

## TEMA 13. RECTIFICADORES CONTROLADOS

### 13.1.INTRODUCCIÓN

#### 13.2.RECTIFICADOR MONOFÁSICO

##### 13.2.1. Rectificador de Media Onda

###### 13.2.1.1. Estudio para diferentes tipos de cargas

###### 13.2.1.2. Diodo de Libre Circulación

##### 13.2.2. Rectificador Puente Monofásico

###### 13.2.2.1. Conmutación Ideal

###### 13.2.2.2. Valor Medio de la Tensión Rectificada

###### 13.2.2.3. Efecto de $\alpha$ sobre la Componente Fundamental de $I_s$

###### 13.2.2.4. Conmutación no Instantánea

##### 13.2.3. Sincronización del Circuito de Disparo

#### 13.3.RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

##### 13.3.1. Valor Medio de la Tensión Rectificada

##### 13.3.2. Funcionamiento como Rectificador y como Ondulador

##### 13.3.3. Influencia de la Naturaleza de la Carga

##### 13.3.4. Conmutación no Instantánea

#### 13.4.RECTIFICADOR PUENTE POLIFÁSICO

##### 13.4.1. Valor Medio de la Tensión Rectificada

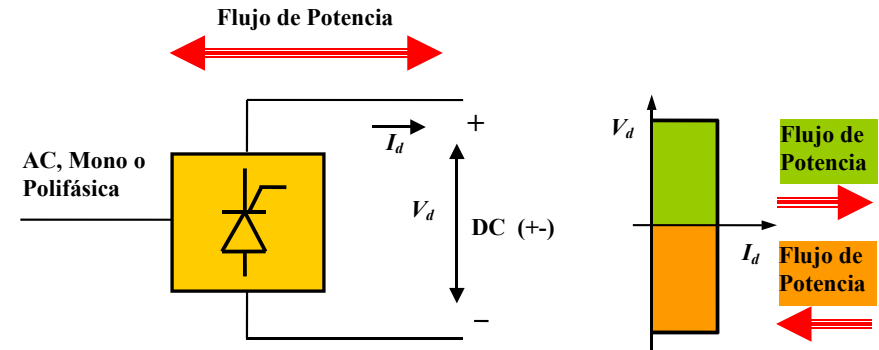
##### 13.4.2. Conmutación no Instantánea

#### 13.5.RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS

##### 13.5.1. Puente Monofásico

##### 13.5.2. Puente Polifásico

## INTRODUCCIÓN

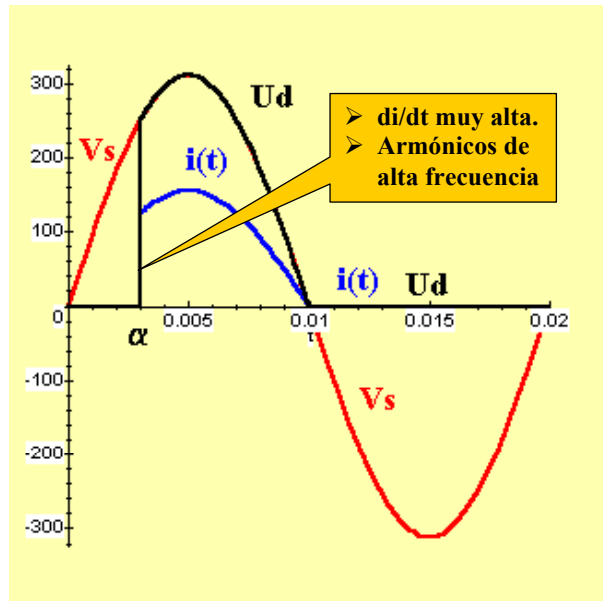
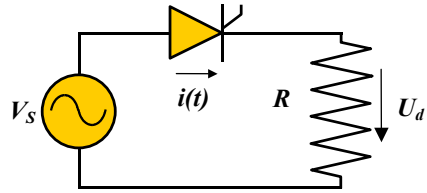


Símbolos de Rectificadores Controlados

Este tipo de convertidores en la actualidad es casi la única aplicación de los SCR, ya que son circuitos que requieren control de ángulo de fase y los dispositivos se bloquean naturalmente.

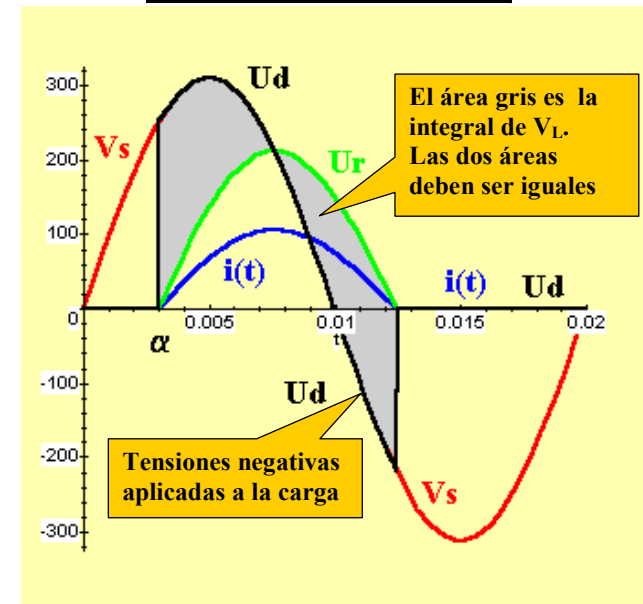
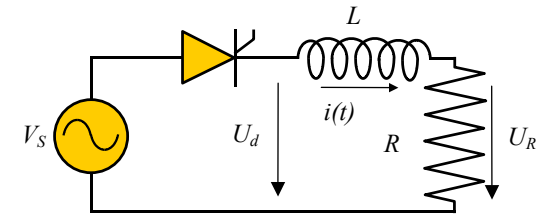
Existen rectificadores controlados monofásicos y polifásicos, diseñados para potencias muy elevadas.

**RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO.  
Carga Resistiva**



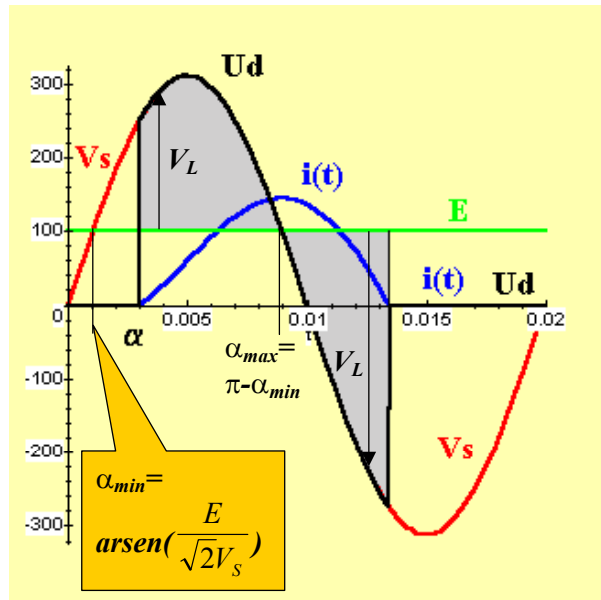
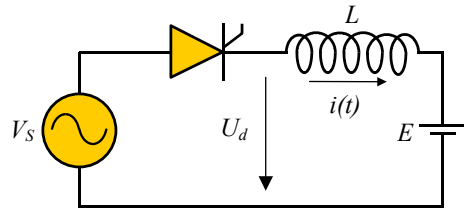
Carga Resistiva

**RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO.  
Carga Resistiva e Inductiva**



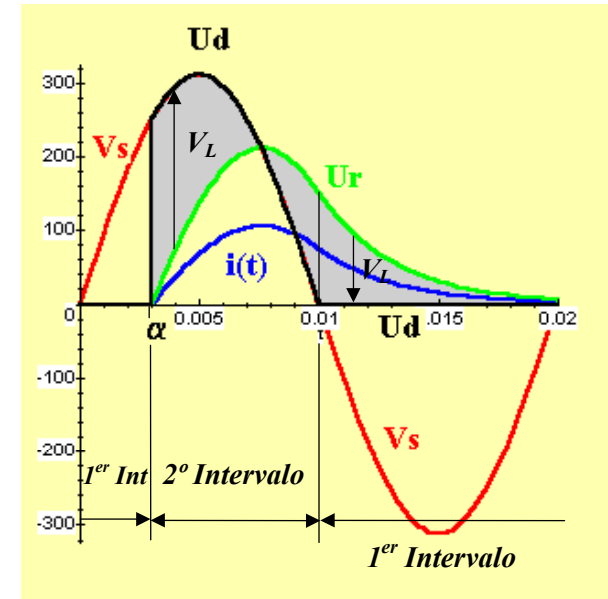
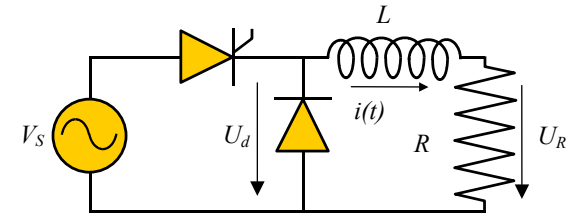
Carga Resistiva e Inductiva

**RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO.**  
**Carga Inductiva y Fuente de Tensión**



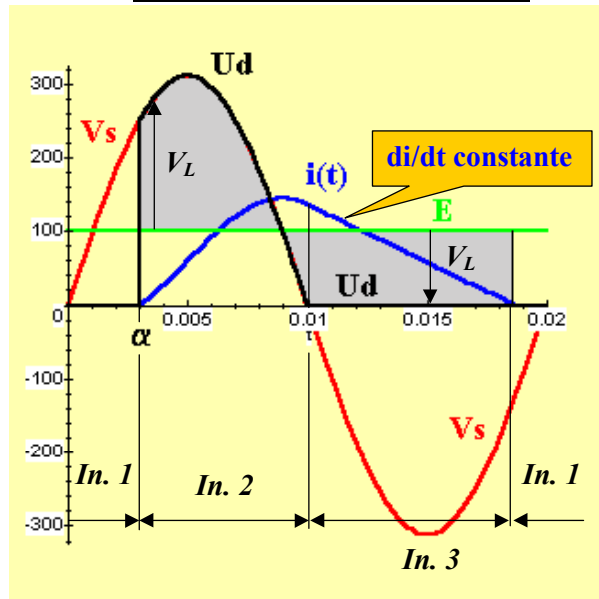
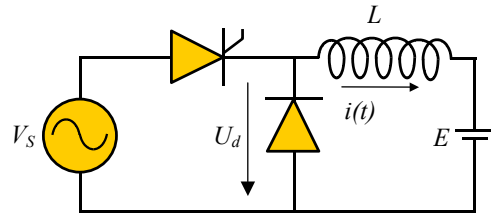
**Carga Inductiva y Fuente de Tensión**

**RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO.**  
**Carga Resistiva e Inductiva y Diodo de Libre Circulación**



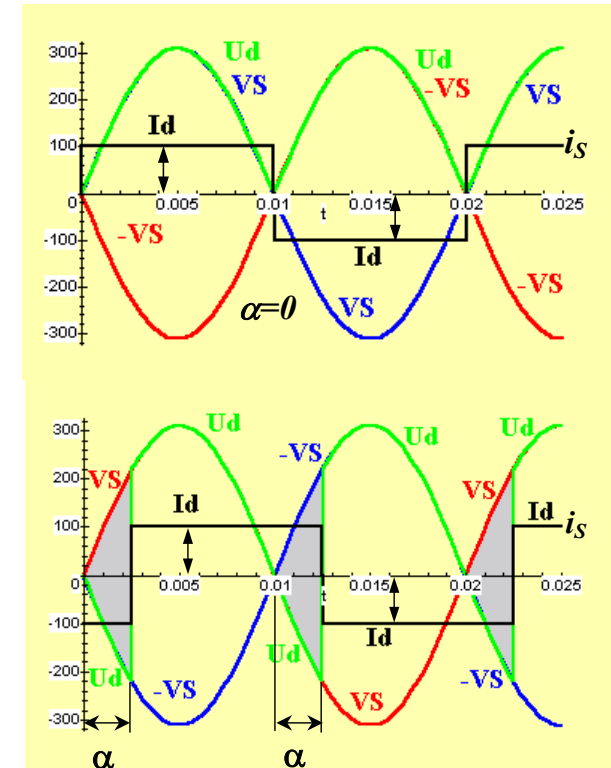
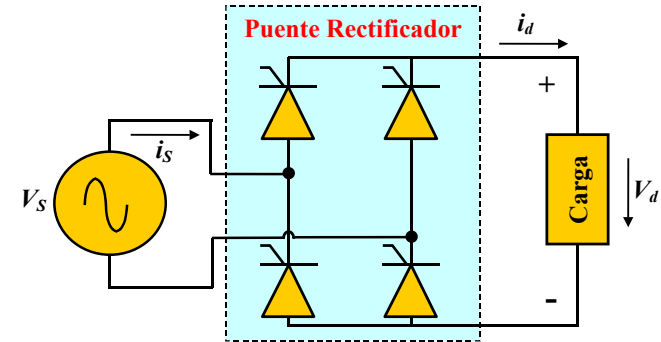
**Carga Resistiva e Inductiva con Diodo de libre circulación**

**RECTIFICADOR CONTROLADO MONOFÁSICO.**  
 Carga Inductiva, Fuente de Tensión y Diodo de Libre Circulación



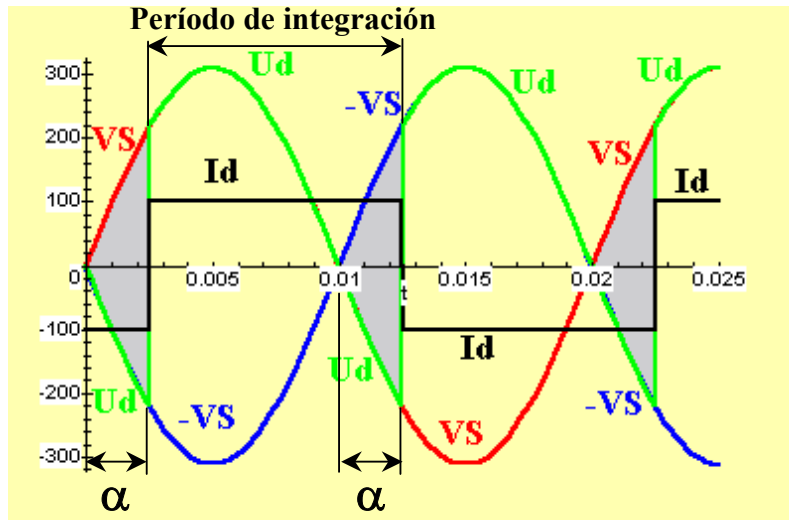
Carga inductiva y fuente de alimentación con Diodo de libre circulación

