


# Estrategias de control de rectificadores activos trifásicos

SEMINARIOS DE ELECTRÓNICA DE POTENCIA - DIEECS  
D. Joaquín González Norniella



19/02/2010



Trabajo de investigación: “Estrategias de control de rectificadores activos trifásicos”

Autor: D. Joaquín González Norniella

Director: D. José Manuel Cano Rodríguez

Fecha de lectura: 11-Septiembre-2009

# Contenido



Introducción

Rectificadores activos trifásicos controlados en tensión (VSR's)

Teoría p-q

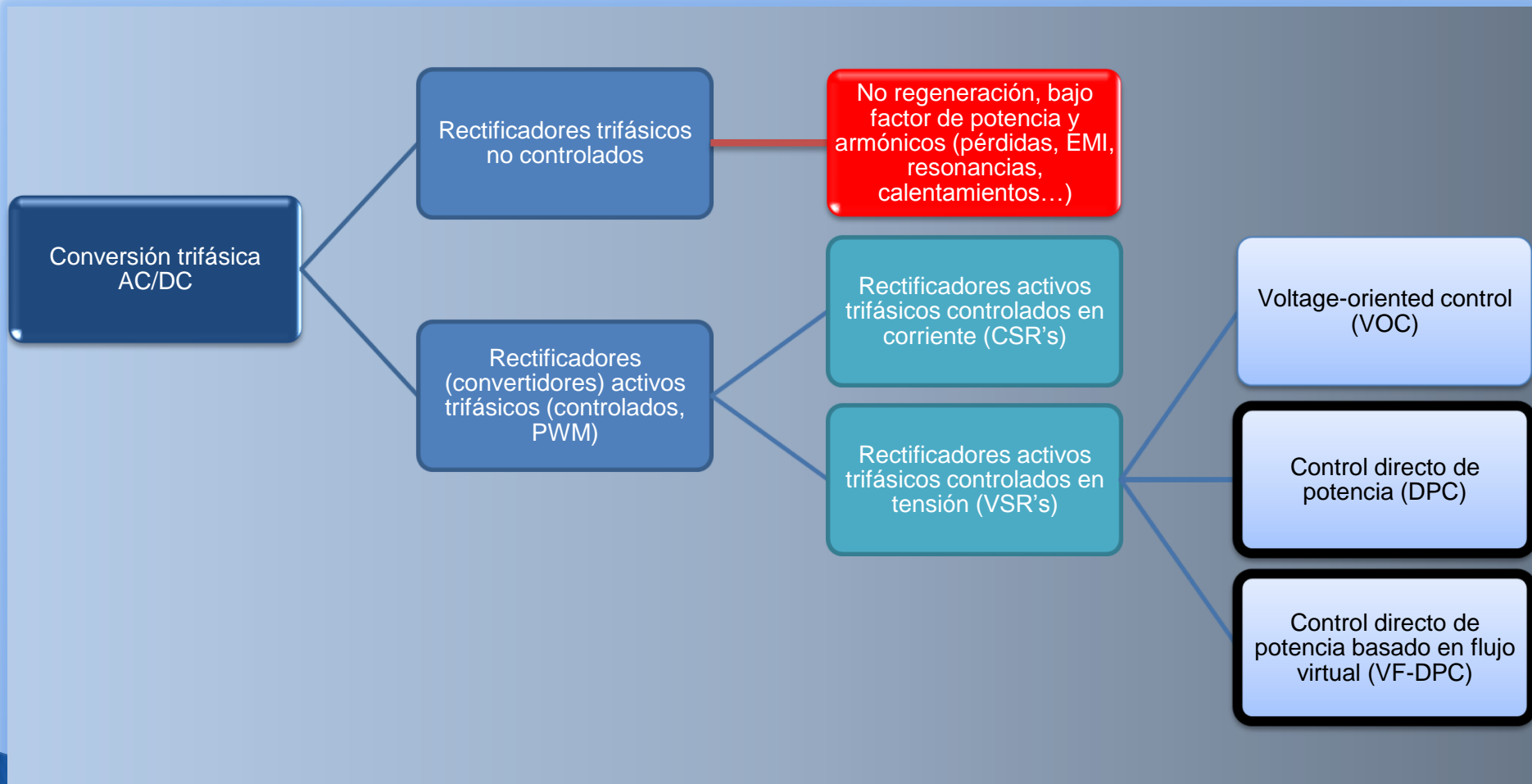
Control Directo de Potencia (DPC)

DPC basado en Flujo Virtual (VF-DPC)

DPC vs. VF-DPC

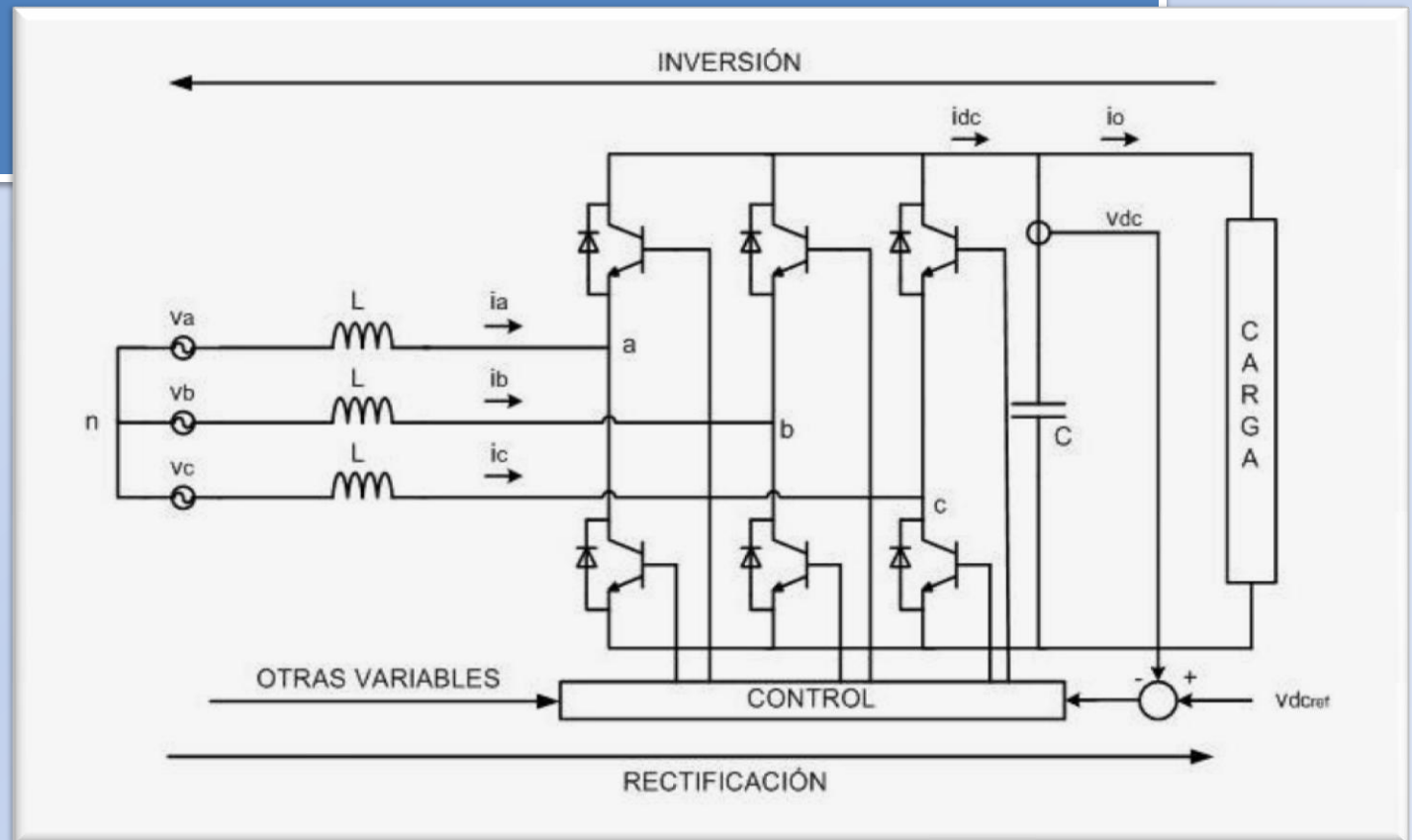
Hitos y líneas de investigación

# Introducción



# Rectificadores activos trifásicos controlados en tensión (VSR's)

## Topología y funcionamiento



# Rectificadores activos trifásicos controlados en tensión (VSR's)

## Vectores de estado de conmutación

Vector	Estado de conmutación
V0	(000)
V1	(100)
V2	(110)
V3	(010)
V4	(011)
V5	(001)
V6	(101)
V7	(111)

# Teoría p-q

AKAGI

TRANSFORMACIÓN  
DE CLARKE

$$\begin{pmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix}$$

$v_a, v_b, v_c$  en  
ejes a, b, c



$\underline{v}$ , vector  
espacial  
giratorio

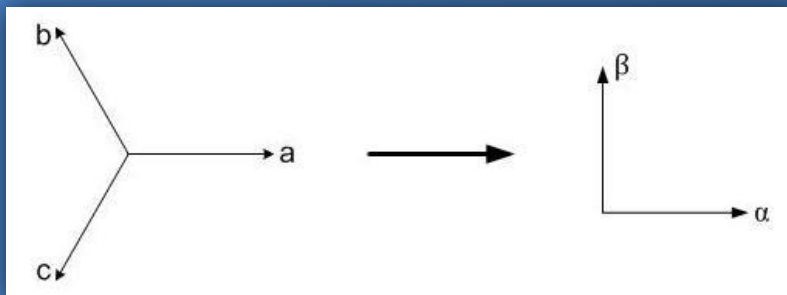


$v_\alpha, v_\beta$  en ejes  
 $\alpha, \beta$

$$\underline{v} = v_\alpha + jv_\beta = \sqrt{3}V_{ef}e^{j(\omega t + \varphi_v)}$$



Potencias  
instantáneas



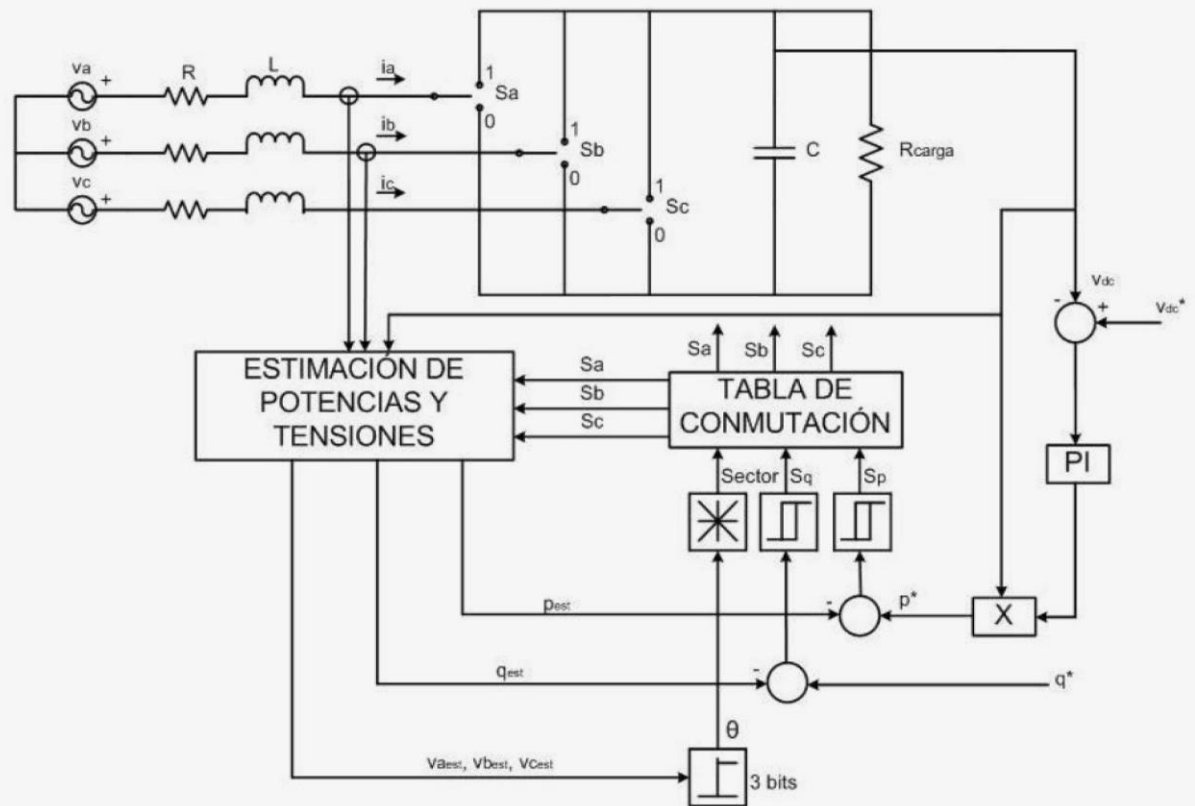
$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$$



