



Adaptación de sistema de control digital para convertidor estático C.A./C.C.

BR. JOSÉ DANIEL MAITÁN JIMÉNEZ

TUTOR INDUSTRIAL: ING. MIGUEL ARELLANO

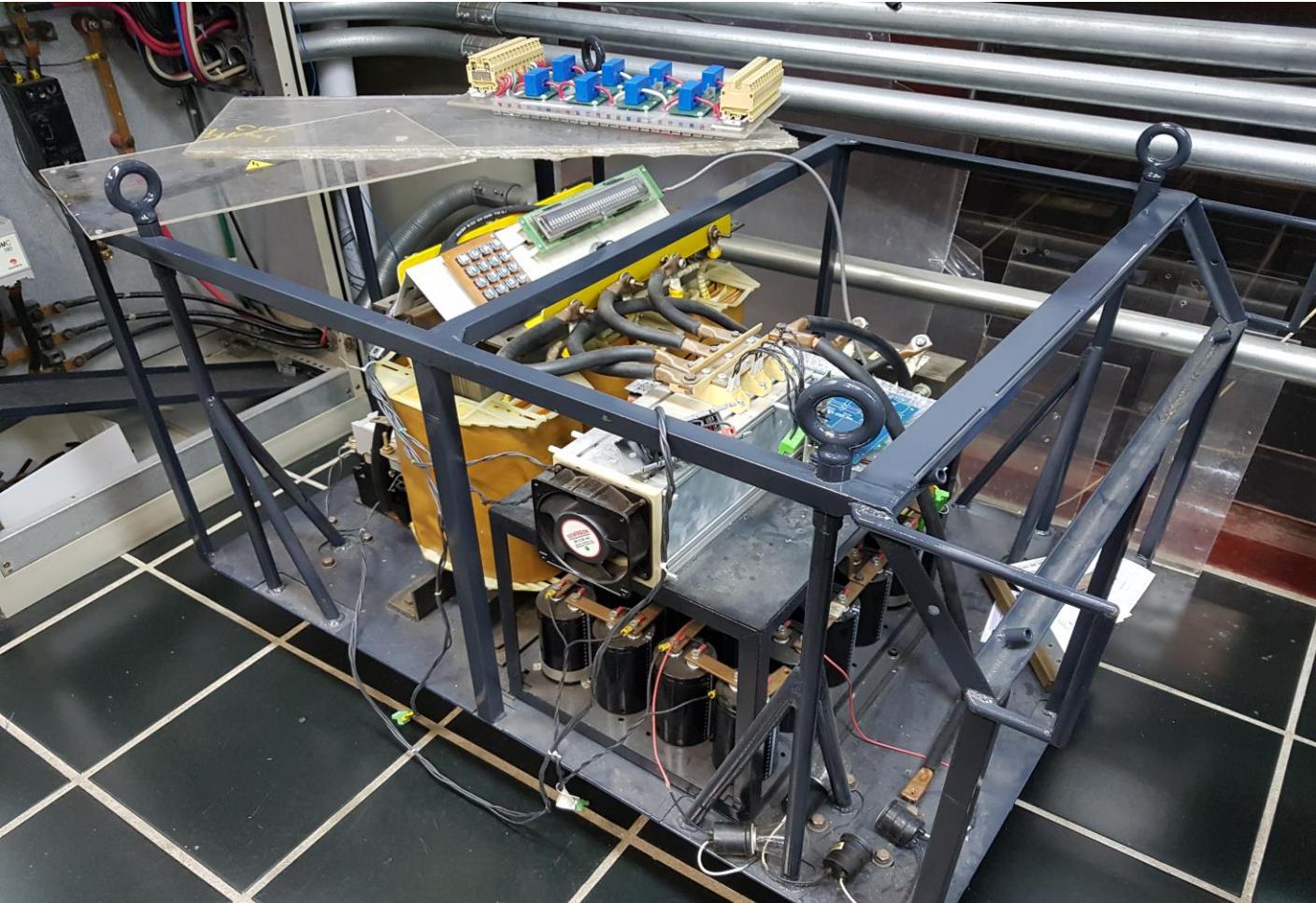
PROFESOR GUÍA: ING. RAFAEL RIVERO

F.I.I.I.D.T.



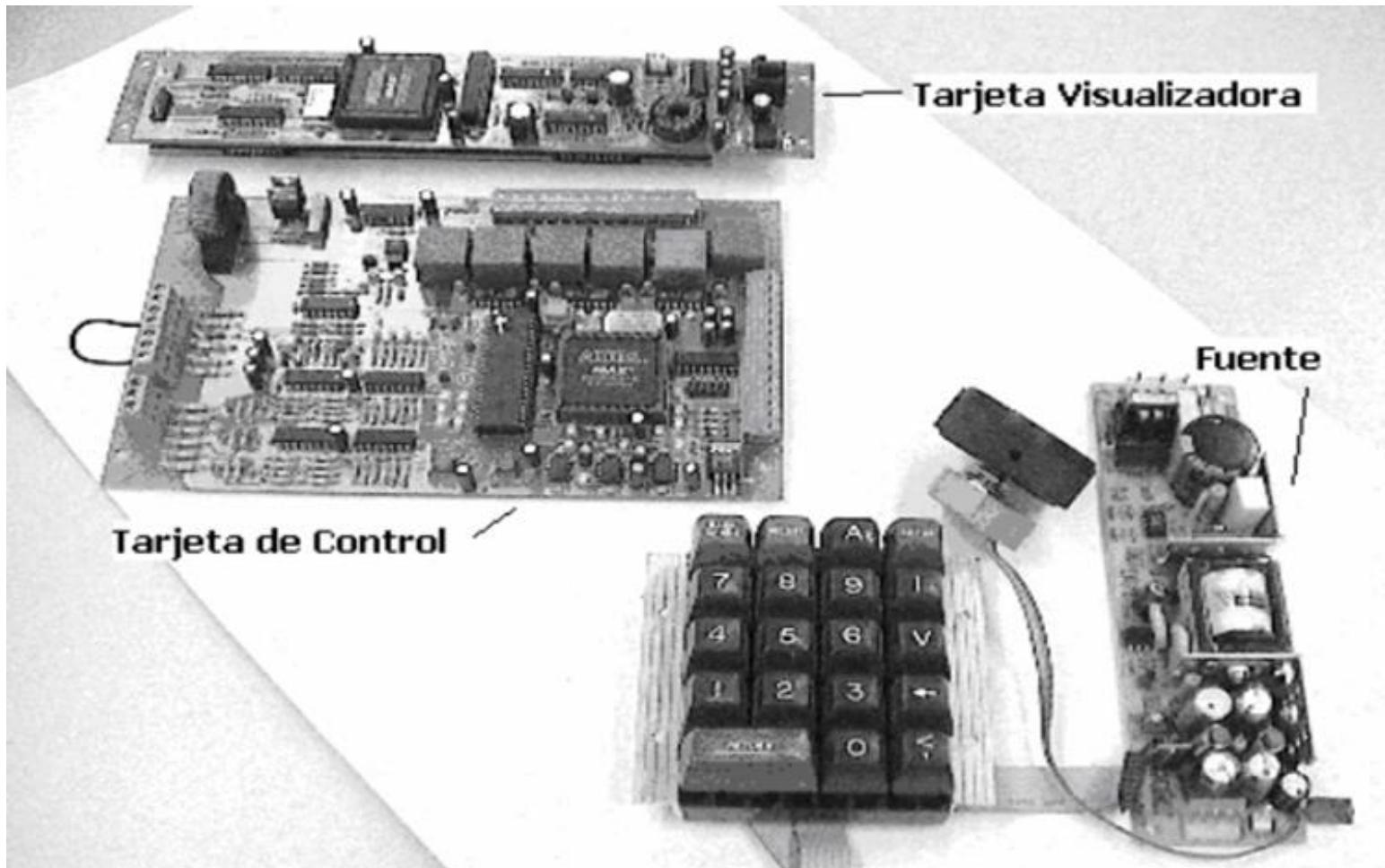
Fundación
Instituto de Ingeniería
para Investigación
y Desarrollo Tecnológico

Rectificador controlado por fase a frecuencia de línea



Fundamentos

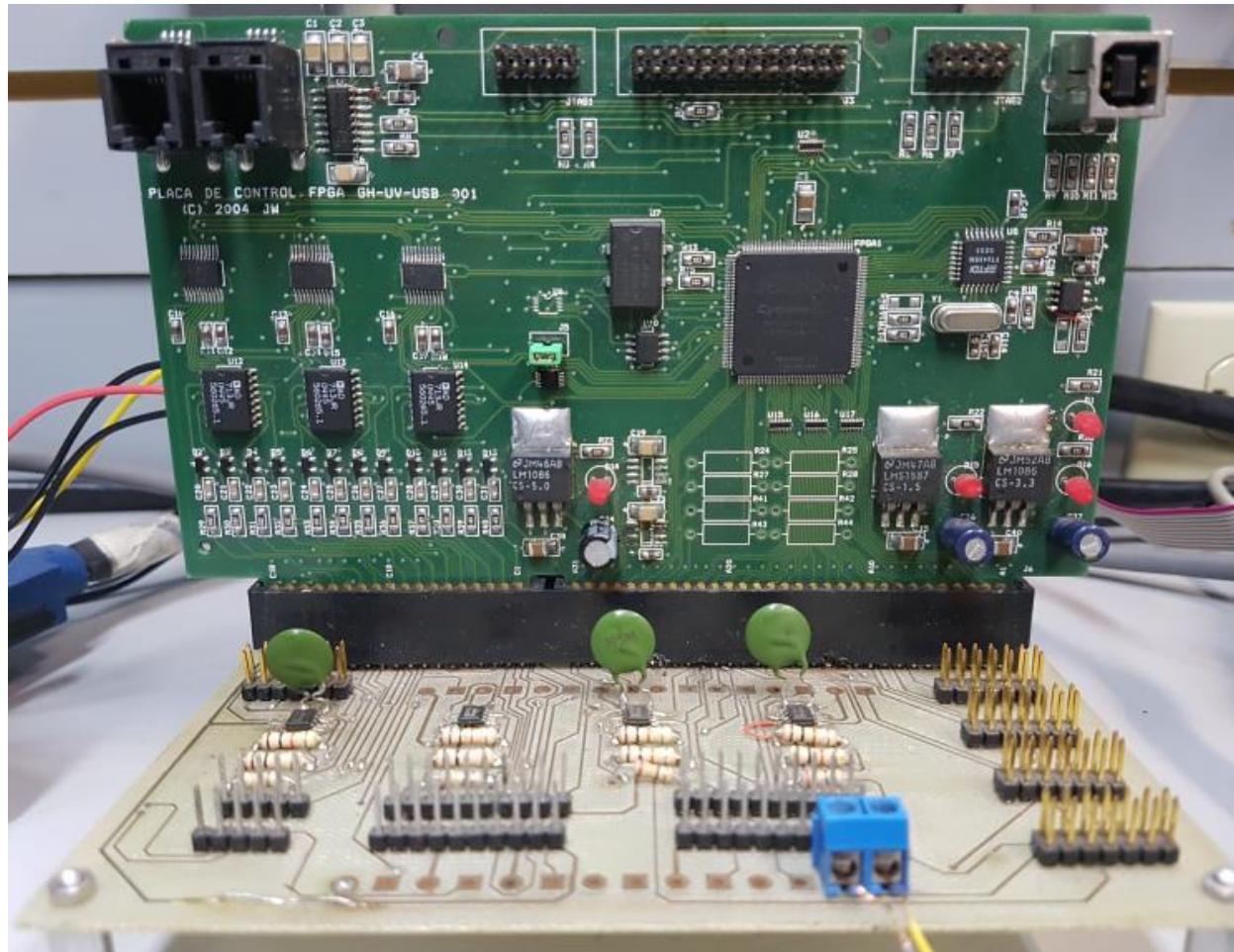
Planteamiento del problema



Planteamiento del problema

- Funcionamiento inestable al variar la carga conectada
- Comportamiento no lineal
- Problemas de sintonización del controlador PID
- Problemas con la lógica de control en la sección de regulación

Tarjeta de desarrollo con F.P.G.A.



Objetivo general

Adaptar un sistema de control digital existente mediante el uso de una tarjeta electrónica equipada con F.P.G.A. para el convertidor C.A/C.C suministrado por la F.I.I.I.D.T.

Objetivos específicos

- Describir los planos, especificaciones y funcionamiento del convertidor estático C.A./C.C. existente.
- Incorporar las tarjetas electrónicas equipadas con F.P.G.A. diseñadas por la F.I.I.I.D.T. en el lazo de control del convertidor C.A./C.C.
- Analizar la técnica de control previamente utilizada.

Objetivos específicos

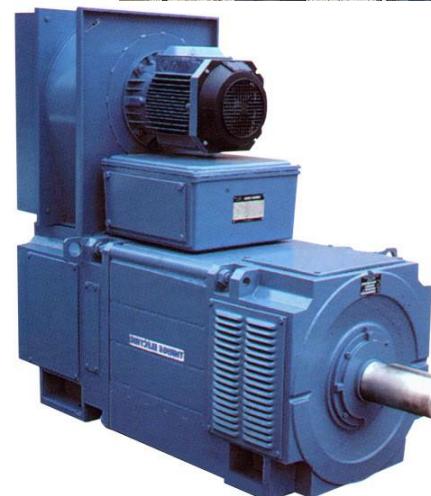
- Realizar las simulaciones de los circuitos y del sistema de control a implementar.
- Implementar la técnica de control identificada utilizando las tarjetas electrónicas equipadas con F.P.G.A y el lenguaje descriptivo V.H.D.L.

Objetivos específicos

- Evaluar el desempeño y regulación bajo carga del convertidor estático C.A/C.C. utilizando el sistema de control adaptado.

Justificación

- Aplicaciones:
 - Fuentes de poder
 - Cargadores de baterías
 - Equipos de soldadura
 - Accionamiento de motores



Antecedentes

Sistema de control realimentado
con controlador PID

“Diseño, elaboración e implementación de un rectificador trifásico controlado mediante PID digital como elemento primario de regulación para una fuente DC de laboratorio de 15 kW”

Regulación lineal/conmutada
mediante I.G.B.T. y lazo de control

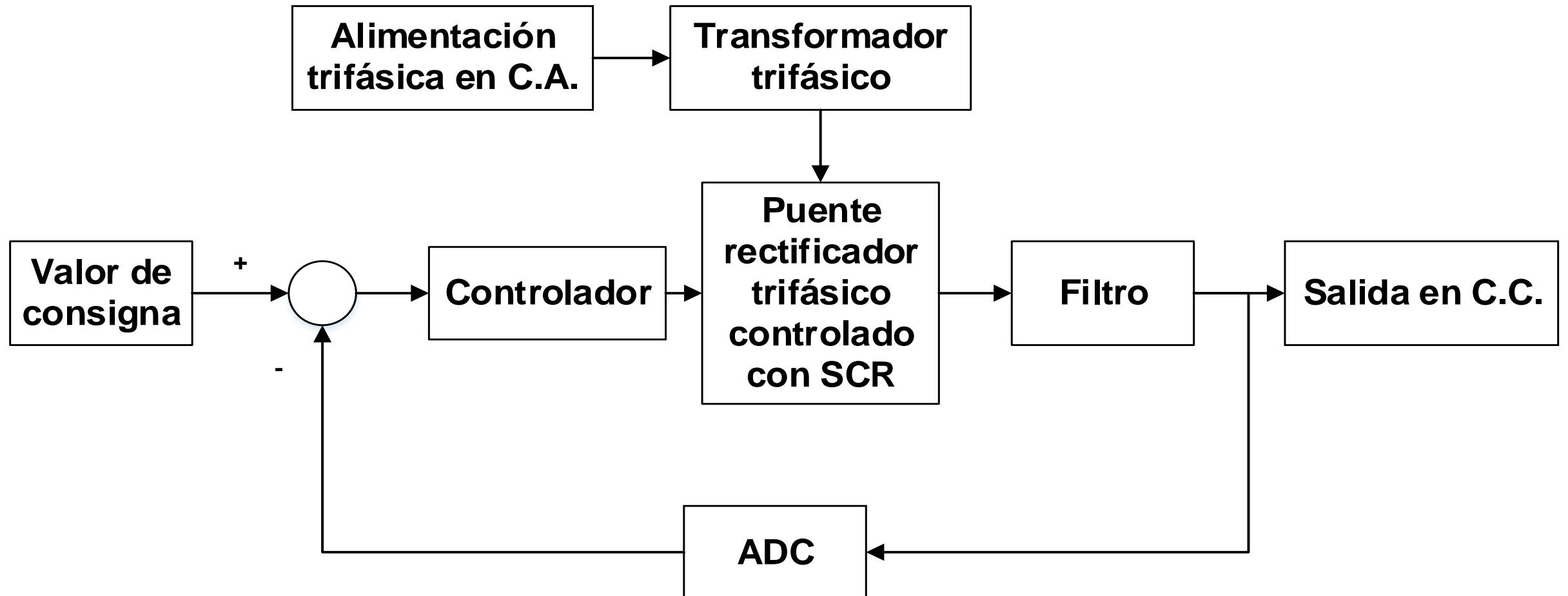
Interfaz gráfica en LabVIEW

Metodología

1. Estudio documental

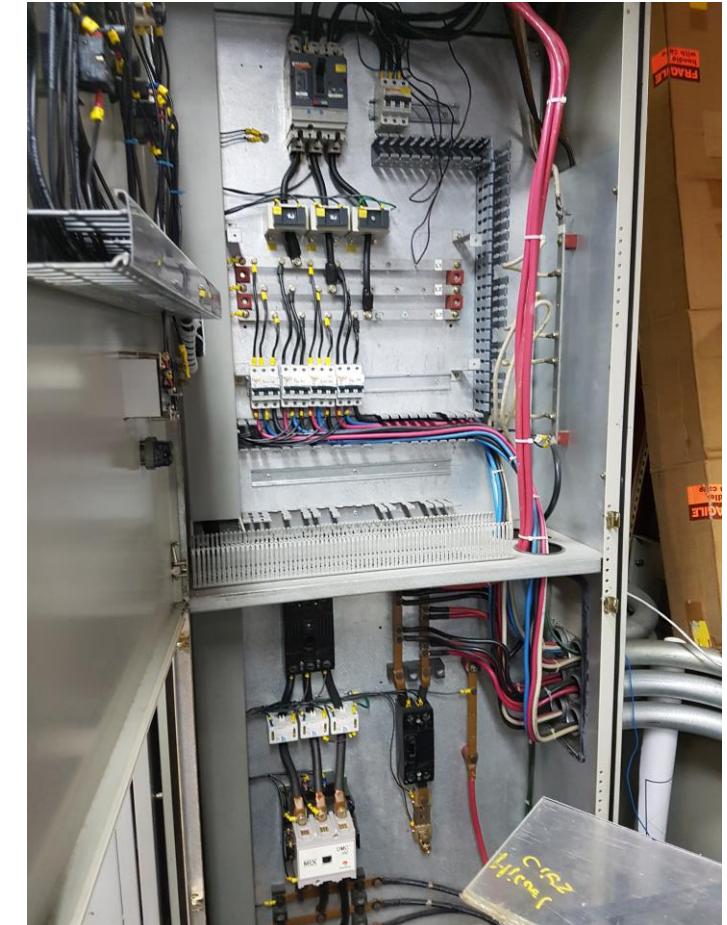
- Tiristores (S.C.R.)
- Rectificadores trifásicos
 - Efecto de inductancia de fuente
 - Conducción no continua
 - Regulación
- F.P.G.A.
- V.H.D.L.
- Quartus II
- Sistemas de control
- Controladores PID
- Convertidores analógicos a digitales

2. Levantamiento de información



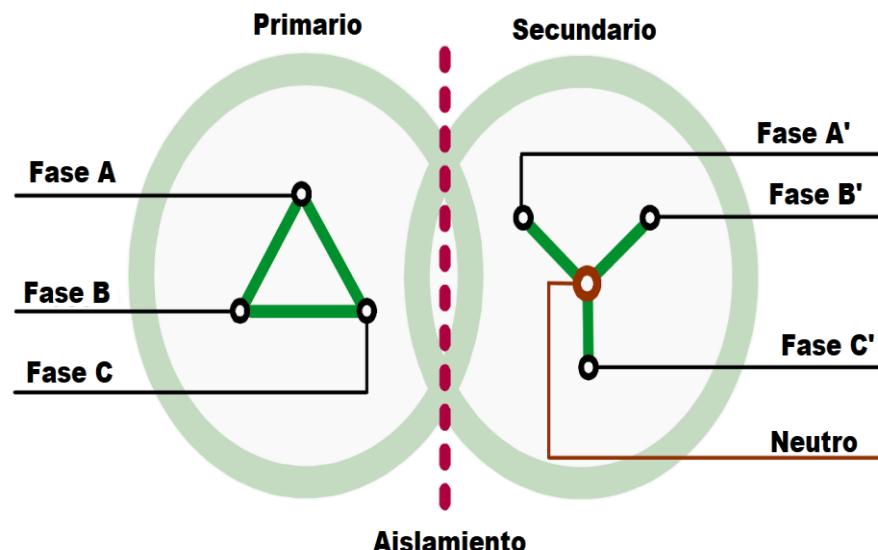
Panel de alimentación trifásica

- Indicadores de tensión y corriente
- Contactores y pulsadores
- 120 V por fase

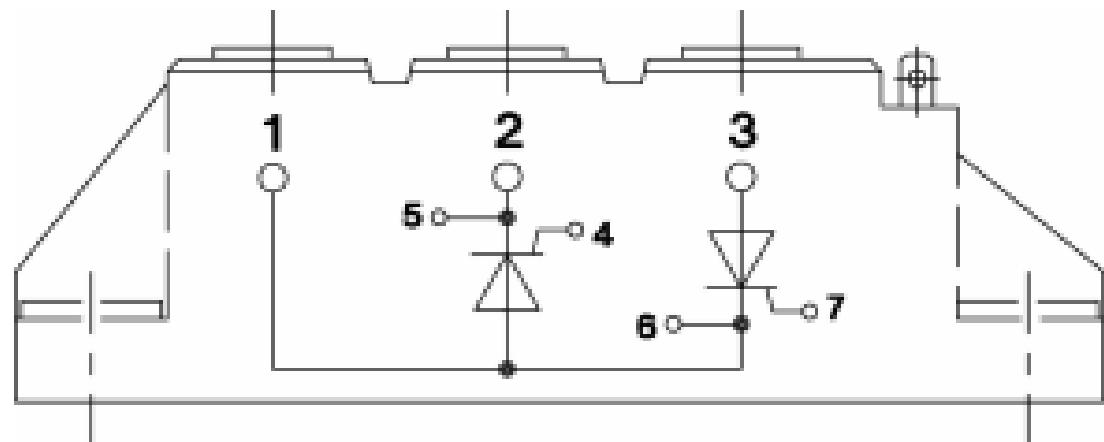


Transformador trifásico

- Configuración delta-estrella
- Tensión de línea de entrada: 208 V
- Tensión de fase de salida: 280 V
- Tensión de línea de salida: 485 V



Puente rectificador trifásico con SCR



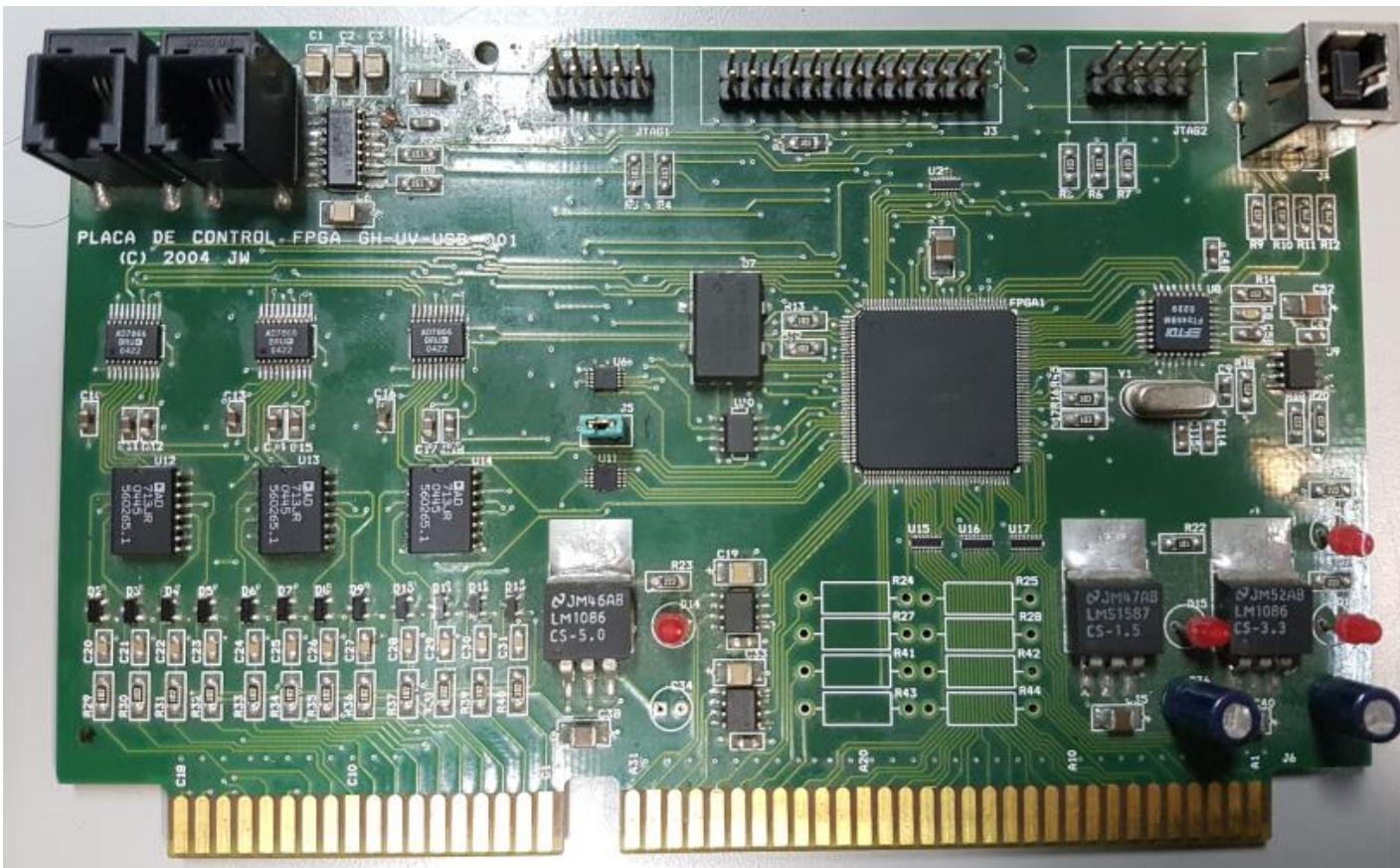
**SEMIKRON –MÓDULO DE
S.C.R. SKKT 92B12 E**