**RECTIFICADOR PUENTE MONOFÁSICO**  
 Conmutación Ideal



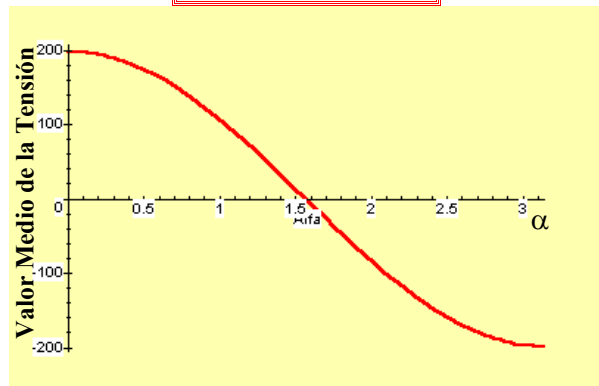
Puente Monofásico Controlado

**RECTIFICADOR PUENTE MONOFÁSICO.**  
**Valor Medio de la Tensión Rectificada**



$$V_{da} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} \sqrt{2}V_s \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot V_s \cdot \cos \alpha =$$

$$V_{da} = 0.9 \cdot V_s \cos \alpha$$



$$P = I_d \left( \frac{1}{T} \int_0^T v_d dt \right) = 0.9 \cdot I_d \cdot V_s \cdot \cos \alpha$$

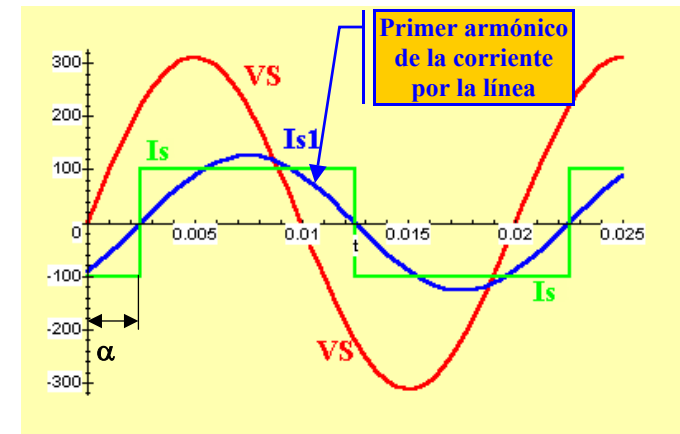
**Puente Monofásico Controlado**

**RECTIFICADOR PUENTE MONOFÁSICO.**  
**Efecto de  $\alpha$  sobre la Componente Fundamental de  $I_s$**

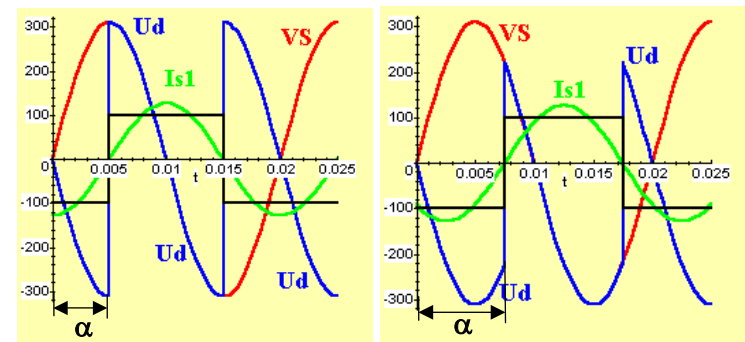
Desarrollando en serie de Fourier se obtiene para la componente fundamental de la corriente por la línea ( $I_{s1}$ ):

$$I_{s1} = 0.9 \cdot I_d \quad (\text{Valor eficaz})$$

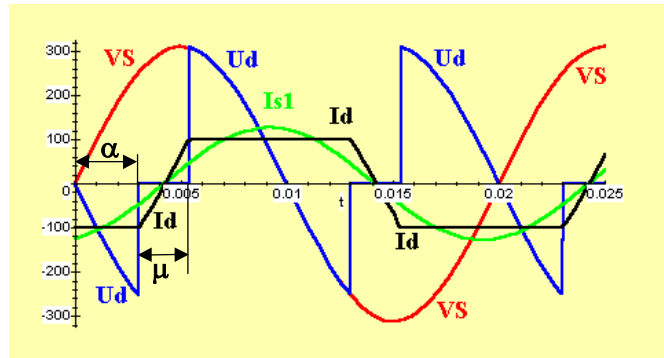
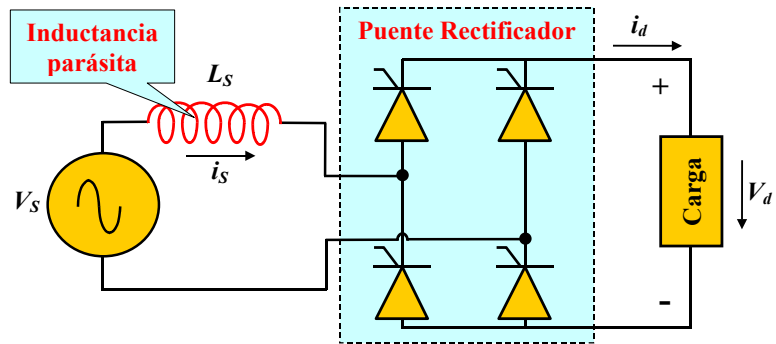
$$I_{s1M} = 0.9 \cdot \sqrt{2} \cdot I_d = 1.27 \cdot I_d \quad (\text{Valor de pico})$$



Para distintos valores de  $\alpha$ :



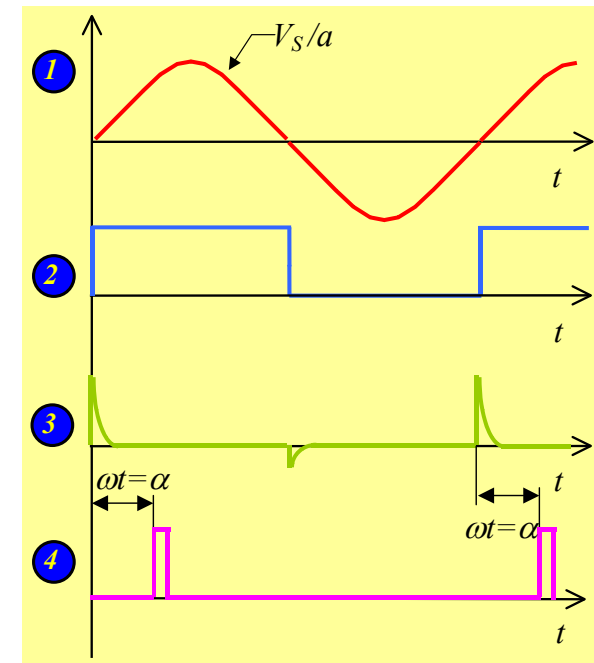
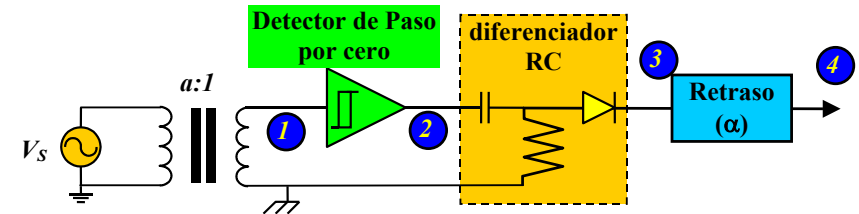
## RECTIFICADOR PUENTE MONOFÁSICO. Comutación no Instantánea