# Control Directo de Potencia (DPC)

## Diagrama de bloques básico y funcionamiento





# Control Directo de Potencia (DPC)

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} v_{\alpha est} \\ v_{\beta est} \end{pmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{pmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_{est} \\ q_{est} \end{pmatrix}$$

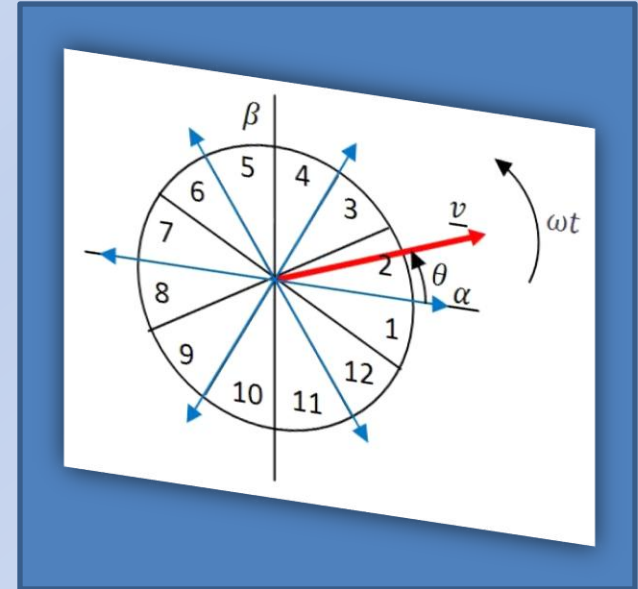
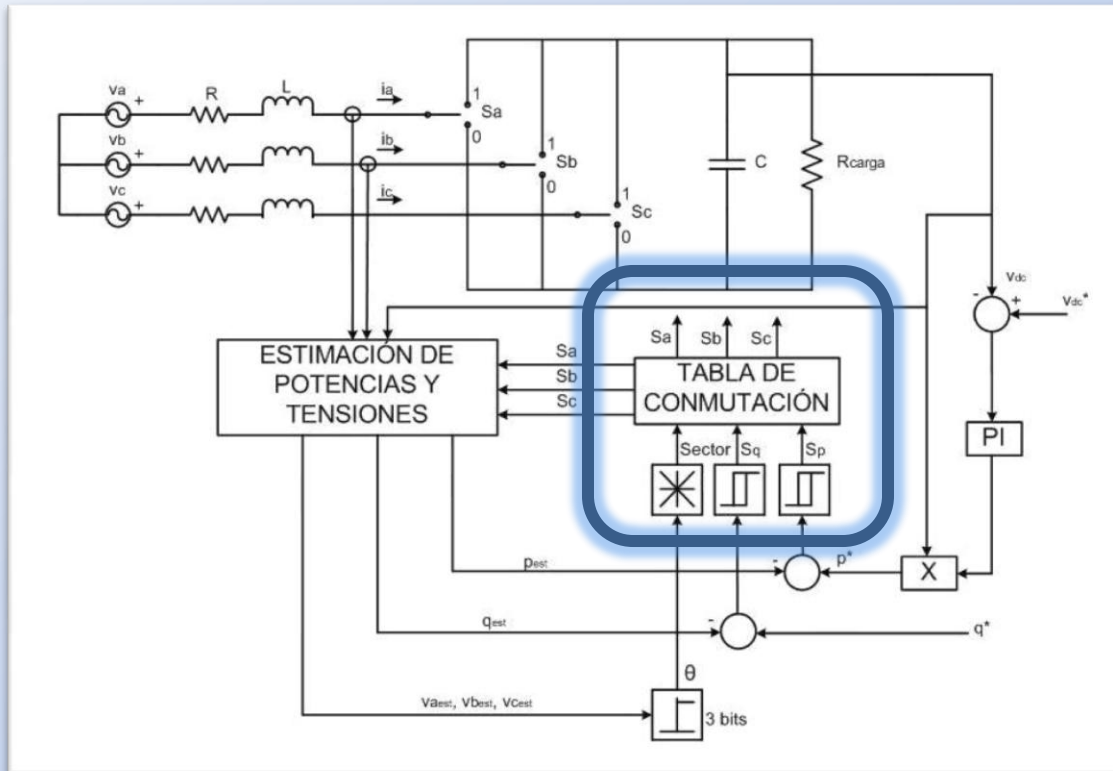
$$\begin{pmatrix} v_{a est} \\ v_{b est} \\ v_{c est} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{\alpha est} \\ v_{\beta est} \end{pmatrix}$$

$$p_{est} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = L \left( \frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + v_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c)$$

$$\begin{aligned} q_{est} &= \frac{1}{\sqrt{3}} ((v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b + (v_a - v_b) i_c) \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} \left\{ 3L \left( \frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - v_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)] \right\} \end{aligned}$$

La estimación de tensiones y potencias instantáneas es función de las derivadas de las corrientes y de los estados de conmutación

# Control Directo de Potencia (DPC)



Los estados de conmutación son función de la posición del vector espacial de tensiones y de las salidas de los comparadores de histéresis

$$S_q = 1 \text{ si } q - q^* < -H_q$$

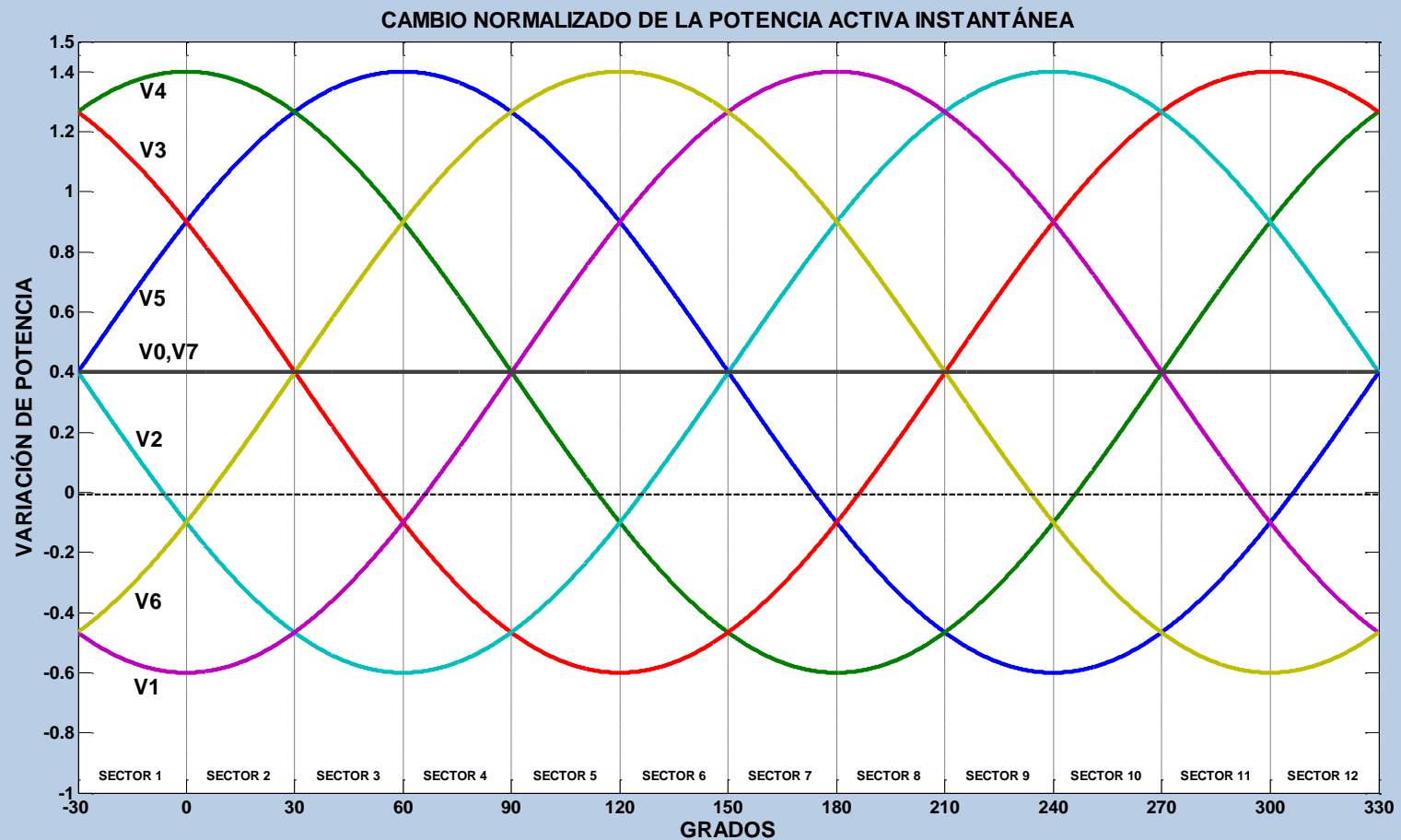
$$S_q = 0 \text{ si } q - q^* > +H_q$$

$$S_p = 1 \text{ si } p - p^* < -H_p$$

$$S_p = 0 \text{ si } p - p^* > +H_p$$

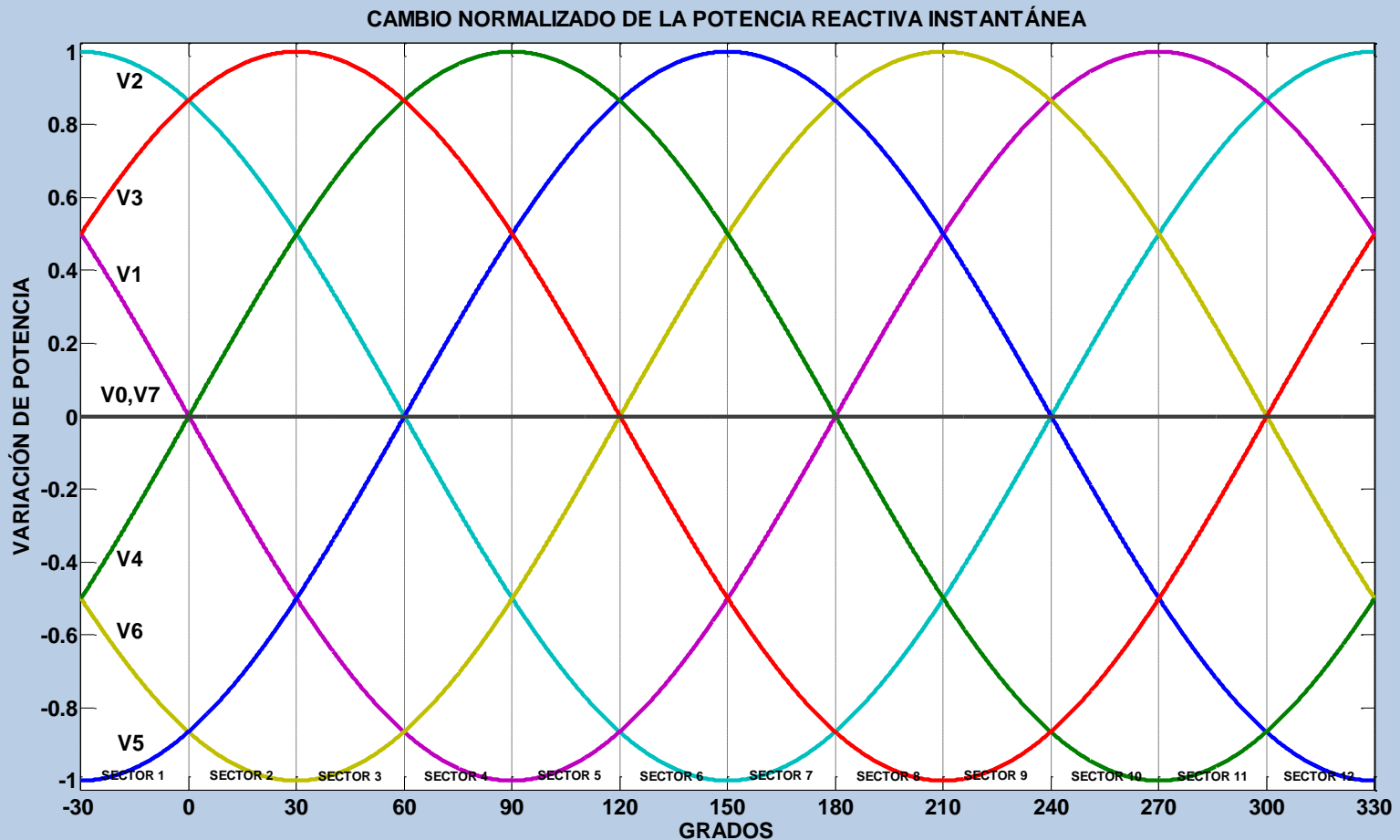
# Control Directo de Potencia (DPC)