Filtro pasivo

Elemento	Valor
Inductor con núcleo de hierro	1,5 mH
Condensadores electrolíticos	4700 uF
Resistencias de descarga	270 kΩ

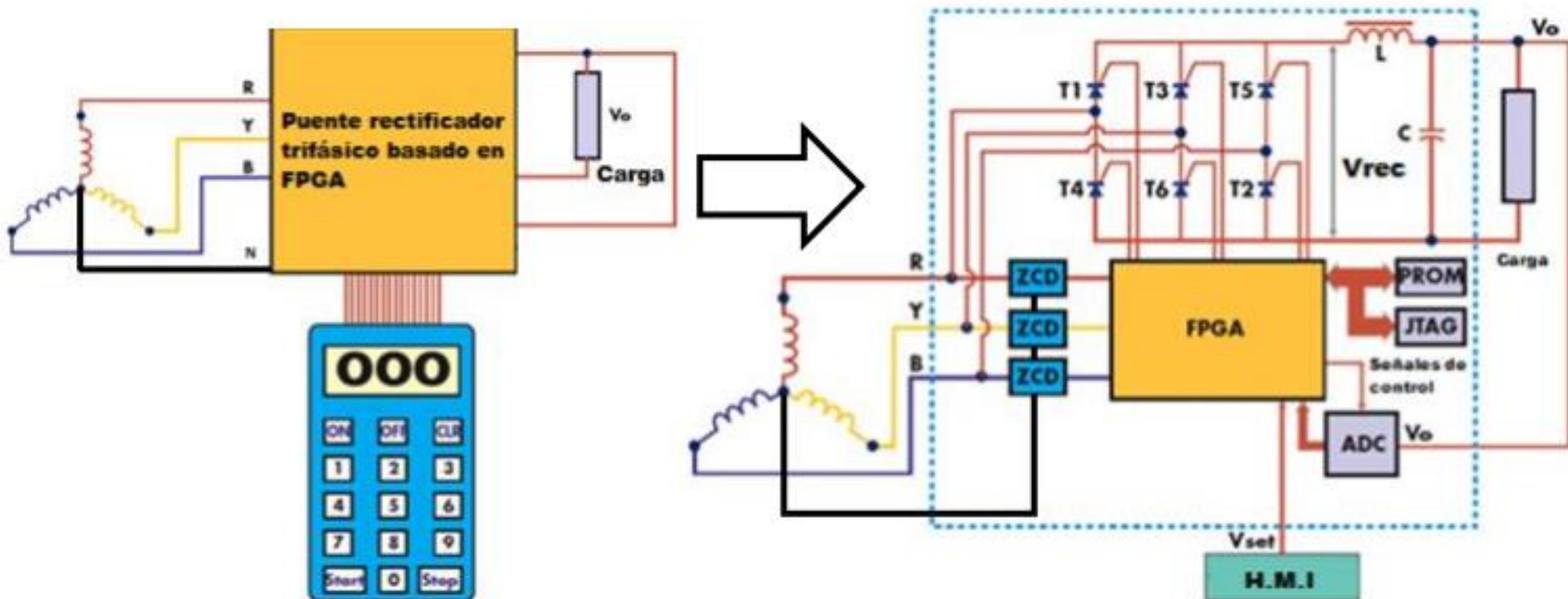


Tarjeta electrónica con F.P.G.A



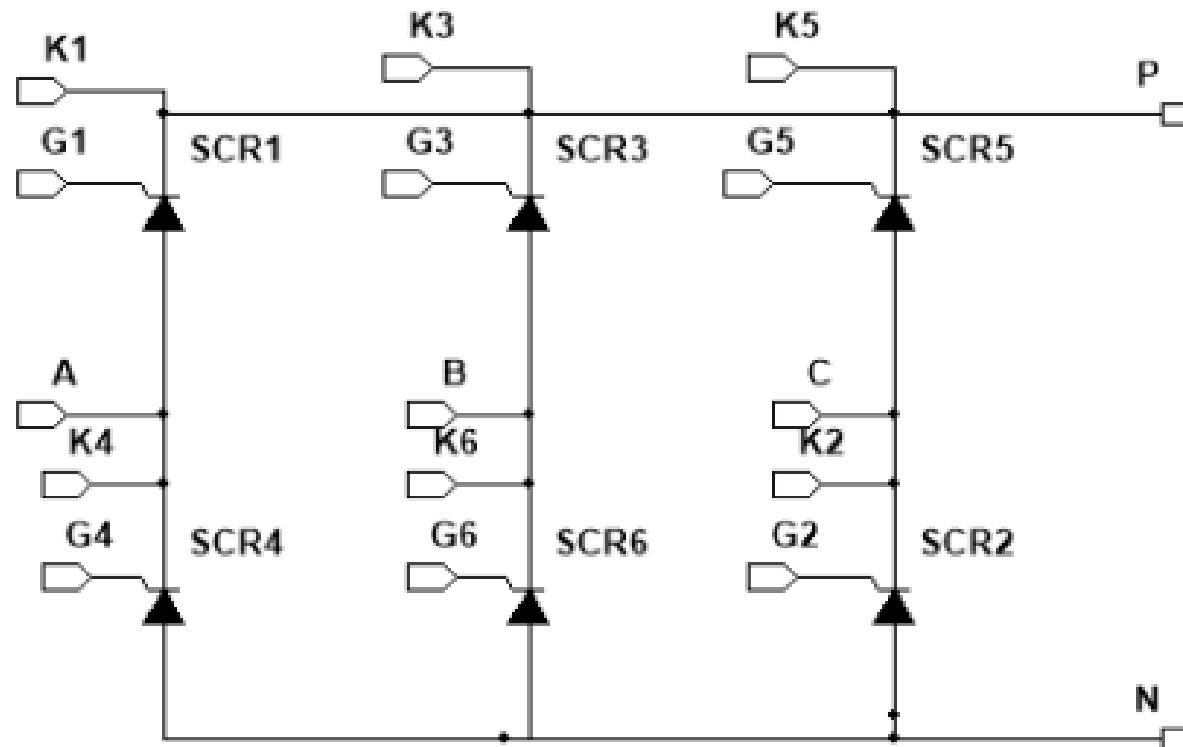
- 23 Entradas/Salidas digitales de 3.3V
- 4 Entradas/4 Salidas de 15V
- 12 Entradas analógicas de 0V a 5V
(Multiplexadas para usar 6 a la vez)
- 6 Convertidores AD y 1 DA
- 3 Reguladores
- F.P.G.A. Cyclone I EP1C6T144C6
- Programación con JTAG
- Memoria FLASH
- Comunicación USB
- Comunicación RS-232

3. Conexiones e incorporación de la nueva tarjeta electrónica



Puente rectificador trifásico con SCR

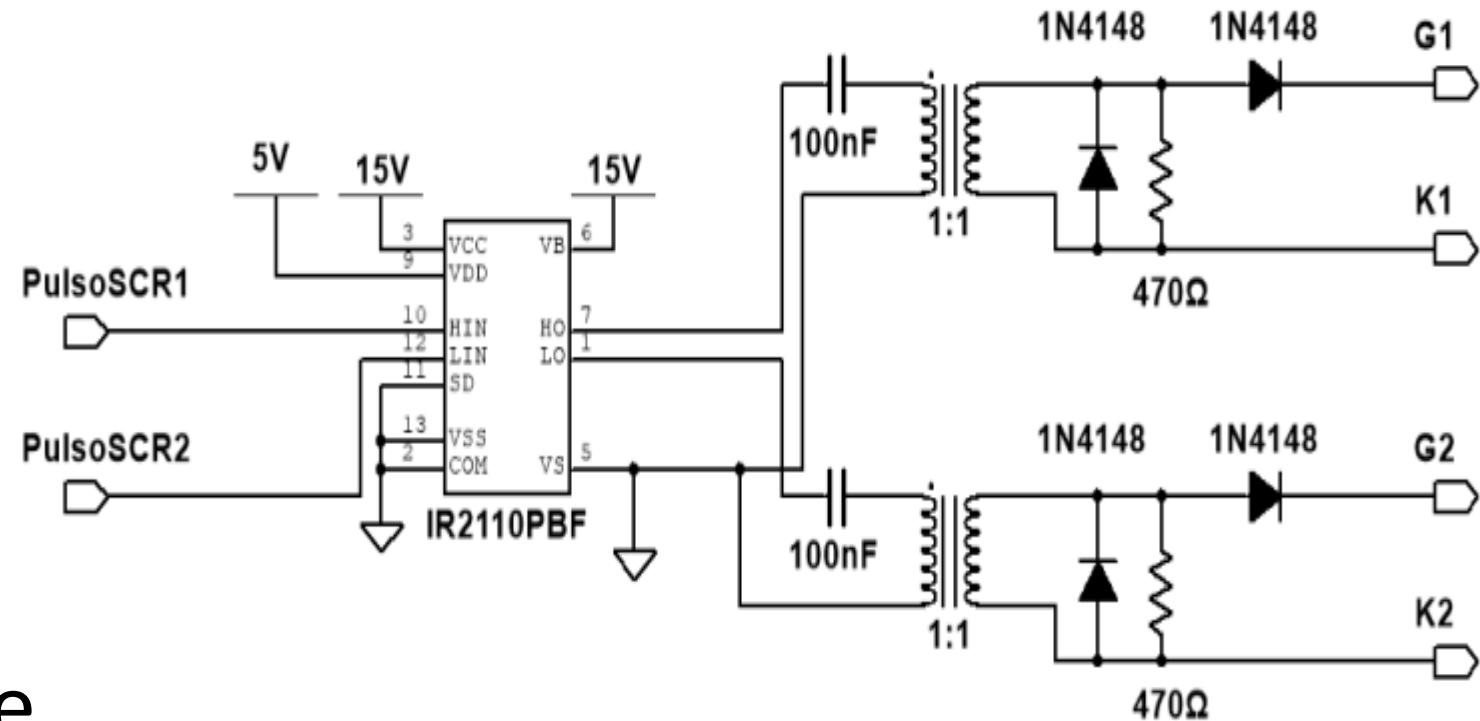
- 3 módulos de SCR conectados mediante barras de cobre.
- 12 terminales de control de disparo.



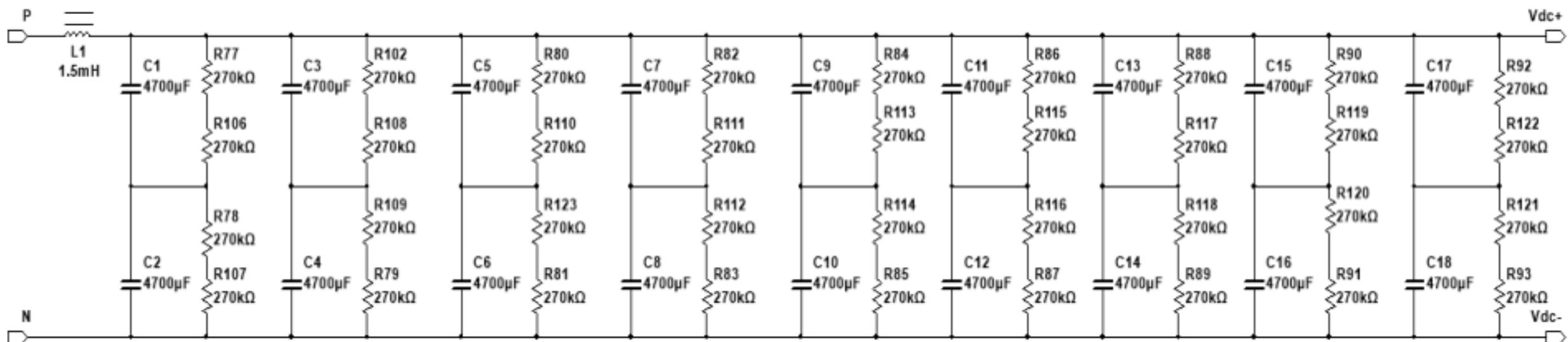
SCR's: SKKT 92B12 E

Circuito de acondicionamiento de pulsos de disparo

- Controlador IR2110 para amplificar pulso.
- Transformadores de pulso SKPT-11 para aislar la sección de control de la sección de potencia.

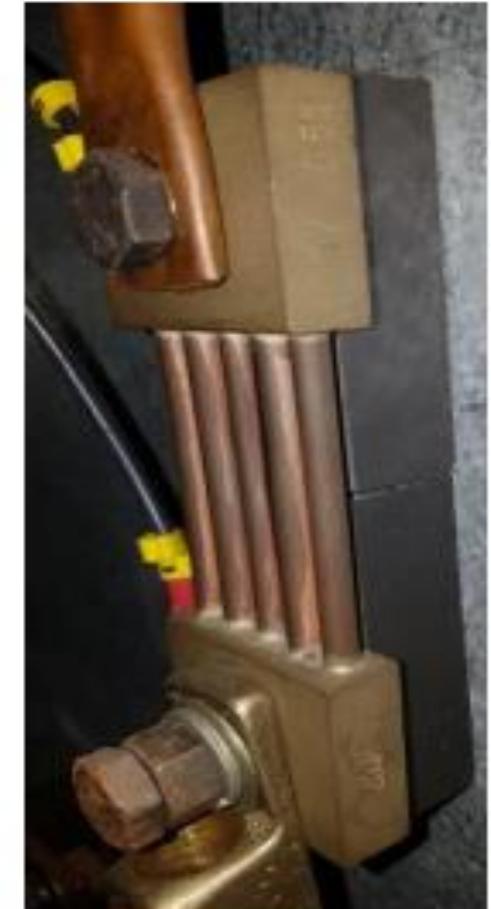
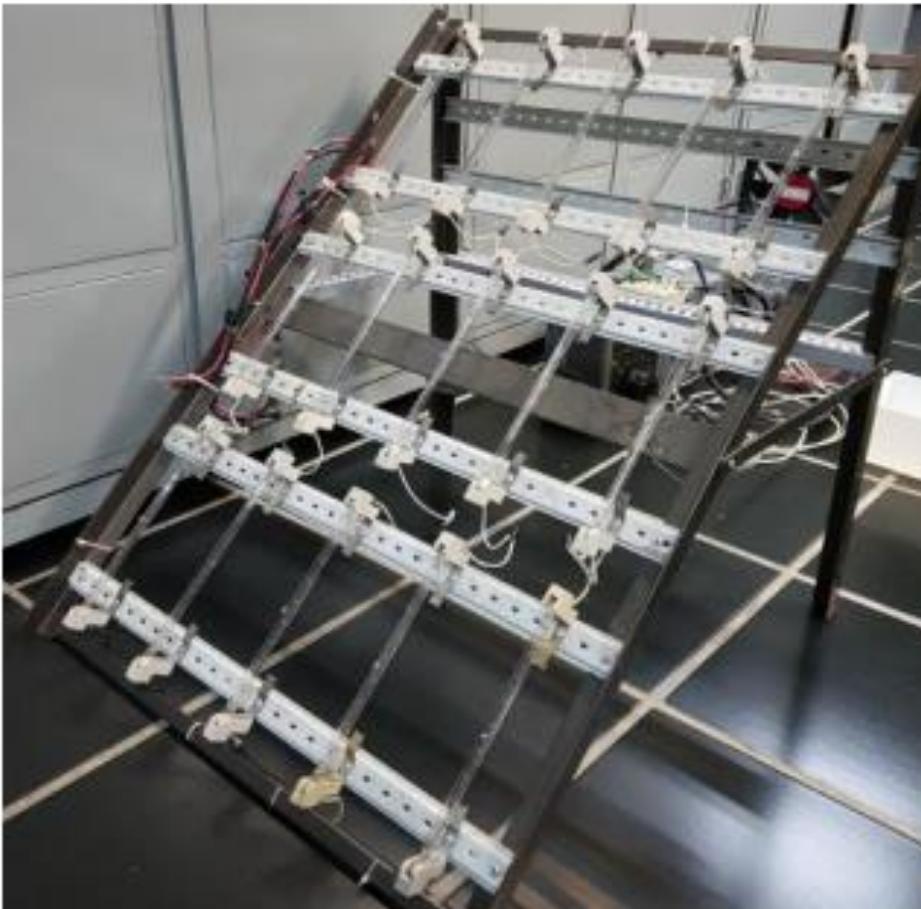


Filtro pasivo

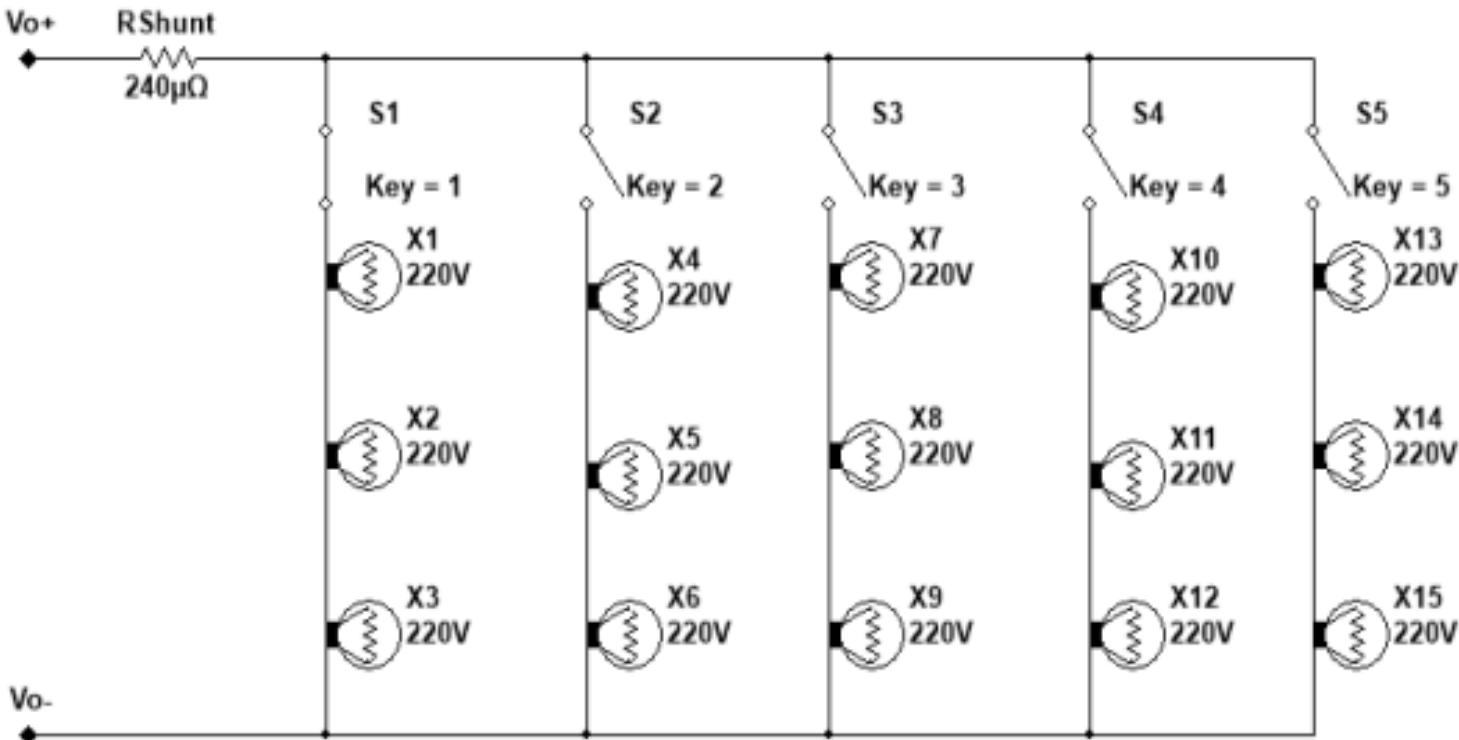


Carga

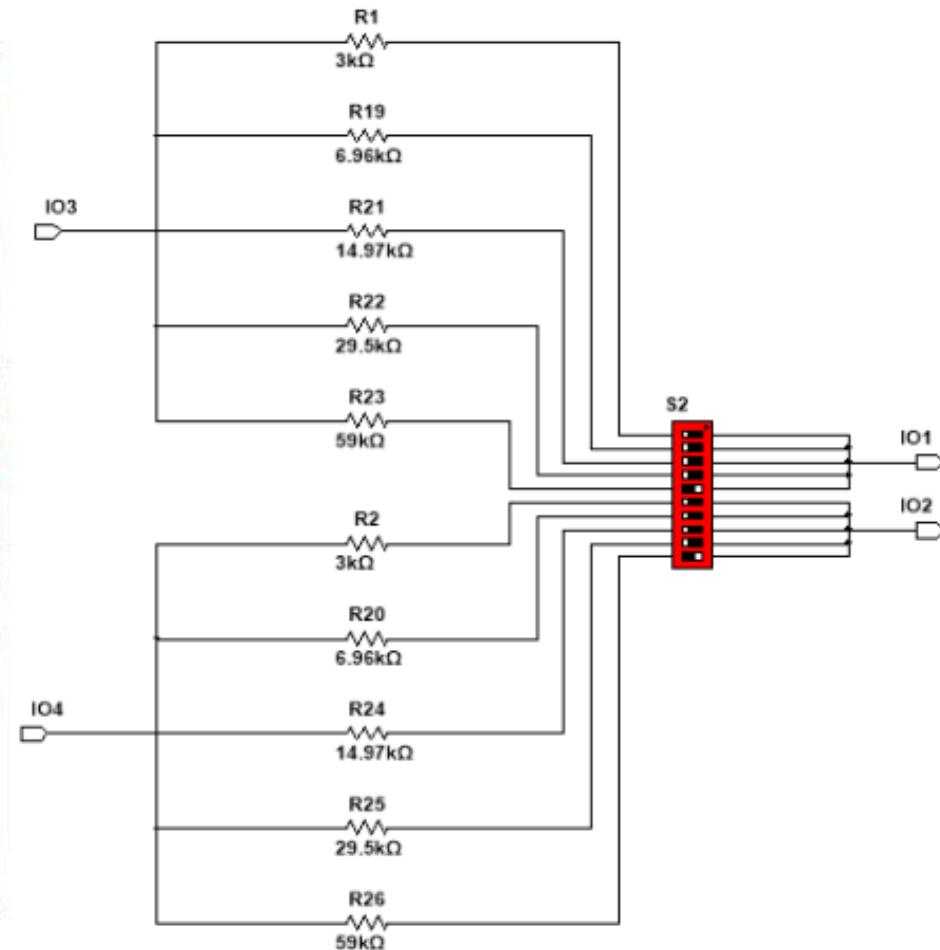
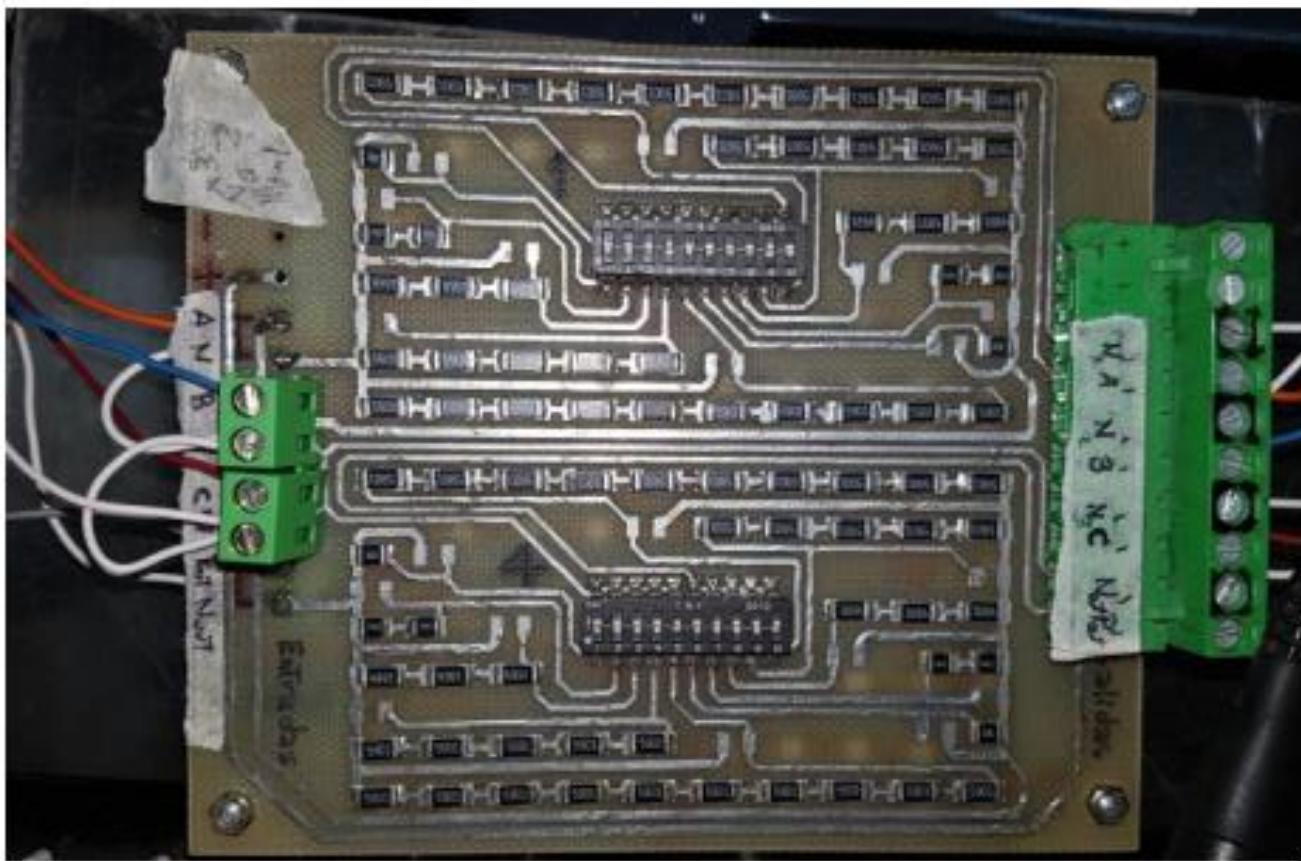
- Arreglo de bombillos incandescentes de 1 kW / 220 V
- Resistencia shunt de 250 A / 60 mV



- 5 ramas de bombillos con tensión nominal de 660 V cada una
- Corriente máxima de 22,72 A@660 V