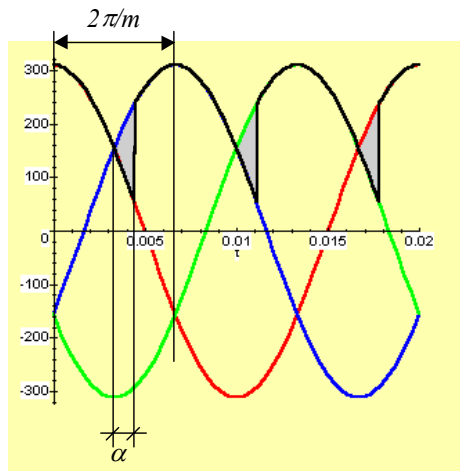
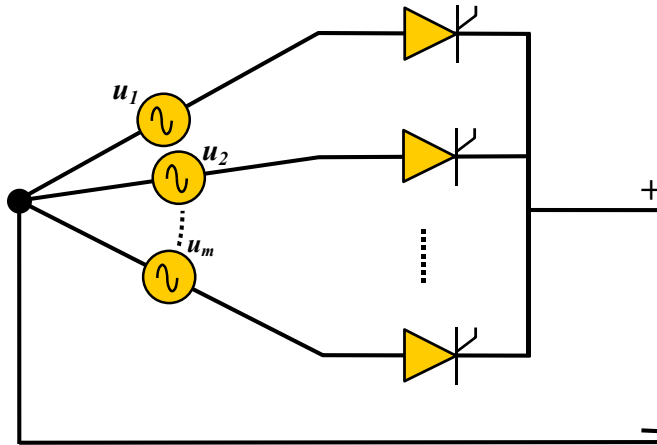
Puente Monofásico con conmutación no instantánea

## SINCRONIZACIÓN DEL CIRCUITO DE DISPARO

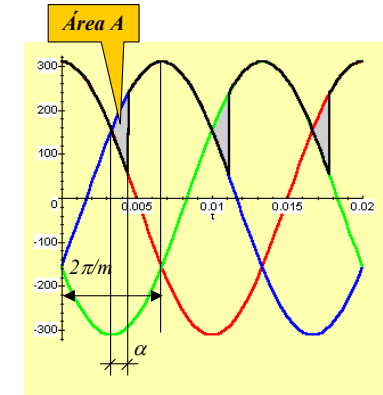
Sincronización del disparo con el paso por cero de  $V_s$ .



## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES



## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES Valor Medio de la Tensión Rectificada



$$U_{\alpha} = \frac{A}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{m}}^{\frac{\pi}{m} + \alpha} \left( U_M \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{m}\right) - U_M \cdot \cos\omega t \right) d\omega t =$$

$$U_{\alpha} = \frac{U_M \cdot m}{2\pi} \left[ \text{sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) - \text{sen}\left(-\frac{\pi}{m}\right) - \text{sen}\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) + \text{sen}\frac{\pi}{m} \right] =$$

$$U_{\alpha} = \frac{U_M \cdot m}{2\pi} \left( 2 \text{sen}\frac{\pi}{m} + \text{sen}\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) - \text{sen}\left(\frac{\pi}{m} + \alpha\right) \right)$$

Aplicando  $\text{sen } p - \text{sen } q = 2 \cos \frac{1}{2}(p+q) \cdot \text{sen} \frac{1}{2}(p-q)$ , resulta:

$$U_{\alpha} = \frac{U_M \cdot m}{2\pi} \left[ 2 \text{sen}\frac{\pi}{m} + 2 \cos \alpha \cdot \text{sen}\left(-\frac{\pi}{m}\right) \right] = U_M \cdot \frac{m}{\pi} \cdot \text{sen}\frac{\pi}{m} (1 - \cos \alpha) =$$

$$U_{\alpha} = U_{ov} (1 - \cos \alpha)$$

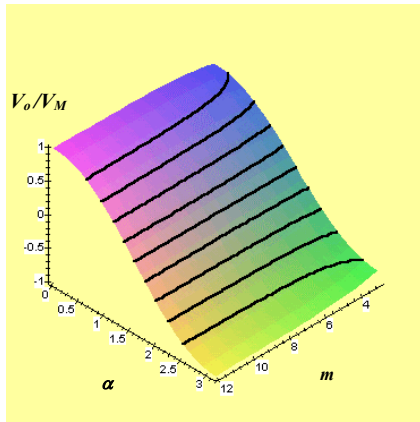
La tensión media a la salida del rectificador controlado será:

$$U_o = U_{ov} - U_{\alpha} = U_{ov} \cdot \cos \alpha$$

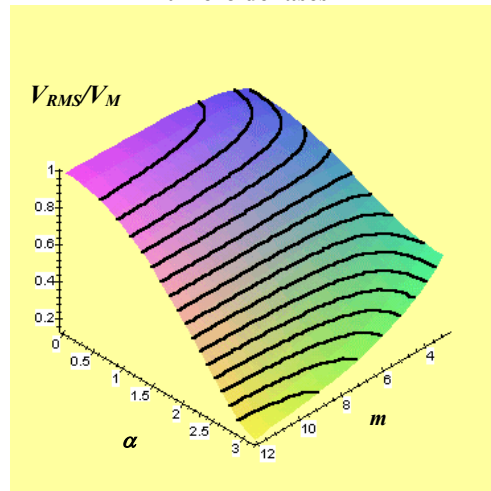
La Tensión Eficaz:  $U_{rms} = U_M \sqrt{\frac{1}{2} + \frac{m}{4\pi} \cdot \text{sen} \frac{2\pi}{m} \cdot \cos \alpha}$

Los Armónicos:  $U_{ok} = U_o \cdot \frac{2}{k^2 \cdot m^2 - 1} \cdot \sqrt{1 + k^2 \cdot m^2 \cdot \text{tg}^2 \alpha}$

**RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES**  
**Valor Medio de la Tensión Rectificada**

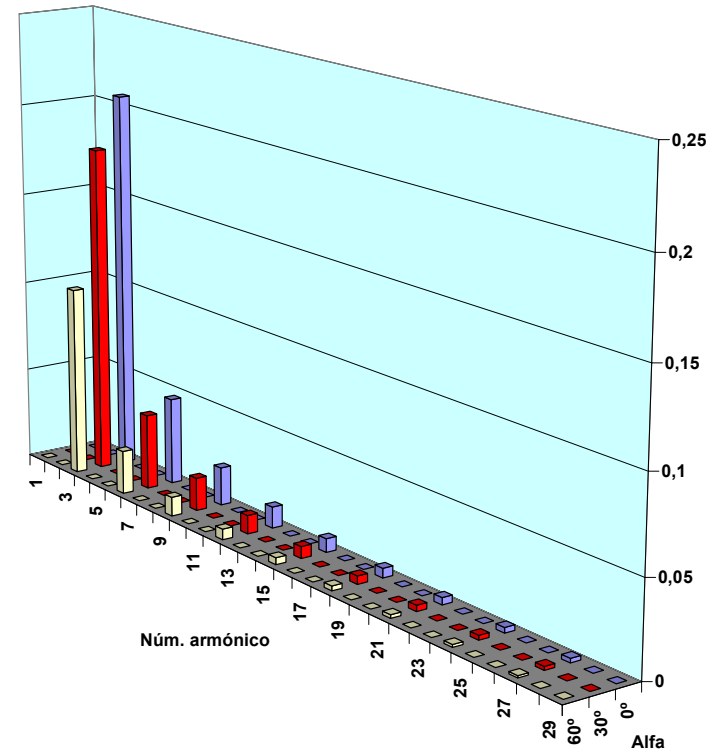


Tensión media rectificada en función del ángulo de disparo  $\alpha$  y del número de fases  $m$



Tensión eficaz rectificada en función del ángulo de disparo  $\alpha$  y del número de fases  $m$

**RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES**  
**Armónicos de la Tensión Rectificada**

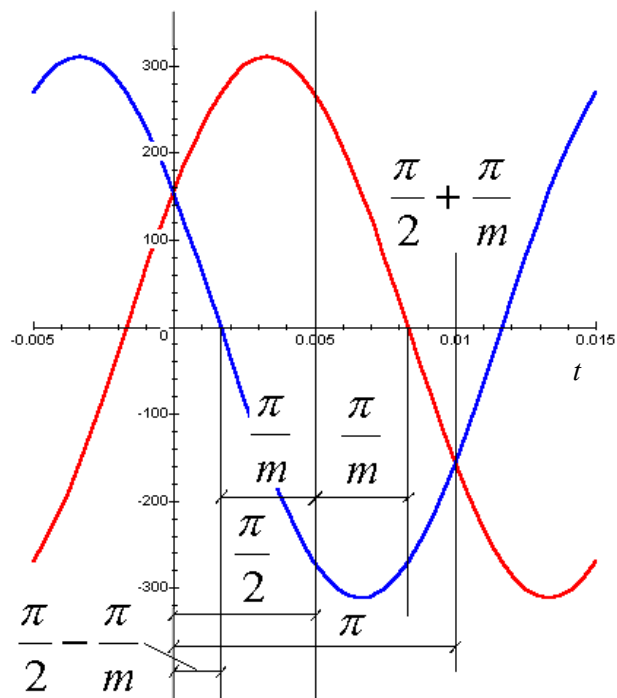


Armónicos de la tensión rectificada en un rectificador **trifásico** en función del ángulo de disparo  $\alpha$



## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Funcionamiento como Rectificador y como Ondulador



Según el valor de  $\alpha$ :

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \Rightarrow U_d \text{ siempre } > 0 \Rightarrow U_o > 0$$

$$\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} < \alpha < \frac{\pi}{2} \Rightarrow U_d \triangleleft 0 \Rightarrow U_o > 0$$

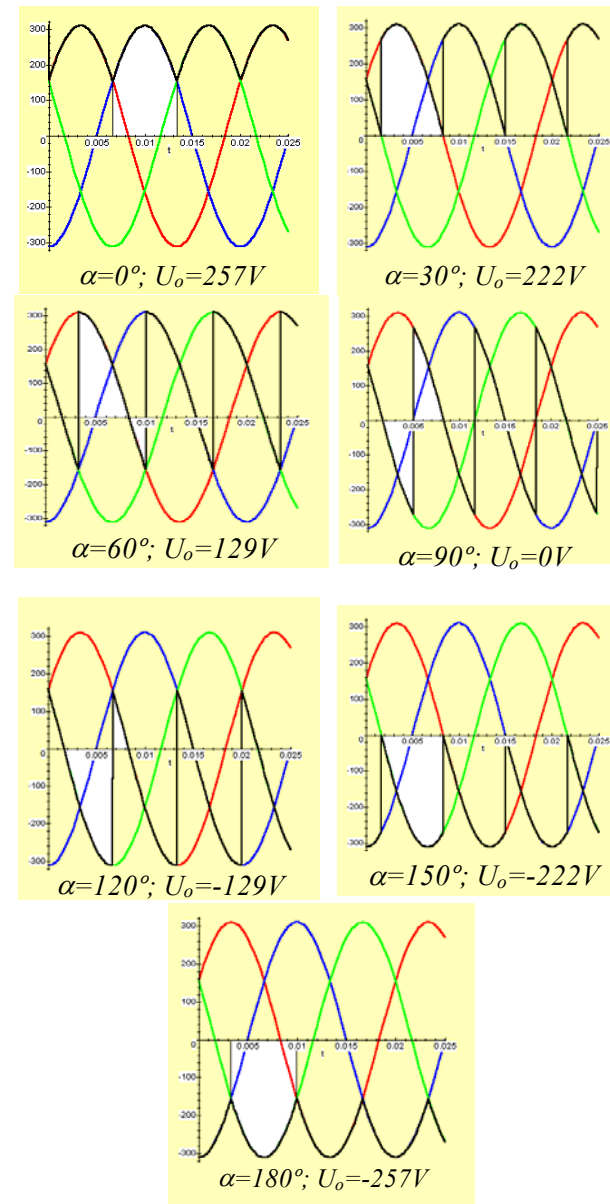
$$\alpha = \frac{\pi}{2} \Rightarrow U_d = 0$$

$$\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} \Rightarrow U_d \triangleleft 0 \Rightarrow U_o < 0$$

$$\frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{m} < \alpha < \pi \Rightarrow U_d \text{ siempre } < 0 \Rightarrow U_o < 0$$

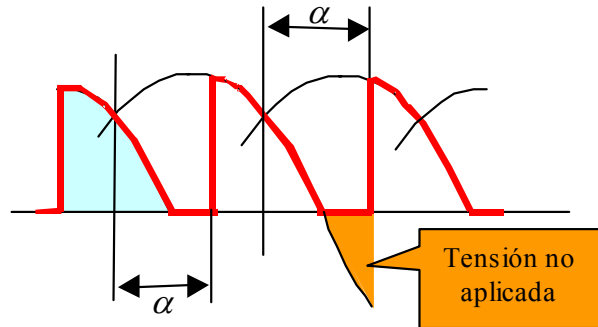
## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Funcionamiento como Rectificador y como Ondulador



## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Influencia de la Naturaleza de la Carga



La fórmula antes calculada:

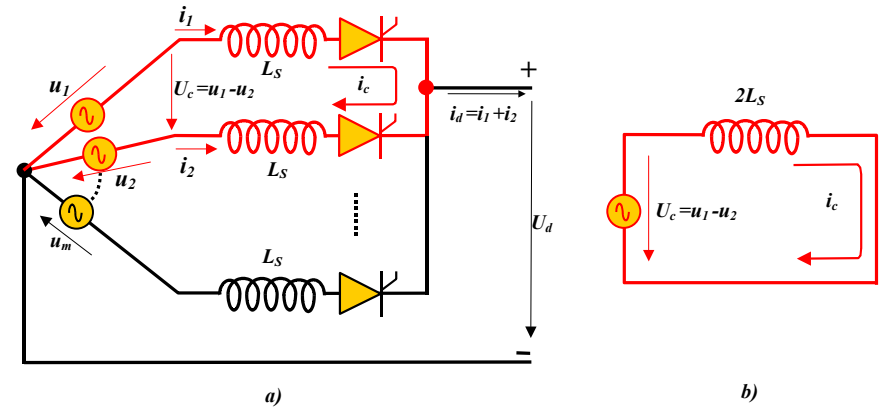
$$U_o = U_{ov} - U_\alpha = U_{ov} \cdot \cos \alpha$$

**No es válida** en el caso de cargas Resistivas o con diodos de libre circulación, ya que no se podrán aplicar tensiones negativas a la carga, en este caso, solo será aplicable si como vimos antes  $\alpha$  está en el intervalo:

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \Rightarrow U_d \text{ siempre } > 0$$

## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Conmutación no Instantánea



a) Corrientes durante la conmutación no instantánea. b) Circuito equivalente.

$$u_c = u_2 - u_1 ; u_c = \sqrt{2} \cdot U_c \cdot \sin \omega t ; U_c = 2 \cdot \sin \frac{\pi}{m} \cdot U_f$$

$$2L_s \cdot \frac{di_c}{dt} = \sqrt{2} \cdot U_c \cdot \sin \omega t$$

$$i_c = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{2\omega \cdot L_s} \int \sin \omega t \cdot d\omega t = \hat{I}_c (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

$$\text{Dónde } \hat{I}_c = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{2\omega \cdot L_s}$$

$$i_1 = I_d - i_2 = I_d - i_c, \text{ para } \omega t = \alpha + \mu, \quad i_1(\omega t = \alpha + \mu) = 0.$$