## CONSTRUCCIÓN DE LA TABLA DE CONMUTACIÓN



# Control Directo de Potencia (DPC)

## CONSTRUCCIÓN DE LA TABLA DE CONMUTACIÓN



# Control Directo de Potencia (DPC)

## CONSTRUCCIÓN DE LA TABLA DE CONMUTACIÓN

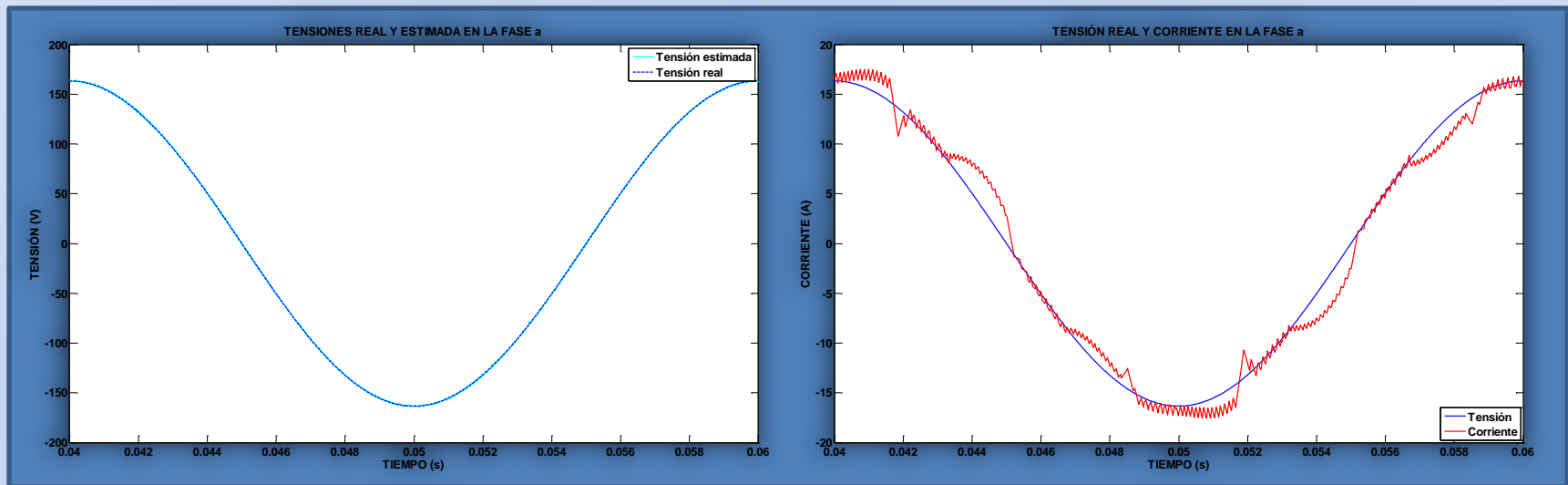
$S_p$	$S_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
1	0	5	5	6	6	1	1	2	2	3	3	4	4
	1	3	4	4	5	5	6	6	1	1	2	2	3
0	0	6	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6
	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	1

MODELO  
IMPLEMENTADO

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diseño incorrecto de la tabla de conmutación

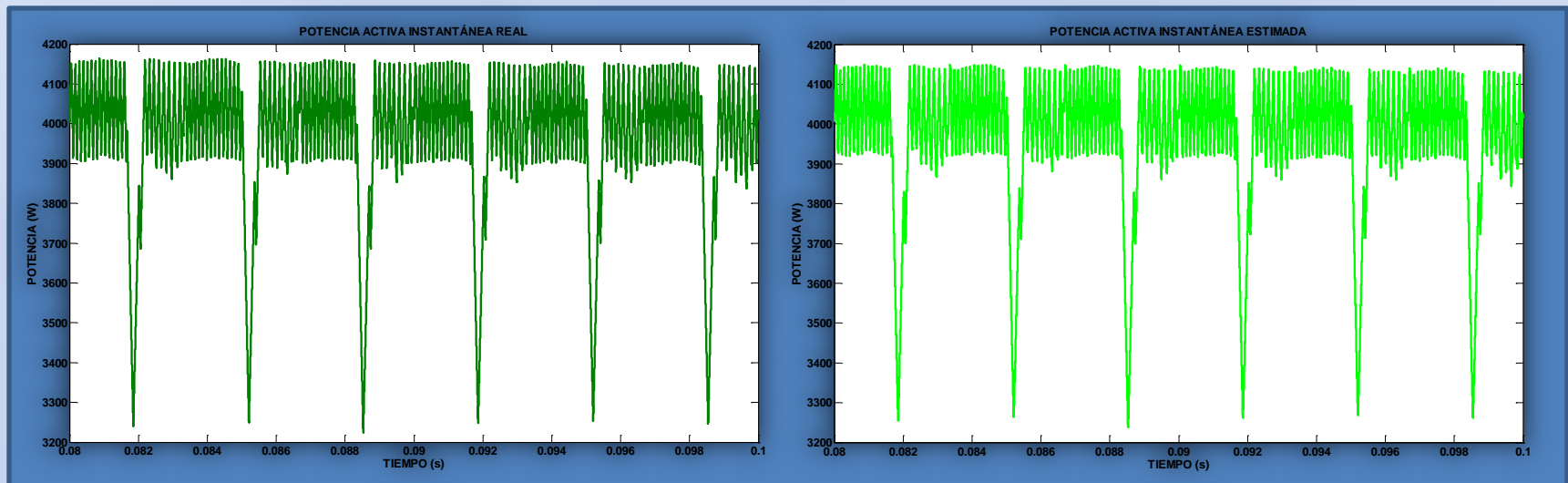


Tensiones y corrientes

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diseño incorrecto de la tabla de conmutación



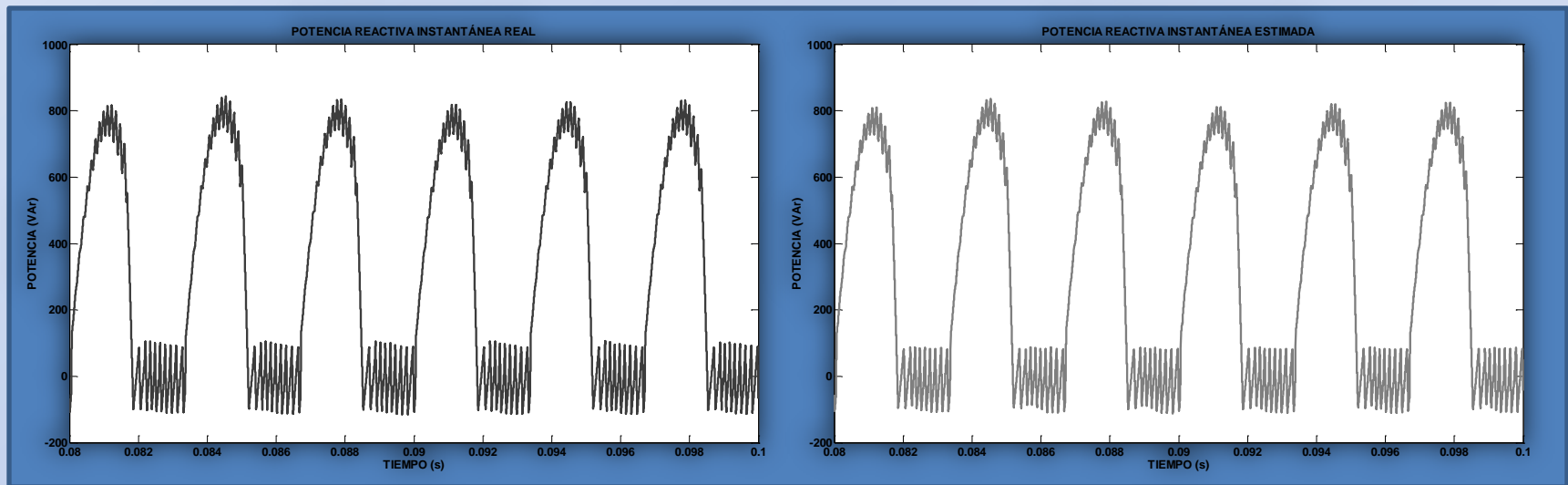
Potencia activa instantánea



# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diseño incorrecto de la tabla de conmutación

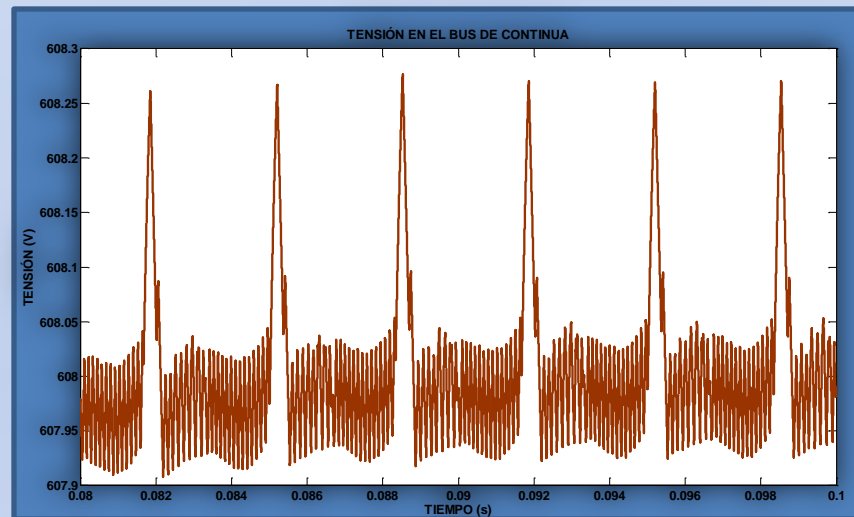


Potencia reactiva instantánea

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diseño incorrecto de la tabla de conmutación