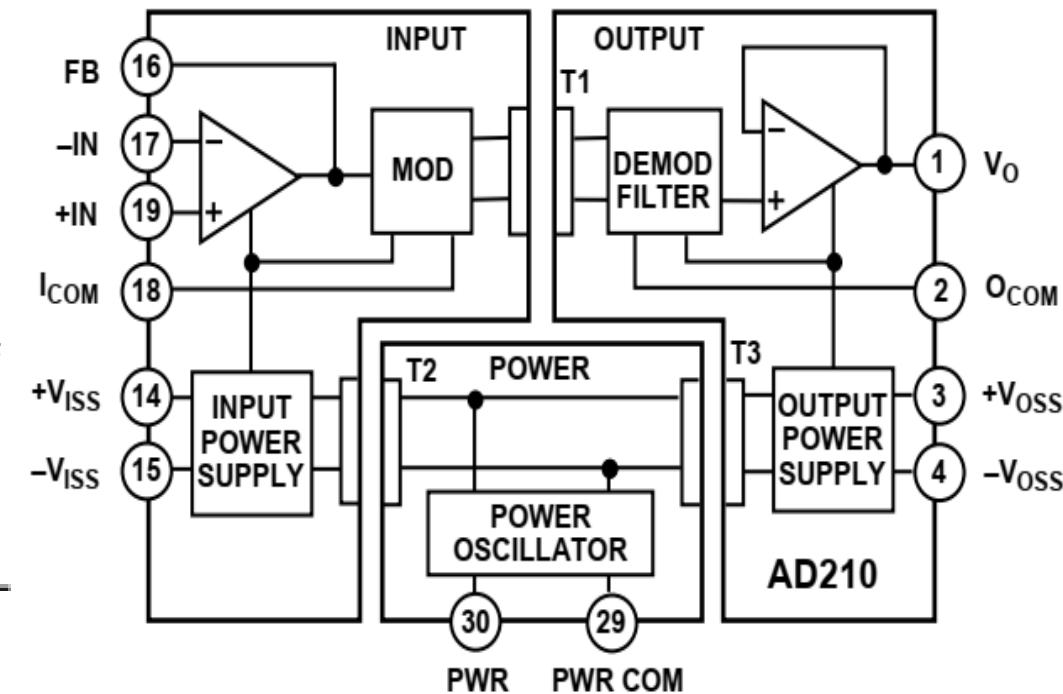
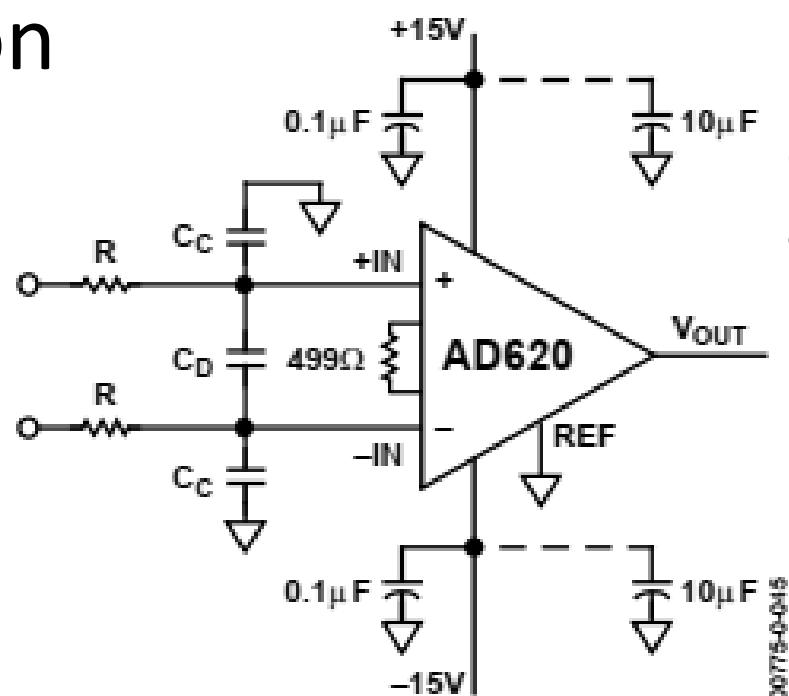


Tarjeta de circuitos divisores de tensión



Tarjeta de aislamiento de señales

- Amplificador de instrumentación AD620
- Amplificador aislador AD210AN



Tarjeta de aislamiento de señales

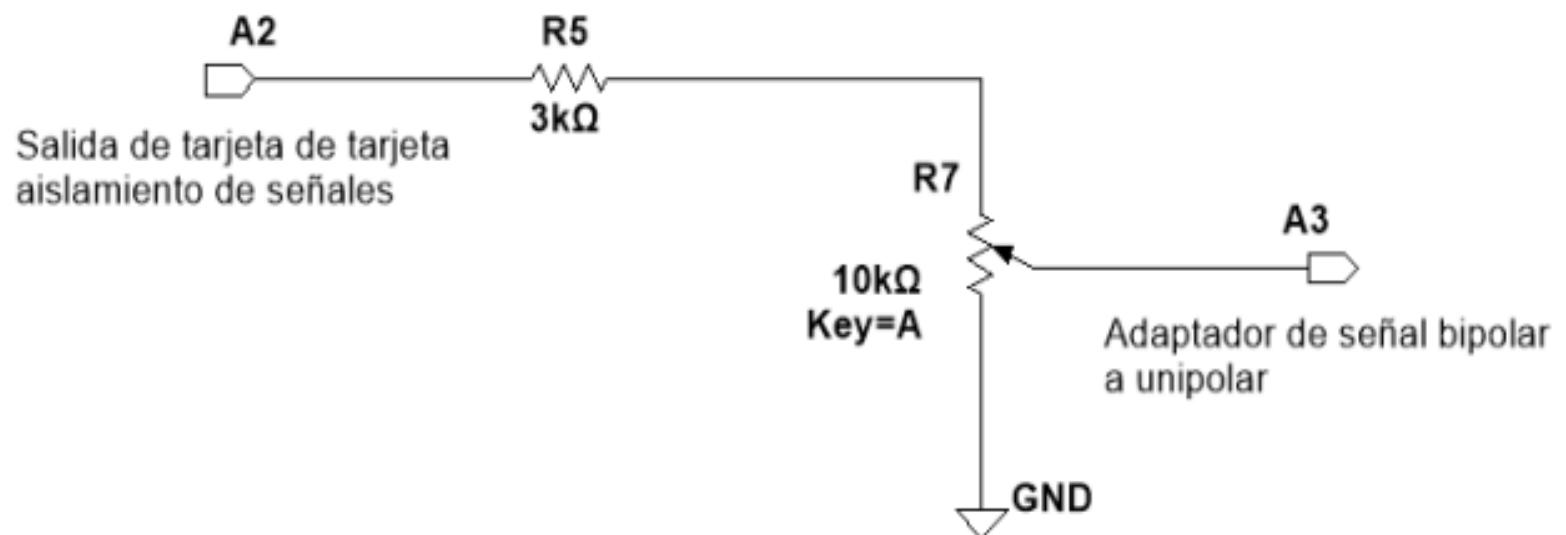


Interruptores DIP accionados	Atenuación	Valor de atenuación
1 y 6	G_1	0,25
2 y 7	G_2	0,126
3 y 8	G_3	0,063
4 y 9	G_4	0,033
5 y 10	G_5	0,017

Ajuste de atenuación de voltaje

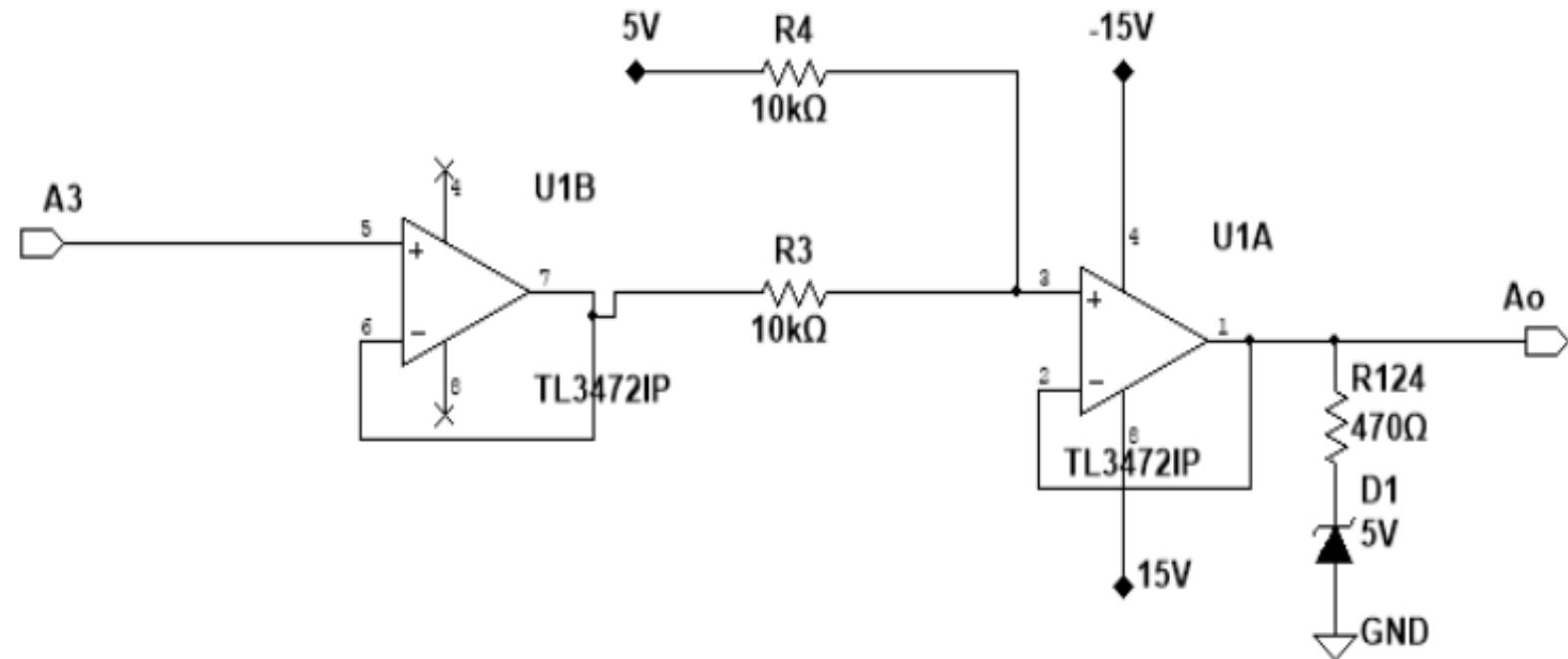
$$V_o = V_\phi \cdot G_5 = 280 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{2}{120} = 6,599V$$

- Ajuste de amplitud de señales bipolares a valores entre ± 5 V



Adaptador de señal bipolar a unipolar

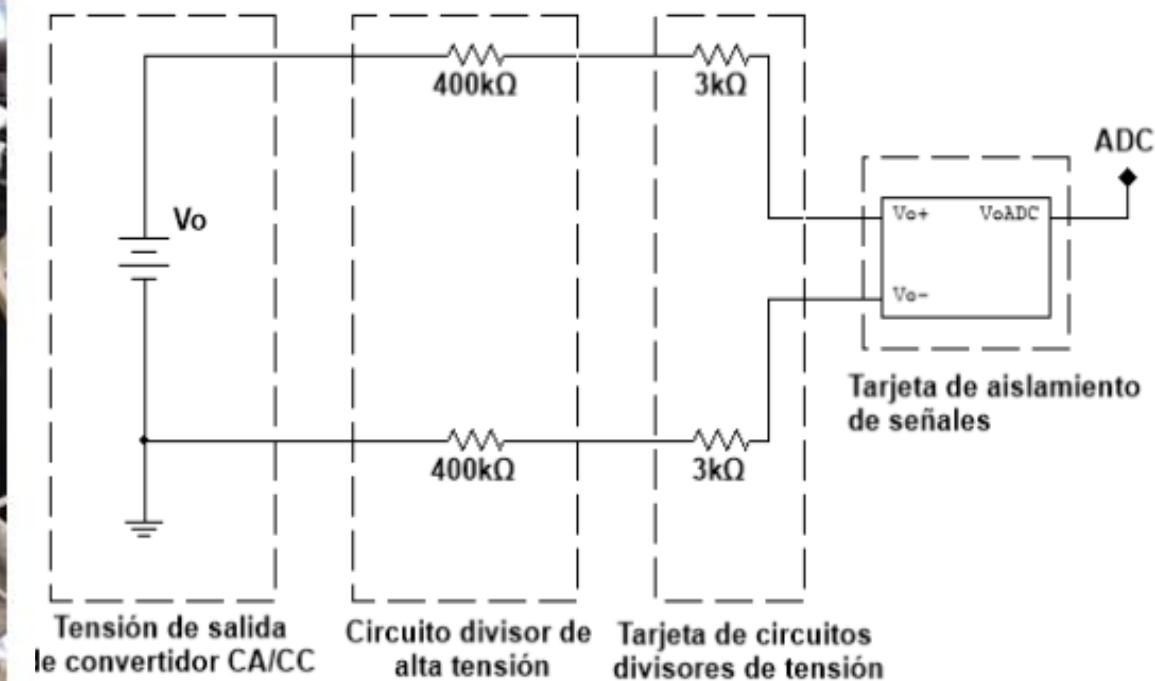
- Señales de salida entre 0 V y 5 V para ser utilizada en convertidores analógicos a digitales.



$$V_o = \left(V_{CC} \frac{R}{R+R} + V_t \frac{R}{R+R} \right) = \left(\frac{V_{CC}}{2} + \frac{V_t}{2} \right)$$

Circuito divisor de alta tensión

- Utilizado para atenuar señal de salida en C.C. del convertidor.

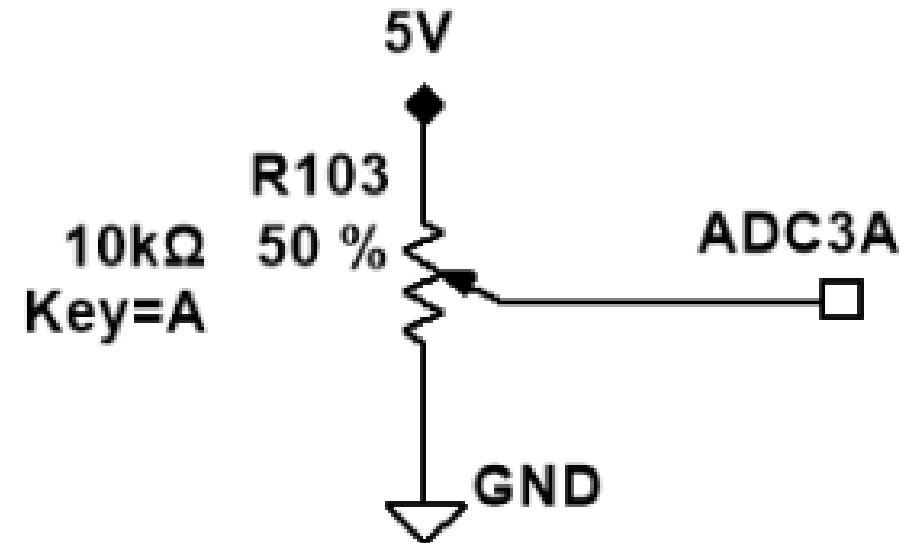


Tarjeta de desarrollo con F.P.G.A.

- Entradas:
 - Tensiones de fase acondicionadas
 - Tensión de salida en C.C. acondicionada
 - Consigna H.M.I.
- Salidas:
 - 6 terminales digitales hacia el puente de SCR.
- Alimentación:
 - 5 V, 15 V, -15 V

Interfaz usuario-máquina

- Potenciómetro con valores de salida de 0 V a 5 V
- Uso de un ADC de la tarjeta de desarrollo

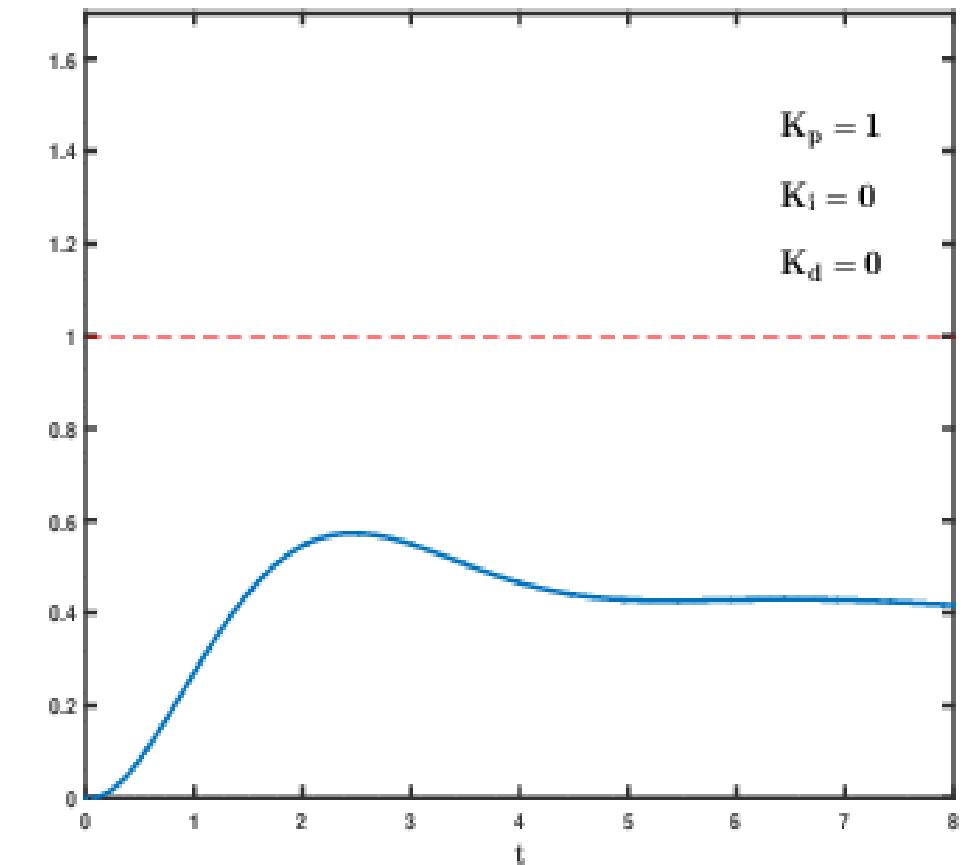
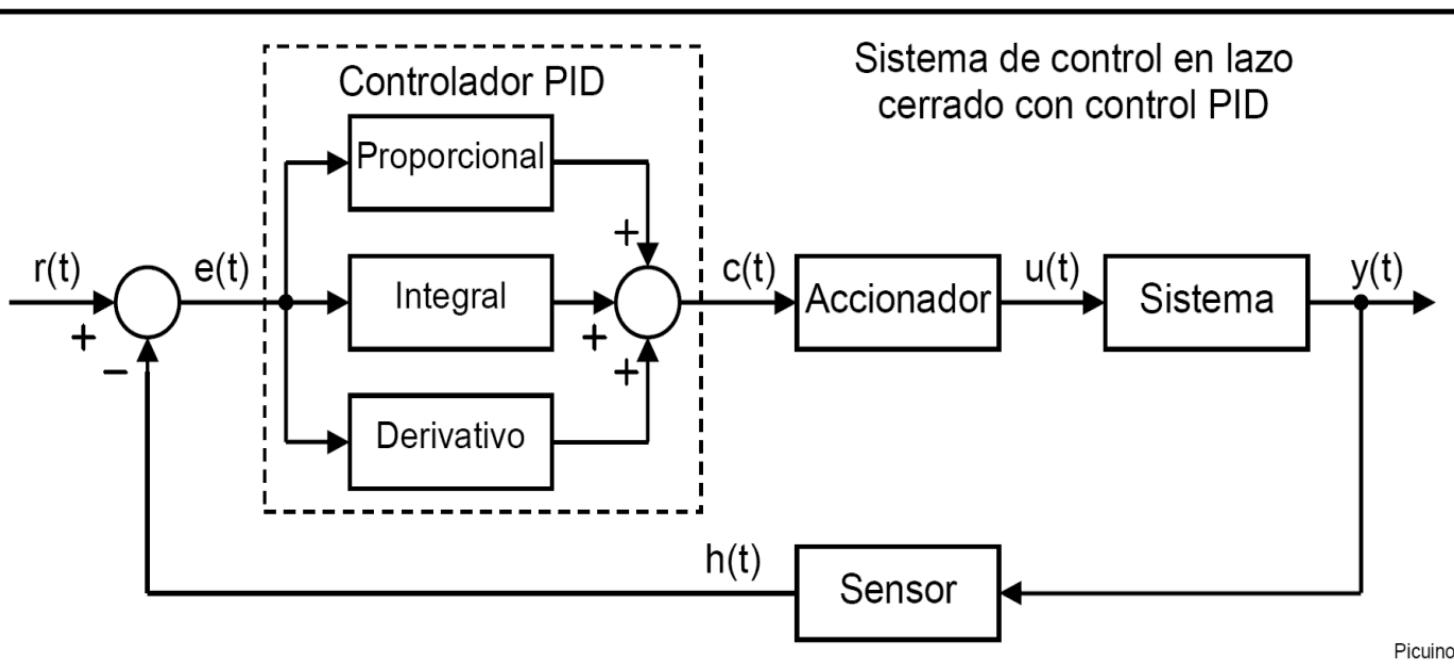


Fuente de alimentación de baja tensión en C.C.

- HP-6236B para tarjeta de desarrollo y acondicionamiento de pulsos
- Extech 382203 para aislador de señales



4. Análisis de lazo de control existente



Ejemplo de discretización de función de transferencia según carga y Tm

$$H_{LC}(s) = \frac{120000Z_{carga}}{s^23,807Z_{carga} + s(180 + 0,0015Z_{carga}) + 240000Z_{carga}}$$

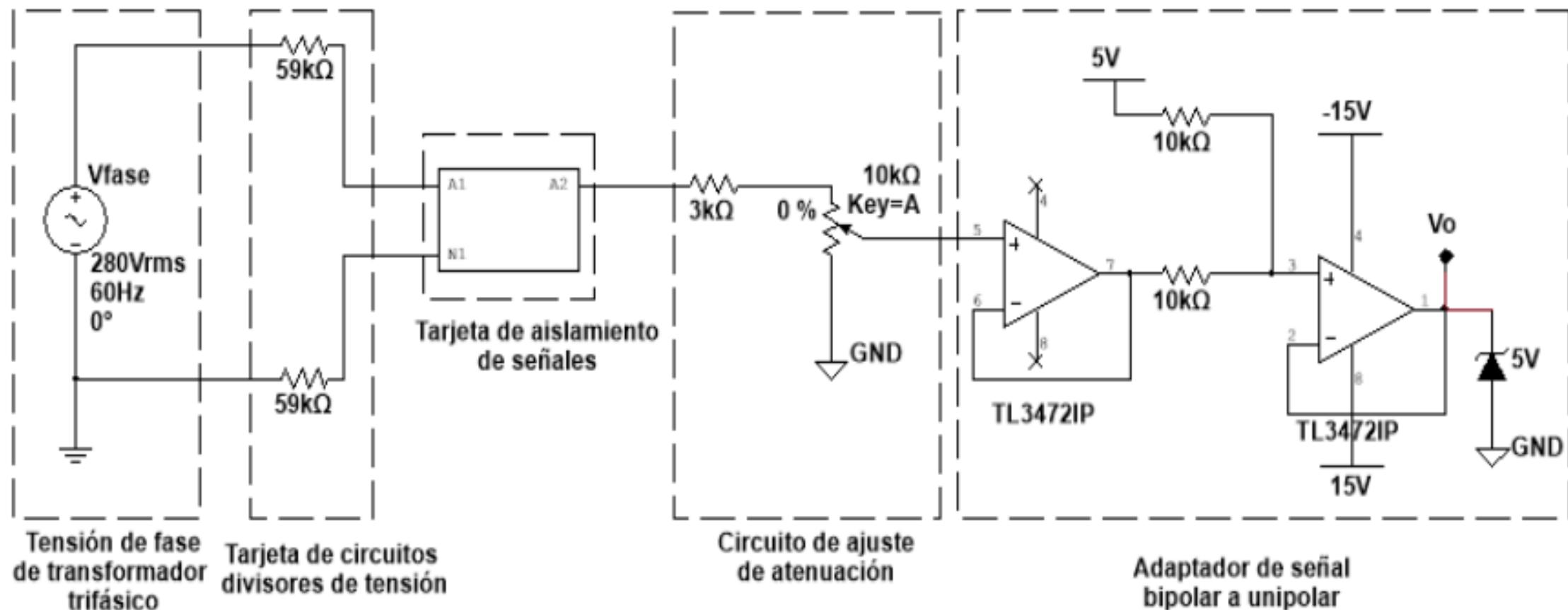
zoh

$$Z_{carga} = 1$$

$$T_m = 800 \text{ ns}$$

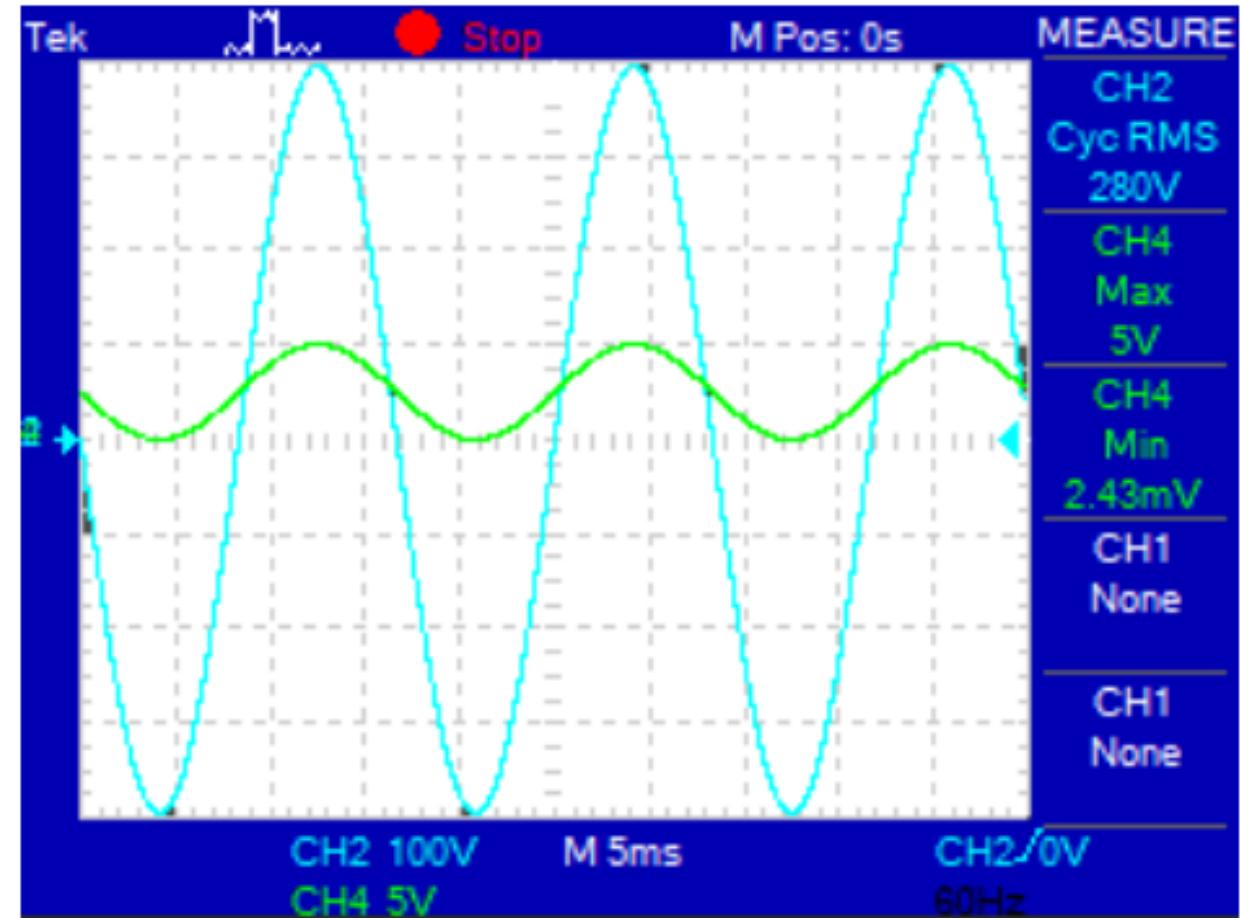
$$H_{LC}(z) = 1,009 \cdot 10^{-8} \frac{z+1}{z^2 - 2z + 1}$$