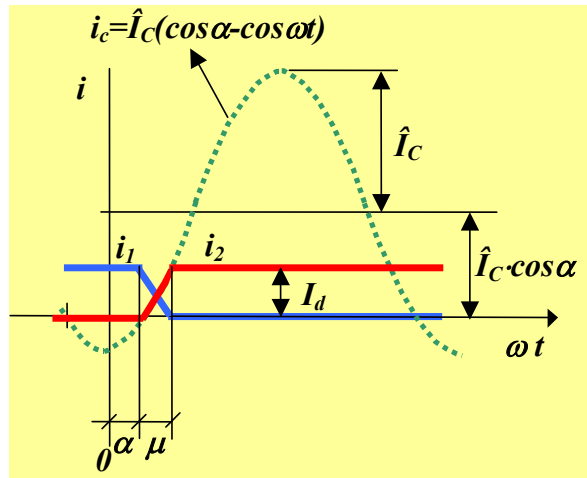
Como:  $i_c(\alpha + \mu) = I_d$  será:

$$i_c(\alpha + \mu) = I_d = \hat{I}_c \cdot (\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu))$$

$$\cos(\alpha + \mu) = \cos \alpha - \frac{I_d}{\hat{I}_c}$$

## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Comutación no Instantánea



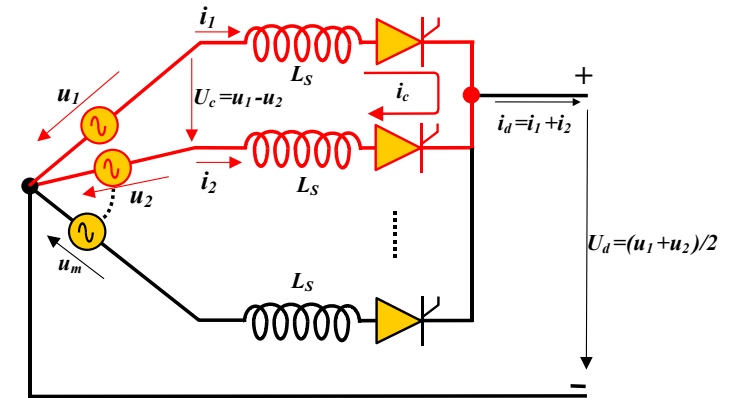
Representación gráfica de la ecuación que rige la conmutación no instantánea de un rectificador polifásico:

$$i_c = \frac{\sqrt{2} \cdot U_c}{2\omega \cdot L_s} \int_{\alpha}^{\omega t} \text{sen } \omega t \cdot d\omega t = \hat{I}_c (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

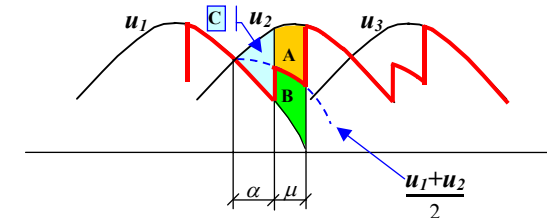
Válida para:  $\alpha \leq \omega t \leq \alpha + \mu$

## RECTIFICADORES POLIFÁSICOS SIMPLES

### Comutación no Instantánea



Circuito equivalente durante la conmutación no instantánea.



de la figura, se deduce que las áreas A y B son iguales y que:

$$A + B + C = U_{\alpha} + 2U_x \text{ donde:}$$

$$U_{\alpha} = U_{ov} \cdot (1 - \cos \alpha) \equiv \text{Área C}$$

$$U_{\alpha} + 2U_x = U_{ov} [1 - \cos(\alpha + \mu)] \equiv \text{Áreas A+B+C}$$

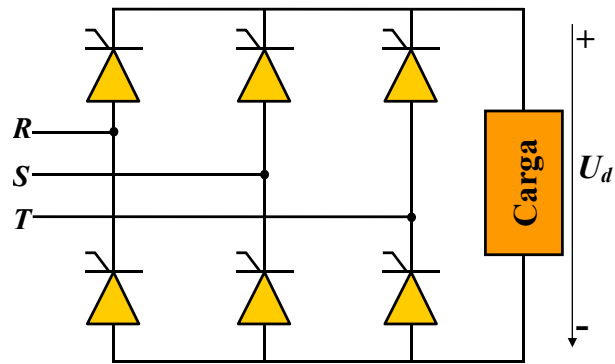
$$2U_x = U_{ov} [\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)]$$

$$U_o = U_{ov} - U_{\alpha} - U_x =$$

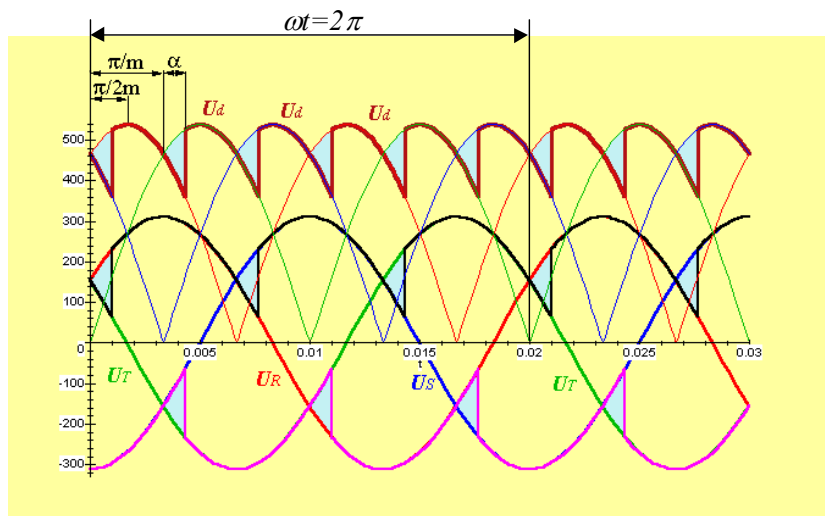
$$U_o = U_{ov} \left[ 1 - (1 - \cos \alpha) - \frac{1}{2} (\cos \alpha - \cos(\alpha + \mu)) \right] =$$

$$U_o = \frac{1}{2} U_{ov} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)]$$

## RECTIFICADOR PUENTE POLIFÁSICO

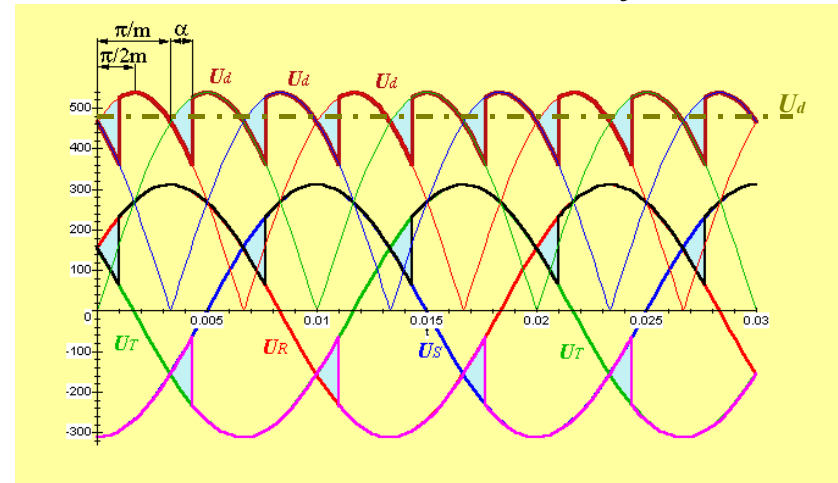


Puente Trifásico



Tensiones en un Puente Rectificador Trifásico con Ángulo de Disparo  $\alpha$

## RECTIFICADOR PUENTE POLIFÁSICO Valor Medio de la Tensión Rectificada



$$U_d = \frac{1}{\left(\frac{2\pi}{2m}\right)} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{m}} U_c d(\omega t) = \frac{m}{\pi} \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{m}} U_c d(\omega t)$$

$$U_c = 2U_M \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{m}\right) \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2m}\right)$$