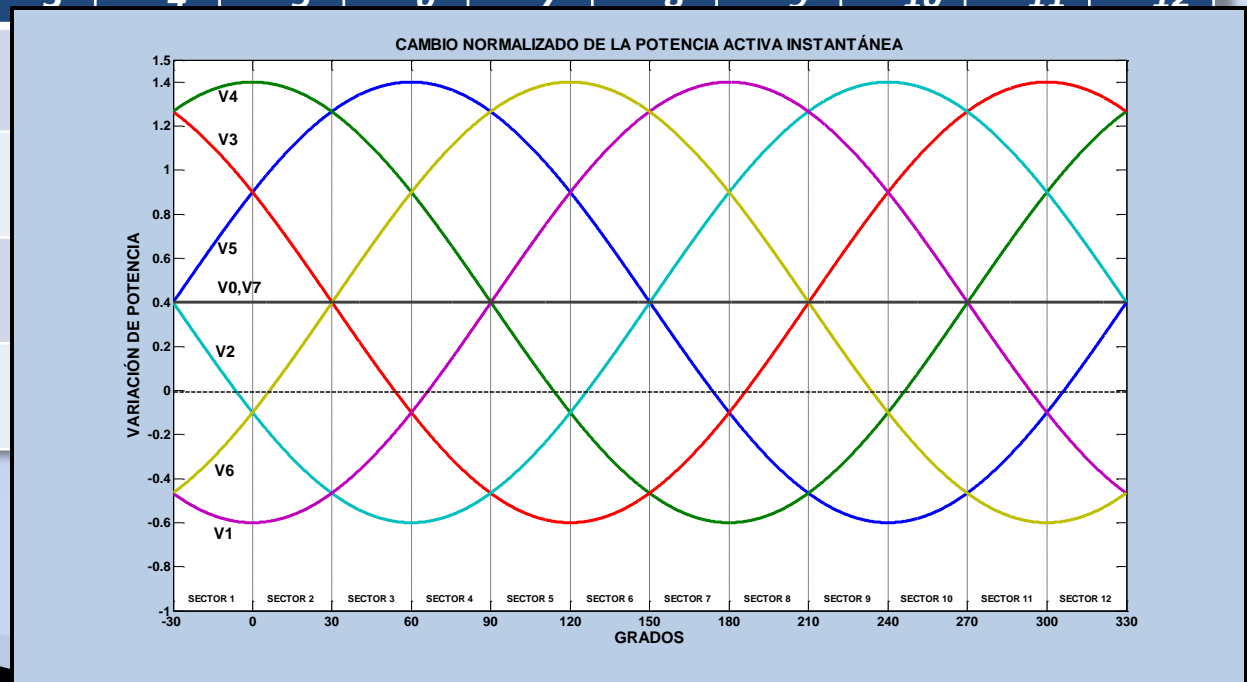
Tensión en el bus

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

Diseño incorrecto de la tabla de conmutación

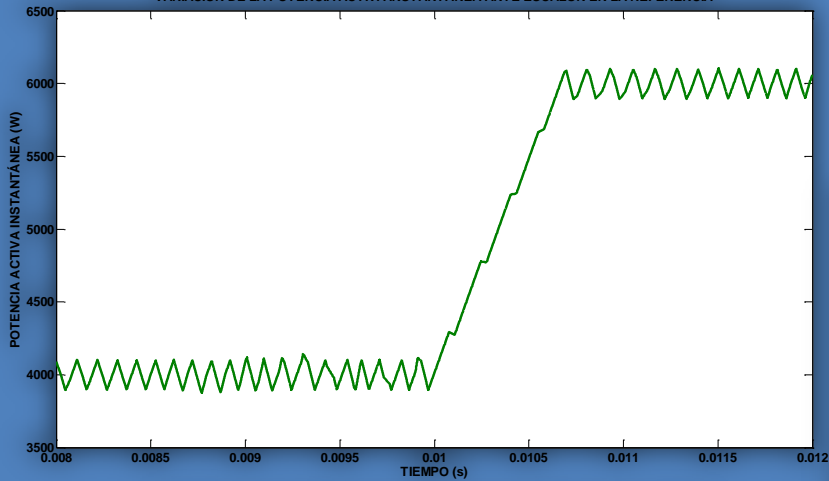
$S_p$	$S_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
1	0	6	7										
	1	7	7										
0	0	6	1										
	1	1	2										



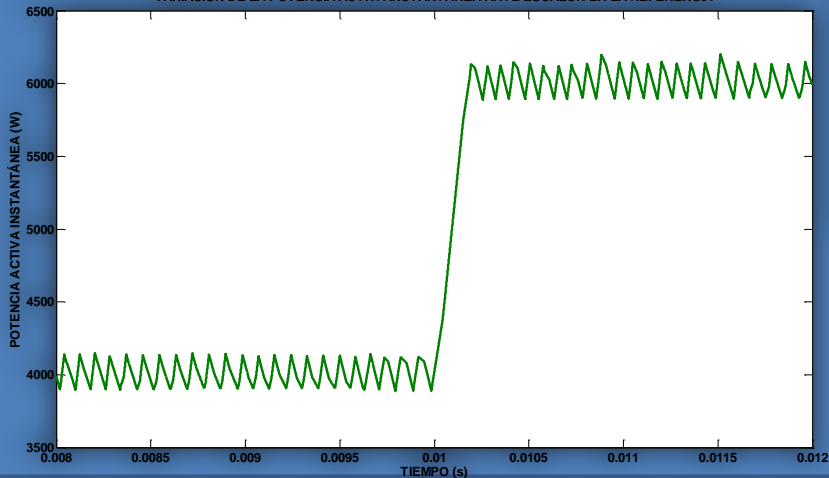
# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

VARIACIÓN DE LA POTENCIA ACTIVA INSTANTÁNEA ANTE ESCALÓN EN LA REFERENCIA

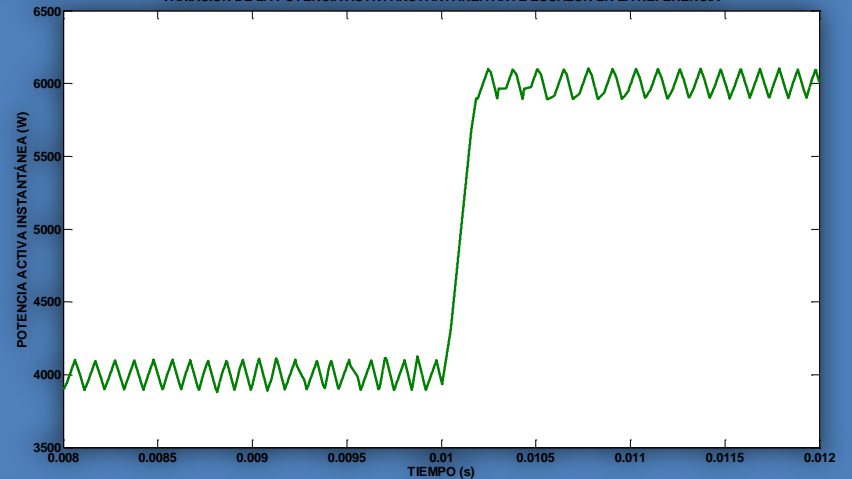


VARIACIÓN DE LA POTENCIA ACTIVA INSTANTÁNEA ANTE ESCALÓN EN LA REFERENCIA



OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

VARIACIÓN DE LA POTENCIA ACTIVA INSTANTÁNEA ANTE ESCALÓN EN LA REFERENCIA

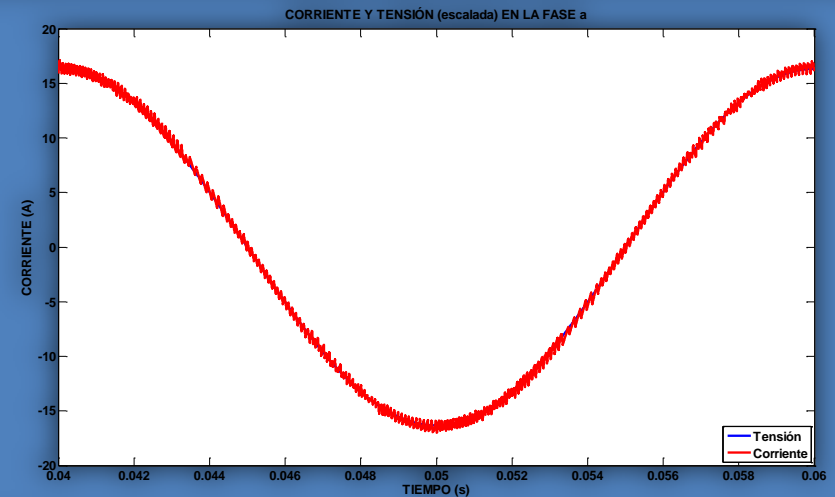
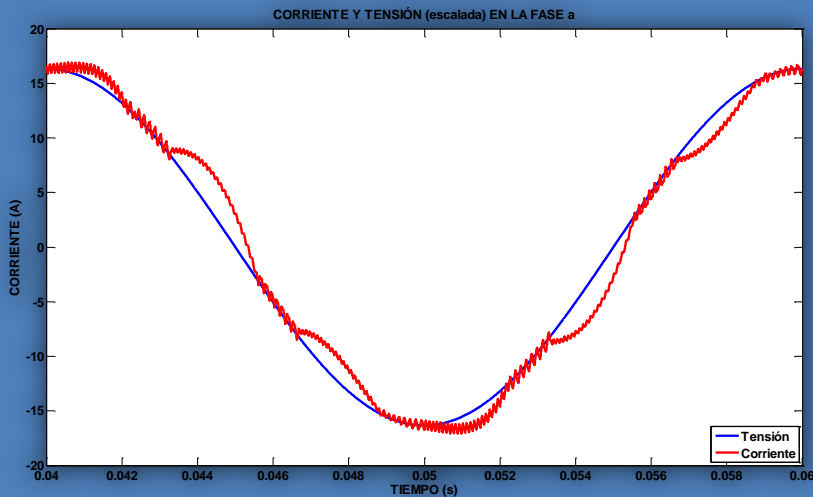


COMPROMISO  
DINÁMICA-ESFUERZOS

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

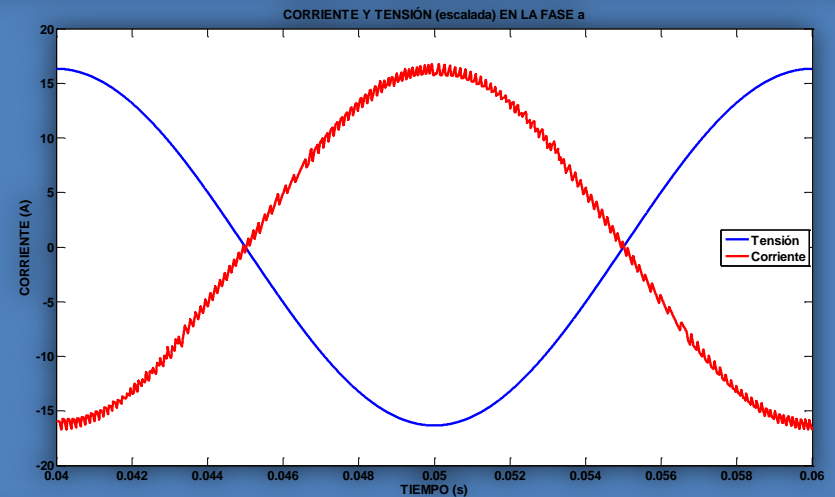
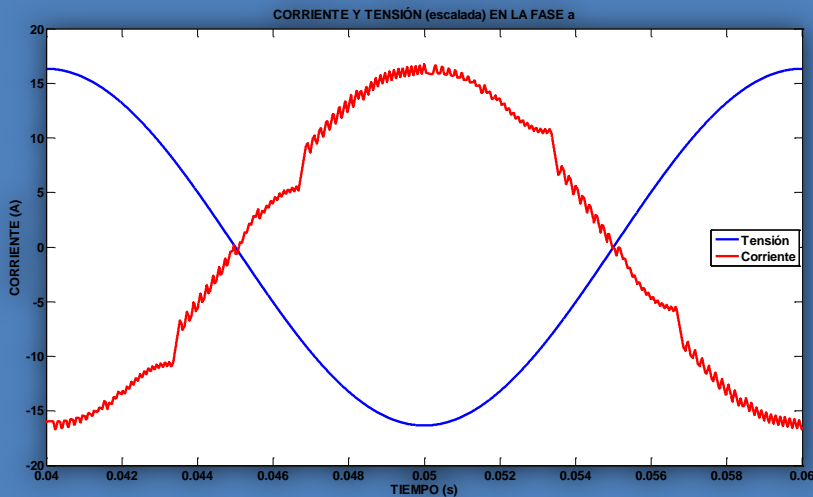