5. Simulación de circuitos y sistema de control



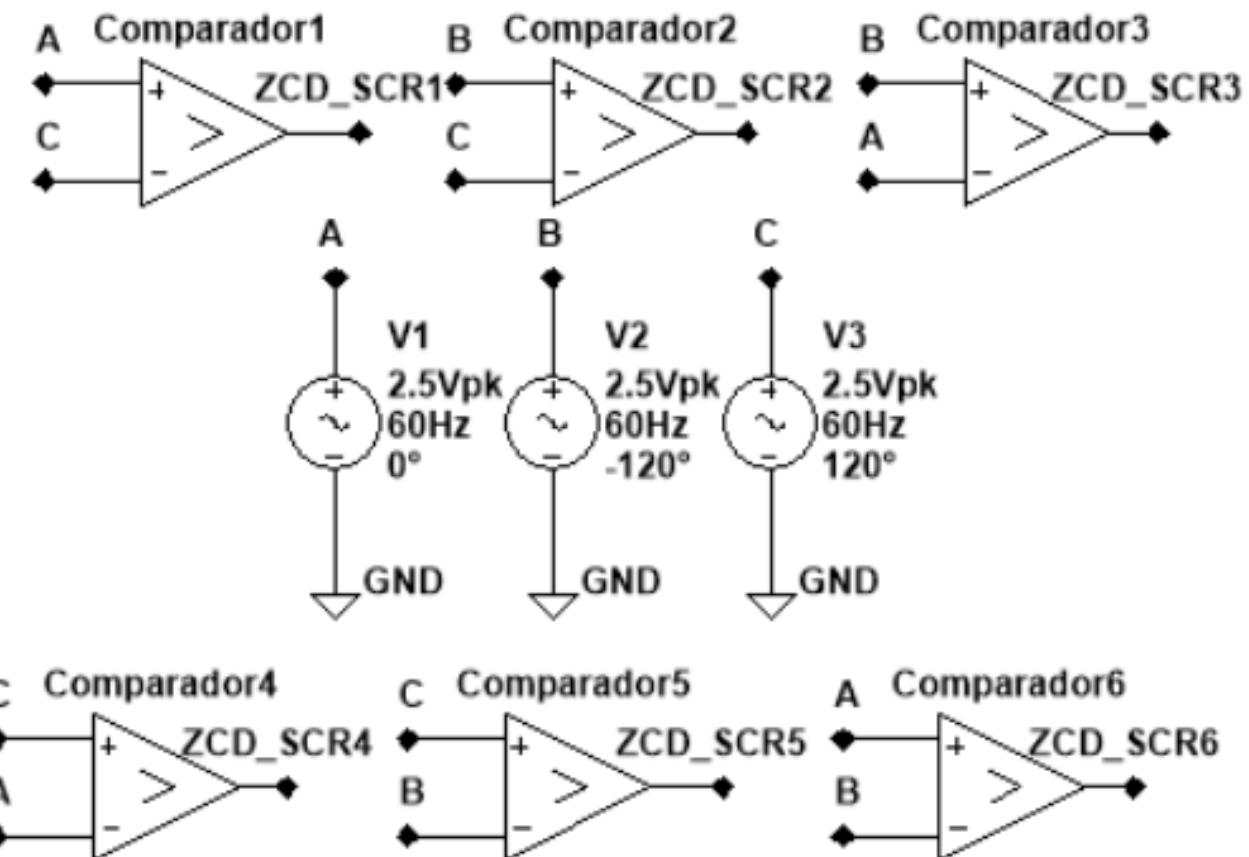
Acondicionamiento de señales de alimentación

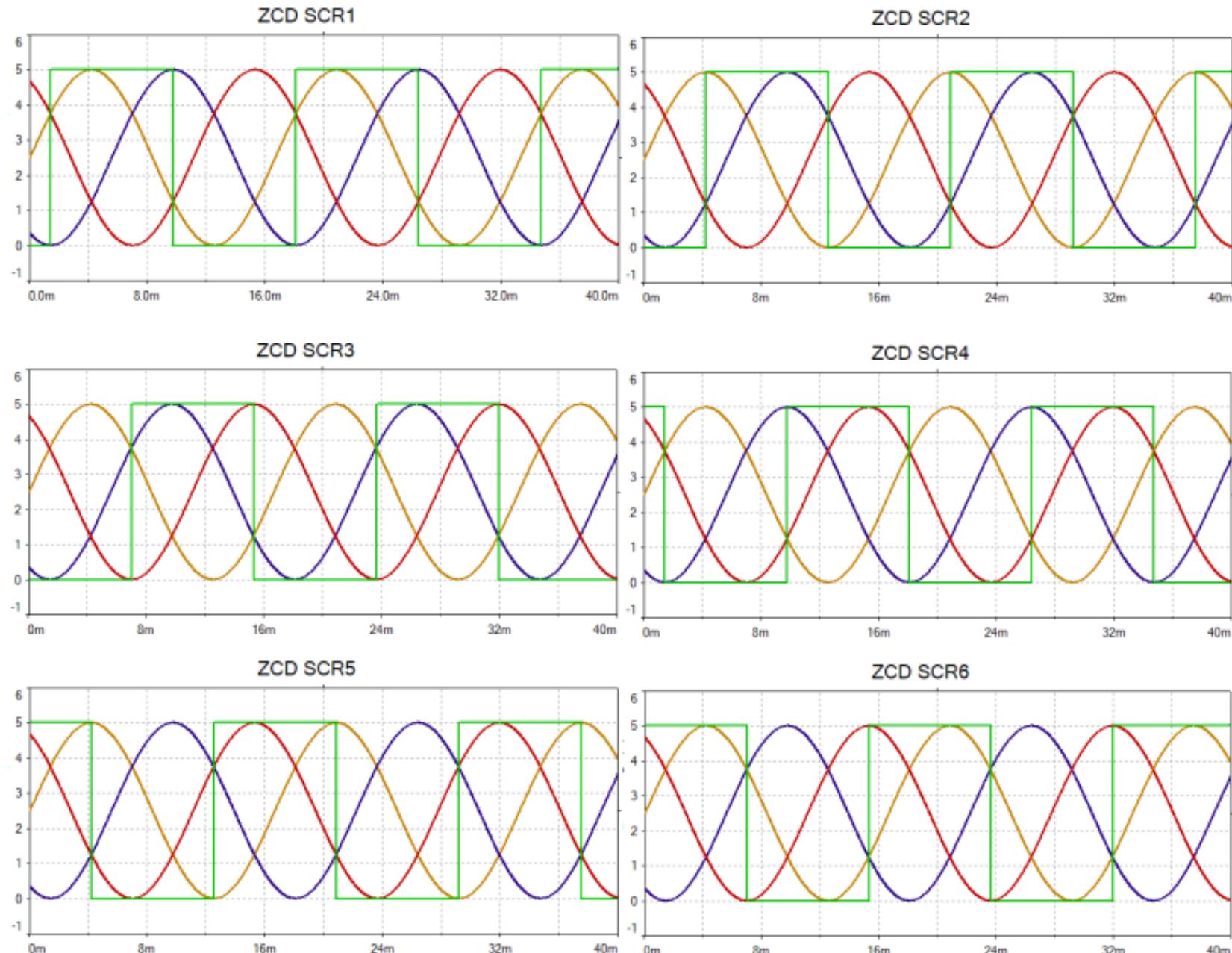
- Señal atenuada, aislada y adaptada a equivalente unipolar.



Sincronización de pulsos

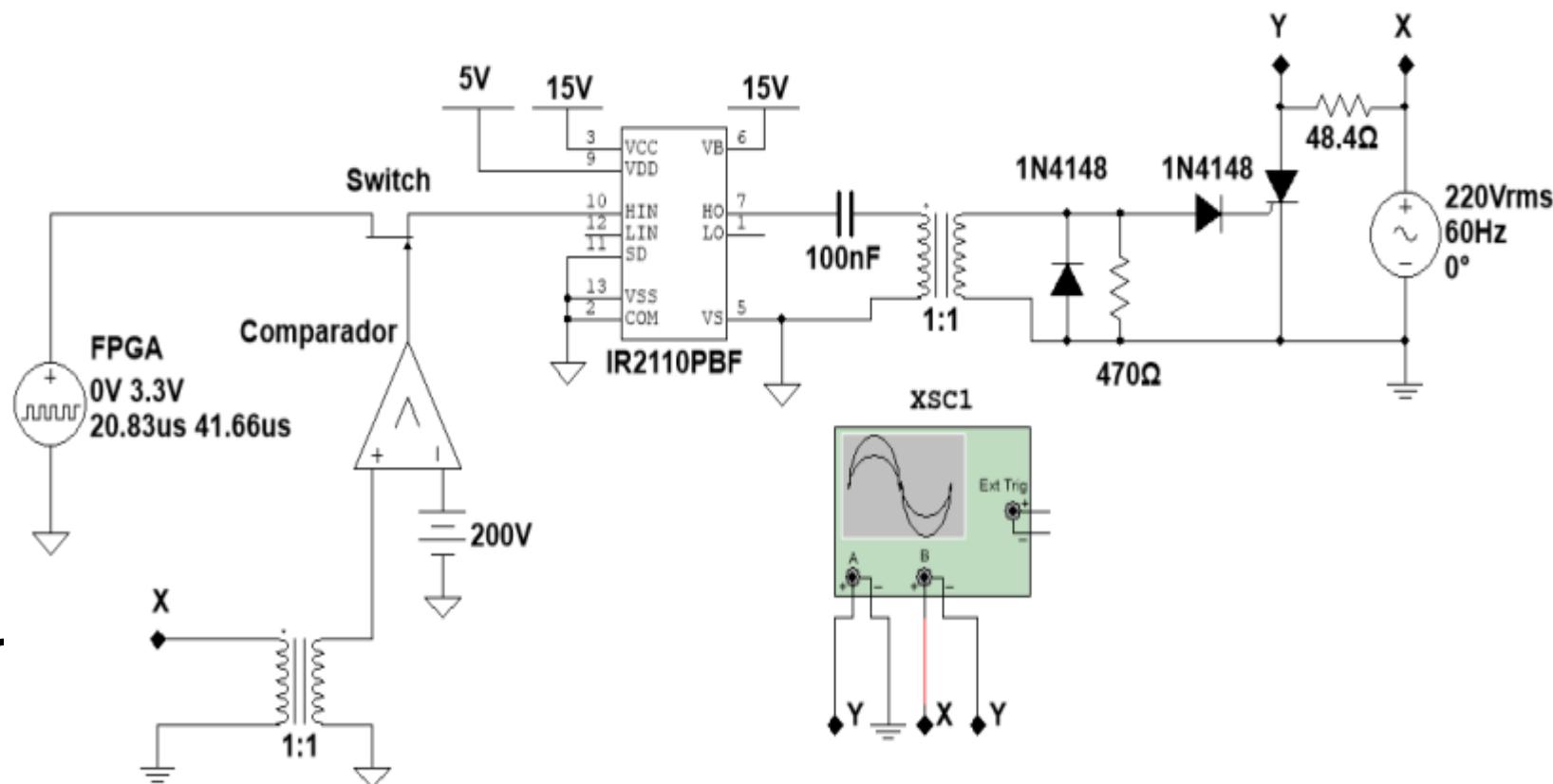
- Detección de cruce por cero de tensión de línea (intersección de tensiones de fase)



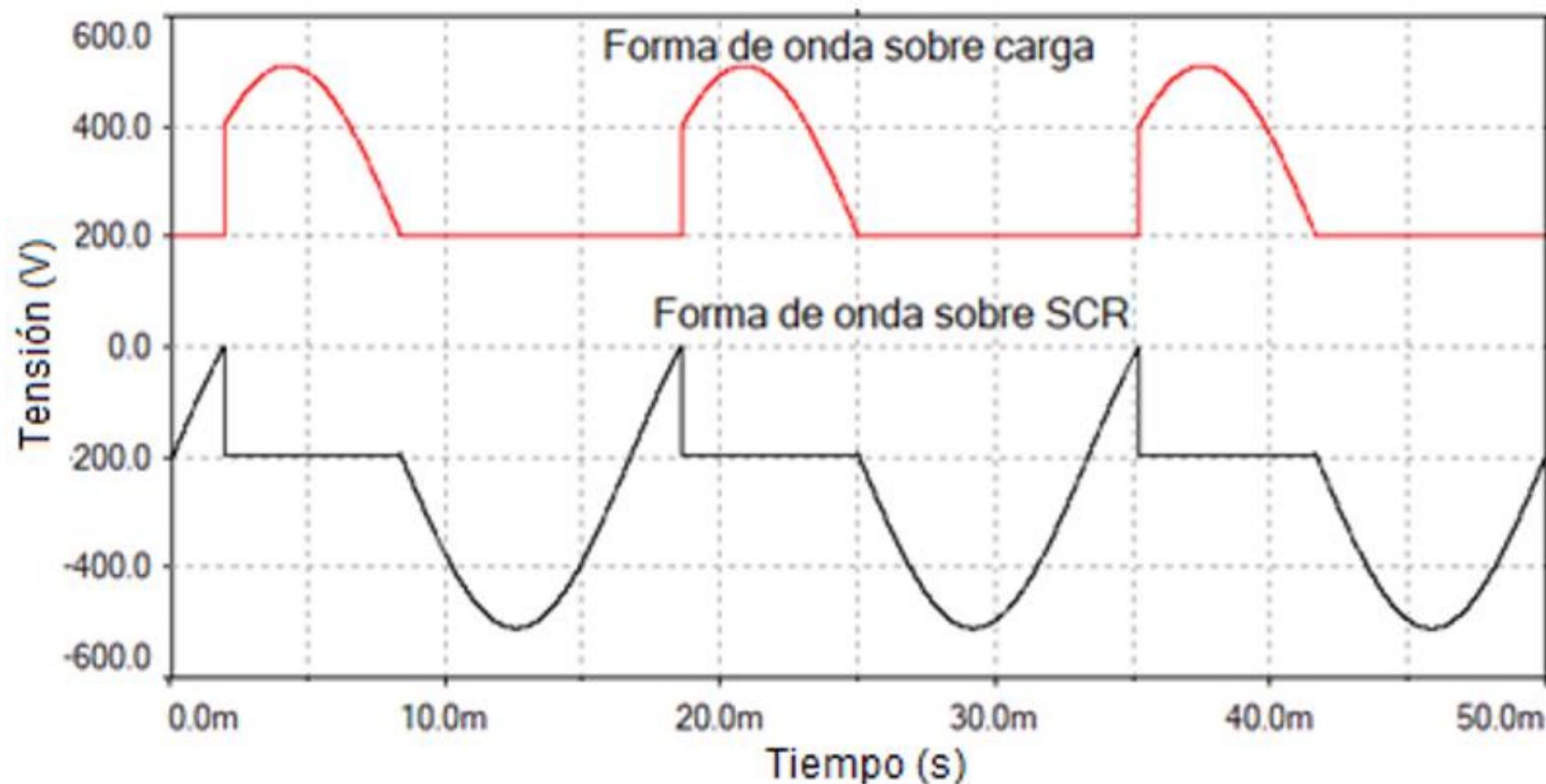


Acondicionamiento de disparo

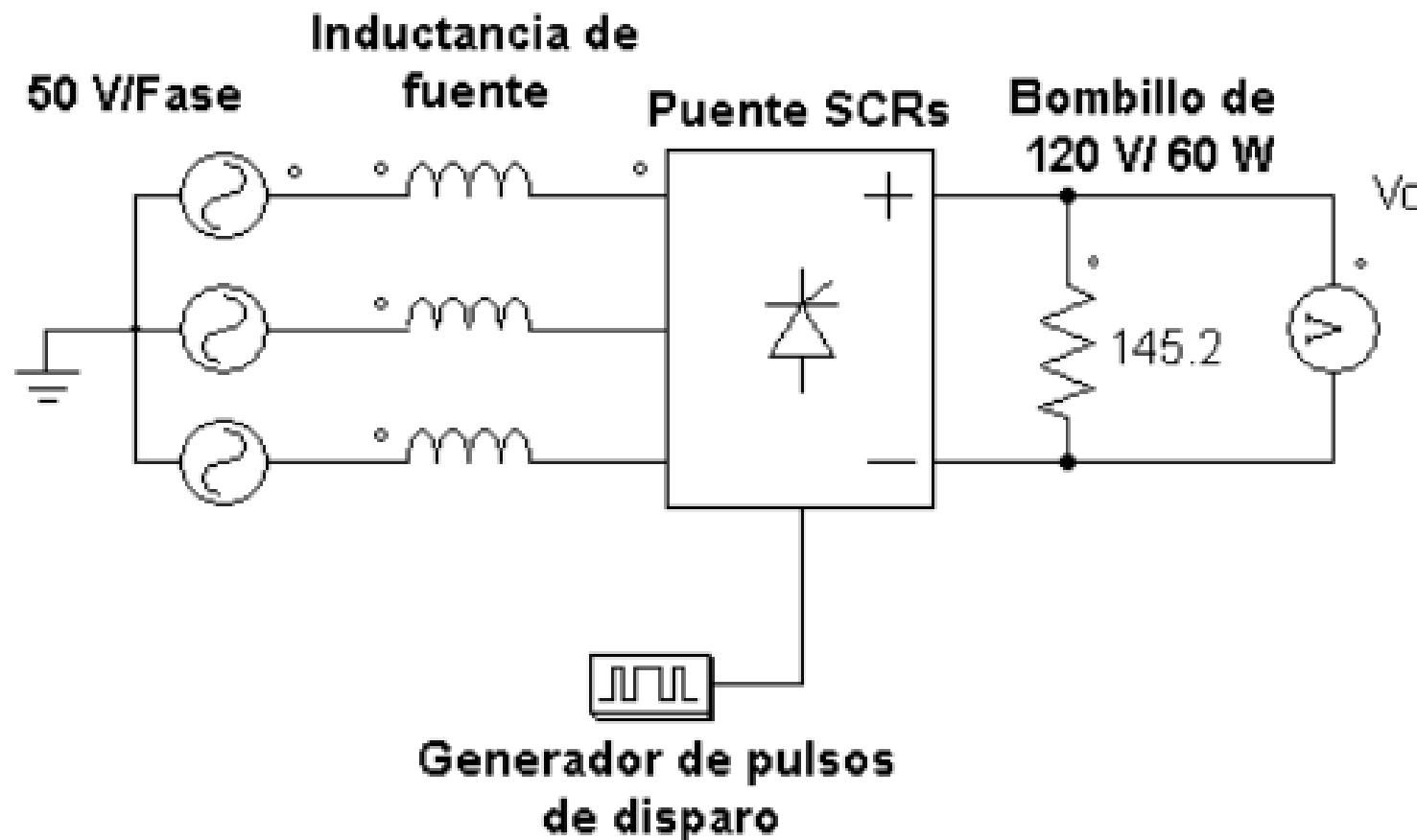
- Fuente de pulsos cuadrados.
- JFET como switch activado al ser la tensión de alimentación mayor a un valor dado



- Bloqueo de flujo de carga hasta el instante deseado.
- Reanudación del bloqueo al ser la tensión de ánodo menor a la de cátodo.

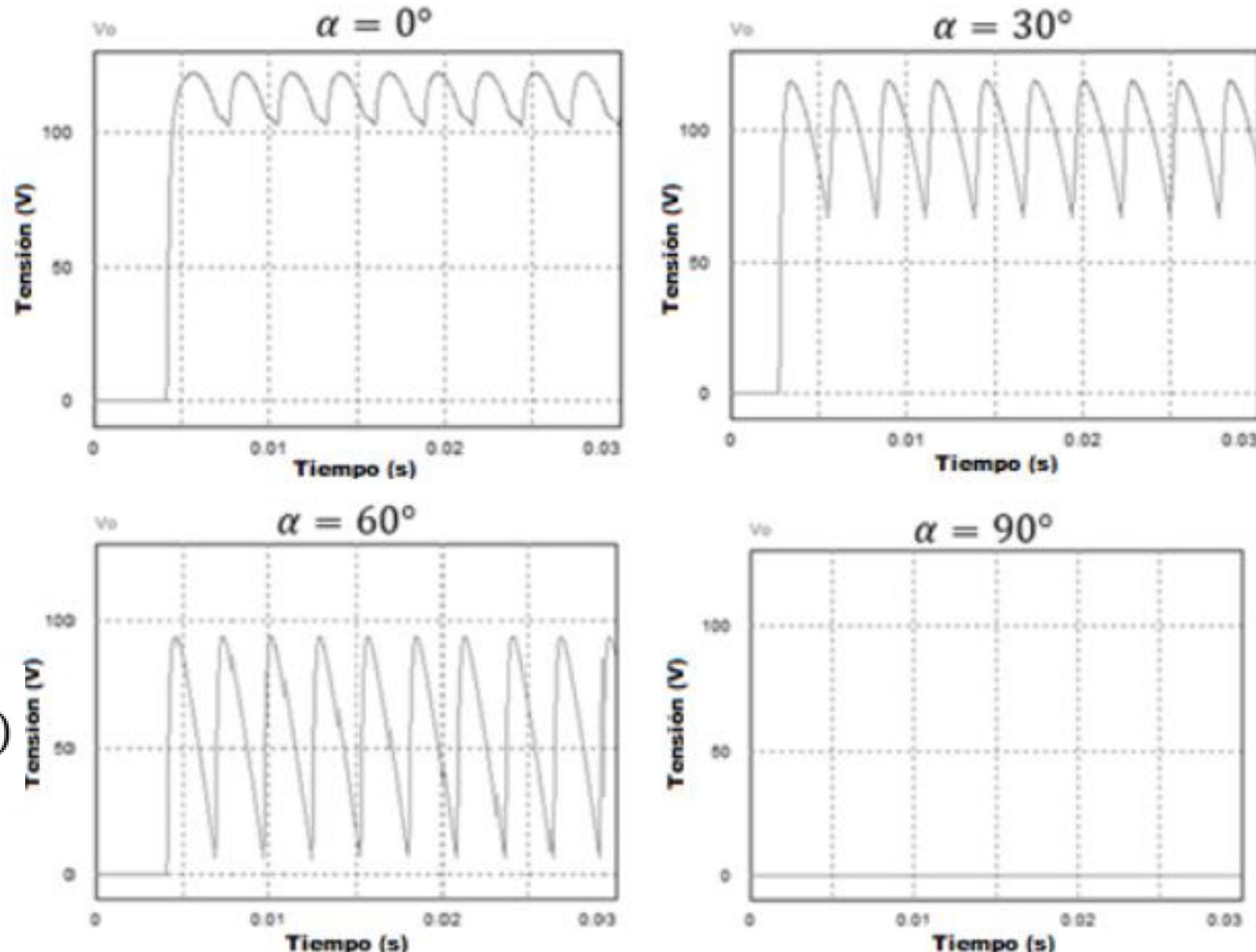


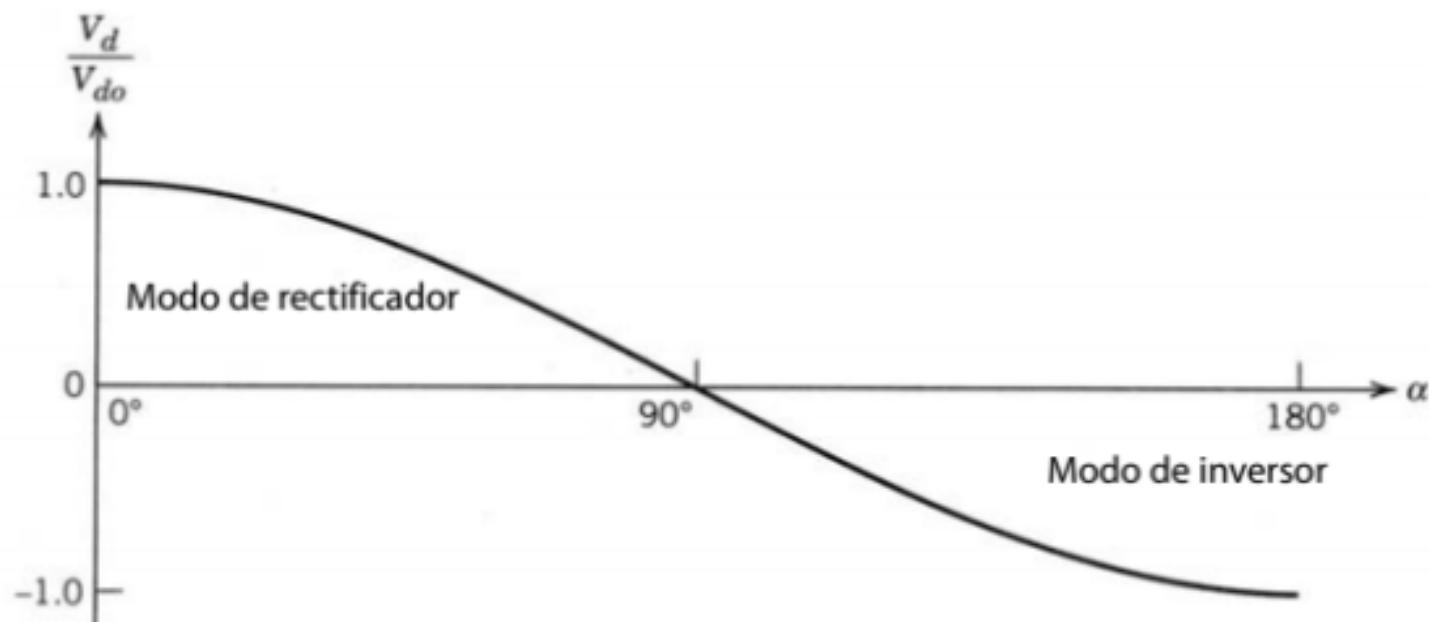
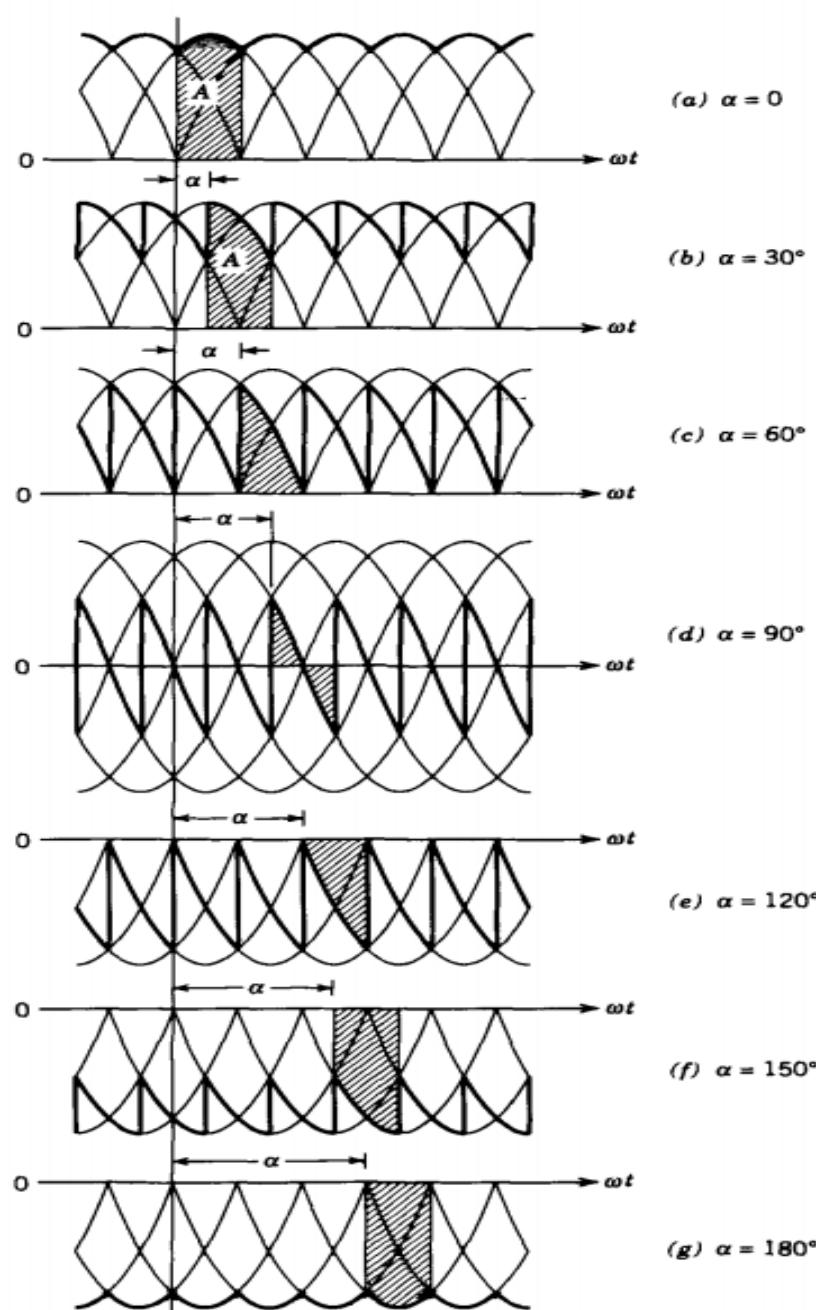
Rectificador controlado por fase a frecuencia de línea