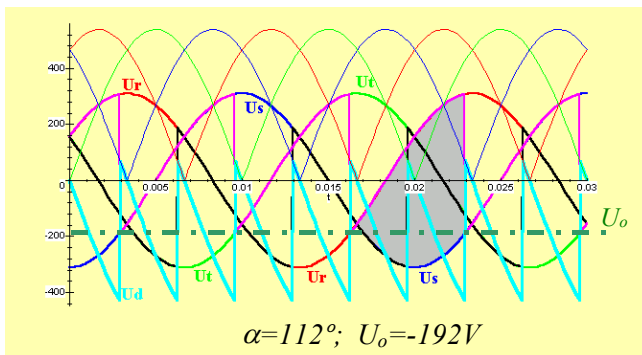
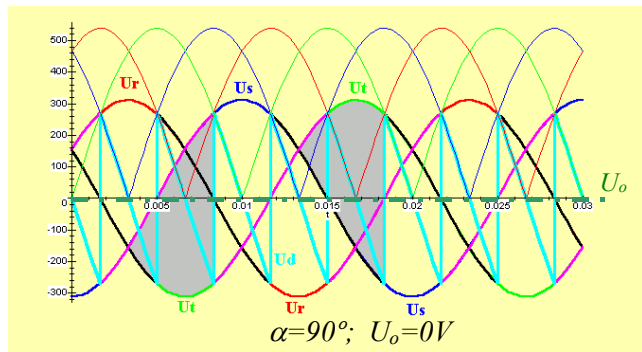
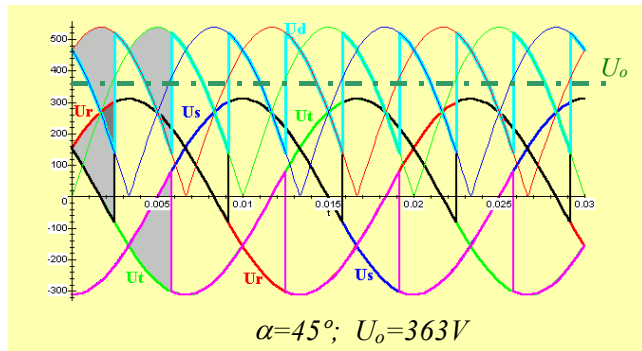
$$U_d = \frac{m}{\pi} 2U_M \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{m}\right) \int_{\alpha}^{\alpha+\frac{\pi}{m}} \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2m}\right) d(\omega t)$$

$$U_d = \frac{4m}{\pi} U_M \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{m}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\pi}{2m}\right) \cos(\alpha)$$

$$\text{Si } m=3, \quad U_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_M \cos(\alpha) = 1.65 U_M \cos(\alpha)$$

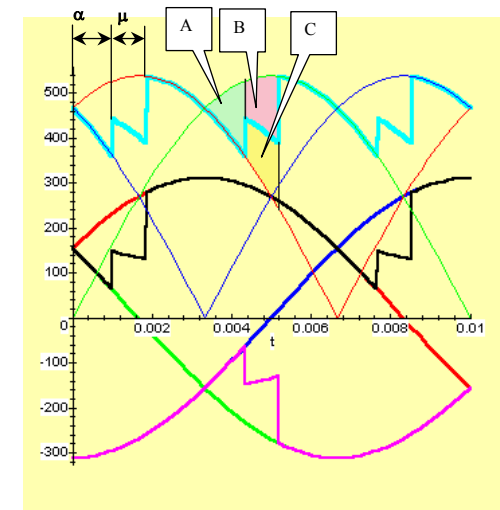
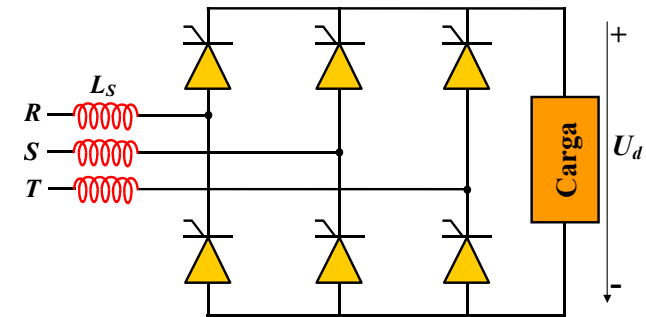
## RECTIFICADOR PUENTE POLIFÁSICO

### Funcionamiento como Rectificador y como Ondulador



## RECTIFICADOR PUENTE POLIFÁSICO

### Conmutación no Instantánea



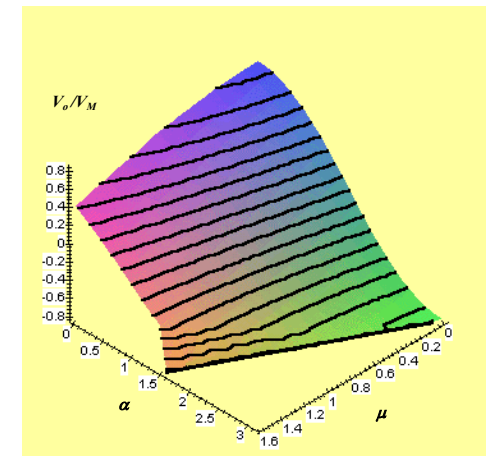
Igual que en el caso del rectificador simple será:

$$U_o = \frac{1}{2} U_{ov} [\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu)]$$

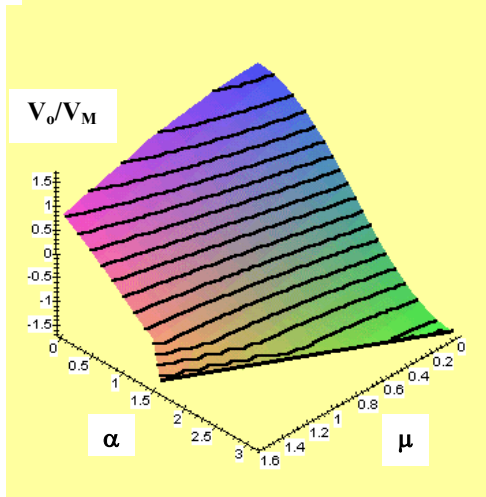
Para el puente trifásico será:

$$U_{ov} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} U_M \cos(\alpha) = 1.65 U_M \cos(\alpha)$$