FUNCIONAMIENTO  
EN SECUENCIA INVERSA

# Control Directo de Potencia (DPC)

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### OPTIMIZACIÓN DEL MODELO

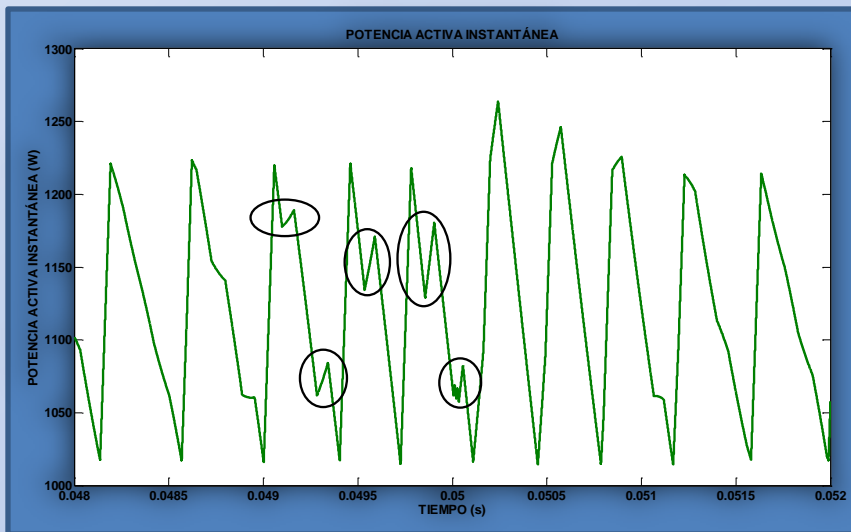


FUNCIONAMIENTO  
EN MODO INVERSOR

# Control Directo de Potencia (DPC)

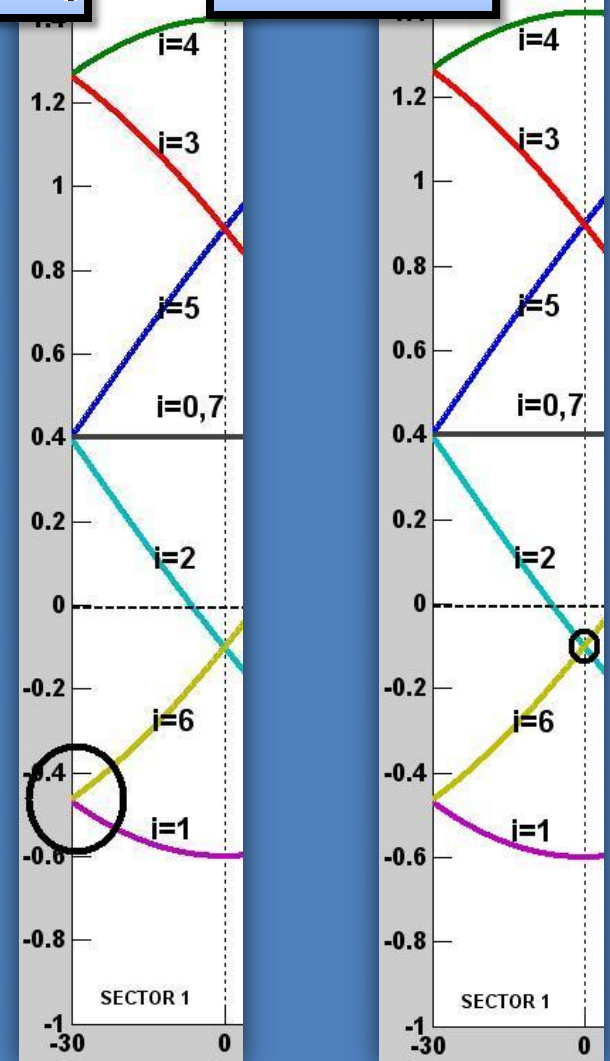
## RESULTADOS EXPERIMENTALES

### INFLUENCIA DE LA TENSIÓN DEL BUS EN LA CONTROLABILIDAD



$$v_{dc} \geq \sqrt{6}v_{ef}$$

$$v_{dc} \geq 3\sqrt{2}v_{ef}$$

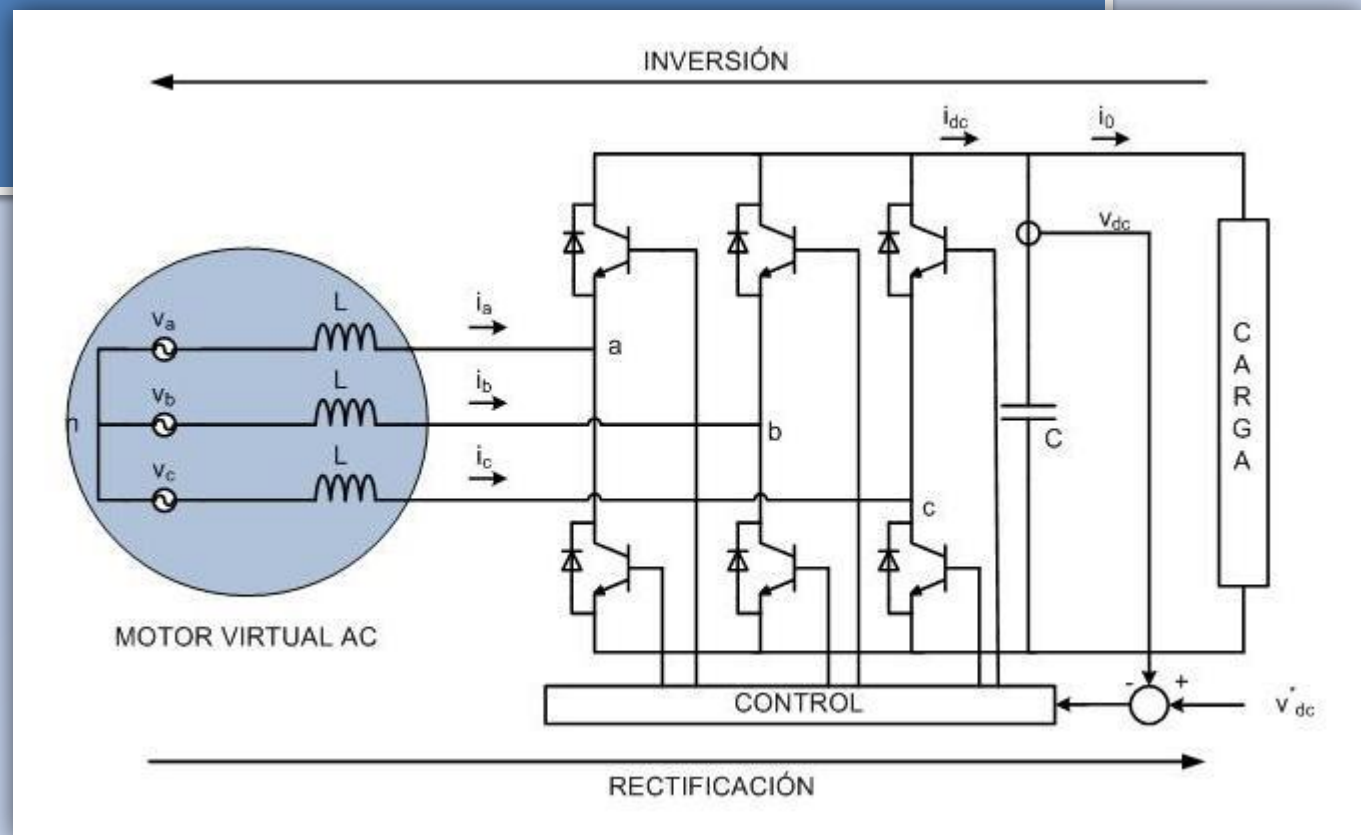




# DPC basado en Flujo Virtual (VF-DPC)

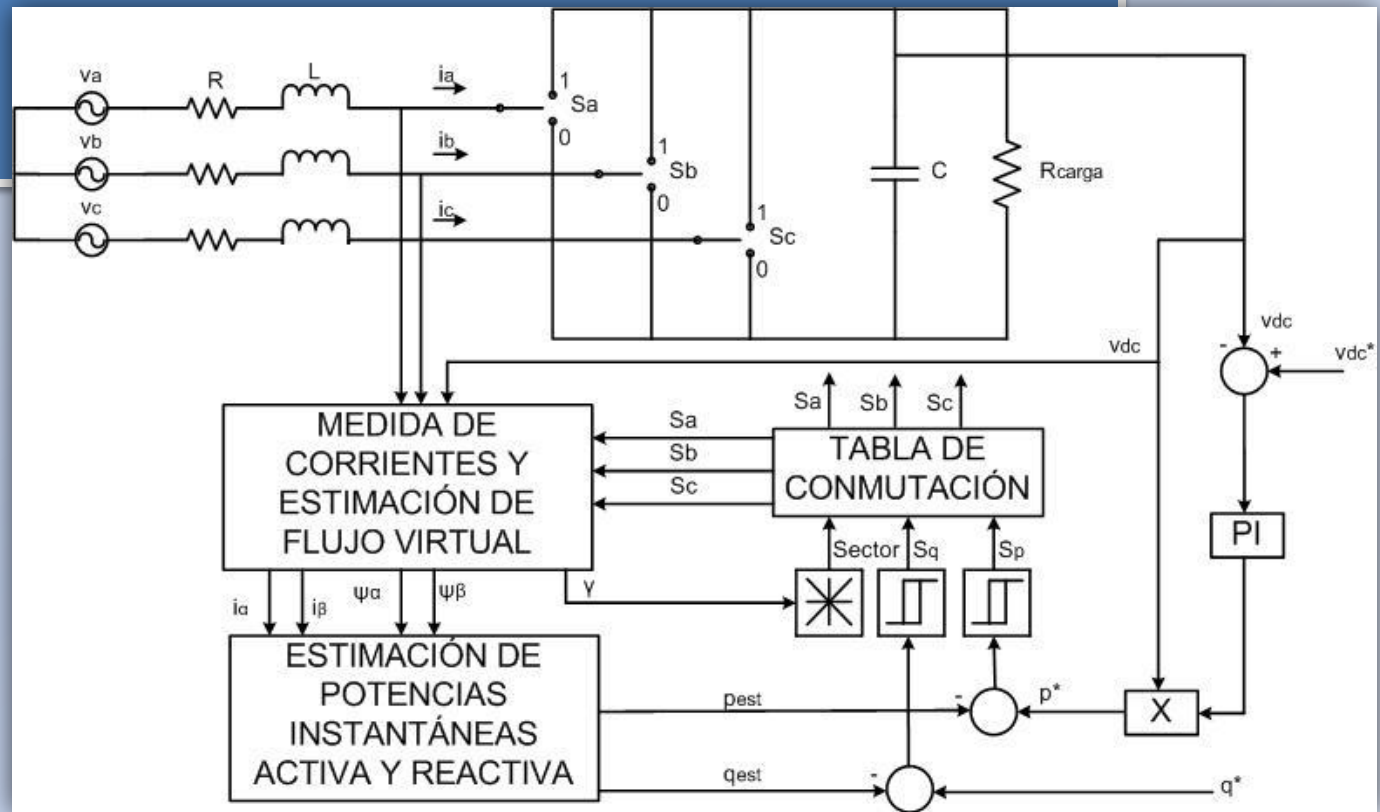
## Fundamento

$$\underline{\psi} = \int \underline{v} dt$$



# DPC basado en Flujo Virtual (VF-DPC)

## Diagrama de bloques básico



# DPC basado en Flujo Virtual (VF-DPC)

$$\underline{\psi} = \int \underline{v} dt = \begin{pmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int v_\alpha dt \\ \int v_\beta dt \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \int (v_{conv\alpha} + L \frac{di_\alpha}{dt}) dt \\ \int (v_{conv\beta} + L \frac{di_\beta}{dt}) dt \end{pmatrix}$$

$$\underline{v}_{conv} = \begin{pmatrix} v_{conv\alpha} \\ v_{conv\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} v_{dc} (S_b - S_c) \end{pmatrix}$$

$$\underline{i} = \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \frac{3}{2} & 0 \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \end{pmatrix}$$

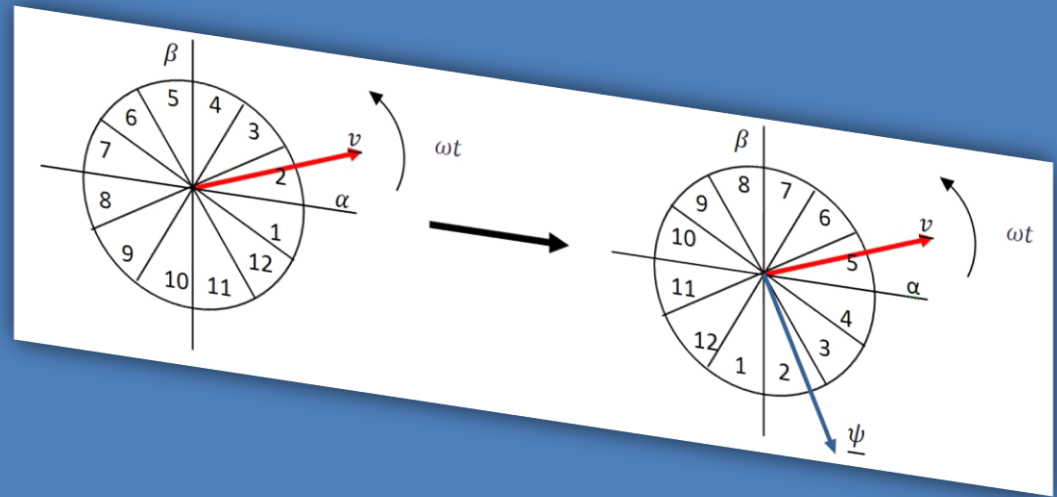
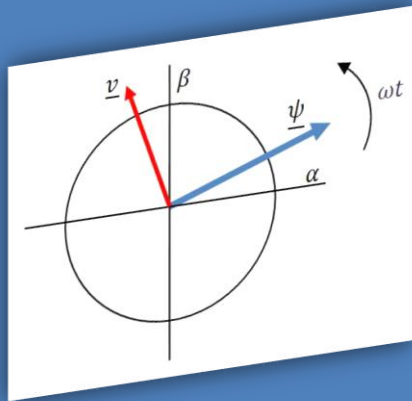
$$p = \left. \frac{d\psi}{dt} \right|_\alpha i_\alpha + \left. \frac{d\psi}{dt} \right|_\beta i_\beta + \omega(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \approx \omega(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha)$$

$$q = -\left. \frac{d\psi}{dt} \right|_\alpha i_\beta + \left. \frac{d\psi}{dt} \right|_\beta i_\alpha + \omega(\psi_\alpha i_\alpha + \psi_\beta i_\beta) \approx \omega(\psi_\alpha i_\alpha + \psi_\beta i_\beta)$$

