



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**Centro de
Posgrados**
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Diseño de una estrategia de control basada en el control predictivo generalizado aplicado a inversores fotovoltaicos para zonas aisladas

Diego Fernando Ñauñay Puente

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

Maestría de Investigación en Electrónica mención Automática

Julio - 2022



MIRA-ESTE: Specific, innovative microgrids solutions (accounting for environmental, social, technological and economic aspects) for isolated rural areas of Ecuador

Project number: EC2020SIN322A101

AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
3. Metodología
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

AGENDA

- 1. Introducción*
2. Conceptos Generales
3. Metodología
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

Problemática

- Tan solo el 97.29% de la población tiene acceso a energía eléctrica.
- Resto de la población pertenece en su mayoría a comunidades y poblaciones aisladas.
- Las poblaciones en zonas aisladas no posee acceso al Sistema Nacional Interconectado (SNI) de energía eléctrica debido principalmente a la geografía propia del Ecuador.
- Esta investigación se enmarca como una posible solución enfocada en la generación energética a partir de fuentes renovables (Energía Solar).

Objetivo General

Proponer una metodología de control basado en el control predictivo generalizado (GPC) aplicado en inversores (VSIs) fotovoltaicos monofásicos de tres niveles con sujeción a punto neutro en topología T que operan en modo aislado.

Objetivos Específicos

- Definir una arquitectura de control de voltaje basada en el GPC que permita mejorar la calidad de energía alterna generada y disminuir la distorsión armónica total.
- Implementar el sistema de control en un procesador digital de señales (DSP).
- Validar experimentalmente la metodología de control propuesta mediante la simulación en tiempo real del VSI con un Hardware-in-the-Loop.
- Analizar el rendimiento y la robustez del controlador desarrollado con respecto a un controlador proporcional integral (PI) frente a perturbaciones de carga.

AGENDA

1. Introducción
- 2. *Conceptos Generales***
3. Metodología
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

Inversores Multinivel

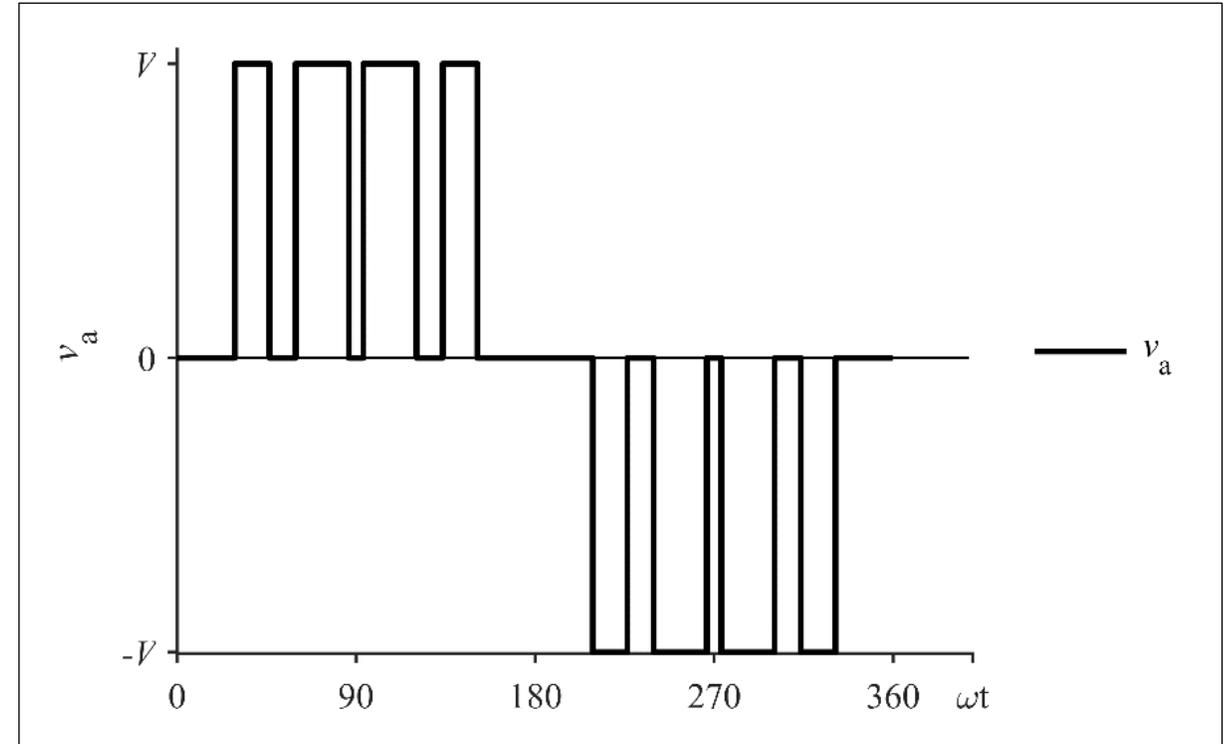
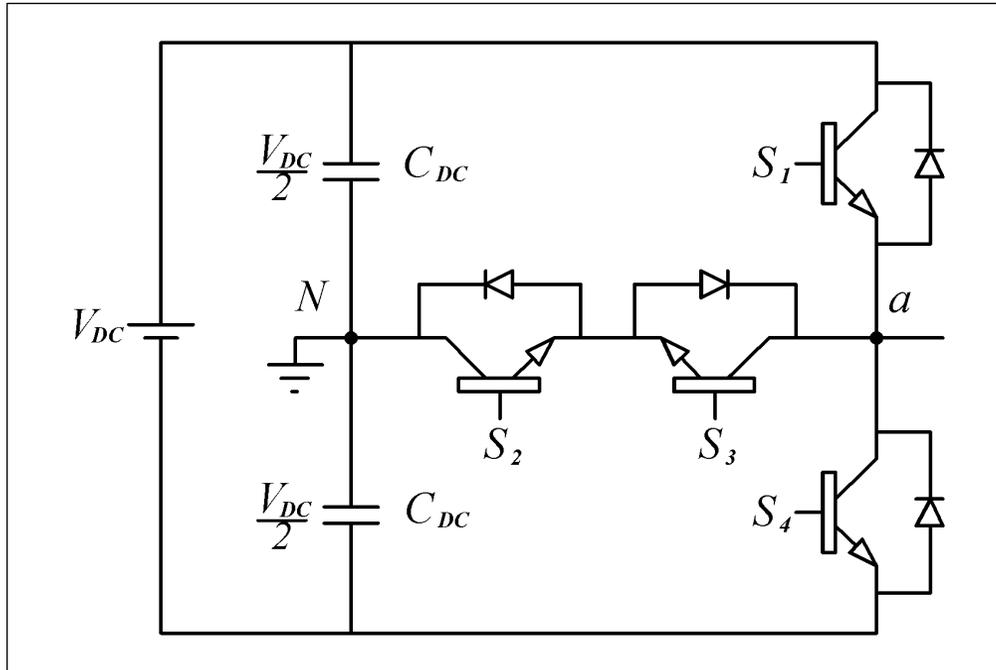
Ventajas:

- Menor distorsión armónica total (THD)
- Menor estrés en los elementos semiconductores
- Menor interferencia electromagnética producida por los interruptores de potencia

Desventajas:

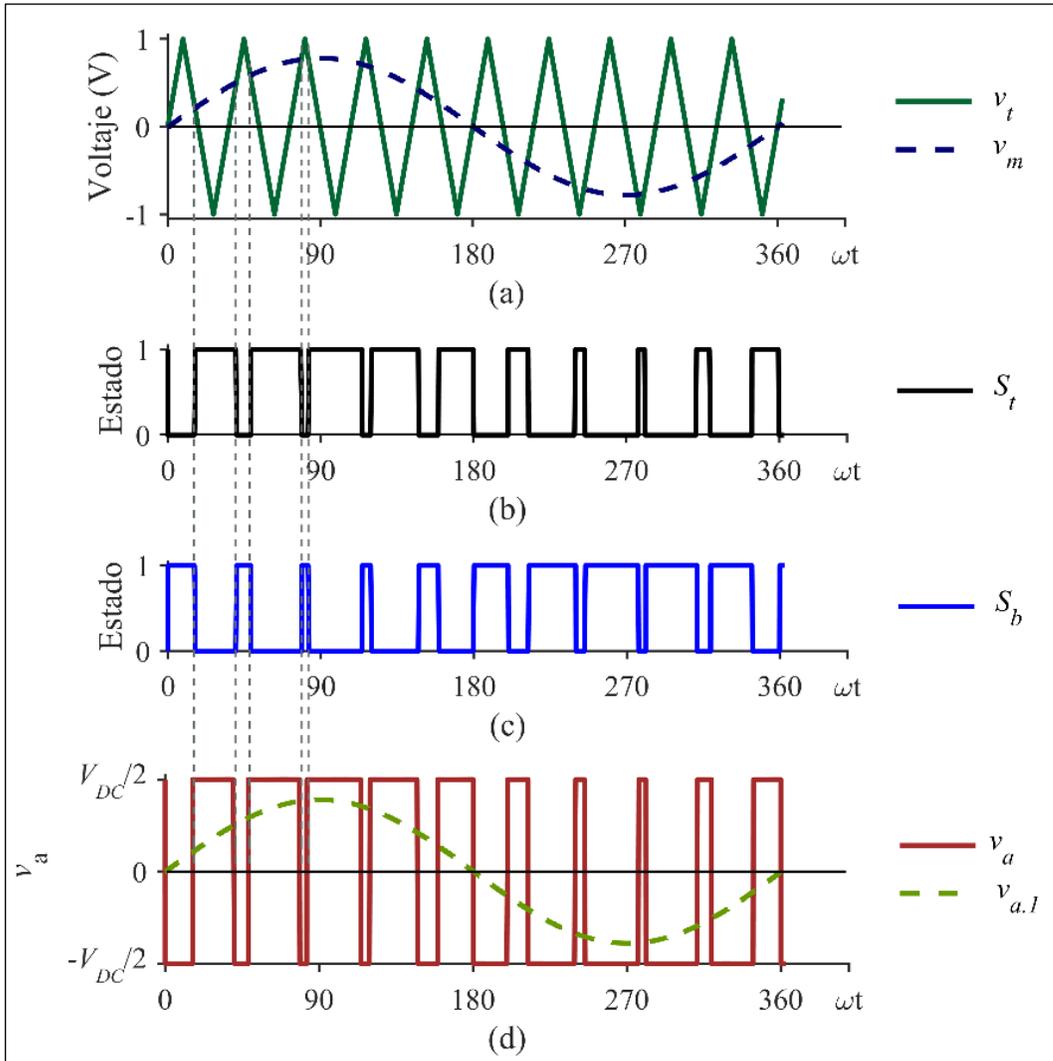
- Necesitan mayor número de semiconductores
- Se debe superar el desbalance de voltaje sobre los capacitores
- Se necesitan varias fuentes de voltaje DC aisladas

