

TEMA 12. RECTIFICADORES NO CONTROLADOS

12.1.INTRODUCCIÓN

12.2.RECTIFICADOR MONOFÁSICO

12.2.1. Rectificador Media Onda

12.2.2. Puente Completo

12.2.2.1. Conmutación Instantánea

12.2.2.2. Conmutación no Instantánea

12.2.2.3. Carga Tipo Tensión Constante

12.2.3. Conexión en Redes Trifásicas. Corrientes por el Neutro

12.3.RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS

12.3.1. Montajes Simples

12.3.2. Conexión Serie

12.3.2.1. Conexión en Fase

12.3.2.2. Conexión en Oposición de Fases

12.3.3. Conexión Puente Completo

12.3.4. Conexión Paralelo

12.3.5. Tensiones y Corrientes Rectificadas

12.3.5.1. Valor Medio de la Tensión Rectificada

12.3.5.2. Valor Eficaz V_{RMS}

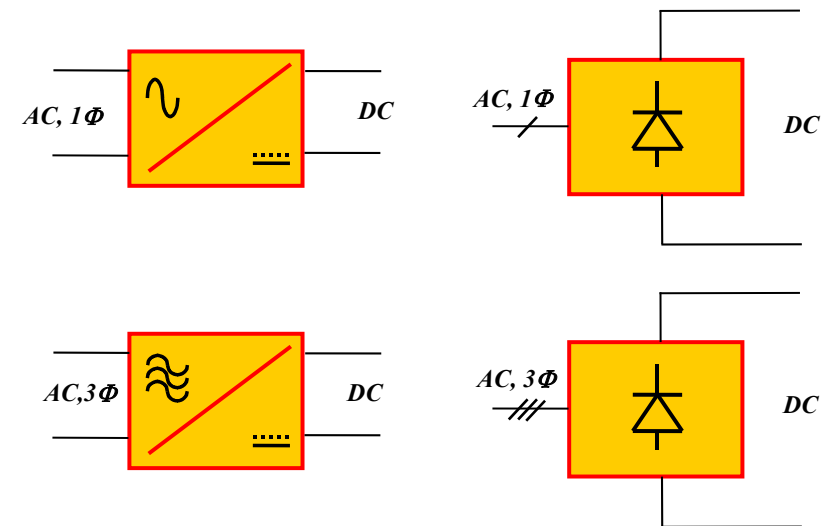
12.3.5.3. Factor de Ondulación

12.3.5.4. Desarrollo en Serie

12.3.5.5. Factor de Potencia del Secundario

12.3.5.6. Corriente Para Carga Altamente Inductiva

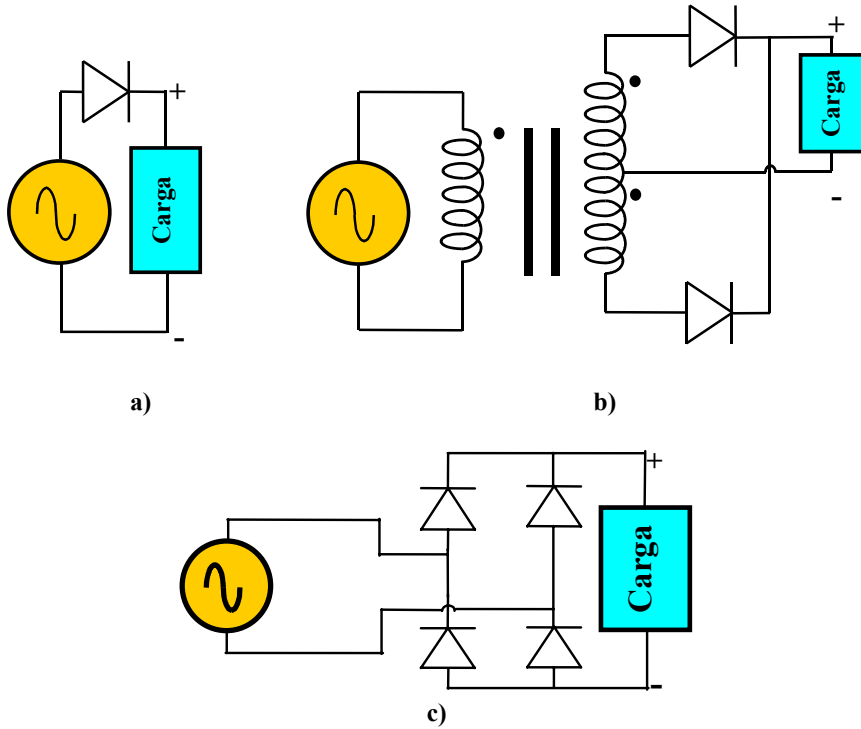
INTRODUCCIÓN



Símbolos de Convertidores AC/DC

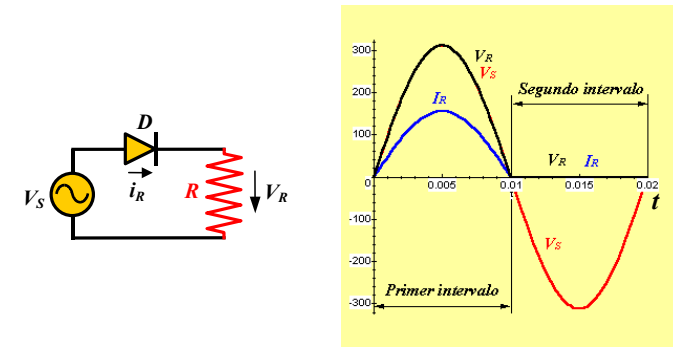
- **Entrada** AC, monofásica o polifásica.
- **Salida** DC no controlada, su valor depende de:
 - La tensión de entrada
 - La corriente por la carga
 - Topología del convertidor
- **Flujo de potencia** desde la entrada a la salida
- **Aplicaciones:**
 - Pueden usarse en aplicaciones con las siguientes características:
 - De coste mínimo
 - No sensibles al valor de la tensión de salida
 - No problema con el factor de potencia
 - Algunos ejemplos:
 - Entrada de fuentes de alimentación
 - Alimentación de motores DC

RECTIFICADOR MONOFÁSICO



Diferentes Topologías de Rectificadores: a) Media Onda, b) Onda Completa con Transformador de Toma Media, c) Onda Completa con Puente de Diodos

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Rectificador Media Onda



Rectificador no Controlado con Carga Resistiva

Primer intervalo:	Segundo intervalo:
$V_R = V_S$	$V_R = 0$
$I_R = V_S/R$	$I_R = 0$
$V_{AK} = 0$	$V_{AK} = V_S$

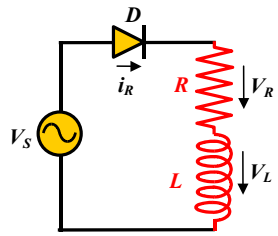
Tensión media en la carga:

$$V_{R(AV)} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}V_S \sin(\omega t) d\omega t = \frac{\sqrt{2}V_S}{\pi}$$