## COMPARACIÓN ENTRE RECTIFICADORES Comutación no Instantánea



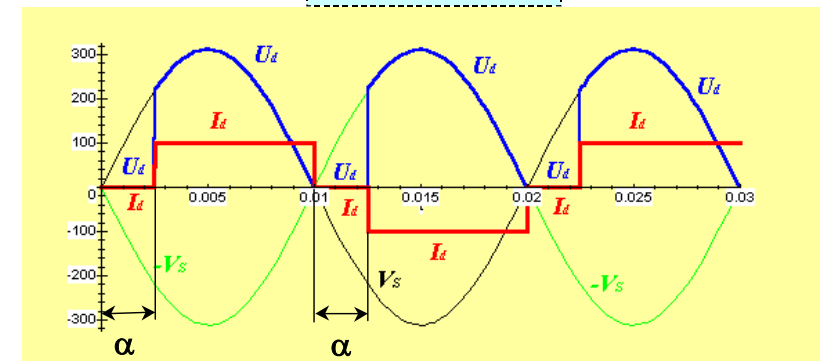
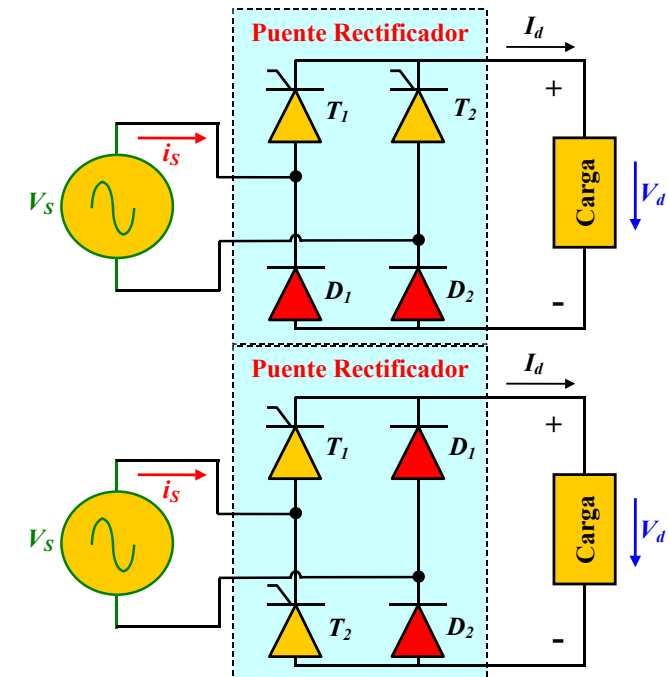
Rectificador Trifásico Simple



Rectificador Trifásico Puente

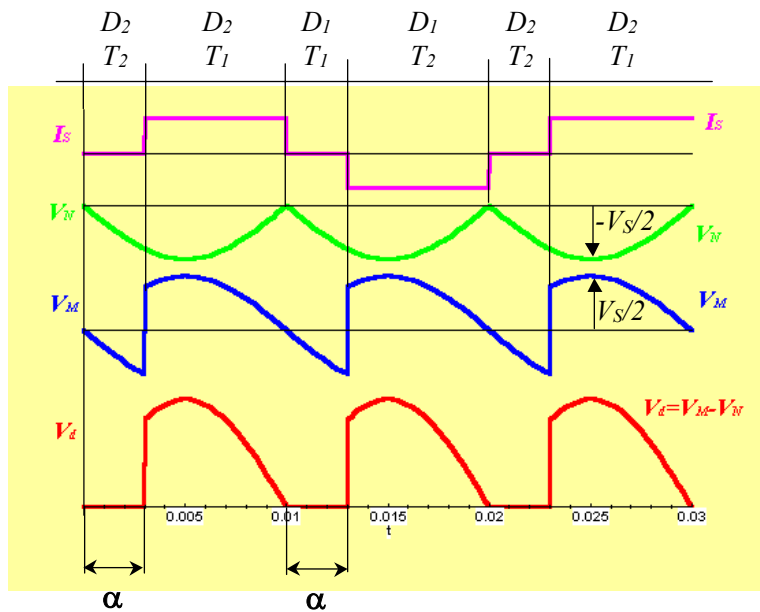
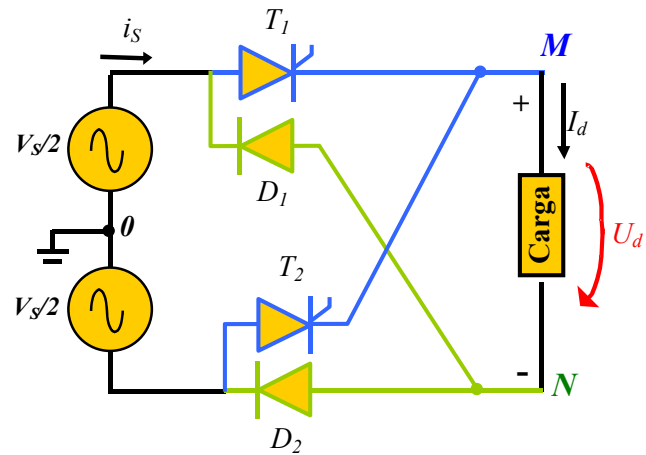
Tensión media rectificada en un rectificador trifásico en función del ángulo de disparo  $\alpha$  y de la duración de la conmutación no instantánea  $\mu$

## RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS Puente Monofásico



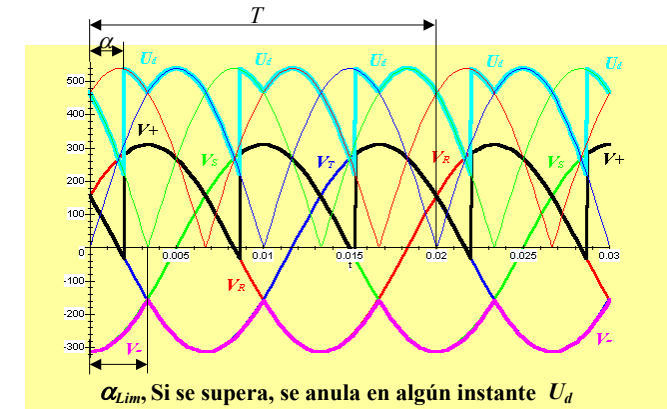
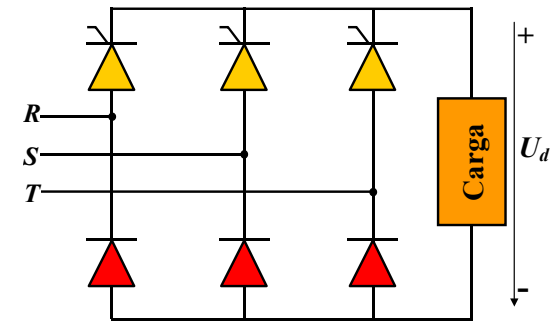
Puente Monofásico Semi-controlado

## RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS Puente Monofásico

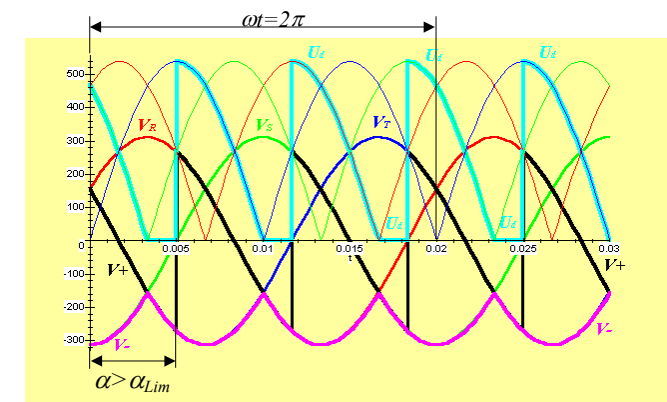


Puente Monofásico Semi-controlado

## RECTIFICADORES SEMICONTROLADOS Puente Polifásico



$\alpha_{Lim}$ , Si se supera, se anula en algún instante  $U_d$



Tensiones en un Puente Rectificador Trifásico semicontrolado con Ángulo de Disparo  $\alpha$