Los integradores representan un filtro pasabajos natural y las derivadas de las corrientes no están presentes

# DPC basado en Flujo Virtual (VF-DPC)

La relación de perpendicularidad entre los vectores espaciales de flujo y tensión permite utilizar las mismas tablas que en DPC



**MODELO  
IMPLEMENTADO**

# DPC vs. VF-DPC

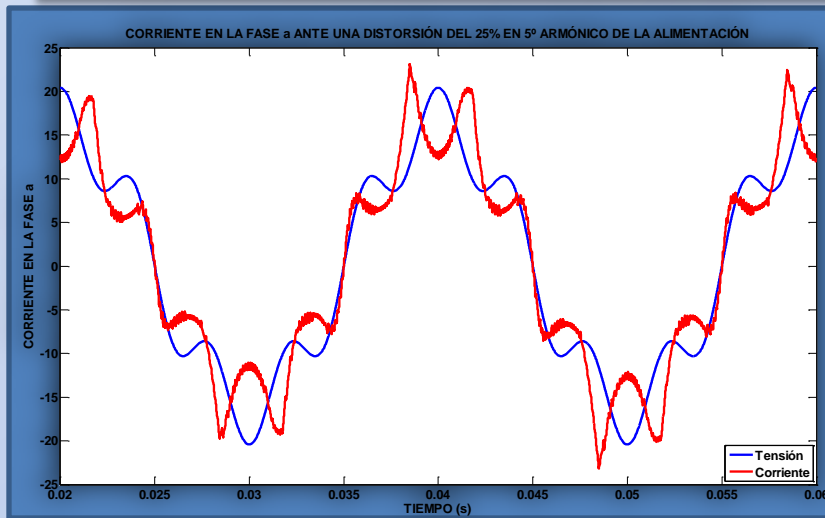
## ALIMENTACIÓN DISTORSIONADA

$$v_a = V_{m\acute{a}x} \cos(\omega t) + k_{dis} V_{m\acute{a}x} \cos(5\omega t)$$

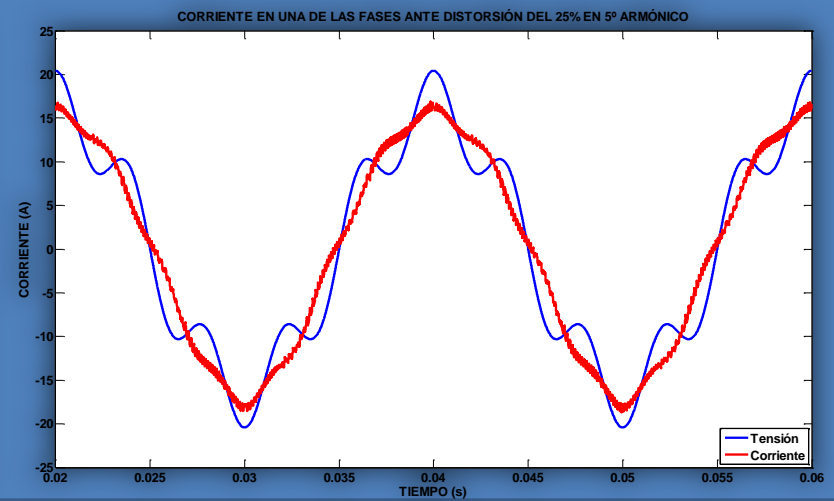
$$v_b = V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + k_{dis} V_{m\acute{a}x} \cos\left(5\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$v_c = V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) + k_{dis} V_{m\acute{a}x} \cos\left(5\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$k_{dis} = 25\%$$



DPC

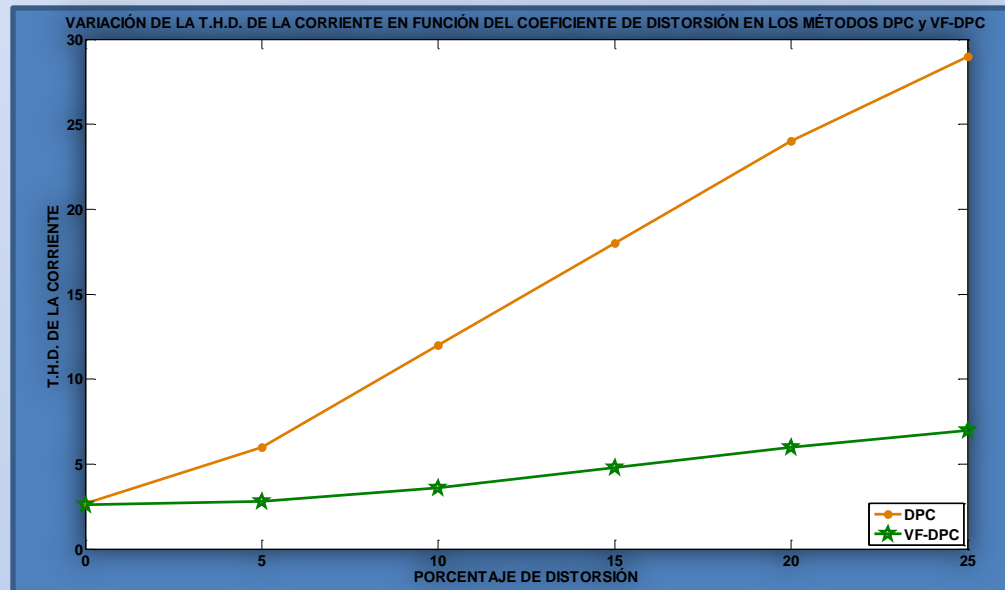


VF-DPC

FASE a

# DPC vs. VF-DPC

## ALIMENTACIÓN DISTORSIONADA



MAYOR ROBUSTEZ  
DEL VF-DPC  
FRENTE AL DPC

# DPC vs. VF-DPC

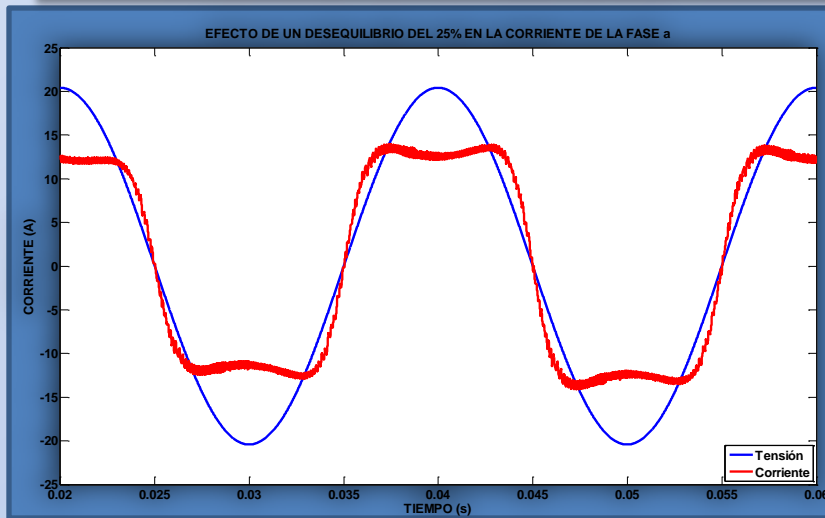
## ALIMENTACIÓN DESEQUILIBRADA

$$v_a = V_{m\acute{a}x} \cos(\omega t) + k_{des} V_{m\acute{a}x} \cos(\omega t)$$

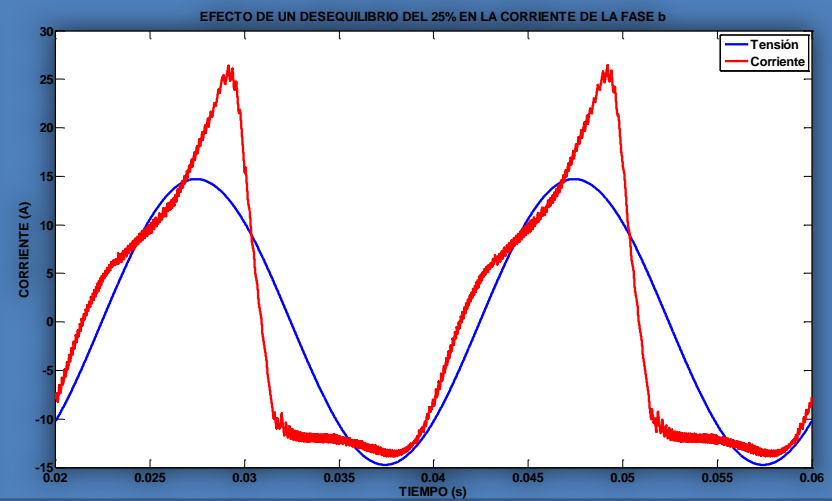
$$v_b = V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + k_{des} V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$v_c = V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) + k_{des} V_{m\acute{a}x} \cos\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$$