Tensión eficaz en la carga:

$$V_{R(RMS)} = \frac{V_S}{\sqrt{2}}$$

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Rectificador Media Onda

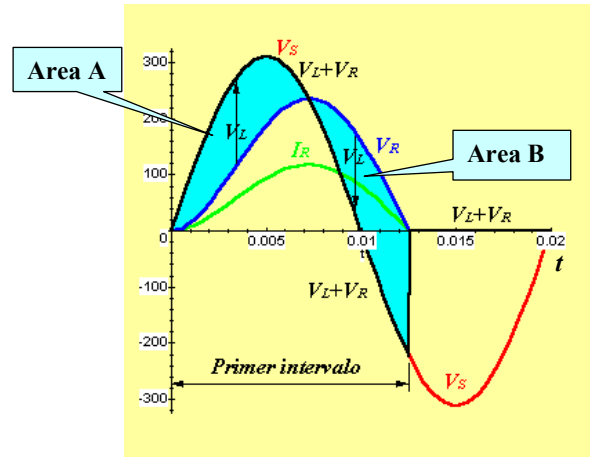


$$V_S = V_L + V_R; \quad V_L = L \cdot \frac{di}{dt};$$

$$di = \frac{1}{L} \cdot V_L \cdot dt$$

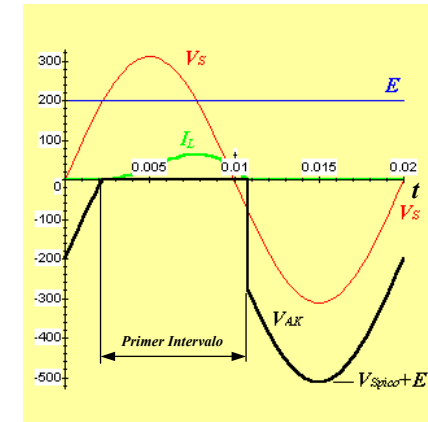
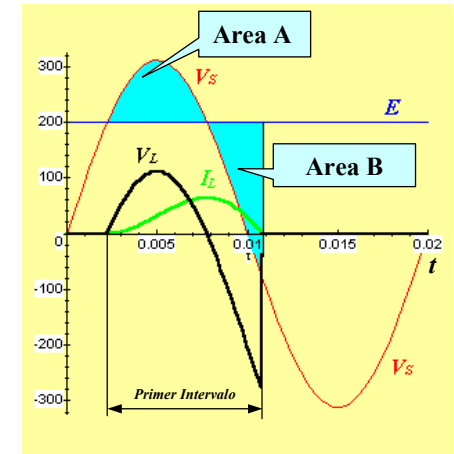
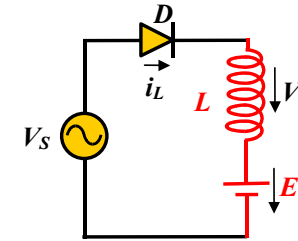
$$\int_{i(t_0)}^{i(t_2)} di = \frac{1}{L} \cdot \int_{t_0}^{t_2} V_L \cdot dt = 0 \Rightarrow$$

$$0 = \text{Area}(A) - \text{Area}(B)$$



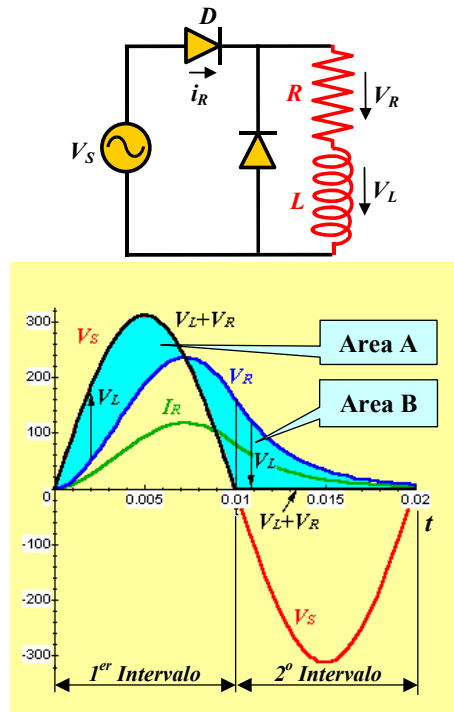
Formas de Onda en un Rectificador con Carga Resistiva-Inductiva

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Rectificador Media Onda



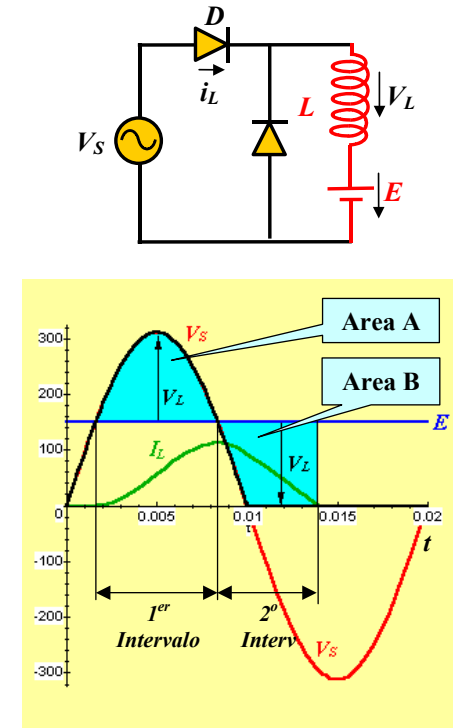
Formas de Onda en un Rectificador con Carga Inductiva y Fuerza Contraelectromotriz (Cargador de Baterías o Motor DC).

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Rectificador Media Onda



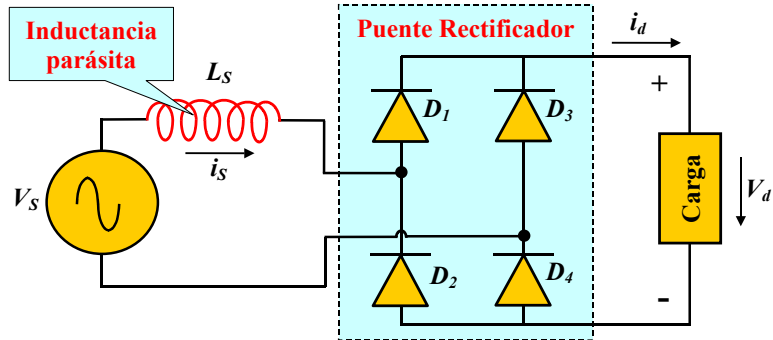
Formas de Onda en un Rectificador con Carga Resistiva-Inductiva y Diodo de Libre Circulación

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Rectificador Media Onda



Formas de Onda en un Rectificador con Carga Inductiva y Fuerza Contraelectromotriz (Cargador de Baterías o Motor DC) y Diodo de Libre Circulación.

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Puente Completo

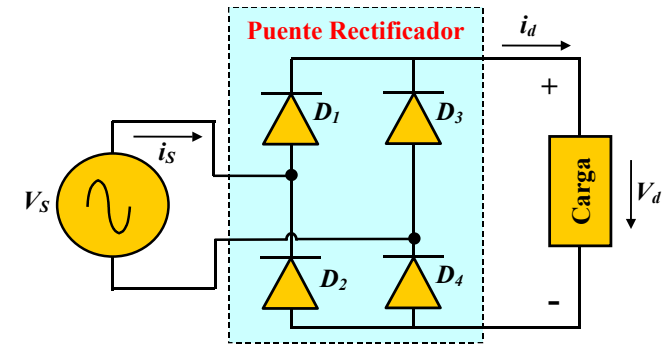


Rectificador en Puente Completo Monofásico

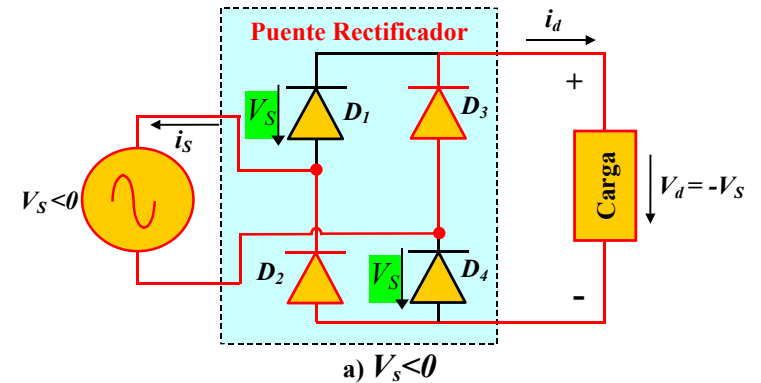
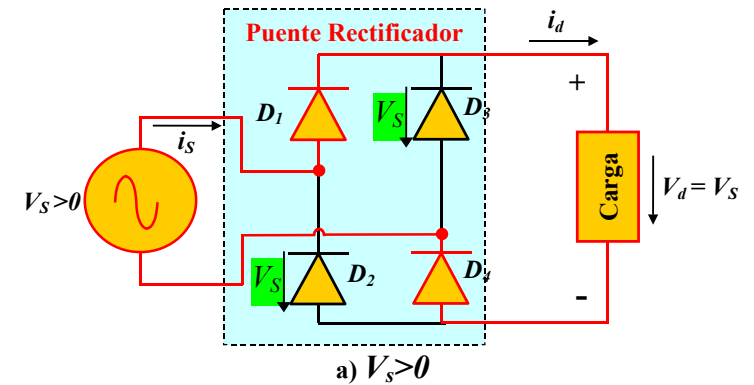
Se estudiarán los siguientes casos:

- Para L_S despreciable.
 - Con carga resistiva
 - Con carga fuertemente inductiva.
- Teniendo en cuenta el efecto de L_S .
 - Con carga fuertemente inductiva.