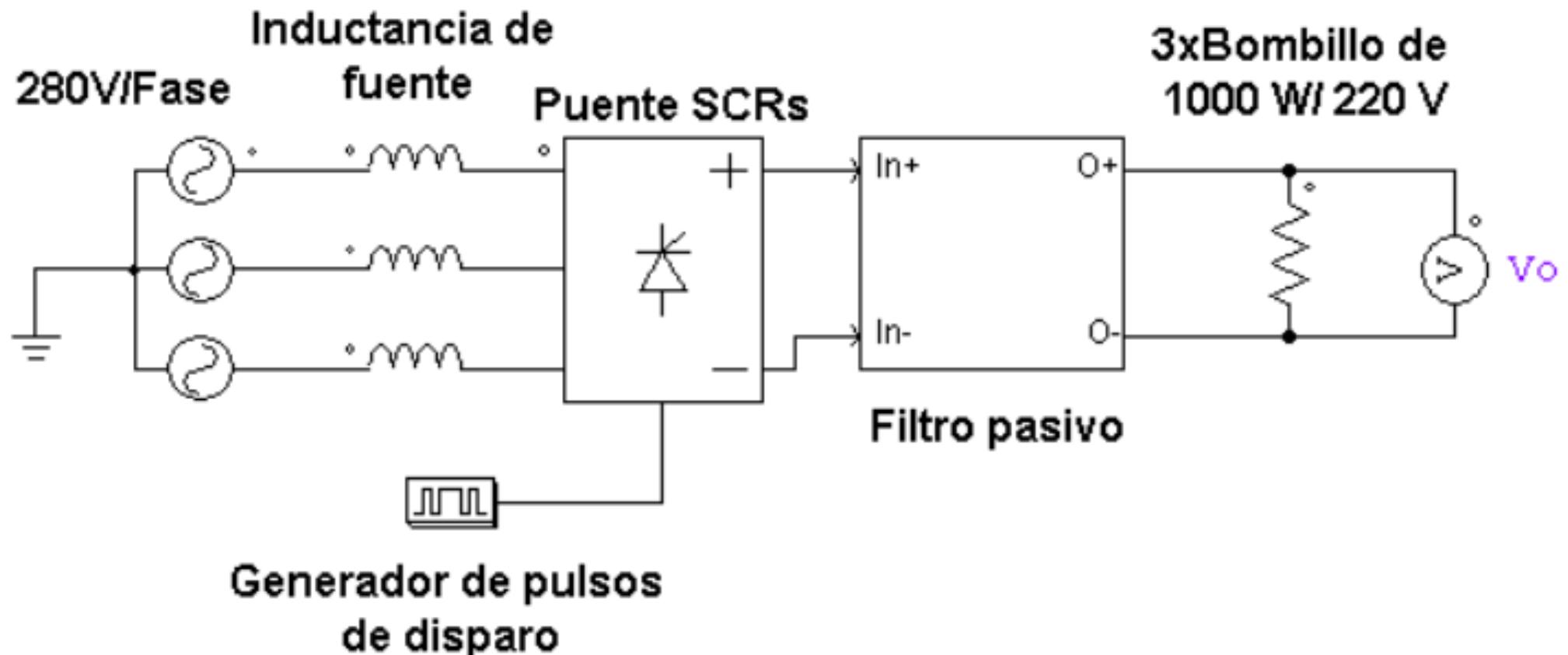
- Al aumentar el ángulo de disparo se disminuye la tensión promedio de salida

$$V_{d\alpha} = 1,35V_{LL}\cos(\alpha) = V_{do}\cos(\alpha)$$

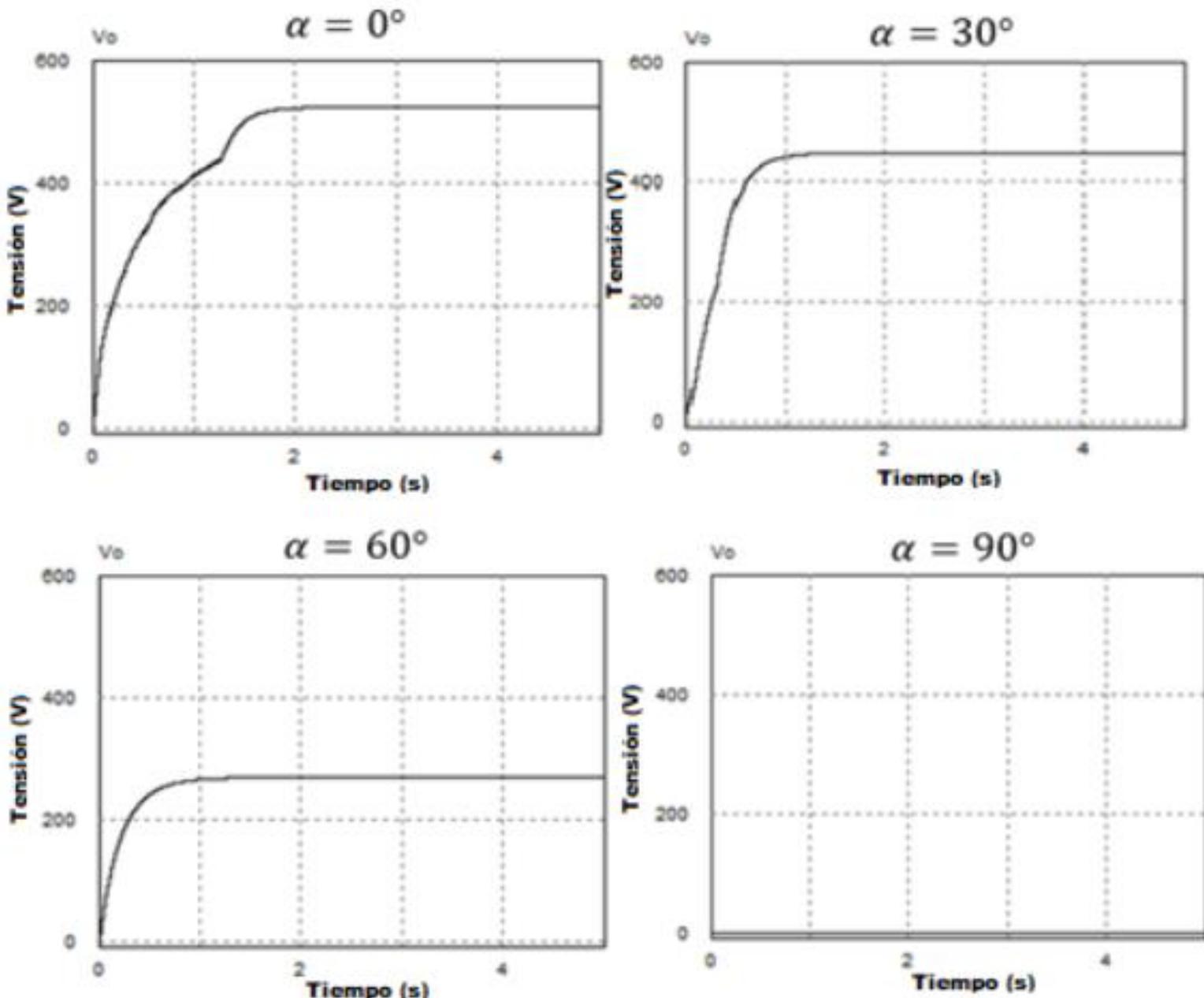




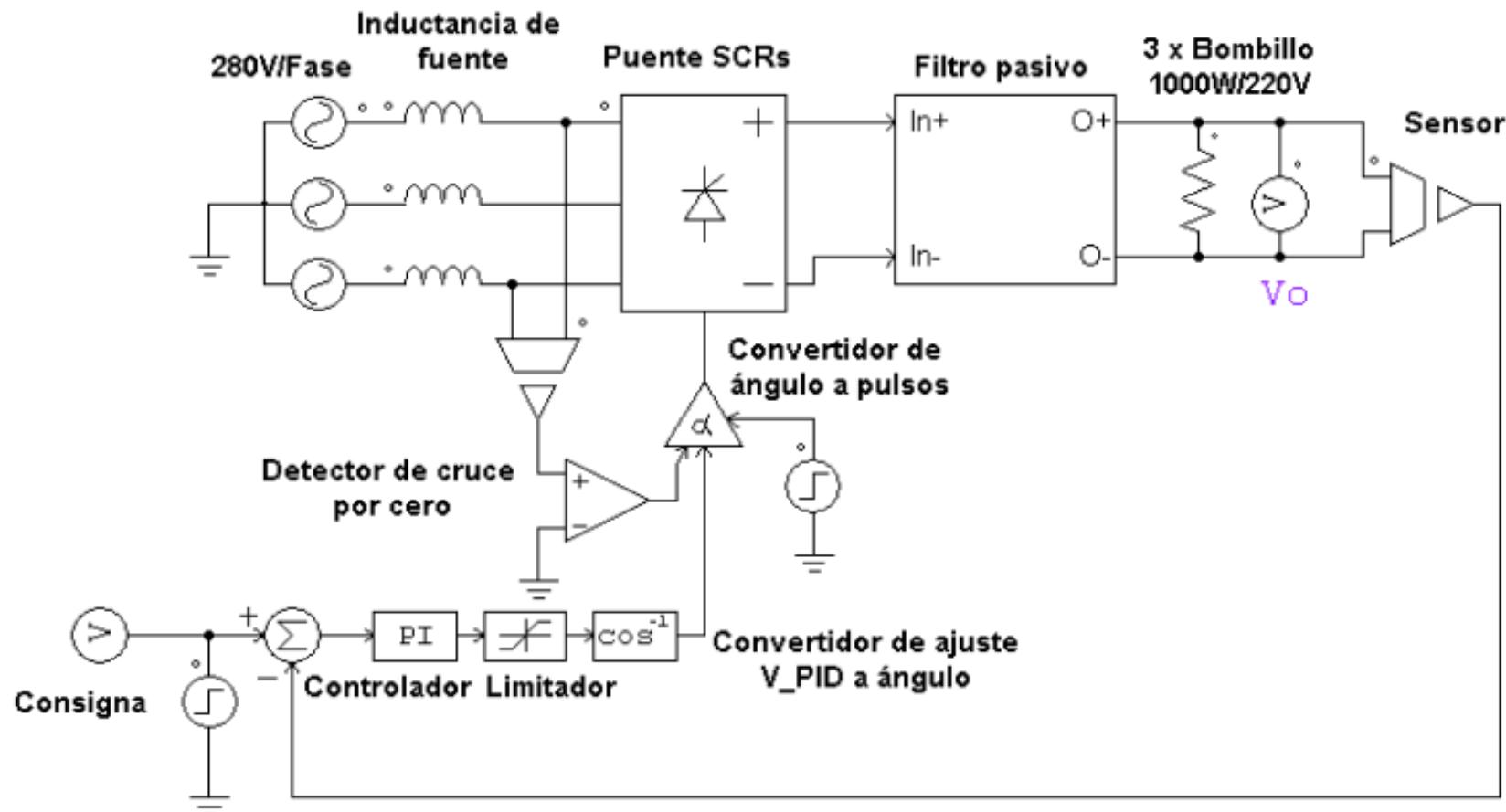
Convertidor CA/CC a lazo abierto



- Eliminación de rizado en la salida
- Tensión en C.C. disminuye al aumentar el ángulo de disparo

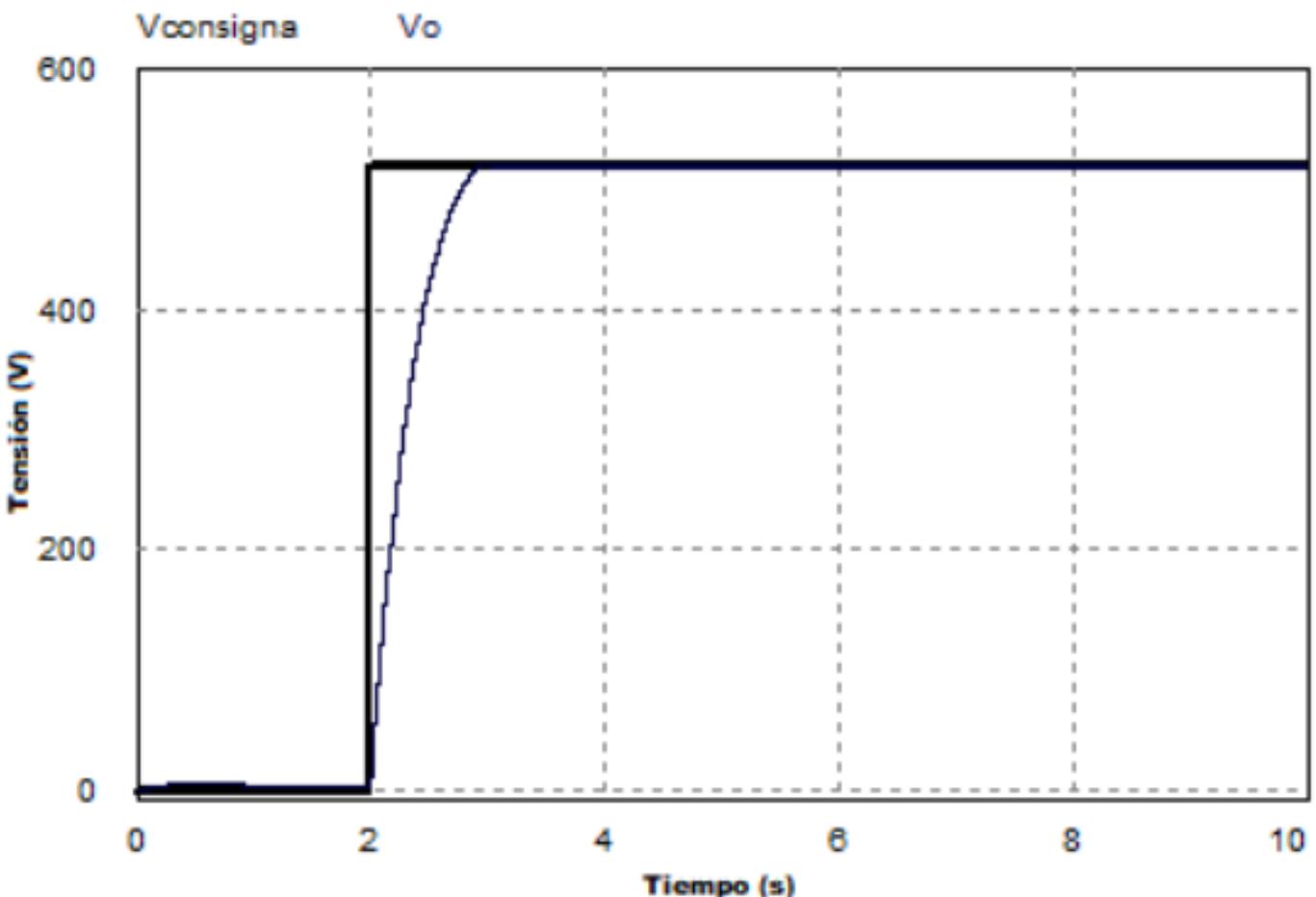


Convertidor CA/CC a lazo cerrado

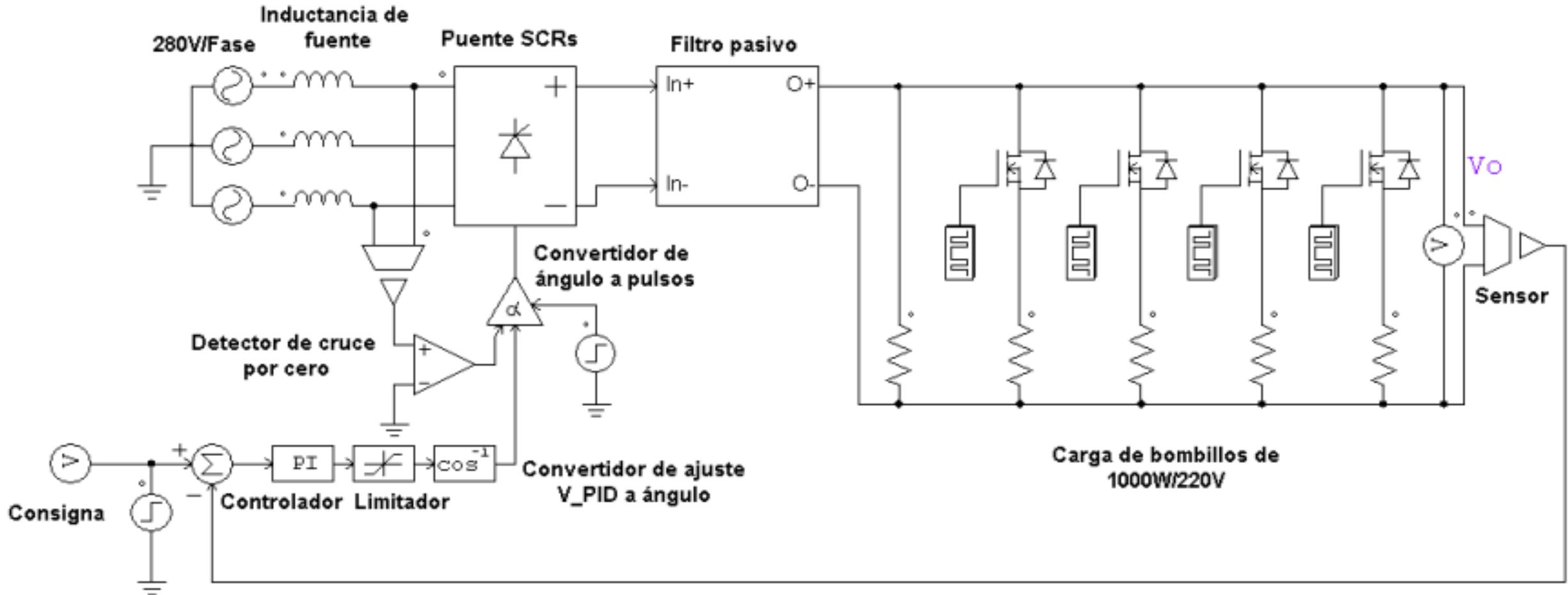


$$\alpha = \arccos \left(\frac{V_{da}}{V_{do}} \right)$$

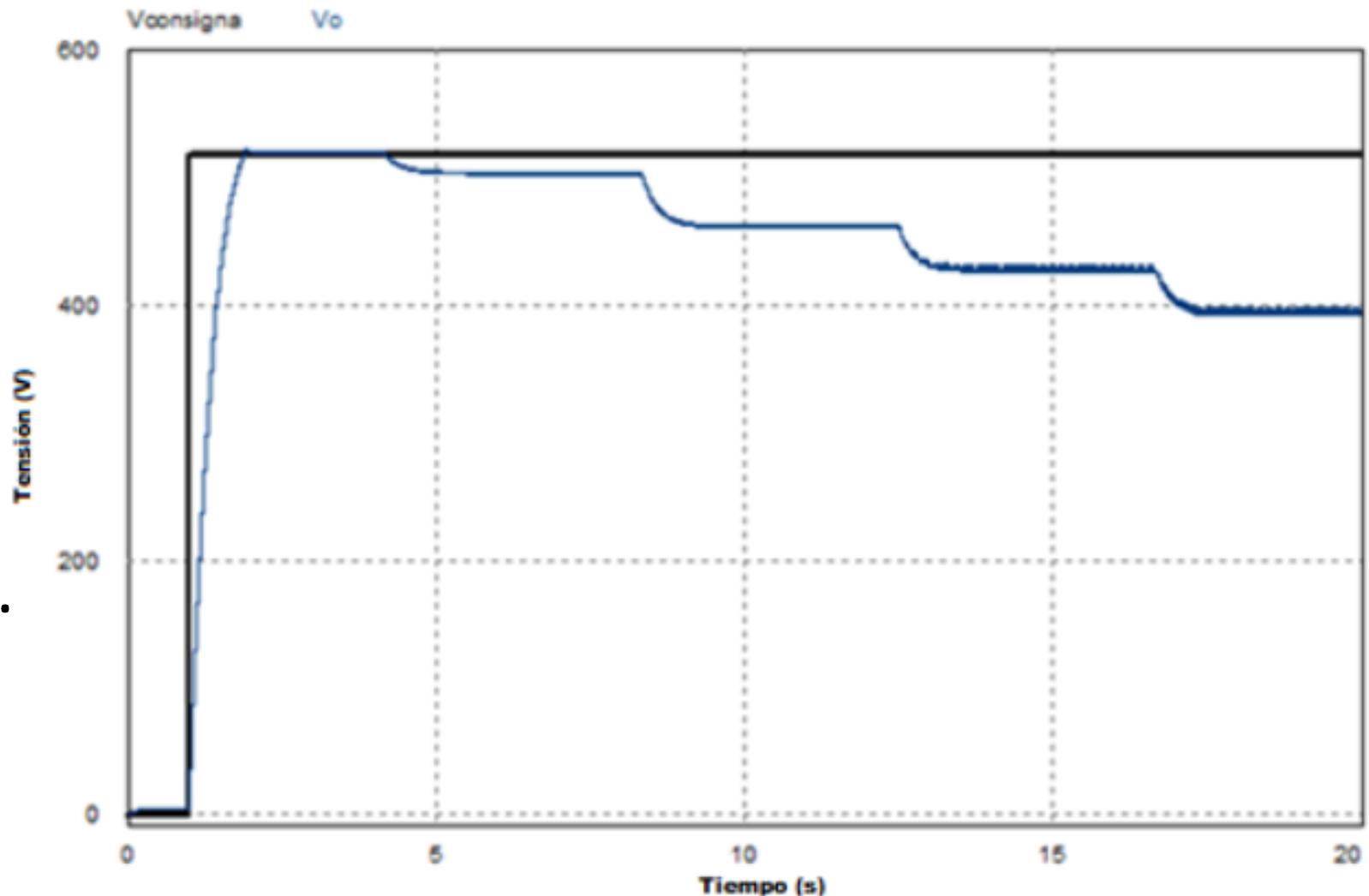
- Respuesta sin error en estado estacionario y sin sobrepicos de tensión



Regulación en convertidor CA/CC a lazo cerrado

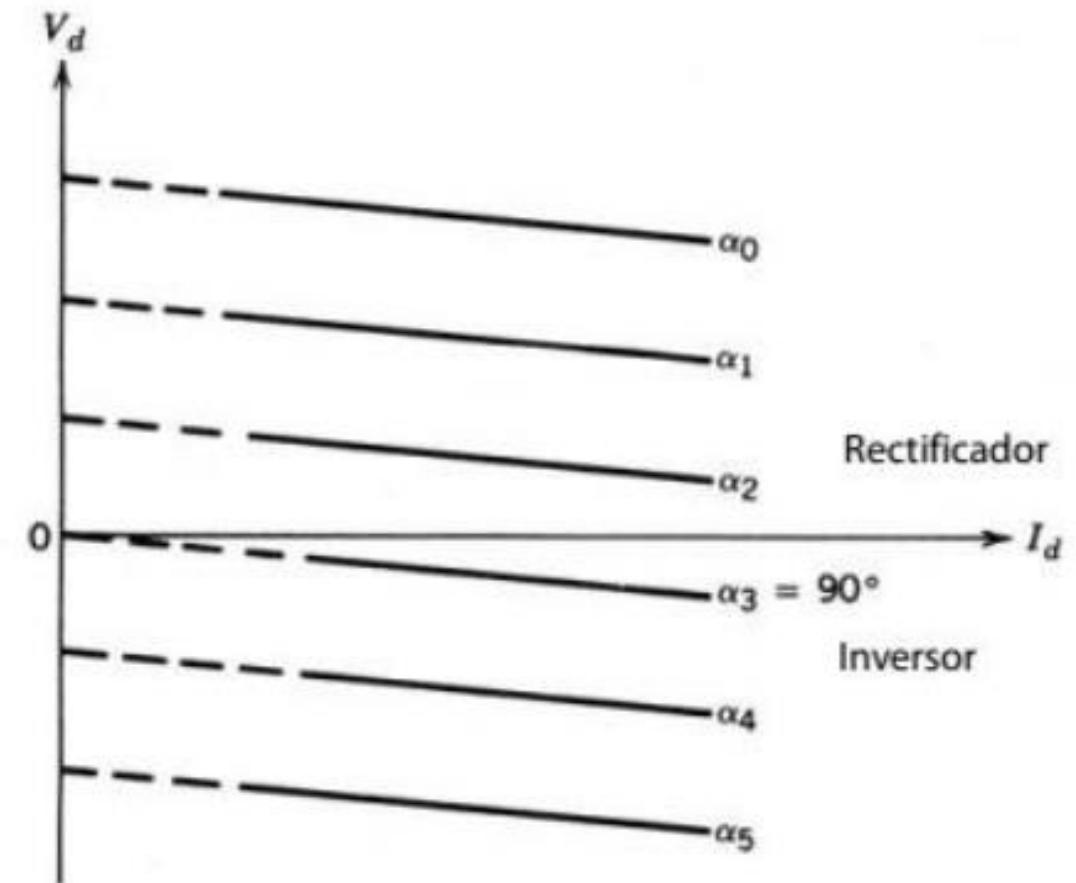


- Disminución de tensión salida a medida que aumenta la carga.