$$k_{des} = 25\%$$



DPC



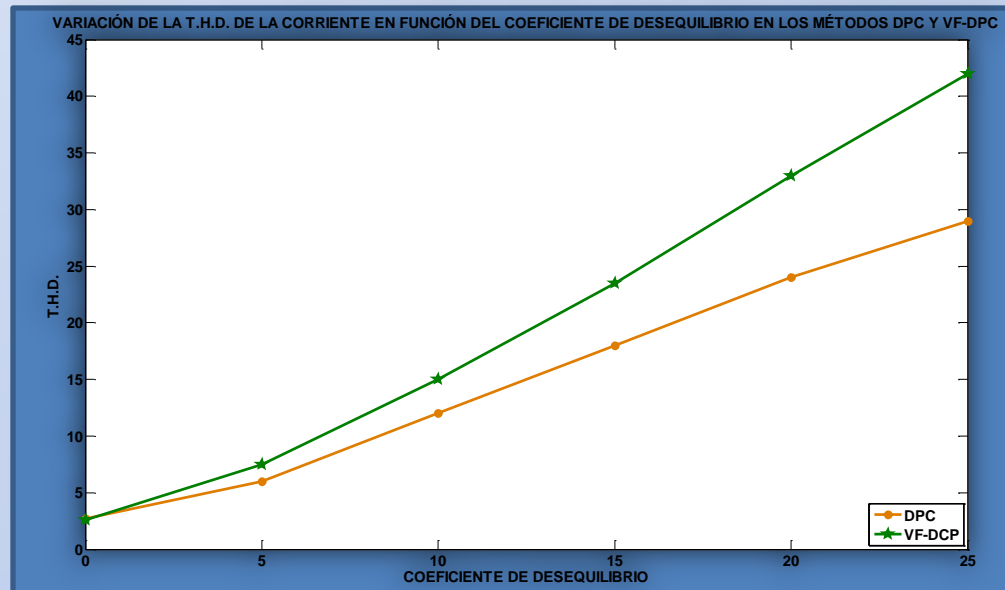
VF-DPC

FASE b



# DPC vs. VF-DPC

## ALIMENTACIÓN DESEQUILIBRADA

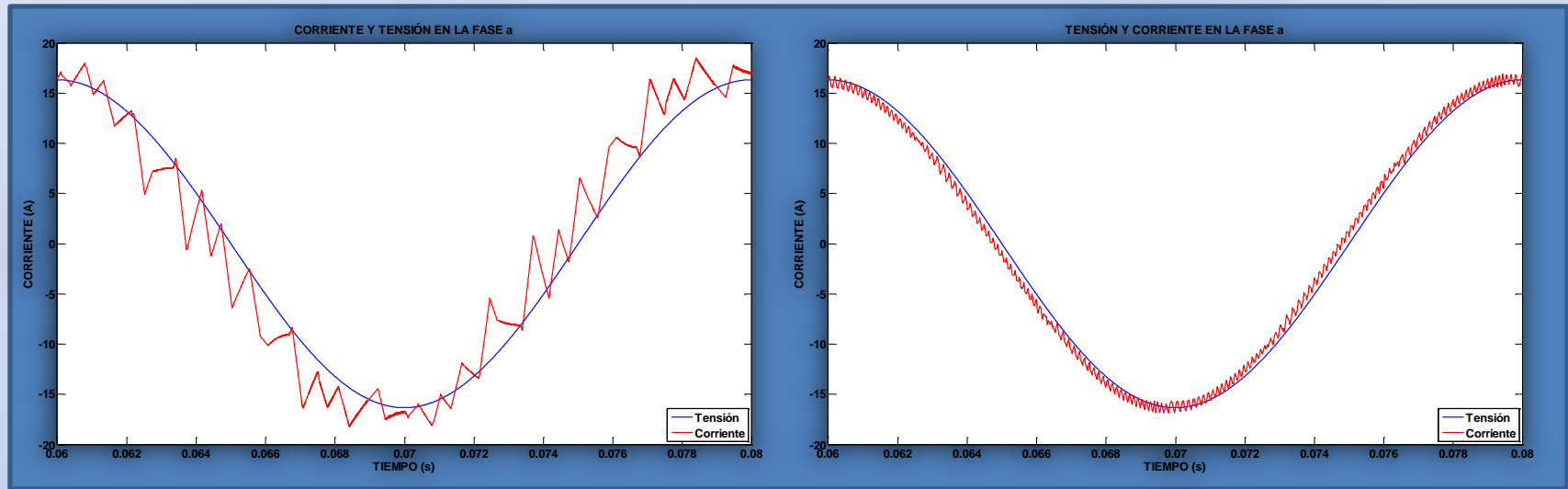


MEJOR  
COMPORTAMIENTO DEL DPC

# DPC vs. VF-DPC

SENSIBILIDAD A IMPRECISIONES EN EL VALOR DE LA BOBINA

$$L' = L + 20\%L$$

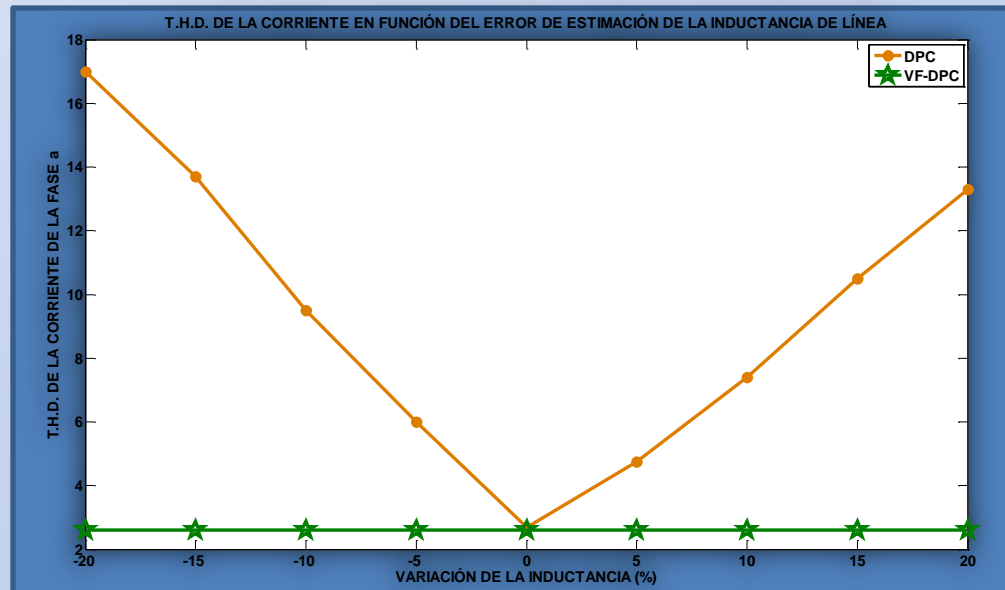


DPC

VF-DPC

# DPC vs. VF-DPC

SENSIBILIDAD A IMPRECISIONES EN EL VALOR DE LA BOBINA



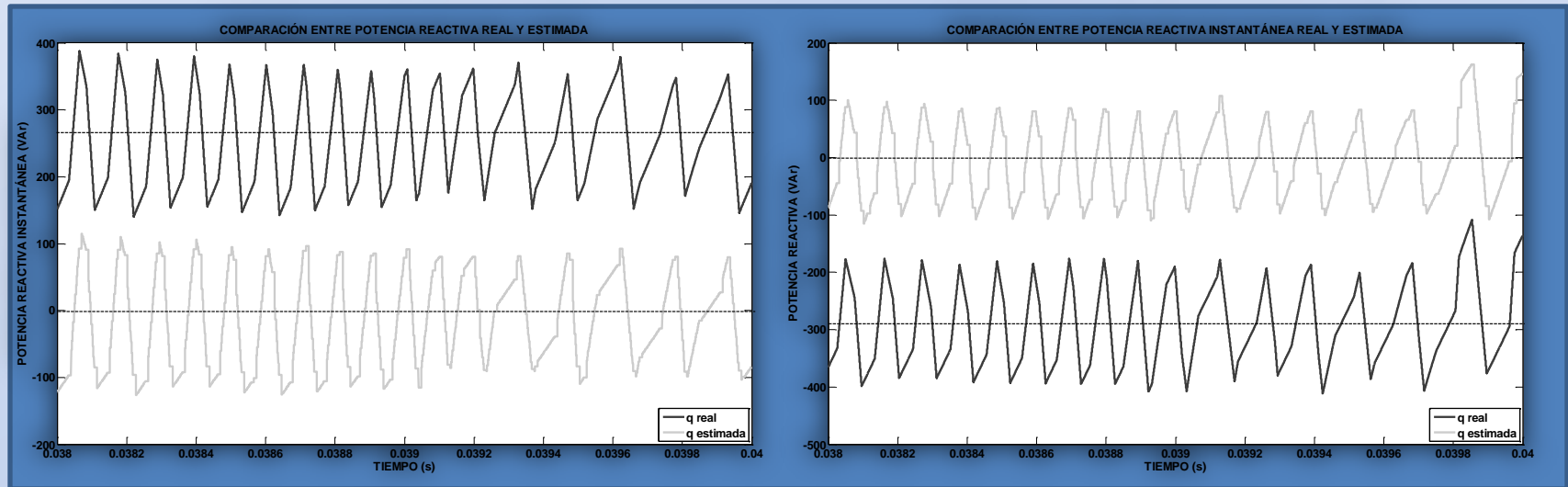
MEJOR  
COMPORTAMIENTO DEL VF-DPC

# DPC vs. VF-DPC

SENSIBILIDAD A IMPRECISIONES EN EL VALOR DE LA BOBINA

$$L' = L - 20\%L$$

$$L' = L + 20\%L$$

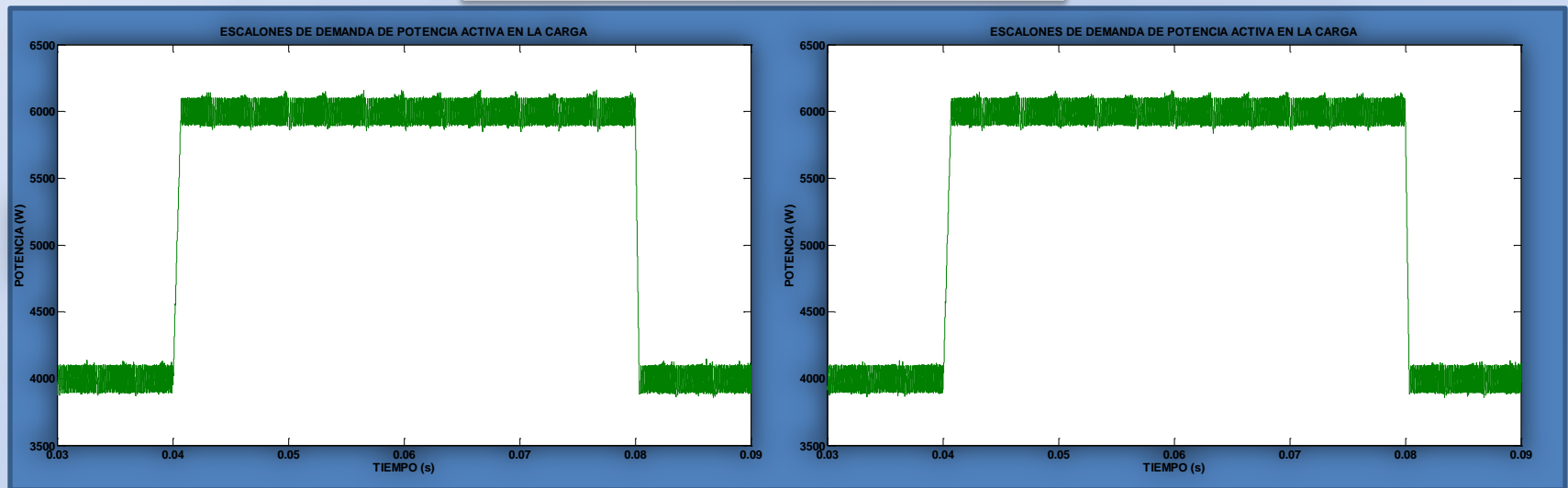


LAS IMPRECISIONES EN L  
SE REFLEJAN EN q

# DPC vs. VF-DPC

COMPORTAMIENTO DINÁMICO

*Escalones de demanda de  $p$*



DPC

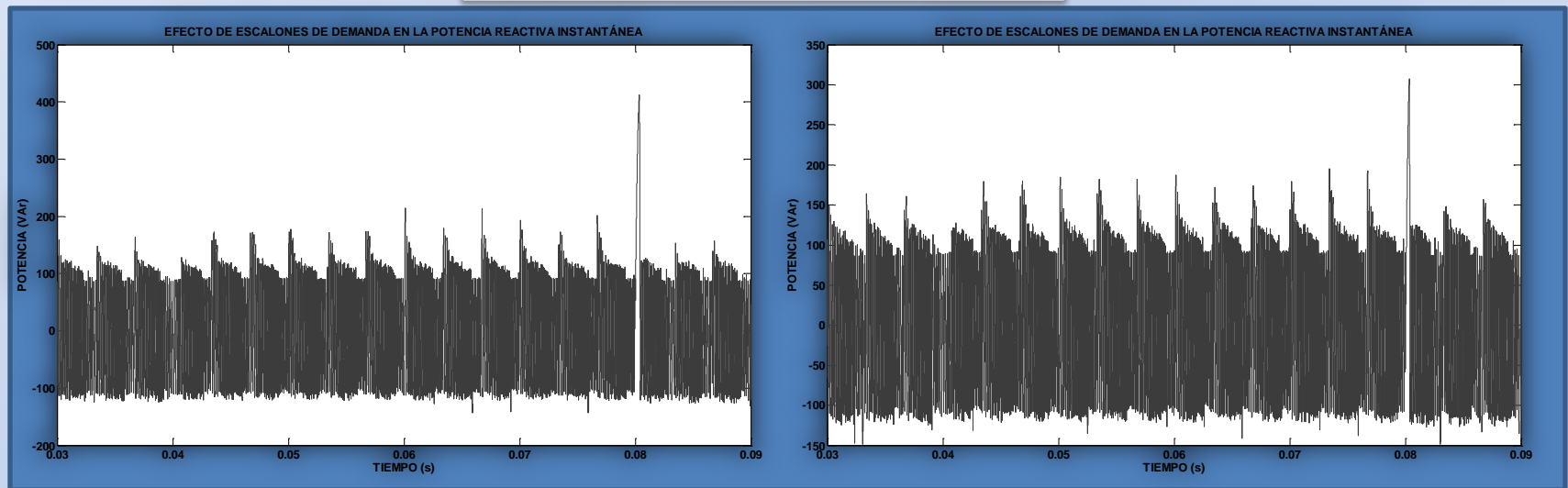
VF-DPC

$p$

# DPC vs. VF-DPC

## COMPORTAMIENTO DINÁMICO

*Escalones de demanda de  $p$*



DPC

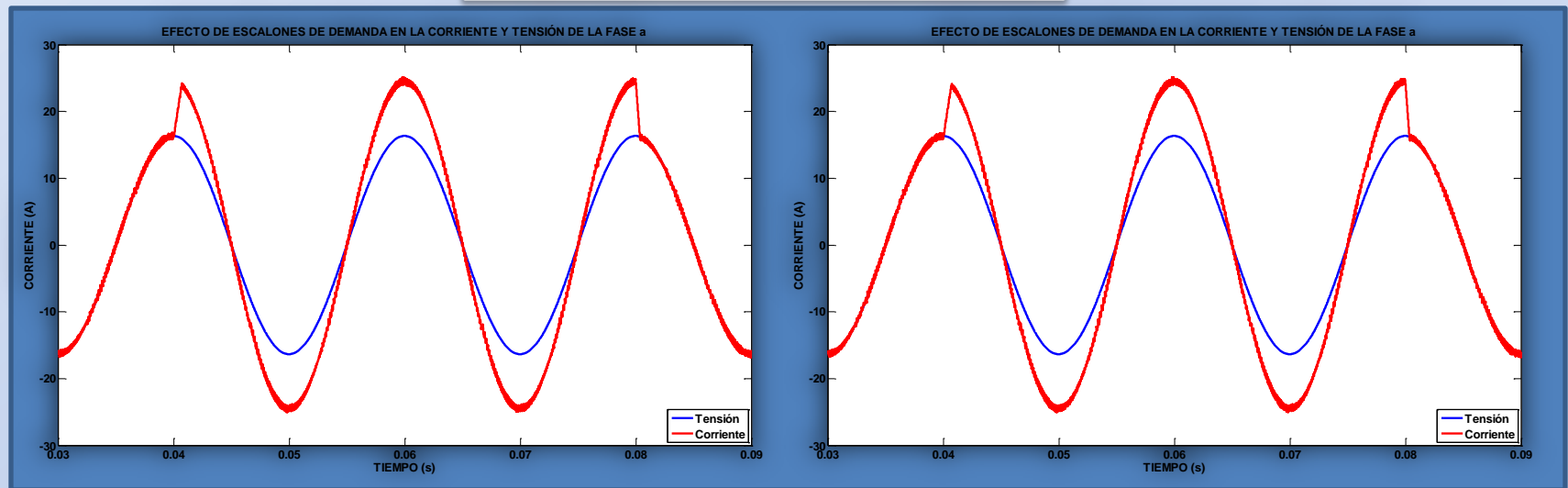
VF-DPC

$q$

# DPC vs. VF-DPC

## COMPORTAMIENTO DINÁMICO

### *Escalones de demanda de $p$*



DPC

VF-DPC

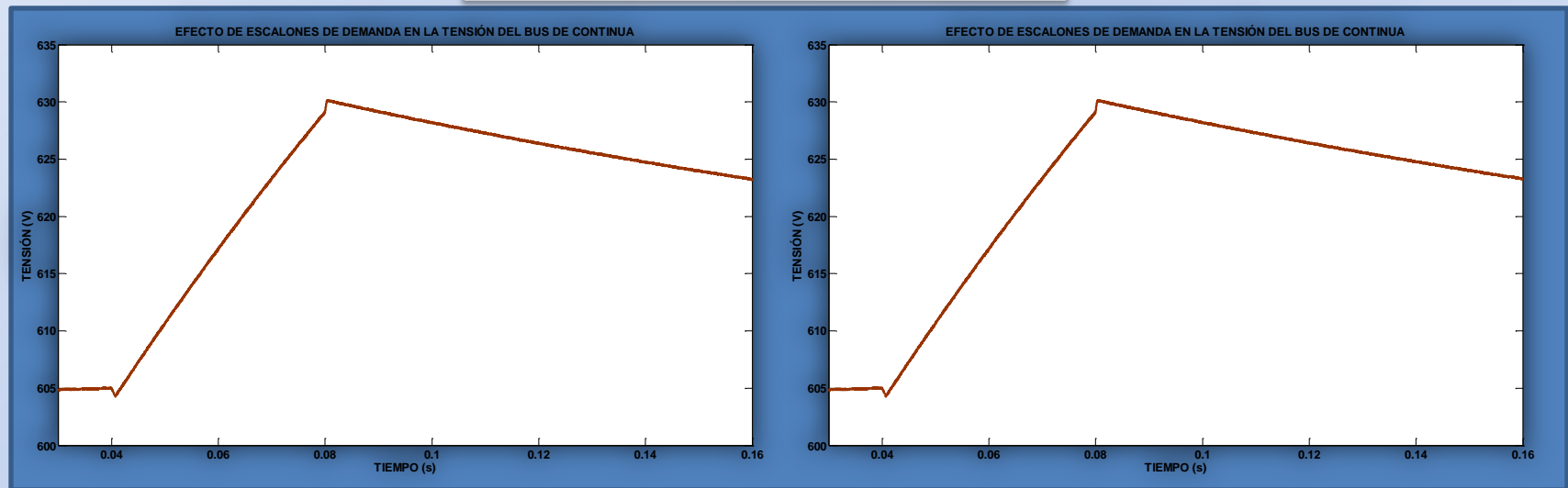
v-i



# DPC vs. VF-DPC

## COMPORTAMIENTO DINÁMICO

*Escalones de demanda de  $p$*



DPC

VF-DPC

EL COMPORTAMIENTO  
DINÁMICO ES SIMILAR

$V_{dc}$

# DPC vs. VF-DPC

## Ventajas de VF-DPC frente a DPC

- Frecuencia de muestreo necesaria menor
- Algoritmos más sencillos
- Buen comportamiento ante sistemas distorsionados
- Menor sensibilidad a errores en parámetros
- Estimación de potencias menos sensible al ruido
- No es necesaria la derivación de las corrientes

## Desventajas de VF-DPC frente a VOC

- Frecuencia de conmutación variable
- Frecuencia de muestreo elevada
- Se requieren dispositivos de gran rapidez

# DPC vs. VF-DPC

## Ventajas de VF-DPC y DPC frente a VOC

- Algoritmos más sencillos
- Ausencia de bucles de corriente
- No se requieren transformaciones a coordenadas rotatorias ni bloques *PI*
- No se necesitan bloques separados de modulación de tensiones *PWM*
- Mejor comportamiento dinámico