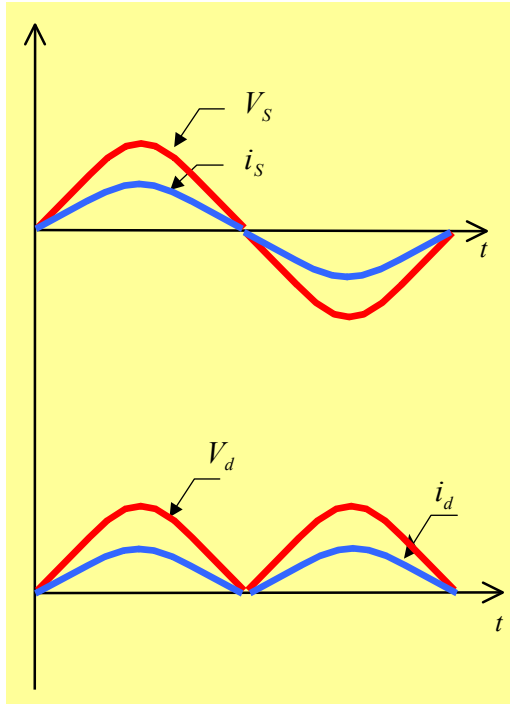
RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Puente Completo Commutación Instantánea



Rectificador en Puente Completo Monofásico con conmutación ideal y carga resistiva:



**RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Puente Completo
Commutación Instantánea**



$L_s=0$; I_s no contiene armónicos

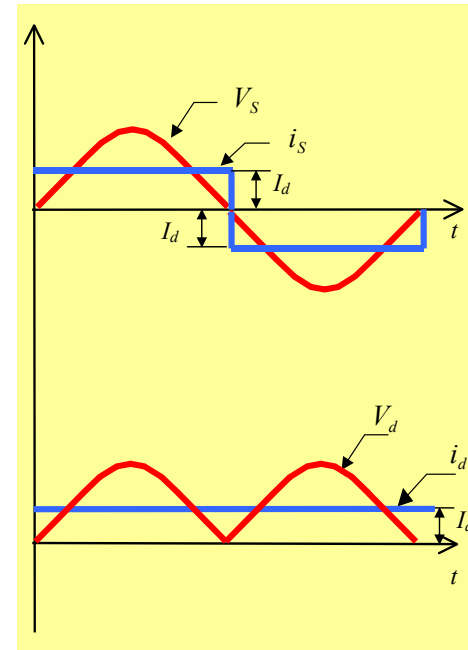
$$V_{d0} = \frac{1}{\left(\frac{T}{2}\right)} \int_0^{T/2} \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) dt =$$

$$V_{d0} = \frac{4\sqrt{2}V_s}{\omega T} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s = 0.9V_s$$

$$I_{d0} = \frac{V_{d0}}{R} = 0.9 \frac{V_s}{R}$$

Formas de Onda de un Rectificador Monofásico Puente no Controlado para Carga Resistiva

**RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Puente Completo
Commutación Instantánea**



$L_s=0$; I_s es una onda cuadrada \Rightarrow

$$I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d = 0.9 I_d ;$$

$$I_{sh} = \begin{cases} 0 & (h \text{ par}) \\ \frac{I_{s1}}{h} & (h \text{ impar}) \end{cases}$$

Los armónicos de la corriente están en fase con la tensión.

$$V_{d0} = 0.9V_s$$

$$I_{d0} = I_d$$

Formas de Onda de un Rectificador Monofásico Puente no Controlado para Carga Fuertemente Inductiva

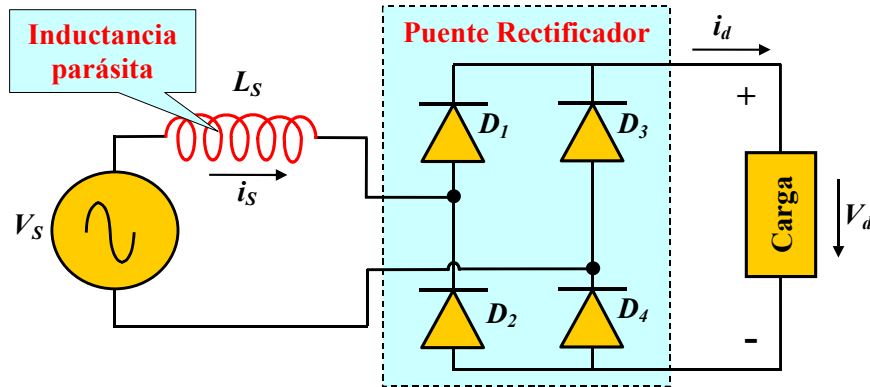
La distorsión total de la corriente de línea I_s será:

$$\%THD = 100 \frac{\sqrt{I_s^2 - I_{s1}^2}}{I_{s1}}, \text{ como } I_s = I_d, I_{s1} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} I_d \Rightarrow$$

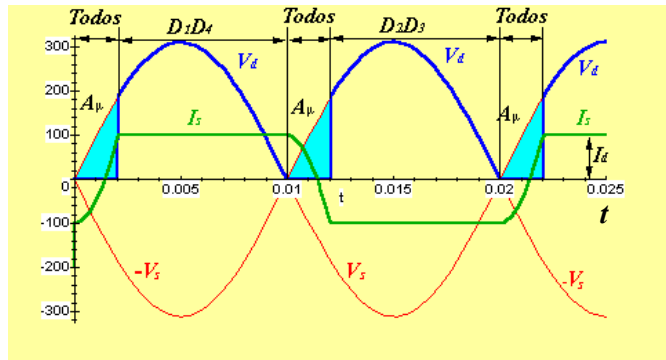
$$\%THD = 100 \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)^2}}{\frac{2\sqrt{2}}{\pi}} = 48.43\%$$

$$PF = \frac{DPF}{\sqrt{1 + THD^2}} \Rightarrow \begin{cases} DPF = 1 \\ PF = 0.875 \end{cases}$$

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Conmutación no Instantánea



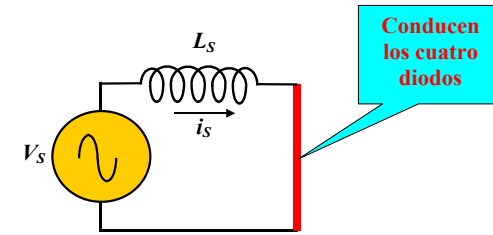
a) Circuito



b) Formas de Onda

Puente Rectificador Monofásico con Conmutación no Instantánea

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Conmutación no Instantánea



Circuito Equivalente Usado para el Estudio de la Conmutación no Instantánea: La fuente y la bobina forman una malla con los cuatro diodos conduciendo.