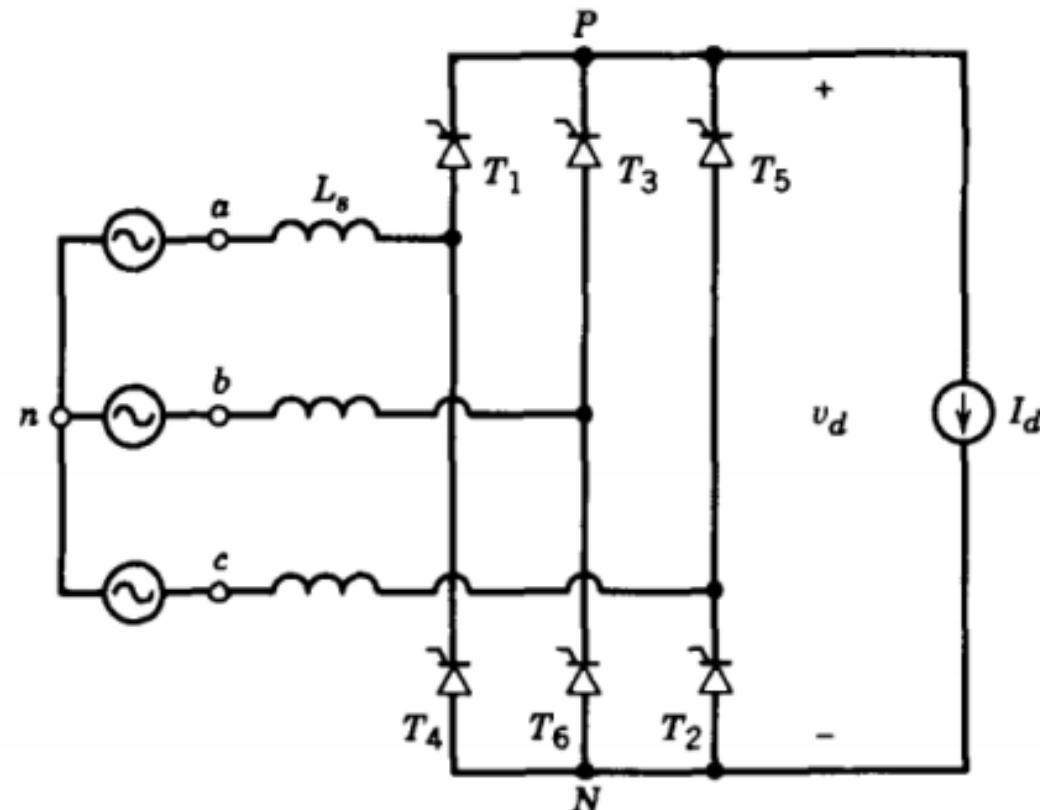


Regulación

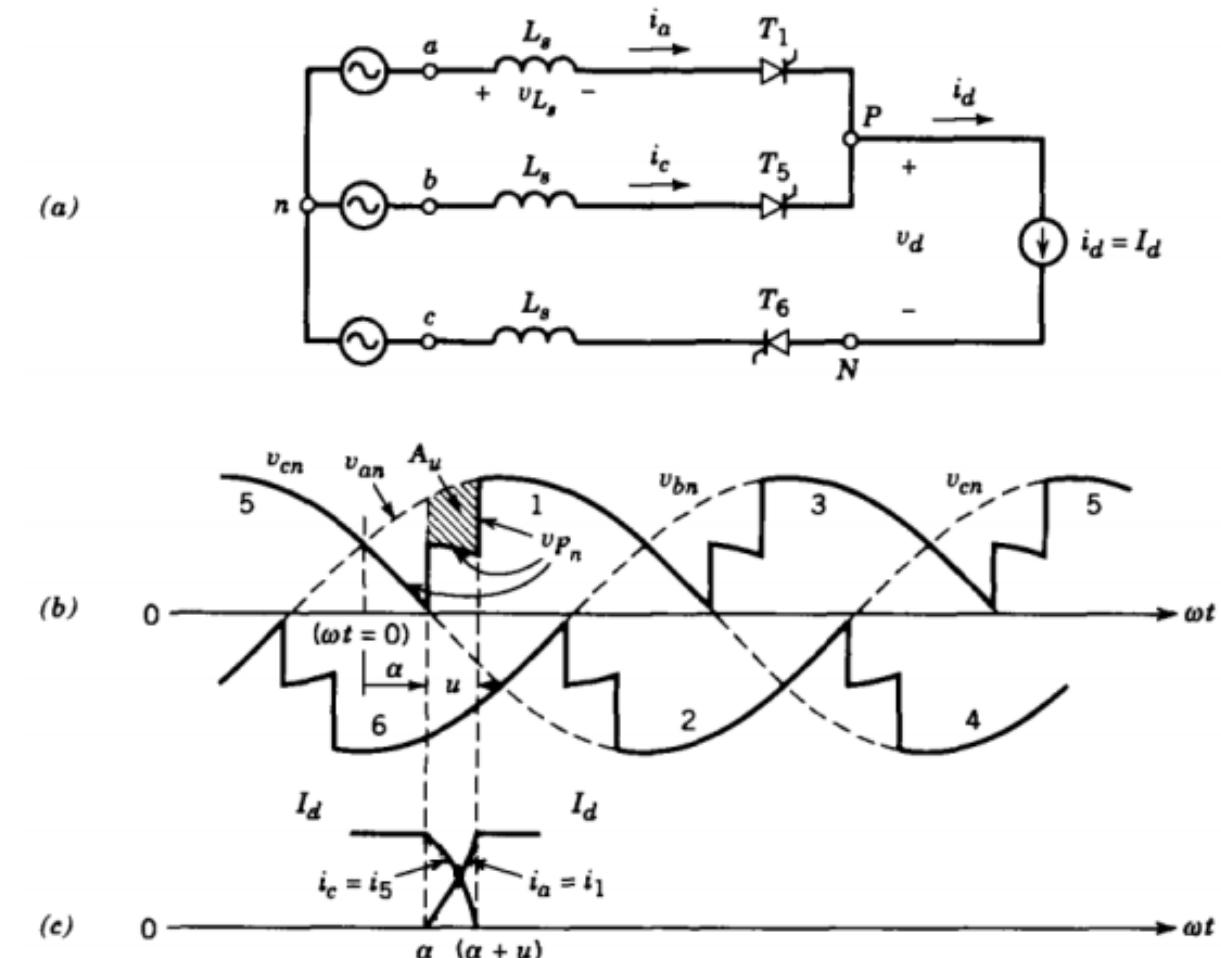
- Para valores bajos de I_d , la regulación es no lineal.
- Al aumentar la corriente de salida la regulación pasa a ser lineal con pendiente negativa.



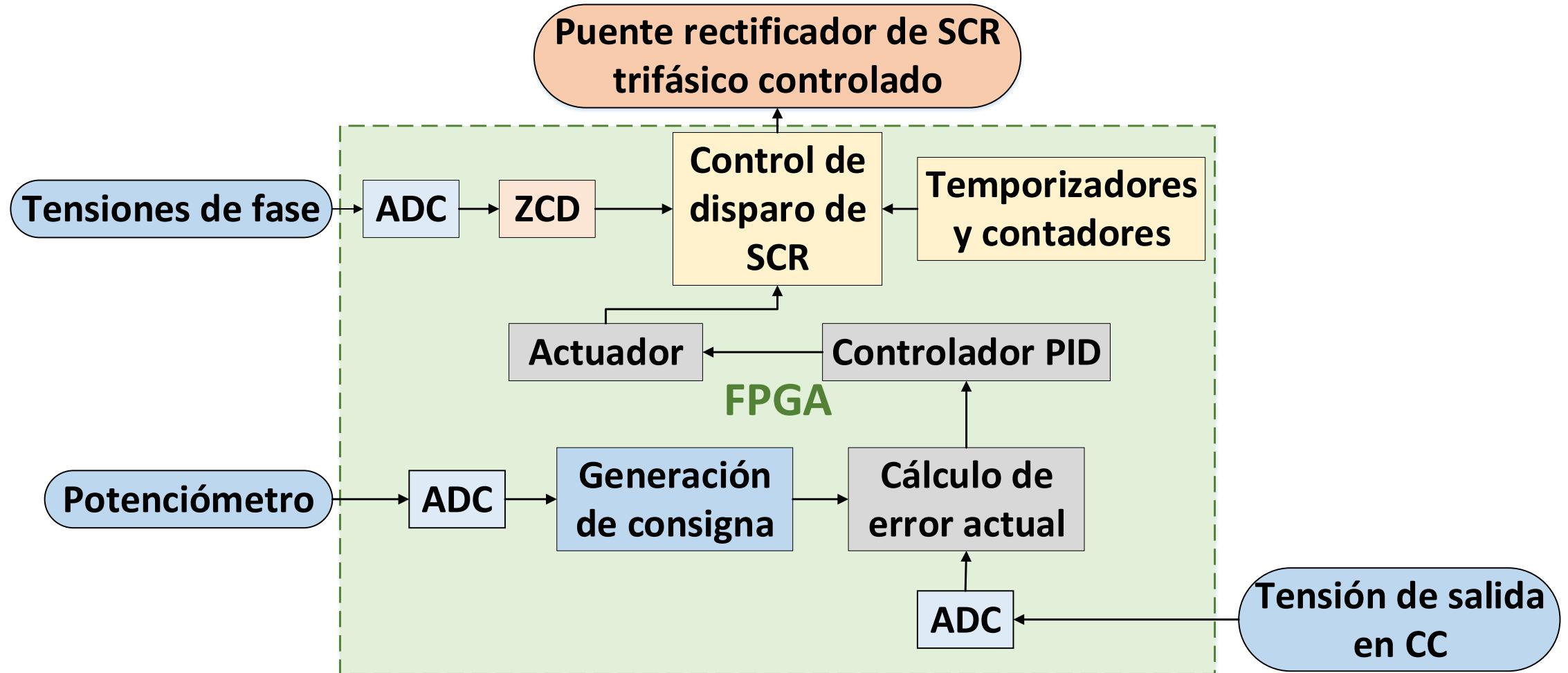
Efecto de inductancia de fuente



$$V_d = 1,35V_{LL} \cos(\alpha) - 6fL_S I_d$$

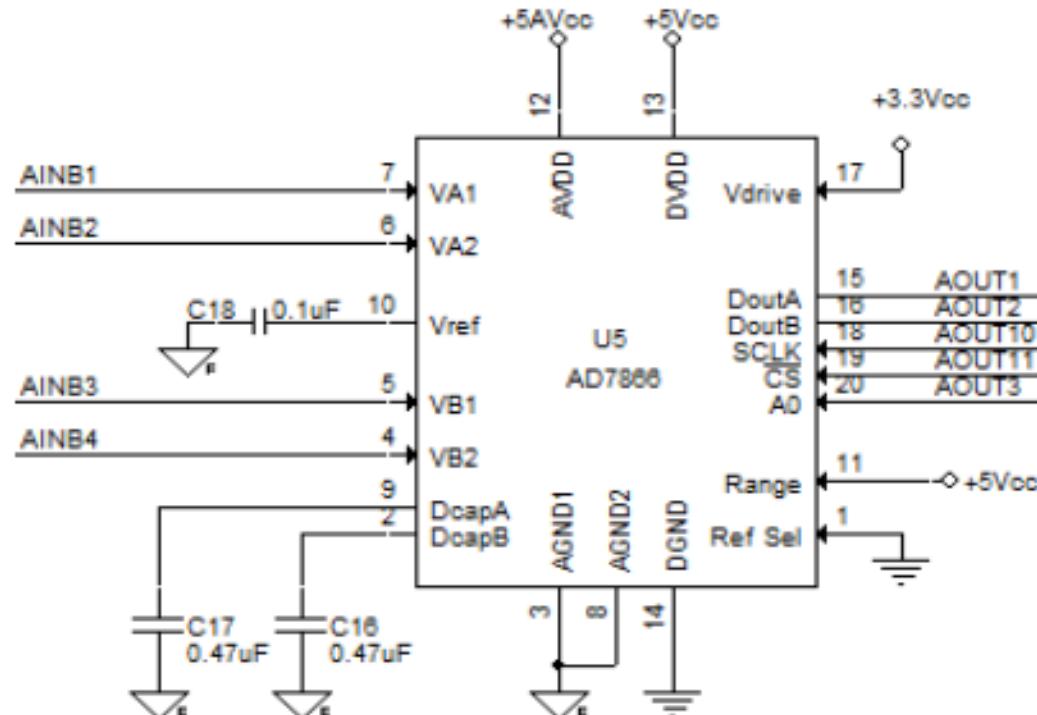


6. Implementación del sistema de control digital con F.P.G.A y V.H.D.L.



Convertidores analógicos a digitales

- 3 ADC AD7866 de Analog Devices
- Resolución de 12 bits
- Tiempo de muestreo de $0,8 \mu\text{s}$

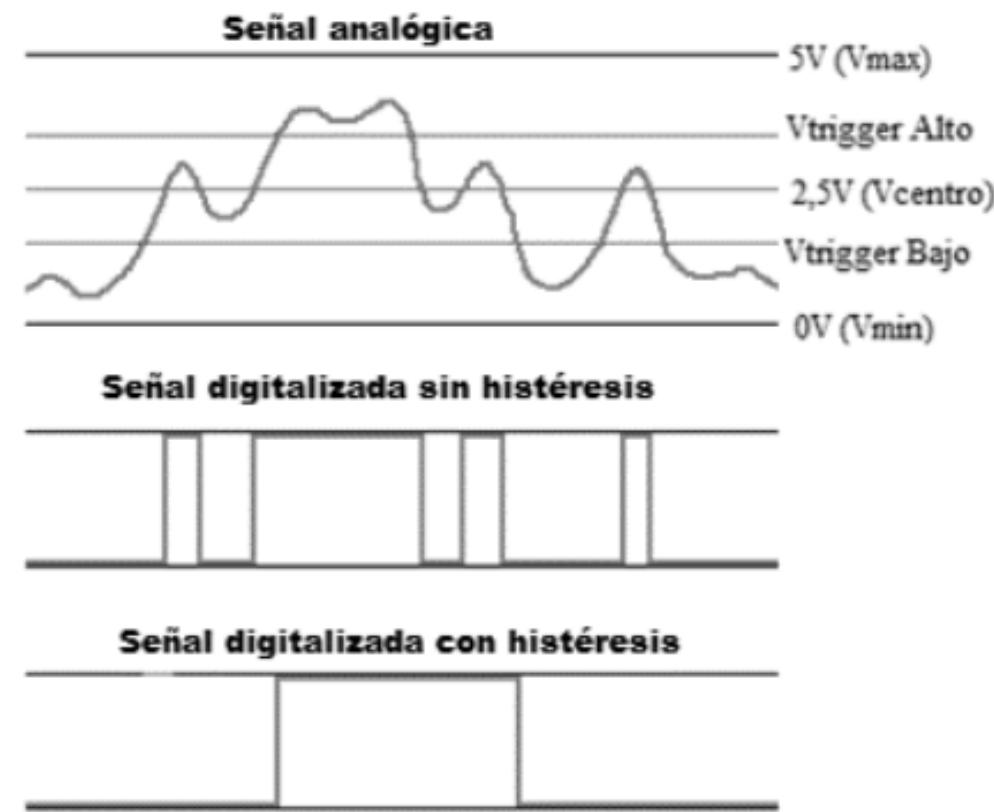


$$T_m = 16 \cdot \frac{1}{f_{SCLK}} = \frac{16}{20000000 \text{ s}^{-1}} = 800 \text{ ns}$$

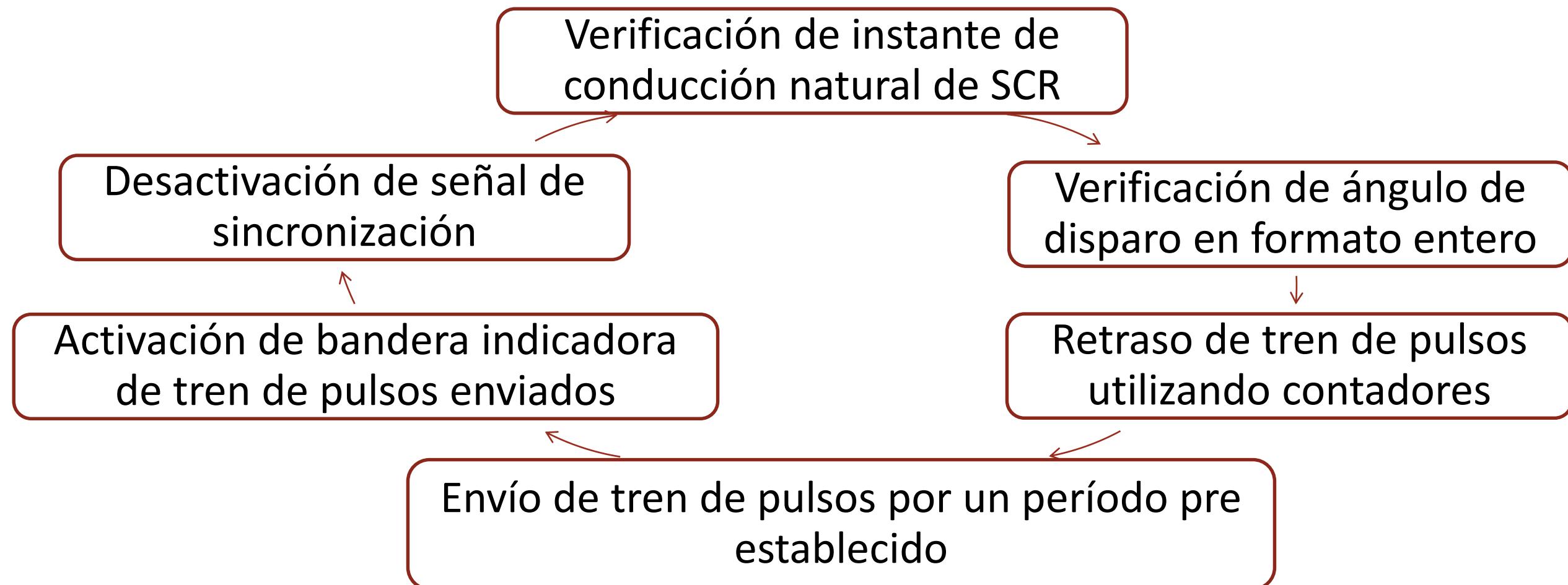
$$\text{Rango} = 0 \text{ a } (2^{12} - 2^0) \Rightarrow 0 \text{ a } 4095$$

Sincronización de disparos

- Uso de las señales equivalentes a las tensiones de fase acondicionadas.
- Condicionales y operaciones con enteros para determinar el instante de conducción natural de cada SCR
- Ciclo de histéresis para evitar ruido indeseado



Control de disparo de SCR



Controlador PID

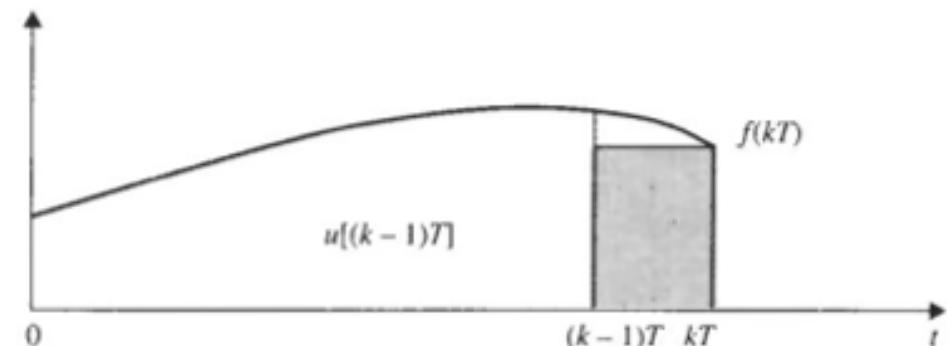
- C. Proporcional: Resta y multiplicación de enteros.
Precisión limitada.

$$V_{PID} = K_P \cdot e(t) + K_I \int e(t)dt + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

$$e(t) = V_i - V_o$$

$$u(kT) = u[(k-1)T] + T f(kT)$$

- C. Integral: Integración rectangular hacia adelante.



- C. Derivativa: regla de diferencia hacia atrás.

$$\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=kT} = \frac{f(kT) - f[(k-1)T]}{T}$$

Escalamiento de componentes

- Operaciones matemáticas limitadas a números enteros

$$V_{PID} = \frac{K_{esc}}{K_{esc}} \left(K_P e(kT) + K_I e_{acum}(kT) + K_D \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \right)$$
$$V_{PID} = \frac{\left(K_P K_{esc} e(kT) + K_I K_{esc} e_{acum}(kT) + K_D K_{esc} \left(\frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \right) \right)}{K_{esc}}$$

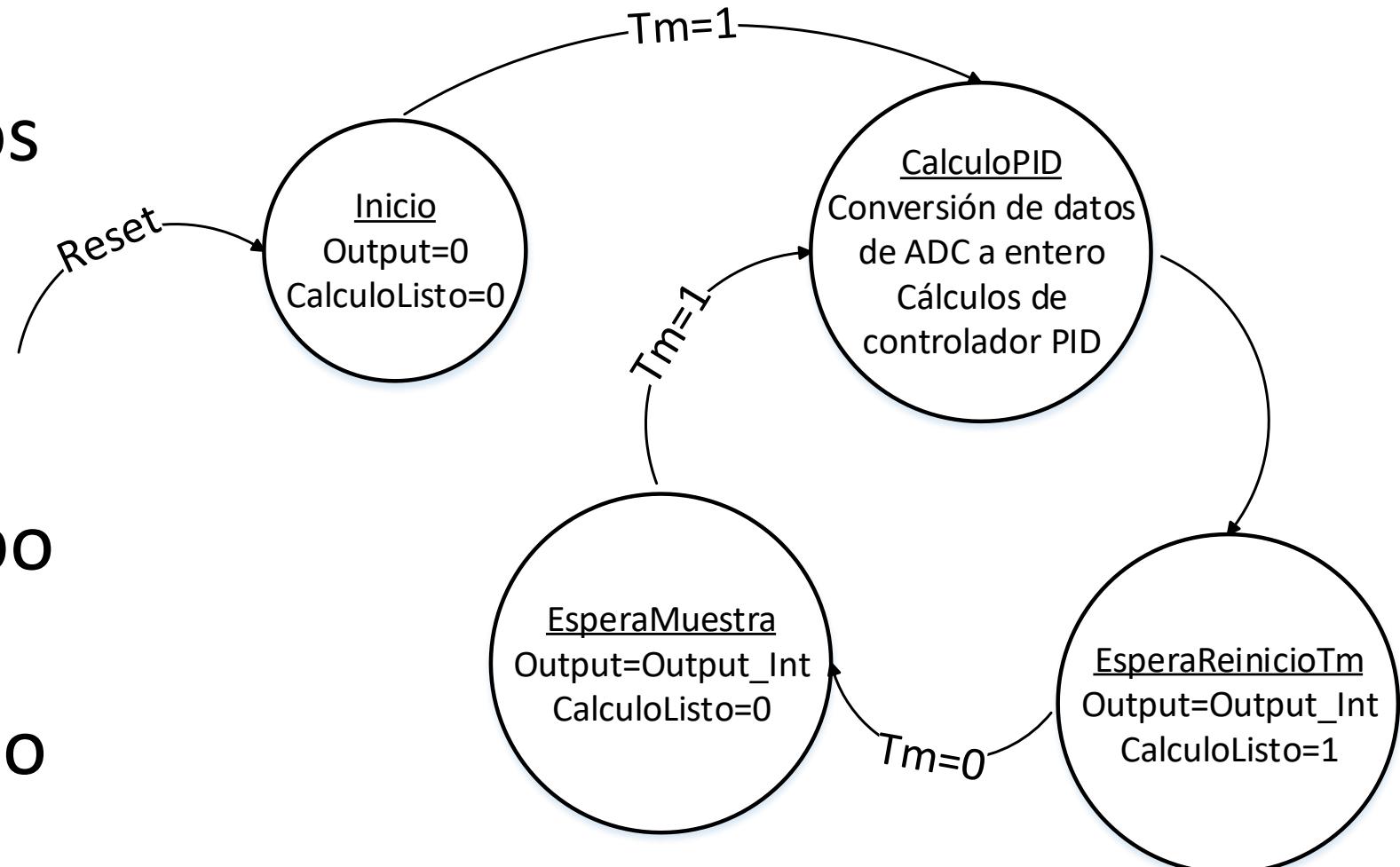
- También conocida como representación de coma fija.

$$V_{PID} = \frac{\left(K_P' e(kT) + K_I' e_{acum}(kT) + K_D' \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} \right)}{K_{esc}}$$

$$K_x = \frac{K_x'}{K_{esc}}$$

Tiempo de muestreo

- Máquina de estados para realizar operaciones del controlador PID en intervalos de tiempo equivalentes al tiempo de muestreo



Tiempo de muestreo

$$V_{PID} = \frac{(K_P'e(kT) + K_I''e_{acum}'(kT) + K_D''(e(kT) - e[(k-1)T]))}{K_{esc}}$$