- No se necesita la descomposición del control en elementos activos y reactivos

# Hitos y líneas de investigación

Estudio de teorías de potencia y su aplicación

Optimización del modelo *DPC*

- Modelo con buena dinámica y baja frecuencia de conmutación
- Modelo adecuado para las dos secuencias de fases
- Modelo con funcionamiento correcto en los dos modos de trabajo
- Influencia de la tensión del bus de continua
- **Método de sintonización automática de la bobina (algoritmo iterativo y método analítico)**
- Otros: comparadores de histéresis de tres niveles, *PLL*, frecuencia de conmutación constante...

# Hitos y líneas de investigación

## Optimización del modelo *VF-DPC*

- Aplicación de las mejoras del *DPC*
- Algoritmos de integración de tensiones

## Estudio detallado de otros métodos de control

- *VOC, VFOC, CSF-DPC, P-DPC, VF-P-DPC...*

## Construcción de un rectificador activo trifásico con apoyo en la plataforma *RT-LAB*

- **Primeros pasos con *RT-LAB***
- **Colaboración con el Grupo de Accionamientos Eléctricos y Electrónica de Potencia**
- **Colaboración con el Grupo de Sistemas Eléctricos de Potencia de la Universidad de Sevilla**

## Elaboración y publicación de artículos científicos

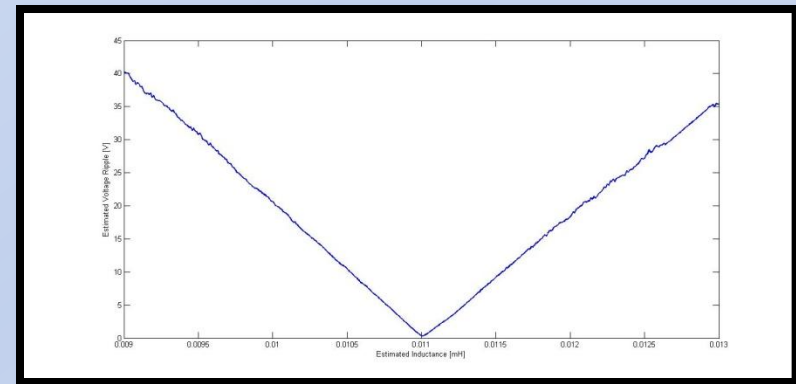
- **“Optimization of Direct Power Control of Three-Phase Active Rectifiers by using Multiple Switching Tables”, *ICREPEQ*, Marzo 2010**

# Hitos y líneas de investigación

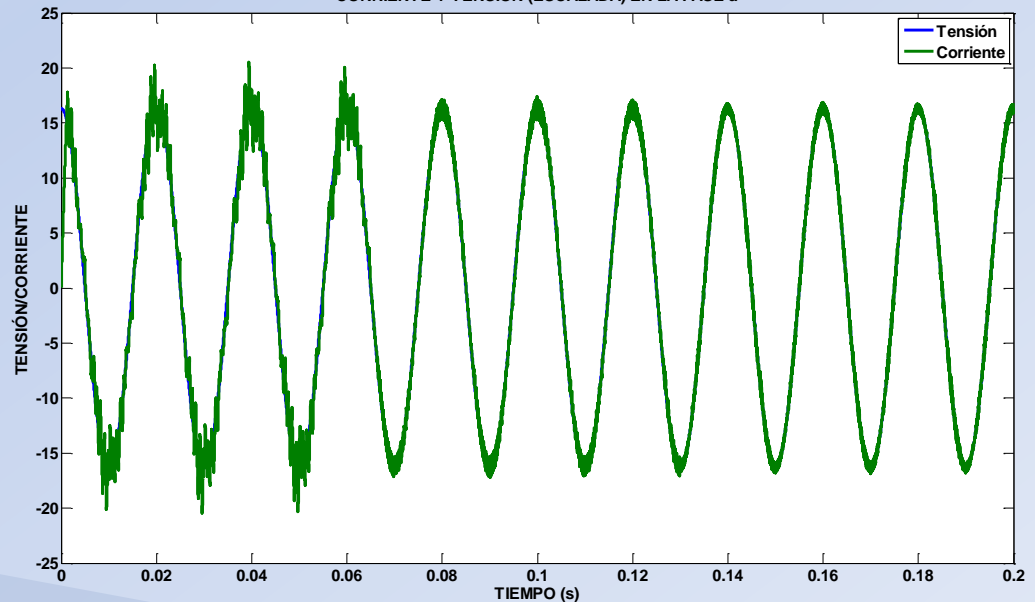
Método de sintonización automática de la bobina

MODELO  
IMPLEMENTADO

OBJETIVO: MÉTODO  
ANALÍTICO DE  
SINTONIZACIÓN



CORRIENTE Y TENSIÓN (ESCALADA) EN LA FASE a





# Hitos y líneas de investigación

## Plataforma RT-LAB: Primeros pasos

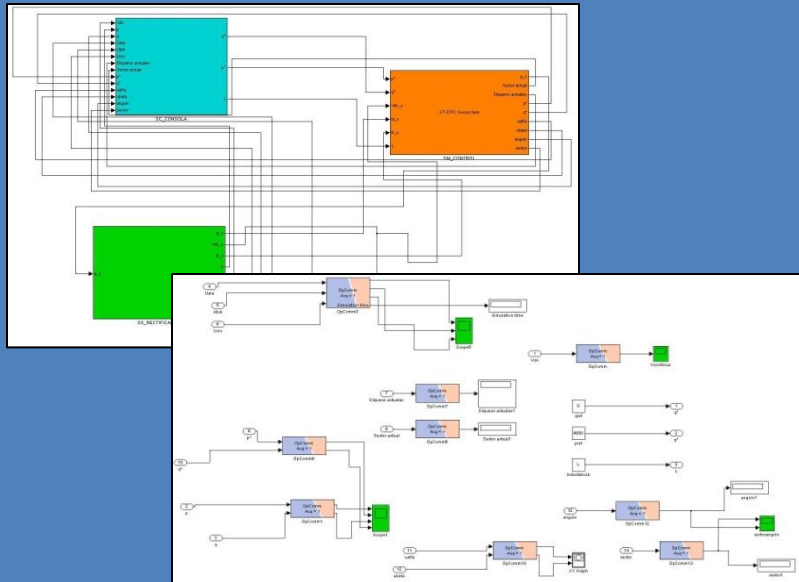




# Hitos y líneas de investigación

## Plataforma RT-LAB: Primeros pasos

### ADAPTACIÓN DEL MODELO AL ENTORNO RT-LAB



CONTROL

PROTOTIPADO  
RÁPIDO DE CONTROL

RECTIFICADOR

PLANTA

SIMULACIÓN EN TIEMPO REAL

# Estrategias de control de rectificadores activos trifásicos

GRACIAS POR SU ATENCIÓN