La ecuación que rige el funcionamiento de este circuito es:

$$V_s = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) = L_s \frac{di_s}{dt} \quad (0 \leq \omega t \leq \mu)$$

$$\sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \omega L_s di_s \quad (0 \leq \omega t \leq \mu)$$

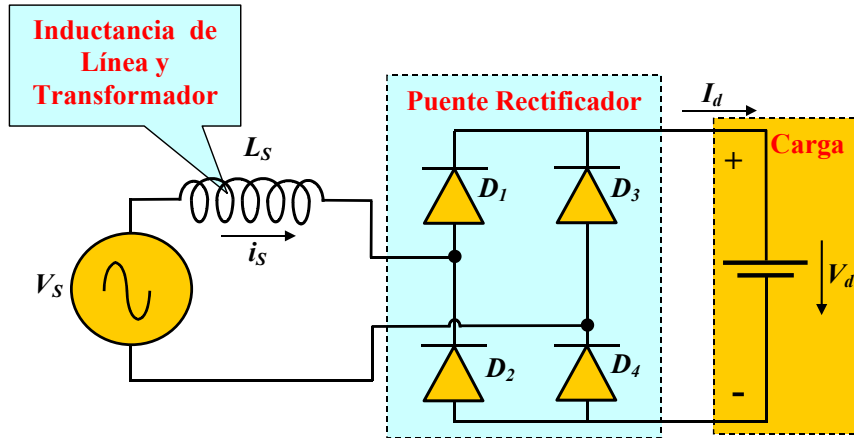
$$A_\mu = \int_0^\mu \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \omega L_s \int_{-I_d}^{I_d} di_s = 2\omega L_s I_d$$

$$A_\mu = \sqrt{2}V_s (1 - \cos \mu) = 2\omega L_s I_d ;$$

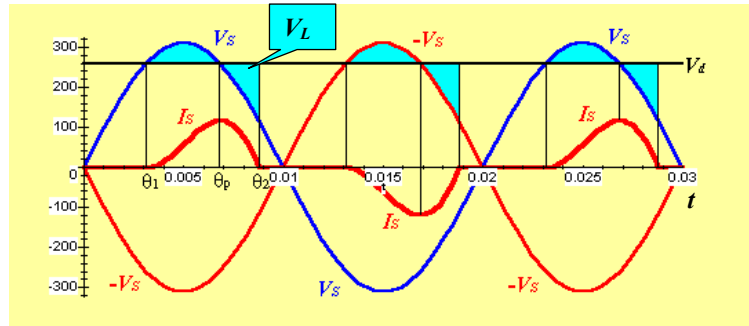
El valor medio de la pérdida de tensión debida a la conmutación no instantánea será: A_μ / π luego la **tensión en el rectificador** será:

$$V_d = V_{d0} - \frac{A_\mu}{\pi} = 0.9V_s - \frac{2\omega L_s I_d}{\pi}$$

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Carga Tensión Constante



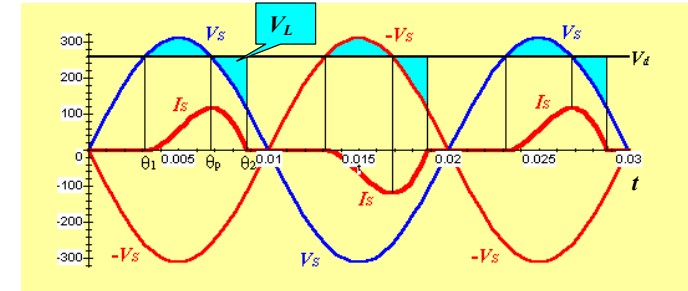
a) Circuito



b) Formas de Onda

Puente Rectificador Monofásico con Carga a Tensión Constante (Carga capacitiva, Motor DC o Batería)

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Carga Tensión Constante



Puente Rectificador Monofásico con Carga a Tensión Constante (Carga capacitiva, Motor DC o Batería)

$$\theta_1 = \arcsin\left(\frac{V_d}{\sqrt{2}V_s}\right); \quad \theta_p = \pi - \theta_1$$

La ecuación que rige el funcionamiento del circuito es:

$$V_L = L_s \frac{dI_d}{dt} = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) - V_d;$$

integrando esta ecuación, se obtiene:

$$\omega L_s \int_0^{\theta} dI_s = \int_{\theta_1}^{\theta} (\sqrt{2}V_s \sin(\omega t) - V_d) d(\omega t) \Rightarrow$$

$$\omega L_s i_s(t) = \sqrt{2}V_s (\cos(\theta_1) - \cos(\omega t)) - V_d (\omega t - \theta_1) \Rightarrow$$

$$i_s(t) = \frac{\sqrt{2}V_s^2 - V_d^2}{\omega L_s} - \frac{\sqrt{2}V_s}{\omega L_s} \cos(\omega t) - V_d \frac{t - t_1}{L_s};$$

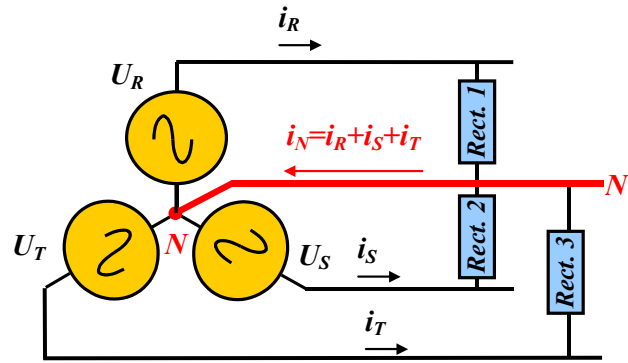
El ángulo θ_2 en el que se anula la corriente, se calcula de:

$$\int_{\theta_1}^{\theta_2} (\sqrt{2}V_s \sin(\omega t) - V_d) d(\omega t) = 0$$

y el valor medio de la corriente por la carga de:

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} i_s(t) d(\omega t)$$

RECTIFICADOR MONOFÁSICO. Conexión en redes trifásicas. Corrientes por el neutro.



Conexión de tres rectificadores idénticos en una red trifásica.

$$i_R = \sqrt{2}I_{S1} \sin(\omega t - \Phi_1) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{Sh} \sin(h\omega t - \Phi_h), \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$$i_S = \sqrt{2}I_{S1} \sin(\omega t - \Phi_1 - 120^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{Sh} \sin(h\omega t - \Phi_h - 120^\circ h)$$

$$i_T = \sqrt{2}I_{S1} \sin(\omega t - \Phi_1 - 240^\circ) + \sum_{h=2k+1}^{\infty} \sqrt{2}I_{Sh} \sin(h\omega t - \Phi_h - 240^\circ h)$$

La corriente por el neutro es: $i_N = i_R + i_S + i_T$

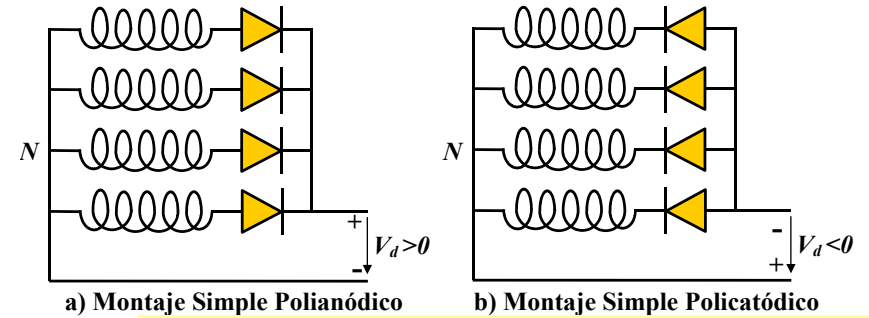
En esta suma todos los armónicos no triples suman cero, luego **la corriente por el neutro** será:

$$i_N = 3 \sum_{h=3(2k-1)}^{\infty} \sqrt{2}I_{Sh} \sin(h\omega t - \Phi_h), \quad k = 1, 2, 3 \dots$$

$$I_N = 3 \sqrt{\sum_{h=3(2k-1)}^{\infty} I_{Sh}^2} \approx 3I_{S3}$$

Esta última aproximación se puede hacer si el tercer armónico es mucho mayor que los demás armónicos triples.

RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS. Montajes Simples

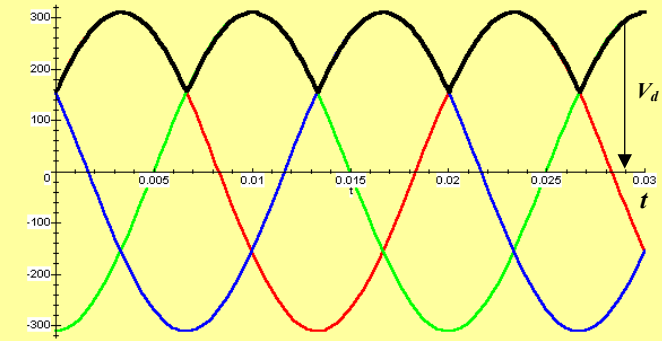


a) Montaje Simple Polianódico

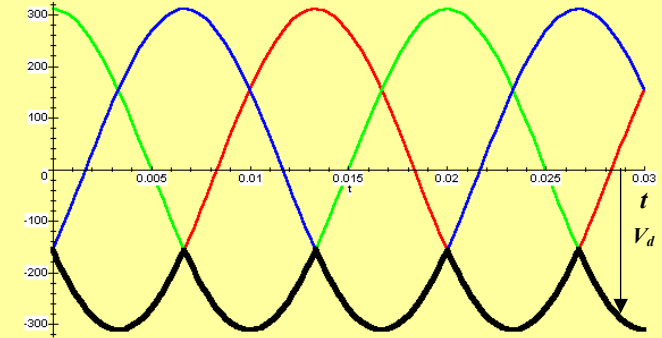
b) Montaje Simple Policatódico

Formas de ondas de los montajes

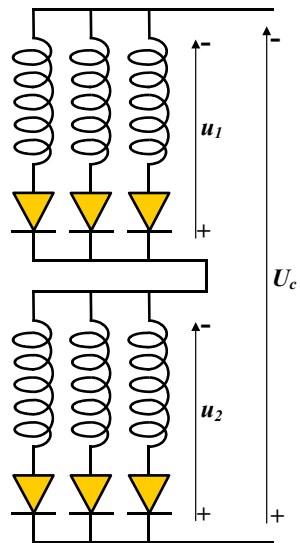
Polianódico



Policatódico



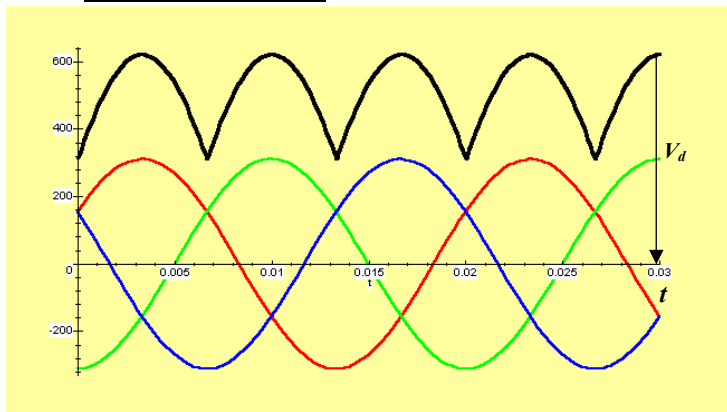
RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS.
Conexión Serie en fase



$$U_c = u_1 + u_2$$

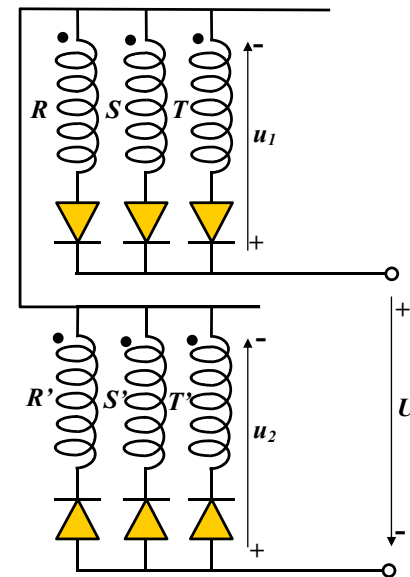
Comparación con un solo rectificador:

- Tensión de pico doble.
- Frecuencia de rizado igual.
- Tensión de rizado doble.



Conexión en Fase de dos Rectificadores Polianódicos idénticos

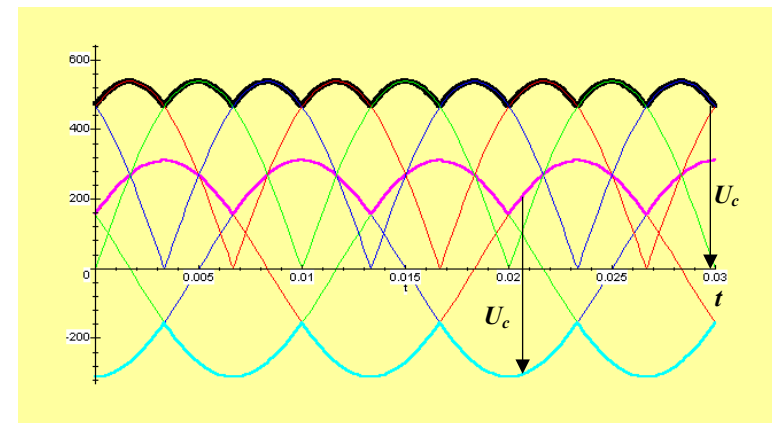
RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS.
Conexión Serie en oposición de fases



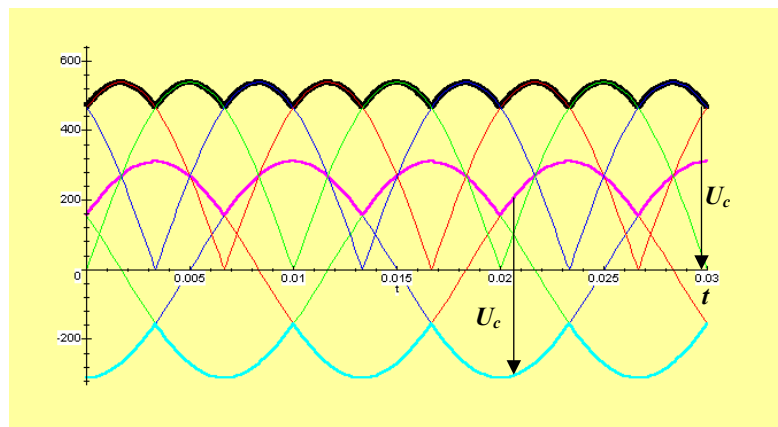
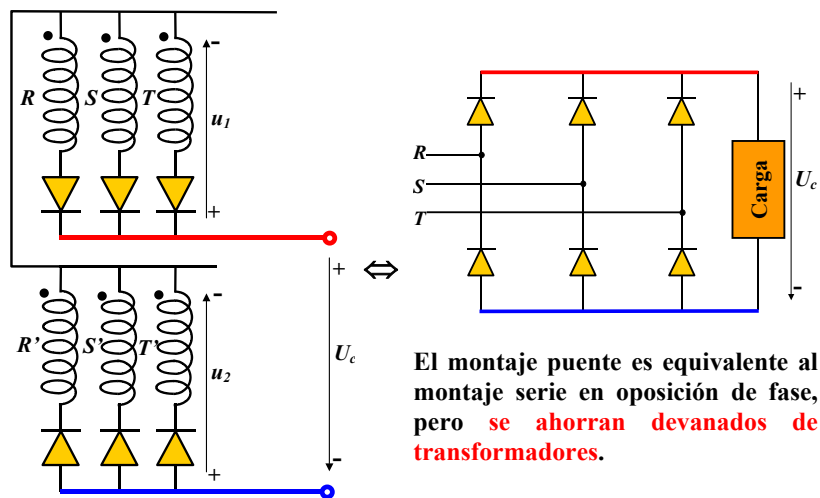
$$U_c = u_1 - u_2$$

Comparación con un solo rectificador:

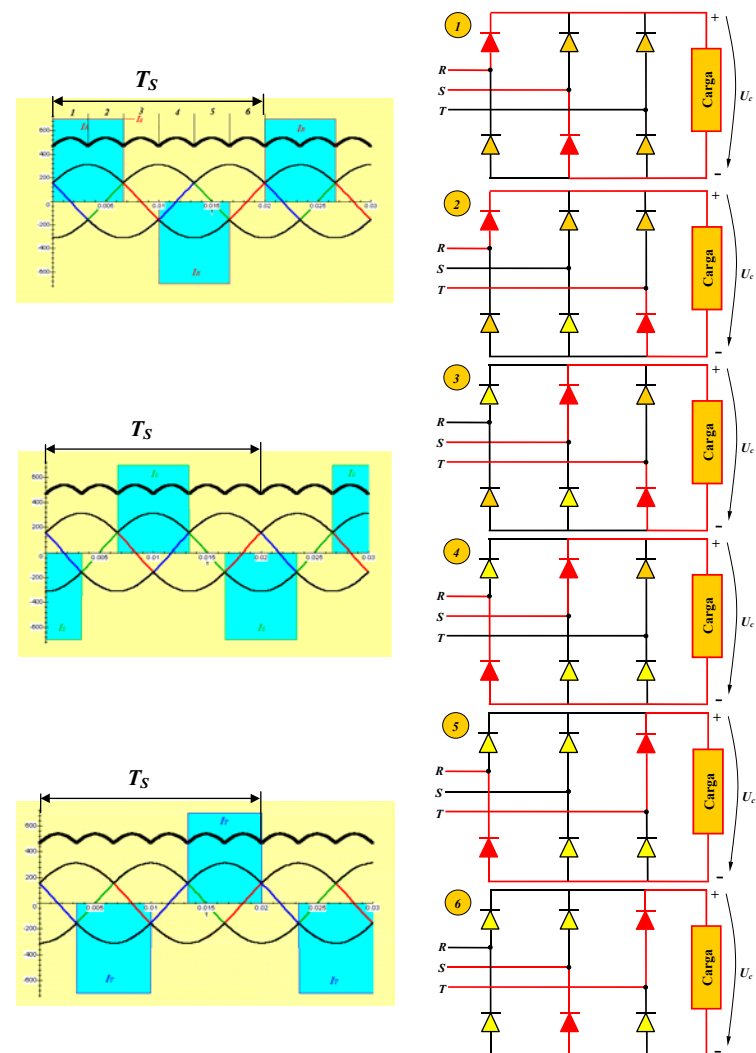
- Tensión de pico menor que el doble (en trifásica $\sqrt{3}$).
- Frecuencia de rizado doble.
- Tensión de rizado menor.



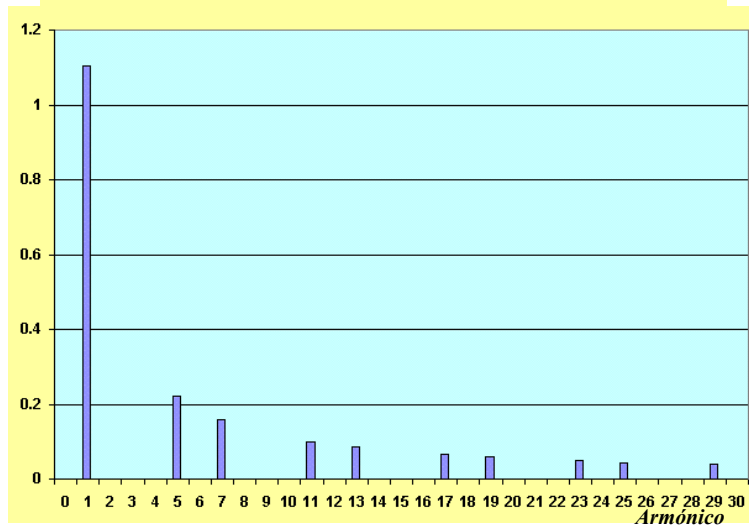
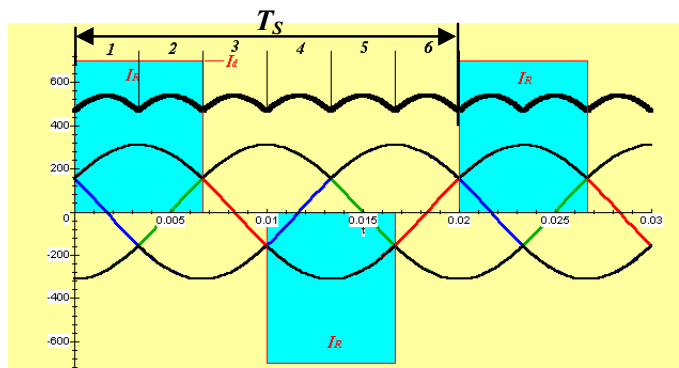
RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS. Puente Trifásico



RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS. Puente Trifásico



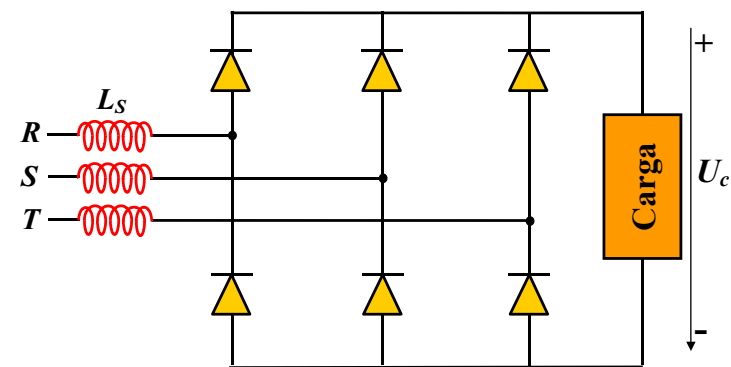
RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS. Puente Trifásico. Armónicos



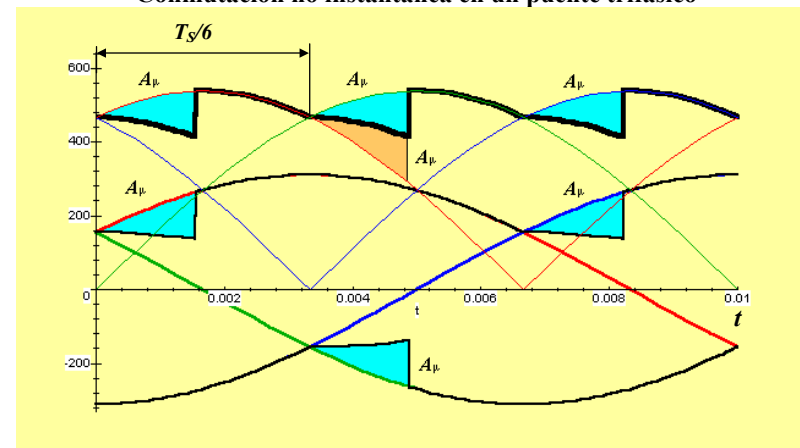
Armón	Valor	Armón	Valor	Armón	Valor	Armón	Valor
0	0	5	0.220	10	0	15	0
1	1.102	6	0	11	0.100	16	0
2	0	7	0.157	12	0	17	0.064
3	0	8	0	13	0.084	18	0
4	0	9	0	14	0	19	0.0584

Armónicos de la corriente I_R (normalizada con I_d)

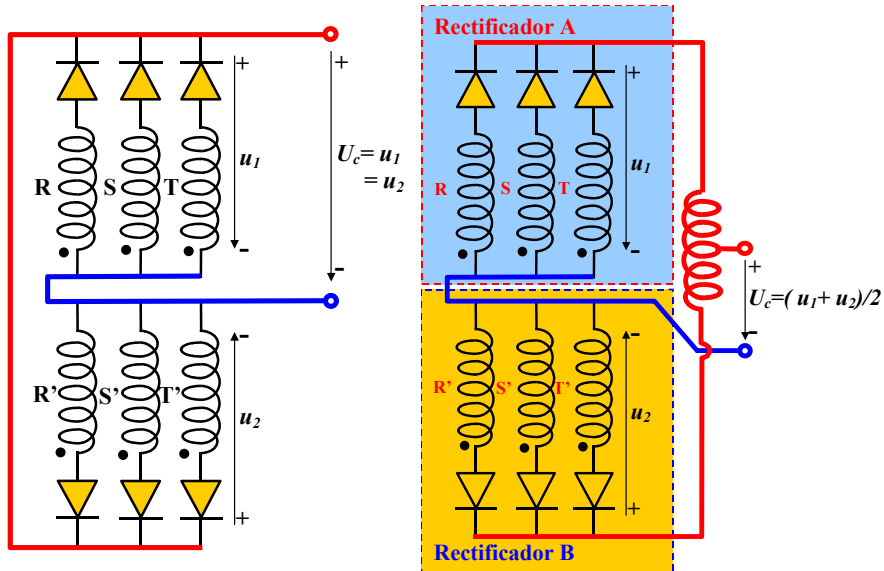
RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS



Comutación no instantánea en un puente trifásico

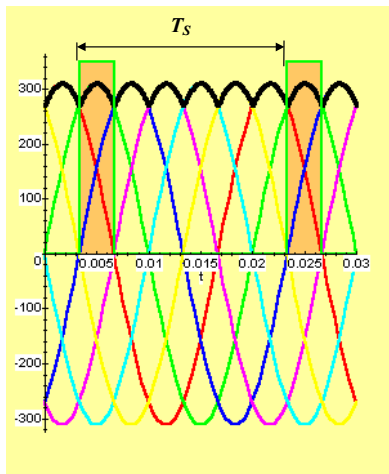


RECTIFICADORES TRIFÁSICOS Y POLIFÁSICOS. Conexión en paralelo

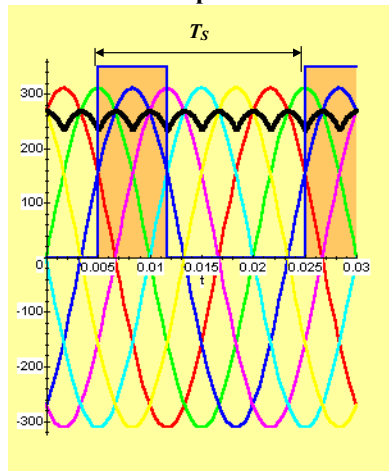


Rectificador Hexafásico

Conexión Paralelo de dos Rectificadores Trifásicos en Oposición de Fase

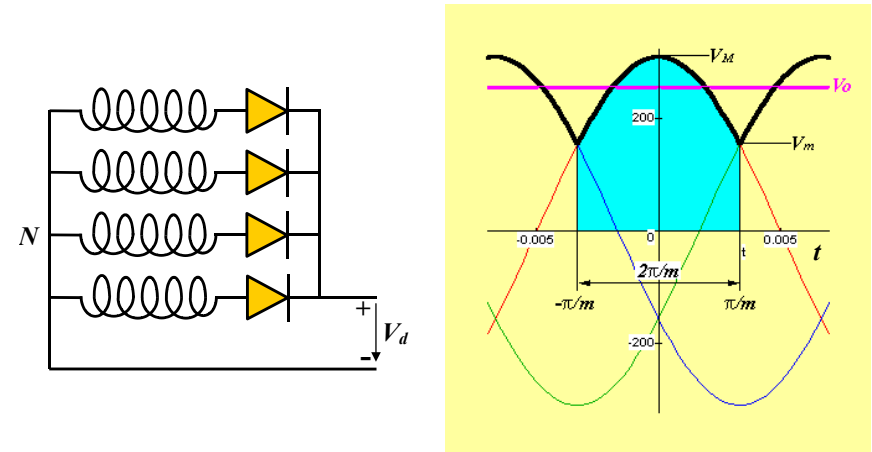


Sólo conduce un diodo en cada instante



Conducen un diodo de cada rectificador en cada instante

TENSIÓN RECTIFICADA. Valor Medio de la Tensión Rectificada en un Montaje Simple



De la figura, puede deducirse que:

$$V_m = V_M \cdot \cos \frac{\pi}{m}$$

La tensión de salida estará formada por una **serie de arcos** que se repiten periódicamente:

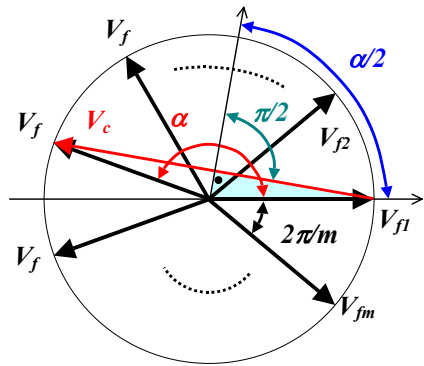
$$u = V_M \cdot \cos \omega t \text{ para } \frac{-\pi}{m} < \omega t < \frac{\pi}{m}.$$

El valor medio V_o se obtiene integrando entre los límites anteriores:

$$\begin{aligned} V_o &= \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{m}\right)} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} V_M \cdot \cos \omega t \cdot d\omega t = \frac{m}{2\pi} \cdot V_M \left[\text{sen } \omega t \right]_{-\pi/m}^{\pi/m} = \\ &= \frac{m}{2\pi} \cdot V_M \left[\text{sen } \frac{\pi}{m} - \text{sen } \frac{-\pi}{m} \right] \end{aligned}$$

$$V_o = \frac{m}{\pi} \cdot V_M \cdot \text{sen } \frac{\pi}{m}$$

TENSIÓN RECTIFICADA. Valor Medio de la Tensión Rectificada en un Puente



En el triángulo isósceles, el lado mayor es la tensión compuesta V_c (tensión fase-fase) y los lados iguales son las tensiones de fase V_f . Al dividirlo por la bisectriz, quedan dos triángulos rectángulos, de donde se calcula:

$$V_c/2 = V_f \cdot \text{sen}(\alpha/2)$$

$$\text{dónde } \alpha = (2\pi/m) \cdot \text{trunc}(m/2)$$

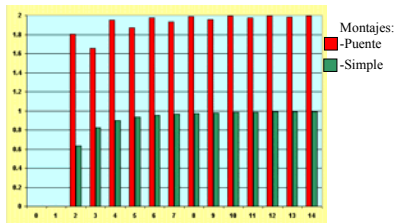
Para calcular la tensión media en un puente, se puede aplicar la fórmula deducida para un montaje simple, pero teniendo en cuenta que la tensión de pico será la tensión compuesta y que la frecuencia de rizado será el doble:

$$V_M = V_c = 2V_f \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{m} \cdot \text{trunc}\left(\frac{m}{2}\right)\right)$$

$$V_o = \frac{2m}{\pi} \cdot V_c \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2m}\right) =$$

$$= \frac{2m}{\pi} \cdot \left(2 \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{m} \cdot \text{trunc}\left(\frac{m}{2}\right)\right) \cdot V_f\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2m}\right) =$$

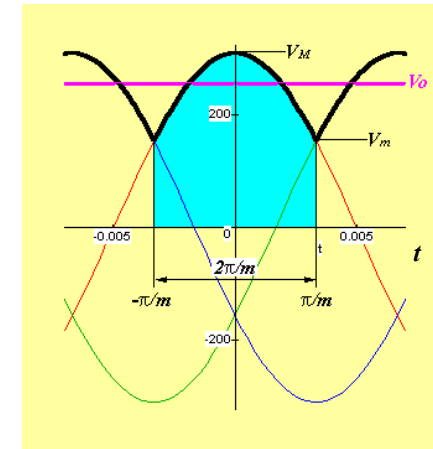
$$= 4 \frac{m}{\pi} \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{m} \cdot \text{trunc}\left(\frac{m}{2}\right)\right) \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{2m}\right) \cdot V_f$$