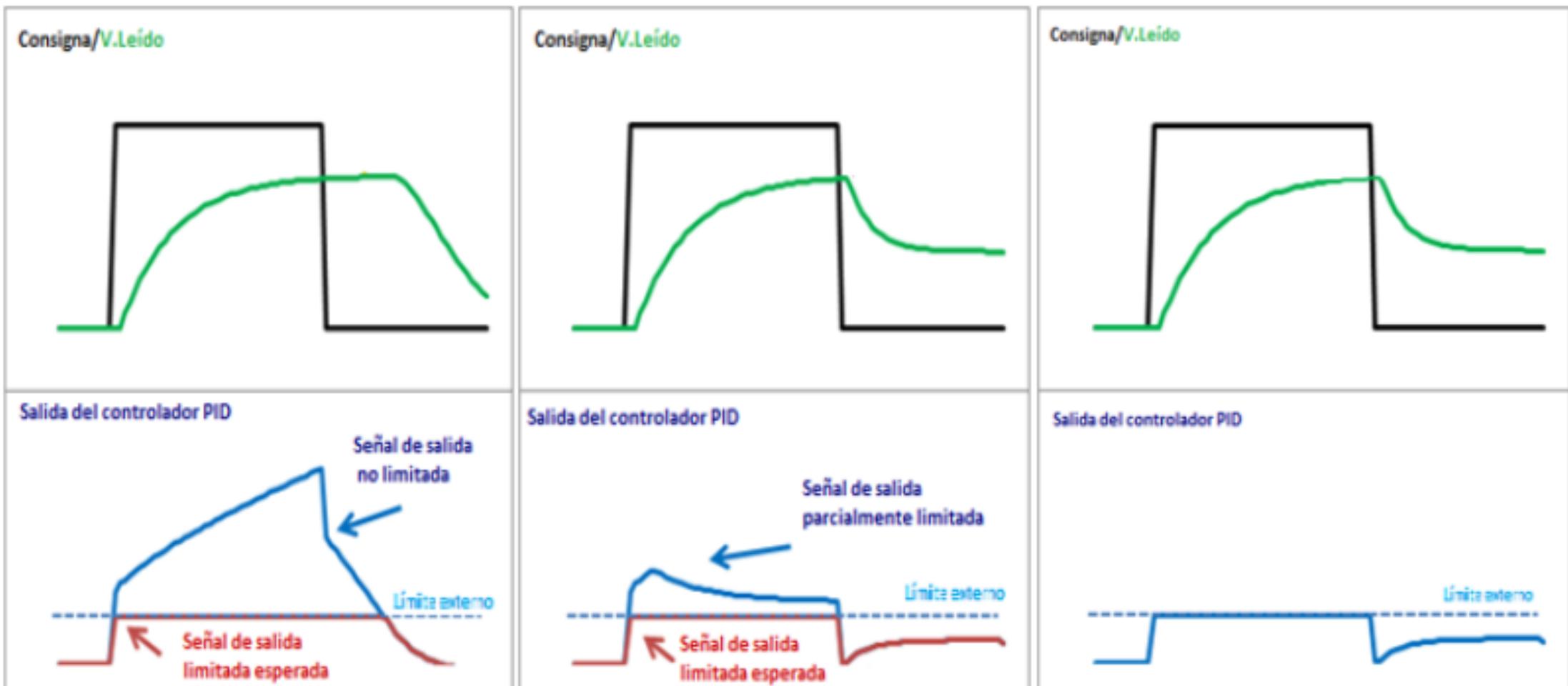
- Simplificación de ecuación PID a sumas y restas

$$K_I'' = K_I'T = K_I'T_m$$

$$K_D'' = \frac{K_D'}{T} = \frac{K_D'}{T_m}$$

$$e'_{acum}(kT) = e'_{acum}((k-1)T) + e(kT)$$

Limitadores



Actuador

Valor de ajuste
calculado por
el controlador
PID



Ángulo de
retraso de
disparo



Conteo de
flancos de
retraso de
disparo

Digitalización de variables analógicas

- Conversión de valores de tensión analógicos a equivalente entero digital:

$$Rango_{ADC} = 0 \text{ a } 4095$$

$$V_{ADC_{max}} = 5 \text{ V}$$

$$V_{o_{int}} = 4095 \frac{V_o}{V_{o_{max}}} \quad Precisión_{V_o} = \frac{V_{o_{max}}}{4095}$$

- Rango de lectura de tensión de salida tomando en cuenta sobrepicos de tensión:

$$V_{o_{max}} = V_{d\alpha_{max}} + V_{d\alpha_{max}}SP = V_{d\alpha_{max}}(1 + SP)$$

$$V_{o_{max}} = 1,35V_{LL}(1 + SP)$$

Digitalización de variables analógicas

- Limitación de rango de consigna a rango de valores teóricos máximos y mínimos:

$$Rango\ util_{V_{i_{int}}} = 0 \text{ a } 4095 \frac{V_{d\alpha_{max}}}{V_{o_{max}}} = 0 \text{ a } 4095 \frac{1,35V_{LL}}{1,35V_{LL}(1 + SP)}$$

$$Rango\ util_{V_{i_{int}}} = 0 \text{ a } \frac{4095}{1 + SP}$$

Conversión de señal de ajuste

- Ángulo de disparo en función de tensión de salida/consigna:

$$V_{d\alpha} = 1,35V_{LL}\cos(\alpha) = V_{do}\cos(\alpha) \rightarrow \alpha = \arccos\left(\frac{V_{d\alpha}}{1,35V_{LL}}\right) = \arccos\left(\frac{V_o}{1,35V_{LL}}\right)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_{PID_V}}{1,35V_{LL}}\right)$$

Conversión de señal de ajuste

- Sustitución de variable independiente y digitalización en formato entero:

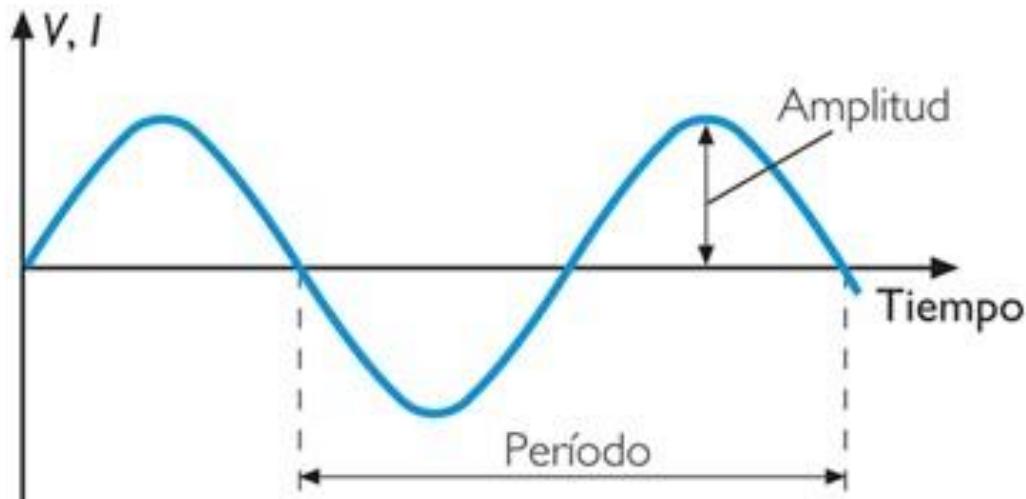
$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_{PID_V}}{1,35V_{LL}}\right) = \arccos\left(\frac{V_{PID_V}}{V_{do}}\right) = \arccos\left(\frac{V_{PID_{int}}}{4095 \frac{V_{do}}{V_{do_{max}}}}\right)$$

$$\alpha = \arccos\left(\frac{V_{PID_{int}}}{\left(\frac{V_{do}}{Precisión_{V_o}}\right)}\right)$$

Conversión de señal de ajuste

- Equivalencia ángulo-tiempo:

$$v_{(t)} = \sqrt{2}V_{RMS} \sin(\omega t) = \sqrt{2}V_{RMS} \sin(2\pi f t) \quad \alpha = \omega t_{retraso} = 2\pi f t_{retraso}$$



$$t_{retraso} = \frac{\alpha}{2\pi f}$$
$$arccos \left(\frac{V_{PID_{int}}}{\left(\frac{V_{do}}{Precisión_{V_o}} \right)} \right)$$
$$t_{retraso} = \frac{arccos \left(\frac{V_{PID_{int}}}{\left(\frac{V_{do}}{Precisión_{V_o}} \right)} \right)}{2\pi f}$$

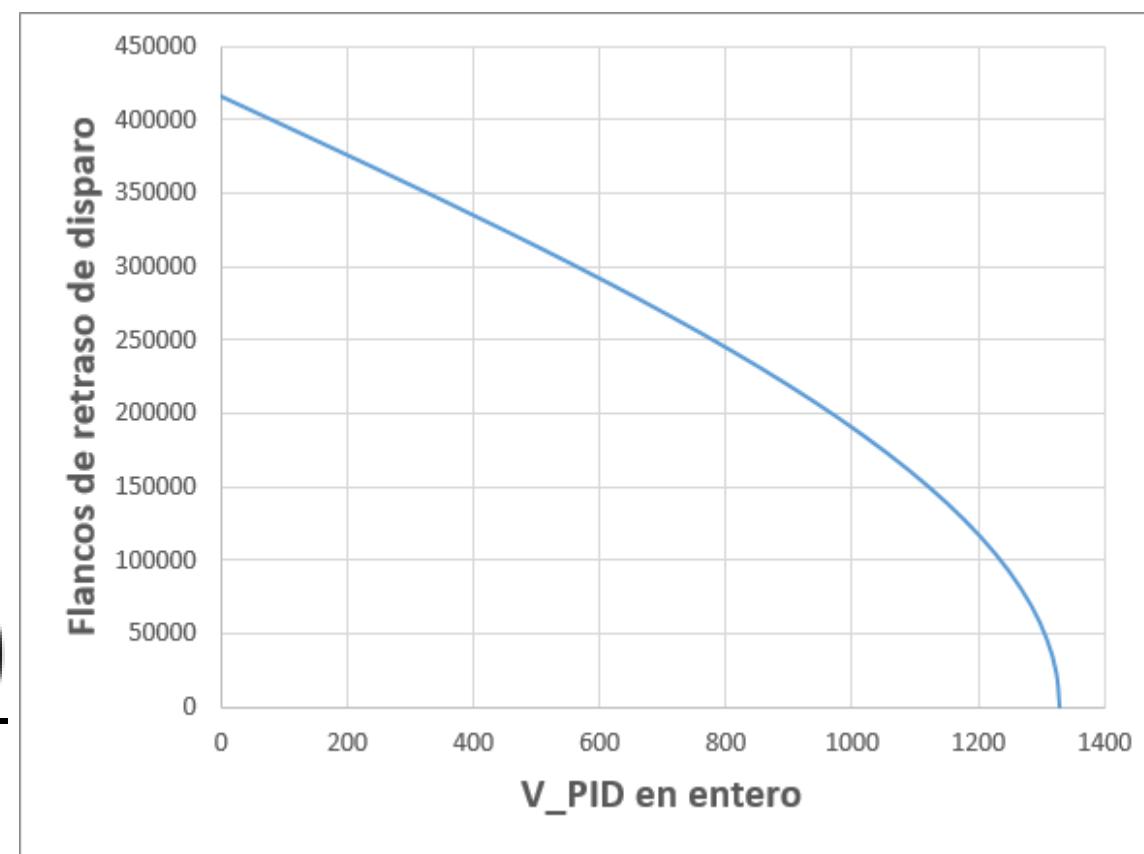
Conversión de señal de ajuste

- Equivalencia tiempo-flancos de señal de reloj de 100 MHz:

$$Flancos_{\alpha-\text{retraso}} = t_{\text{retraso}} \frac{1 \text{ flanco}}{10 \cdot 10^{-9} \text{ s}} = t_{\text{retraso}} \cdot 100 \cdot 10^6$$

$$Flancos_{\alpha-\text{retraso}} = 100 \cdot 10^6 \arccos \left(\frac{V_{PID_{int}}}{\left(\frac{V_{do}}{\text{Precisión}_{V_o}} \right)} \right)$$

$$Flancos_{\alpha-\text{retraso}} = 100 \cdot 10^6 \arccos \left(\frac{V_{PID_{int}}(1 + SP)}{4095} \right)$$



Conversión de señal de ajuste

Algoritmo capaz de realizar operaciones trigonométricas necesarias

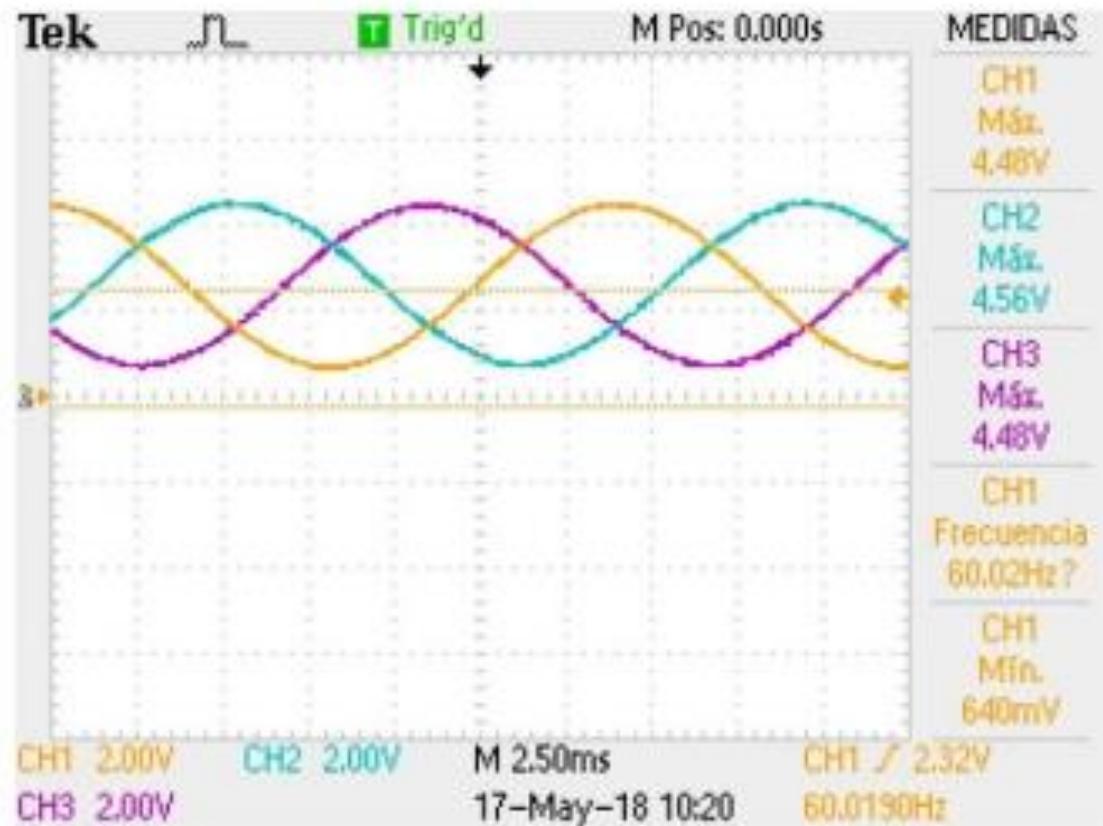
Tabla de consulta según posibles resultados utilizando enteros como variable independiente

Aproximación lineal por tramos

Análisis e interpretación de resultados

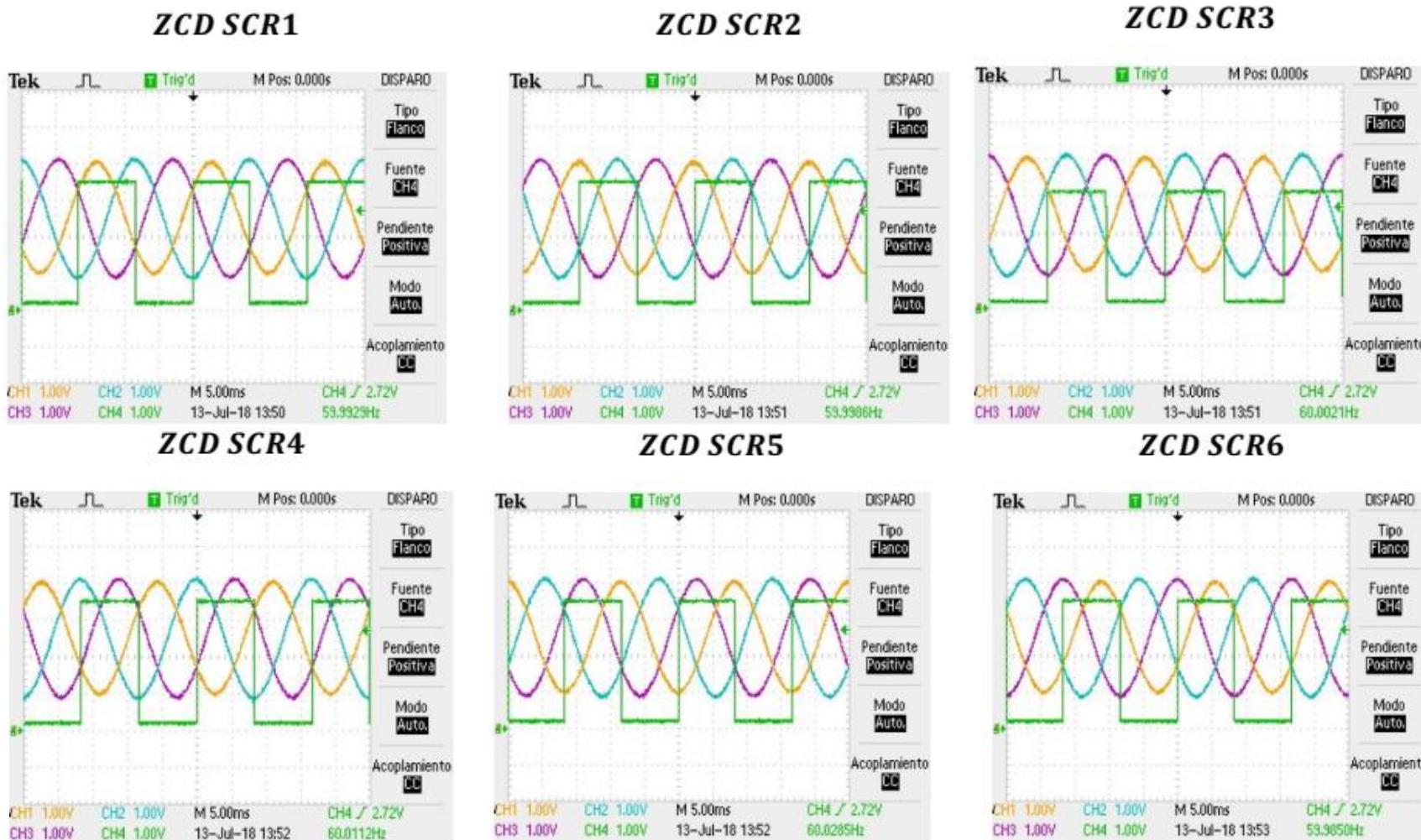
Acondicionamiento de señales de alimentación

- Señales equivalentes a tensiones de fase atenuadas, aisladas y unipolares a ser leídas por los ADCs.



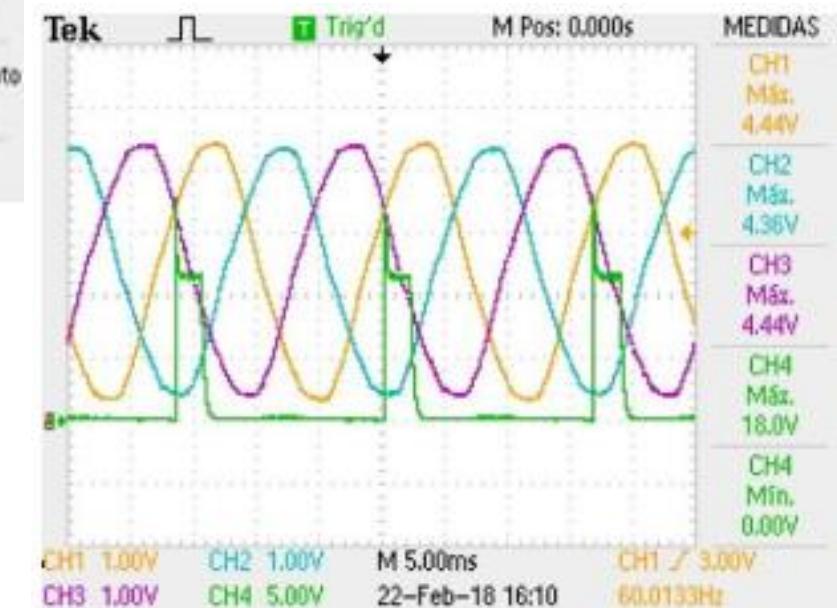
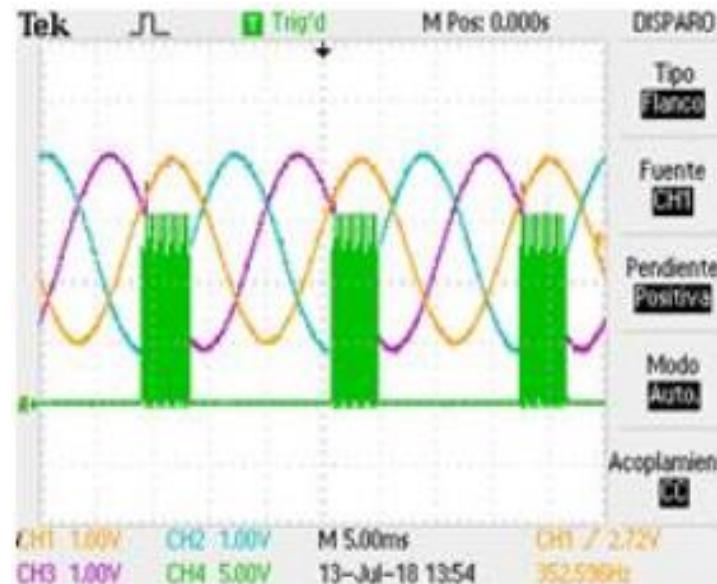
Sincronización de pulsos de disparo

- Registro de instantes de conducción natural de cada SCR



Acondicionamiento de pulsos de disparo

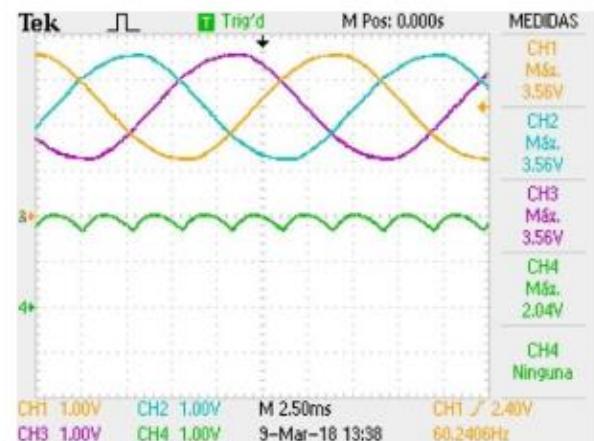
- Tren de pulsos de disparo amplificados acorde al instante de conducción natural
- Pulsos de conducción capaces de activar la conducción de los SCR



Rectificador trifásico controlado por fase a frecuencia de línea

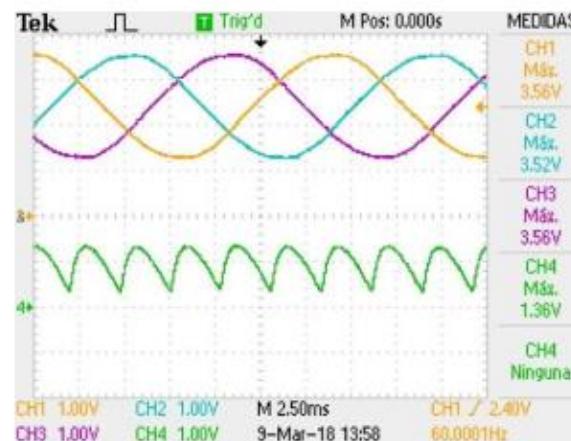
$$\alpha = 0^\circ$$

$$V_{d\alpha} \approx 112,6 \text{ V}$$



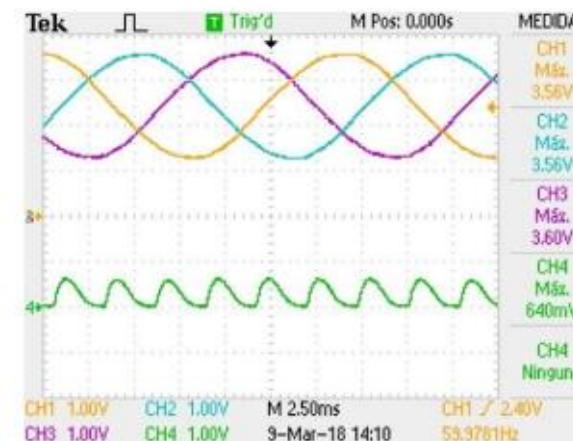
$$\alpha = 30^\circ$$

$$V_{d\alpha} \approx 85,1 \text{ V}$$



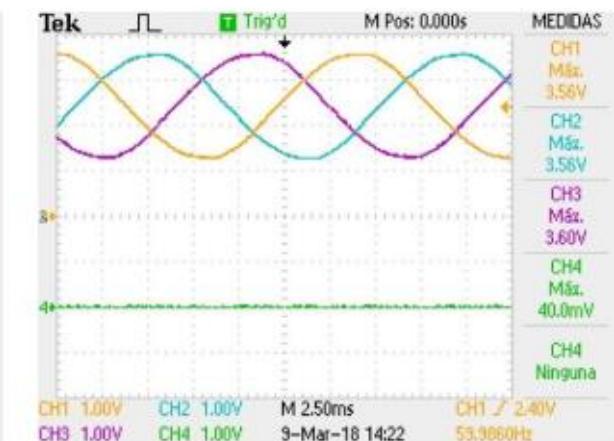
$$\alpha = 60^\circ$$

$$V_{d\alpha} \approx 38,1 \text{ V}$$



$$\alpha = 104^\circ$$

$$V_{d\alpha} \approx 0 \text{ V}$$



Convertidor CA/CC a lazo abierto

$$\alpha = 90^\circ$$

$$V_o = 48 \text{ V}$$

$$\alpha = 60^\circ$$

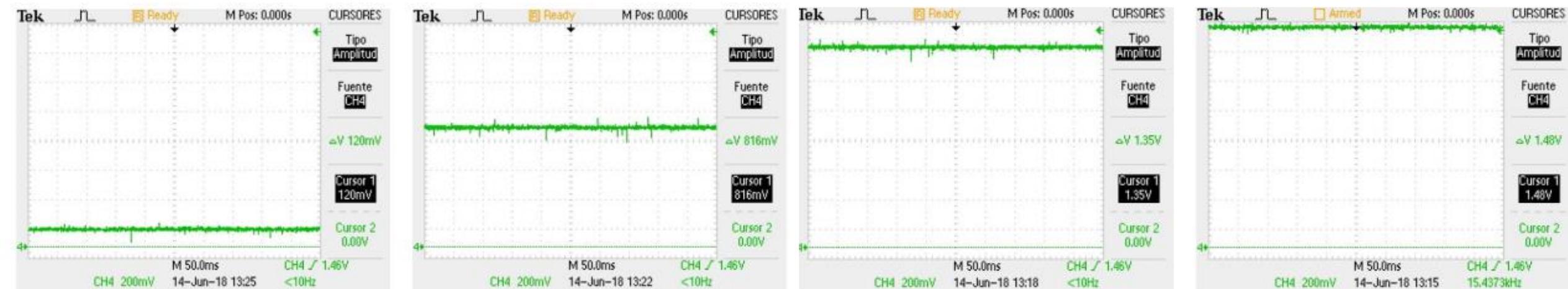
$$V_o = 366 \text{ V}$$

$$\alpha = 30^\circ$$

$$V_o = 610 \text{ V}$$

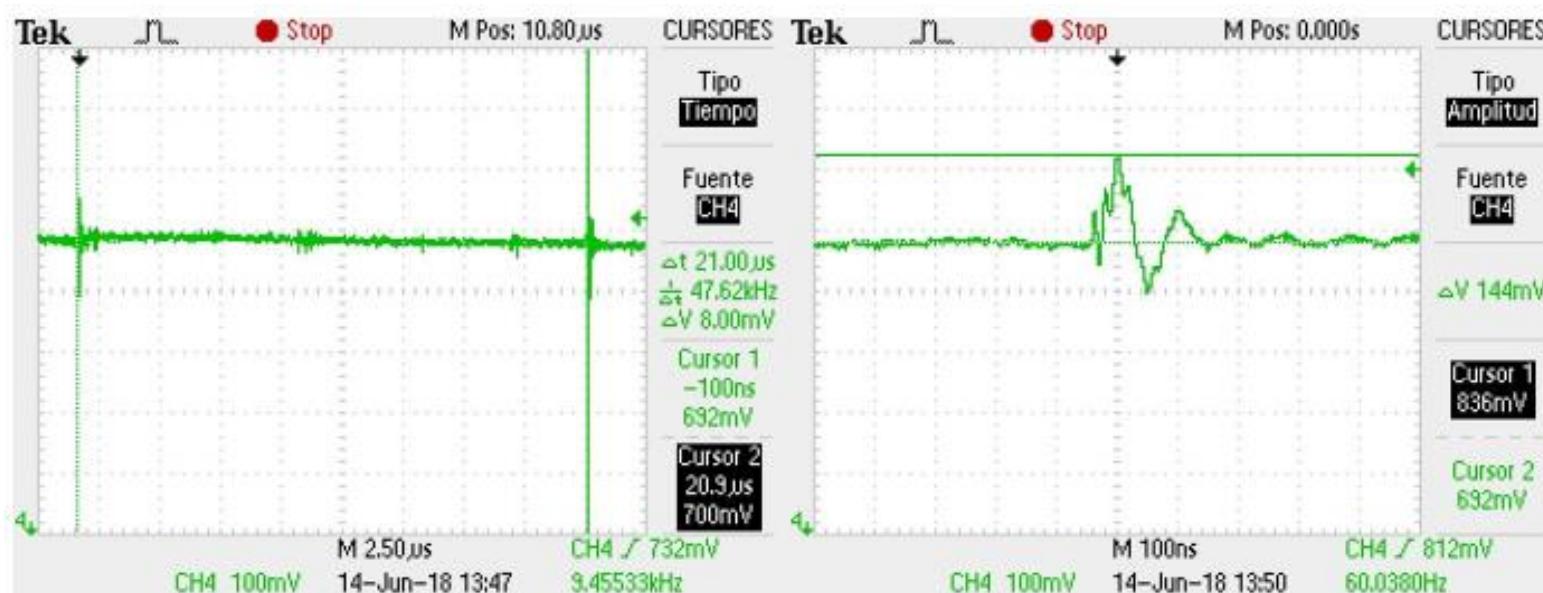
$$\alpha = 15^\circ$$

$$V_o = 668 \text{ V}$$



Transitorios indeseados

- Causados por cambio de polaridad en pulsos de conducción (comutación de SCRs)



