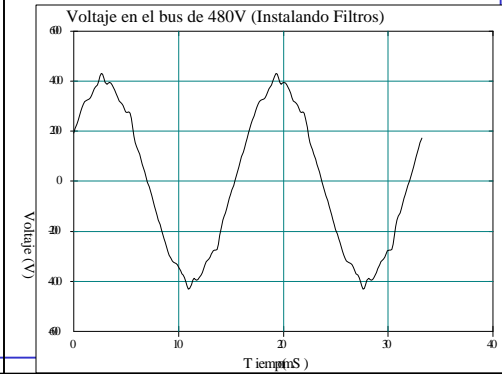
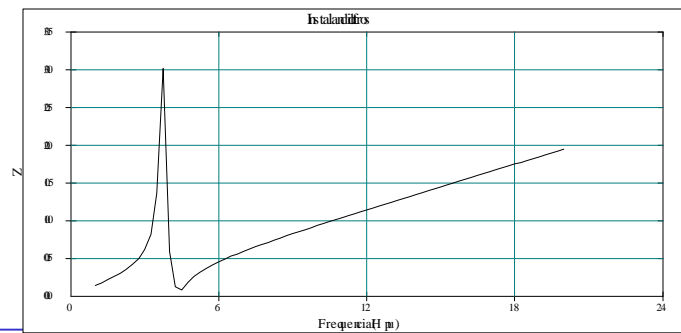
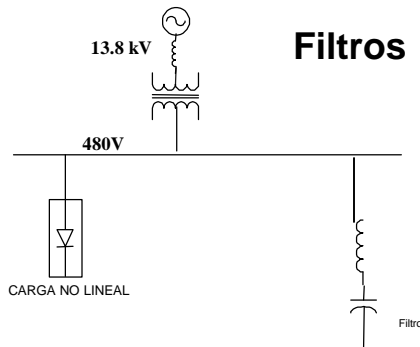
v(t)



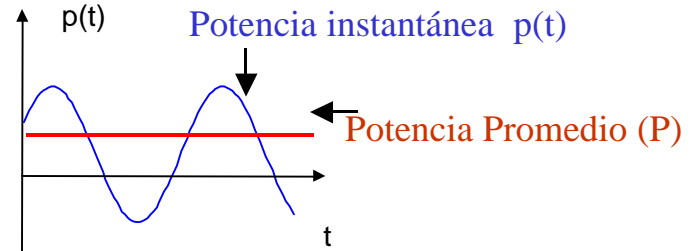
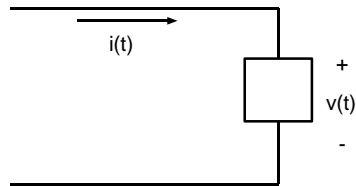
Capacitores



Filtros



Potencia (Estado estable senoidal)



$$p(t) = V_m \cos(\omega t + \mathbf{q}) I_m \cos(\omega t + \mathbf{f}) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f}) + \frac{1}{2} V_m I_m \cos(2\omega t + \mathbf{q} + \mathbf{f})$$

Potencia Promedio: $P = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f})$ Watts (W)

Potencia Reactiva: $Q = \frac{1}{2} V_m I_m \sin(\mathbf{q} - \mathbf{f})$ Volt-ampere reactivos (VAR)

Potencia Aparente: $S = \frac{1}{2} V_m I_m$ Volt-amperes (VA)

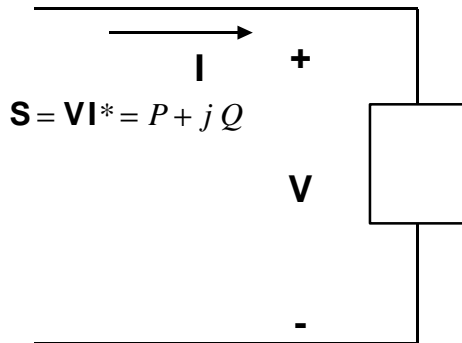
$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}; I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$P = V_{rms} I_{rms} \cos(\mathbf{q} - \mathbf{f})$$

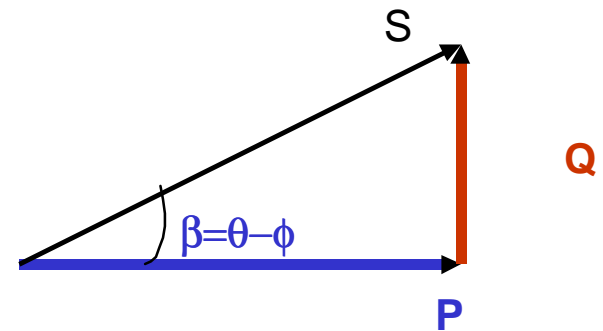
$$Q = V_{rms} I_{rms} \sin(\mathbf{q} - \mathbf{f})$$

$$S = V_{rms} I_{rms}$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{V} \mathbf{I}^* = S \angle \mathbf{b} = S \cos(\mathbf{b}) + j S \sin(\mathbf{b}) = P + j Q$$



- If $P > 0$, circuit draws real power
- If $P < 0$, circuit delivers real power
- If $Q > 0$, circuit draws reactive power
- If $Q < 0$, circuit delivers reactive power



\mathbf{V} e \mathbf{I} are voltage and current phasors expressed in RMS values