En el caso **trifásico**: $m=3$,

$$V_o = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_f = 1.652 V_f$$

TENSIÓN RECTIFICADA. Montaje Simple



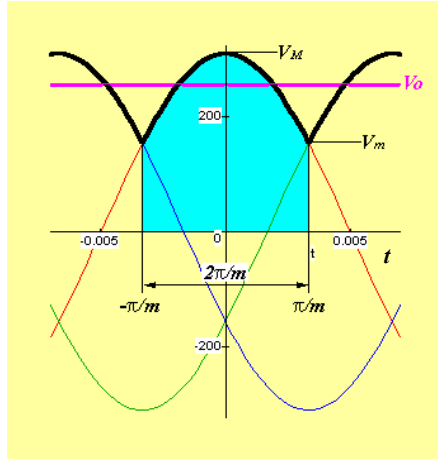
Valor Eficaz (V_{RMS}) . Montaje Simple:

$$\begin{aligned} V_{RMS}^2 &= \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{m}\right)^{-\pi/m}} \int_{-\pi/m}^{\pi/m} V_M^2 \cdot \cos^2 \omega t \cdot d\omega t = \\ &= \frac{m}{2\pi} \cdot V_M^2 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{m} + \frac{\pi}{m} \right) + \frac{1}{4} \left(\text{sen} \frac{2\pi}{m} + \text{sen} \frac{2\pi}{m} \right) \right] = \\ &= V_M^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \cdot \text{sen} \frac{2\pi}{m} \right] \end{aligned}$$

$$V_{RMS} = V_M \cdot \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \cdot \text{sen} \frac{2\pi}{m}}$$

Para el caso **trifásico**: $V_{RMS}(m=3) = 1.189 V_S$

TENSIÓN RECTIFICADA. Montaje Simple. Factor de Ondulación. Desarrollo en Serie. Factor de Potencia del Secundario



Factor de Ondulación. Montaje Simple:

El factor de ondulación se define como la mitad del valor de pico-pico, dividido por el valor medio.

$$K_m = \frac{V_M - V_m}{2V_o} = \frac{V_M - V_M \cdot \cos \frac{\pi}{m}}{2 \frac{m}{\pi} \cdot V_M \cdot \sin \frac{\pi}{m}} = \frac{\pi}{2m} \cdot \frac{1 - \cos \frac{\pi}{m}}{\sin \frac{\pi}{m}}$$

Para el caso trifásico: $K_3 = 0.302$

Desarrollo en Serie. Montaje Simple:

$$u(t) = V_o \cdot \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{-2 \cdot (-1)^k}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \cos(k \cdot m \cdot \omega \cdot t) \right)$$

dónde V_o es el valor medio de la tensión rectificada.

TENSIÓN RECTIFICADA. Montaje Simple. Factor de Potencia del Secundario

Factor de Potencia Secundario:

También se le denomina factor de utilización del transformador

$$TUF = \frac{P_d}{S_s}$$

La potencia activa suministrada por el rectificador es: $P_d = \frac{1}{T} \int_0^T v_d \cdot i_d \cdot dt$,

donde v_d e i_d son la tensión y la corriente a la salida del rectificador.

S_s es la potencia aparente total del secundario del transformador.

Veamos cuanto vale TUF para el caso de carga altamente inductiva. Si suponemos que i_d es constante durante todo el periodo y de valor I_d , $P_d = V_o \cdot I_d$ donde V_o es el valor medio de la tensión rectificada.

La corriente que circula por el devanado secundario es igual a la que circula por cada diodo. Esta corriente es igual a I_d durante el tiempo $\frac{T}{m}$ y es nula durante el resto del periodo T, por tanto:

$$I_s^2 = \frac{1}{m} \cdot I_d^2 \Rightarrow I_s = \left(\frac{I_d}{\sqrt{m}} \right)$$

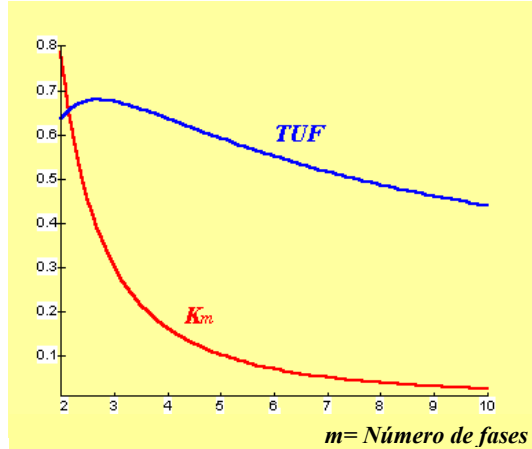
Luego:

$$TUF = \frac{P_d}{S_s} = \frac{V_o \cdot I_d}{m \cdot V_s \cdot I_s} = \frac{\frac{m}{\pi} \cdot V_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot I_d}{m \cdot V_s \cdot \frac{I_d}{\sqrt{m}}} = \frac{\sqrt{2m}}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{m}$$

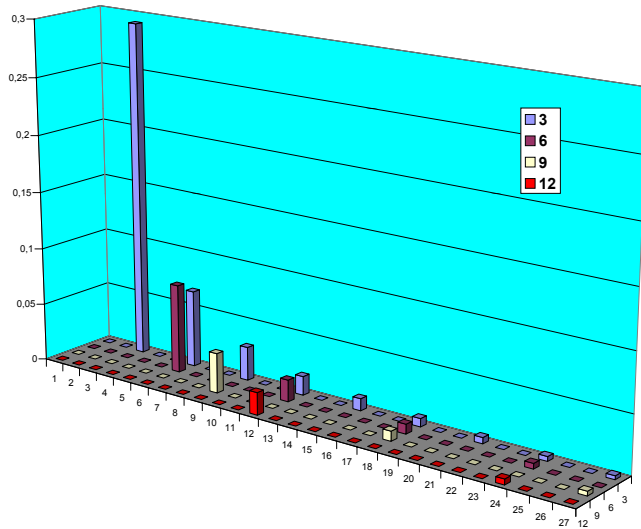
Para el caso trifásico: $TUF(m=3) = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{3} = 0.675$

TENSIÓN RECTIFICADA. Factor de Ondulación. . Factor de Potencia del Secundario. Desarrollo en Serie

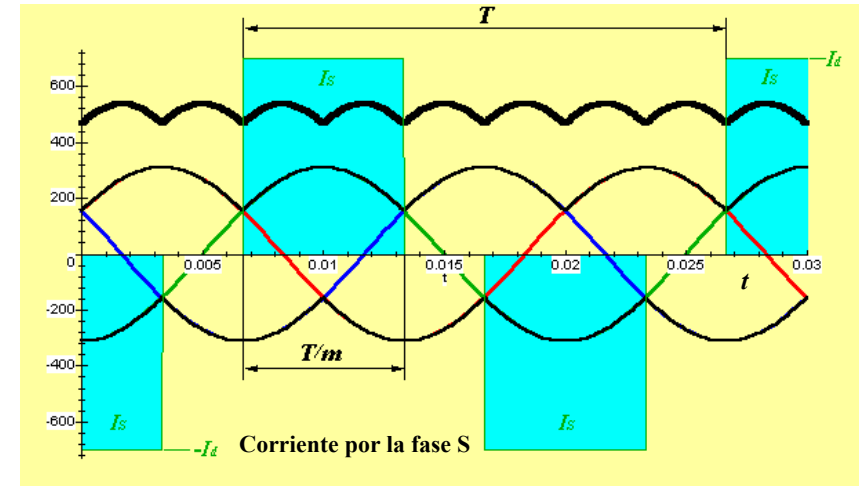
Gráficamente:



Factor de potencia del Secundario (TUF) y Factor de Ondulación (Km) en función del número de fases (m) del rectificador.



CORRIENTE PARA CARGA ALTAMENTE INDUCTIVA. Puente Trifásico



El valor eficaz de la corriente de una fase es: $I_s = \sqrt{\frac{2}{m}} \cdot I_d$

Para $m=3$:

$$\begin{cases} I_s = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \\ I_{S1} = \frac{I_d \sqrt{6}}{\pi} \\ I_{Sh} = \frac{I_{S1}}{h} \quad (h = 5, 7, 11, \dots) \end{cases}$$

Al estar los armónicos en fase, $DPF=1$.

El factor de potencia es: $PF = \frac{I_{S1} DPF}{I_s} = \frac{3}{\pi} = 0.955$