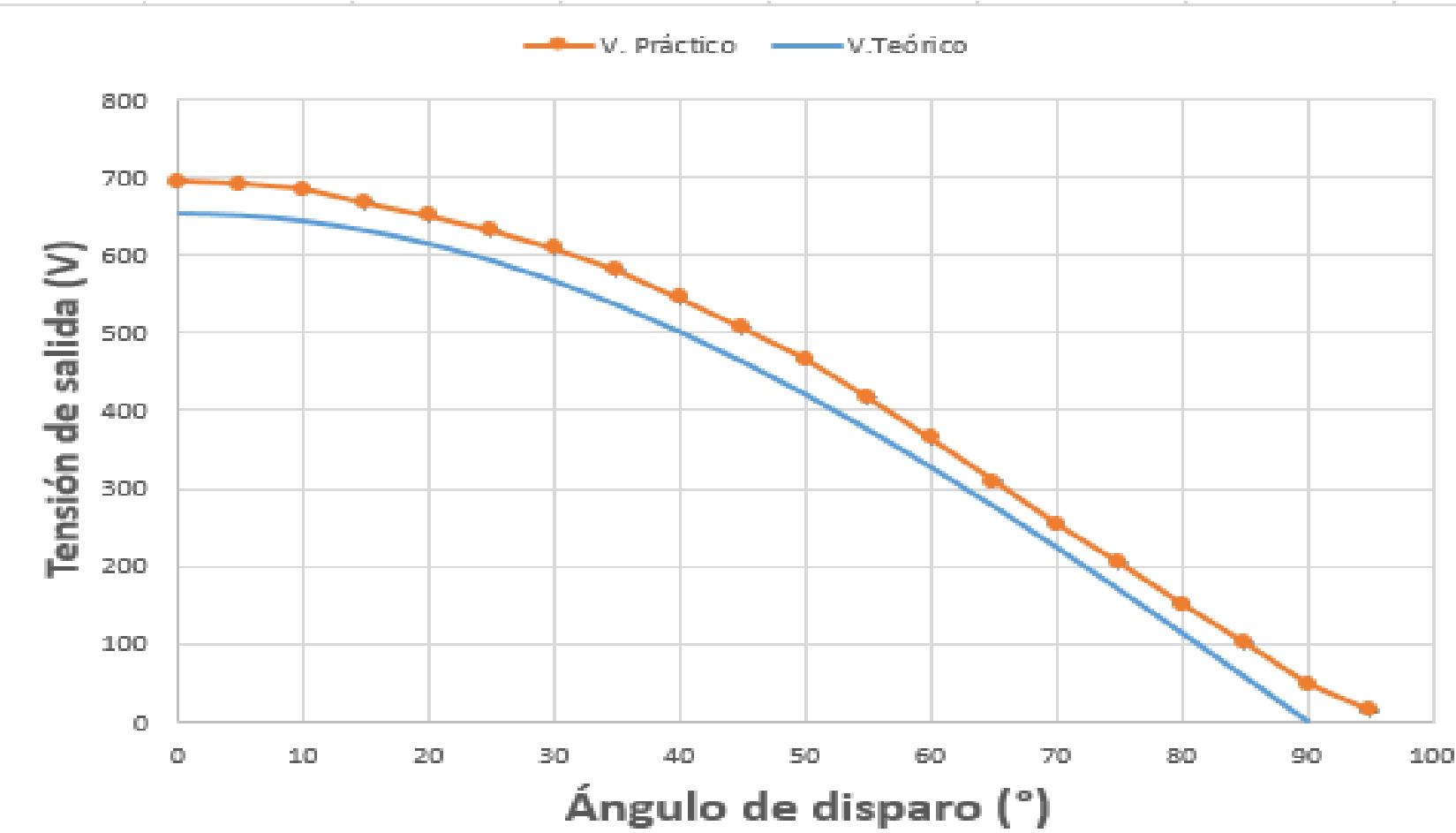
$$\frac{T_{\text{tren de pulsos}}}{2} = \frac{2083}{100 \text{ MHz}} = 20,83 \text{ us}$$

$$\Delta V_{o+} = \frac{\Delta V_{o+\text{atenuada}}}{G_T} \approx \frac{0,144 \text{ V}}{2/808} \approx 58,17 \text{ V}$$

Sobreelongación máxima = $M_P = 20,83\%$

Tiempo de asentamiento = $t_s = 184 \text{ ns}$

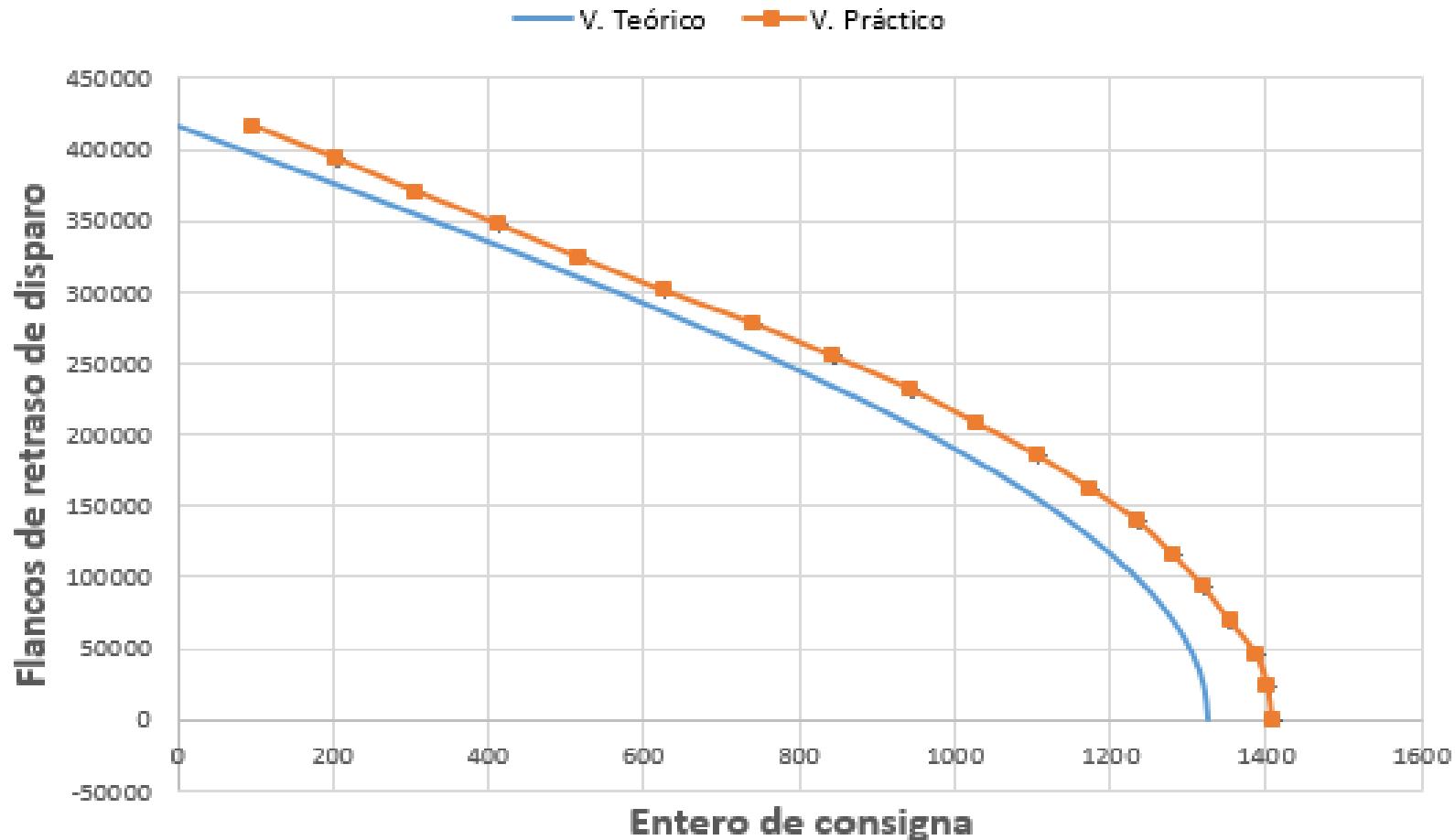
Tensión de salida en función de ángulo de disparo



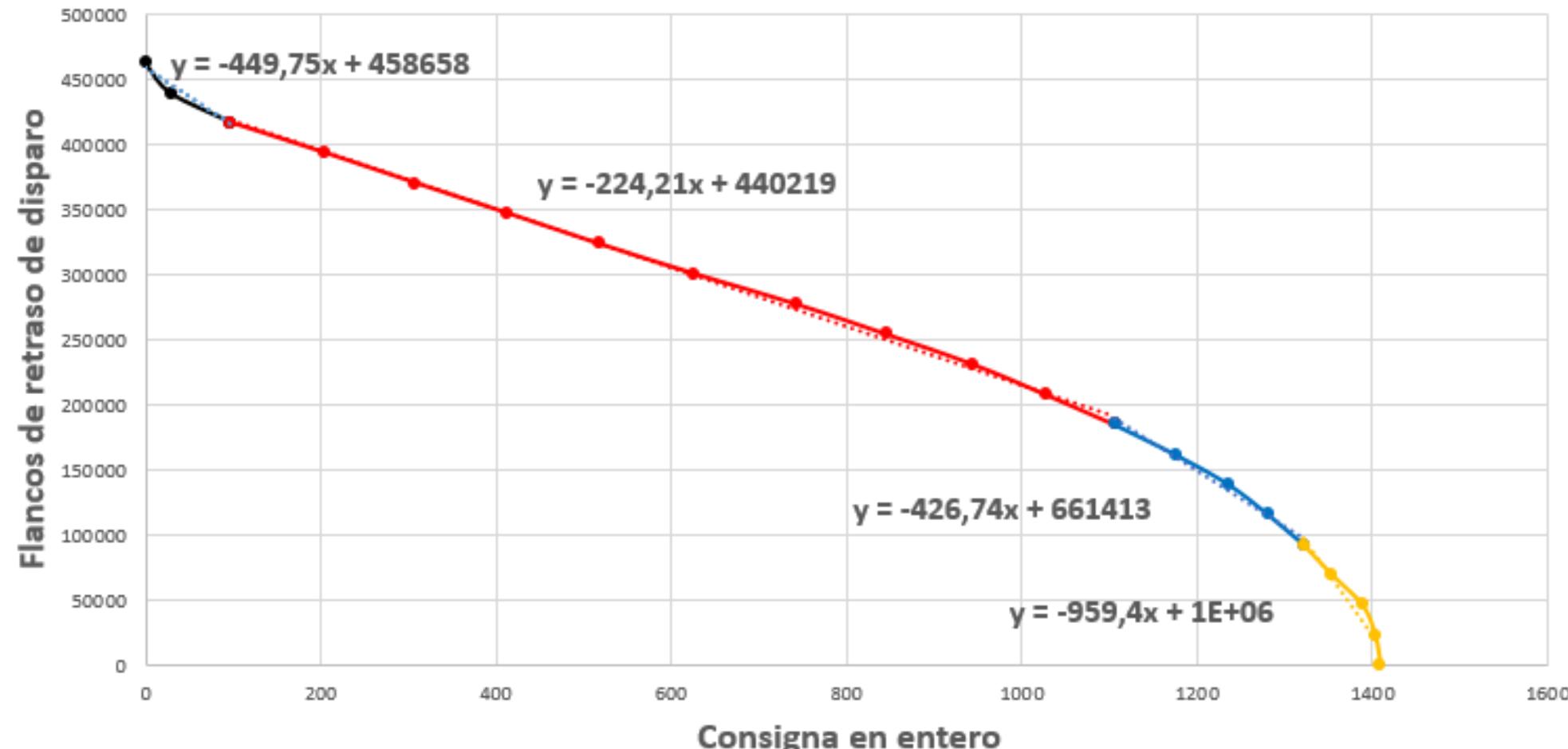
Flancos de retraso de disparo en función de consigna en formato entero

$$Flancos_{\alpha-\text{retraso}} = \frac{\alpha}{2\pi f} 100 \cdot 10^6$$

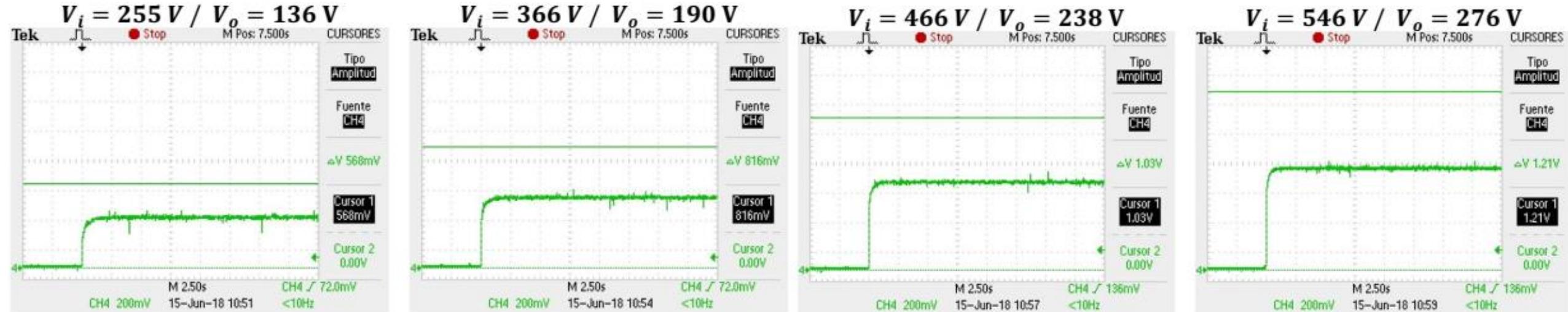
$$V_{i_{int}} = 4095 \frac{V_i}{V_{o_{max}}} = 4095 \frac{V_i}{2020 V}$$



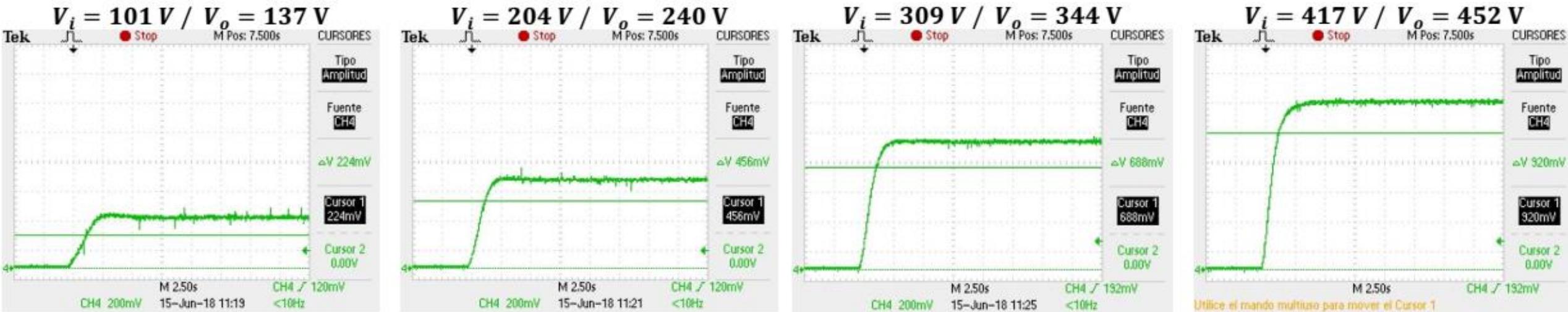
Aproximación lineal por tramos



Convertidor CA/CC a lazo cerrado Respuestas con ganancia unitaria



Convertidor CA/CC a lazo cerrado Respuestas con ajuste de PID

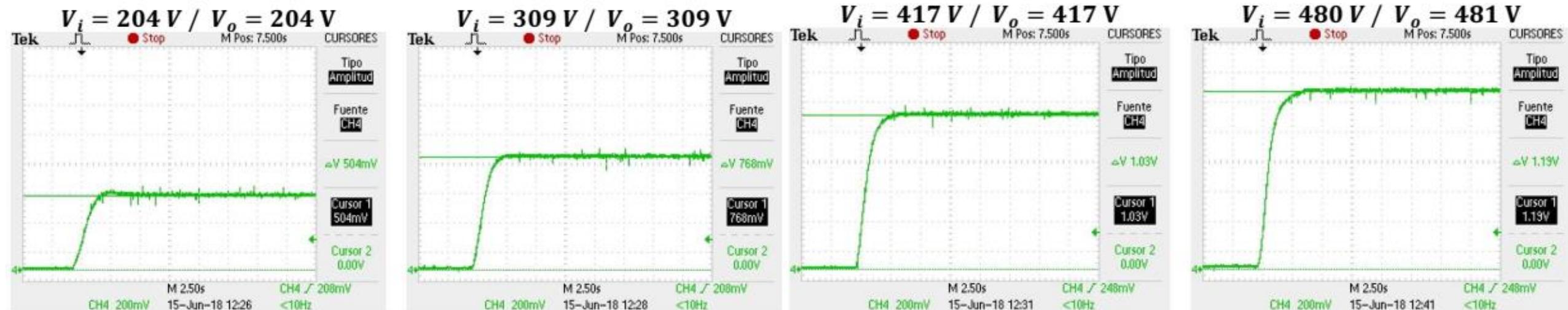


Ajuste de consigna

- Debido al uso del menor valor posible de constante integral se modifica la lógica de consigna del sistema
- Relación lineal de ajuste gracias a la limitación del rango de trabajo a la zona lineal

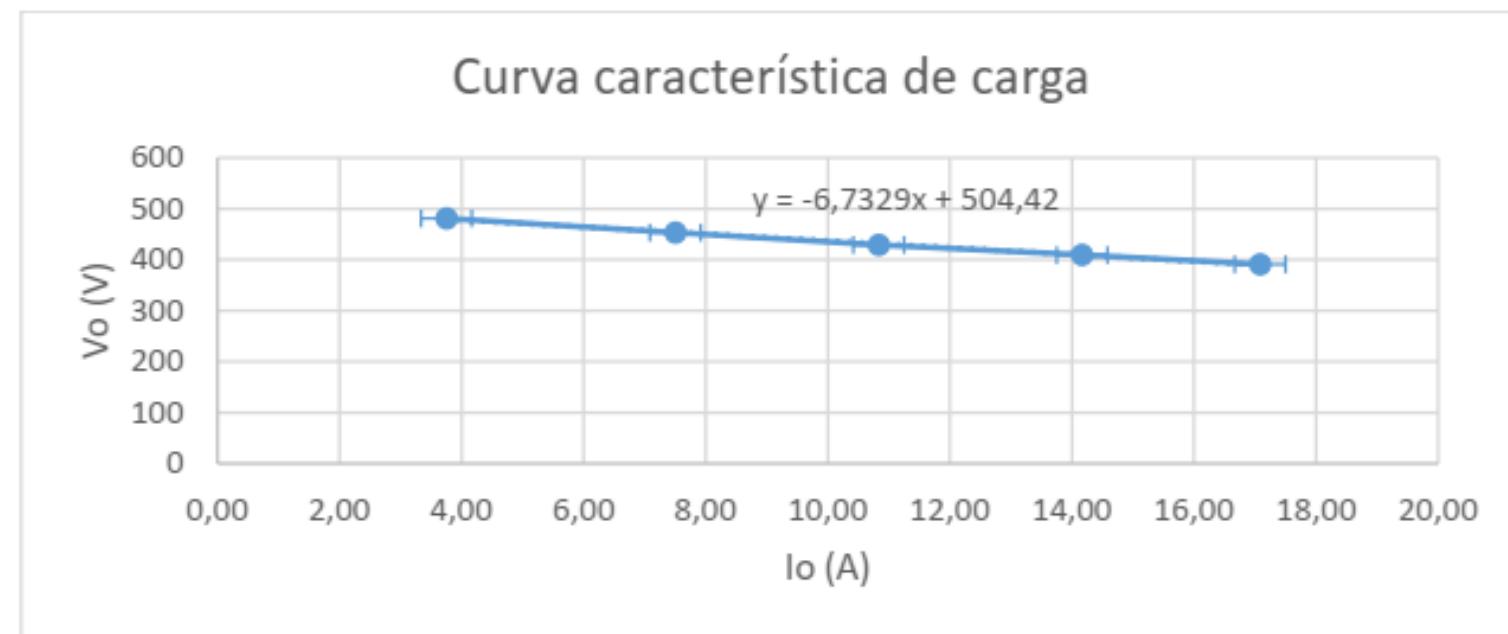


Convertidor CA/CC a lazo cerrado Respuestas con ajuste de PID y consigna



Regulación

- Disminución lineal de tensión de salida al aumentar la carga
- Comportamiento esperado sin la sección de regulación



Conclusiones

- Recopilación de datos teóricos y descripción de funcionamiento de cada componente.
- Se logró incluir las tarjetas equipadas con F.P.G.A. al lazo de control. Las mismas pueden ser utilizadas como elemento de control para múltiples tareas en paralelo a altas velocidades.

Conclusiones

- Se obtuvieron los datos necesarios para adaptar del sistema de control utilizado. El mismo ha sido modificado en base a las limitaciones del F.P.G.A. utilizado.
- Se han realizado las simulaciones de los componentes electrónicos y del sistema diseñado utilizando NI Multisim 14.0 y PSIM 9.0.

Conclusiones

- El uso de herramientas como MATLAB permite análisis numéricos del sistema y su respuesta escalón. Se debe tomar en cuenta el comportamiento no lineal y el punto de operación.
- El uso de un controlador PID representa una solución útil al no conocer con exactitud todos los parámetros implicados en un proceso a controlar.

Conclusiones

- A pesar de las capacidades limitadas del F.P.G.A. utilizado, ha sido posible implementar la técnica de control utilizando equivalencias digitales y lógica de coma fija.
- Las pruebas de funcionamiento del convertidor CA/CC concuerdan con las simulaciones realizadas, confirmando el funcionamiento esperado del mismo sin la etapa de regulación.

Conclusiones

- Es posible confirmar la posibilidad de adaptar el sistema de control digital previamente diseñado para controlar un convertidor CA/CC utilizando F.P.G.A y el lenguaje V.H.D.L.

Recomendaciones

- Se plantea el uso de un F.P.G.A. con mayores capacidades y recursos para lograr implementar la lógica de control restante.
- Se plantea el diseño de una tarjeta de desarrollo con un mayor número de convertidores analógicos a digitales capaces de adquirir todas las variables involucradas en el sistema.

Recomendaciones

- Se propone el desarrollo de una rutina de sintonización automática del controlador al momento de variar la carga del convertidor.
- Se recomienda limitar el rango de salida a zonas lineales.

Recomendaciones

- Se plantea la inclusión de una sección de regulación basada en el principio de commutación y el uso de otro controlador.
- Análisis de relación entre tensión de salida según la corriente otorgada por el convertidor.

Recomendaciones

- Desarrollo de lógica de consigna modificada para ajustar ángulo de disparo y asegurar una tensión constante en la salida.
- Rutina de cálculo de eficacia del convertidor tomando en cuenta limitaciones en operaciones con punto flotante.

Recomendaciones

- Desarrollo de una interfaz gráfica para monitorear variables, ajustar consignas y constantes del controlador.

Gracias por su atención

¿PREGUNTAS?