Funcionamiento

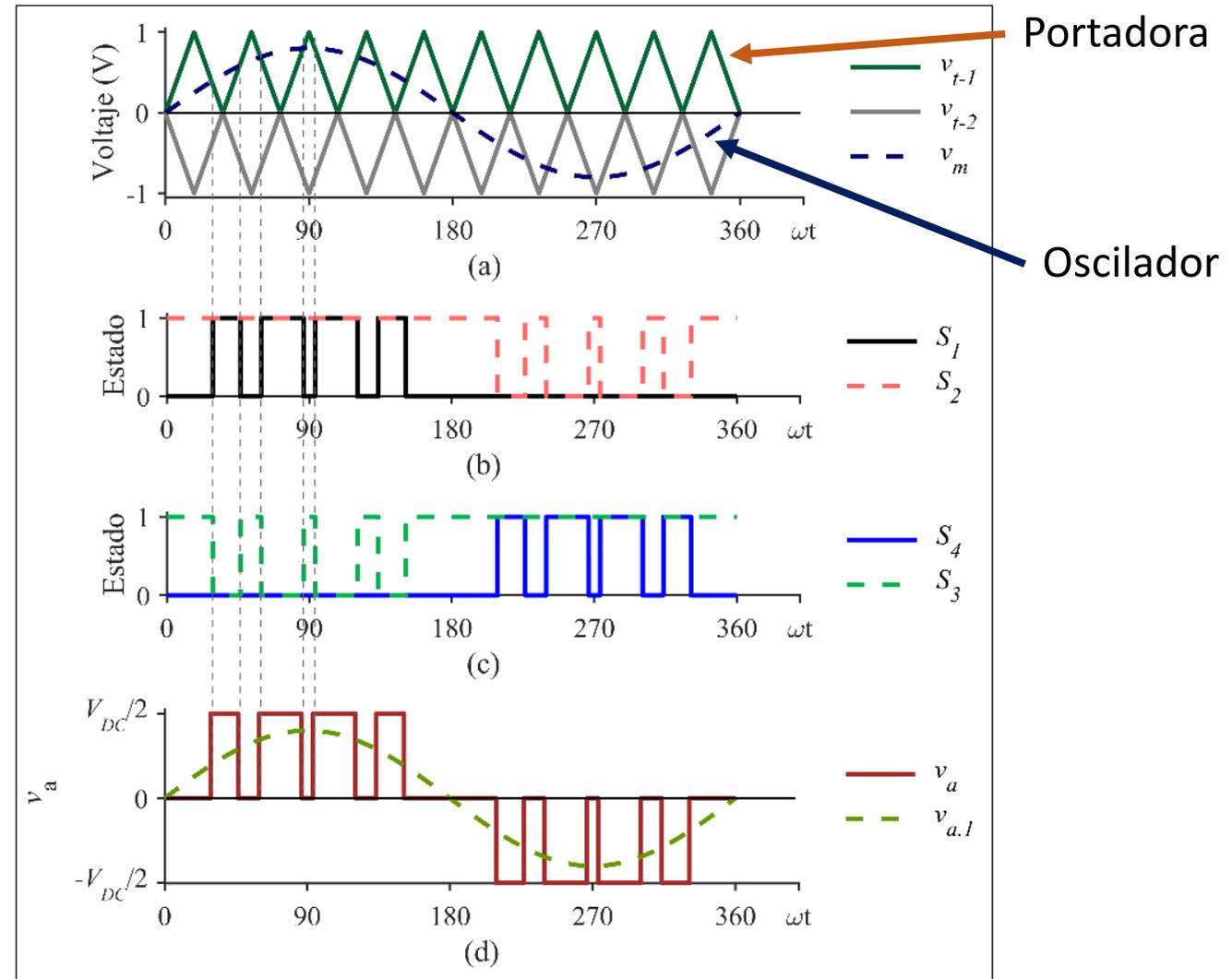


u	S_1	S_2	S_3	S_4	v_a
1	1	1	0	0	$V_{DC}/2$
0	0	1	1	0	0
-1	0	0	1	1	$-V_{DC}/2$

Modulación PWM bipolar



Modulación PWM unipolar



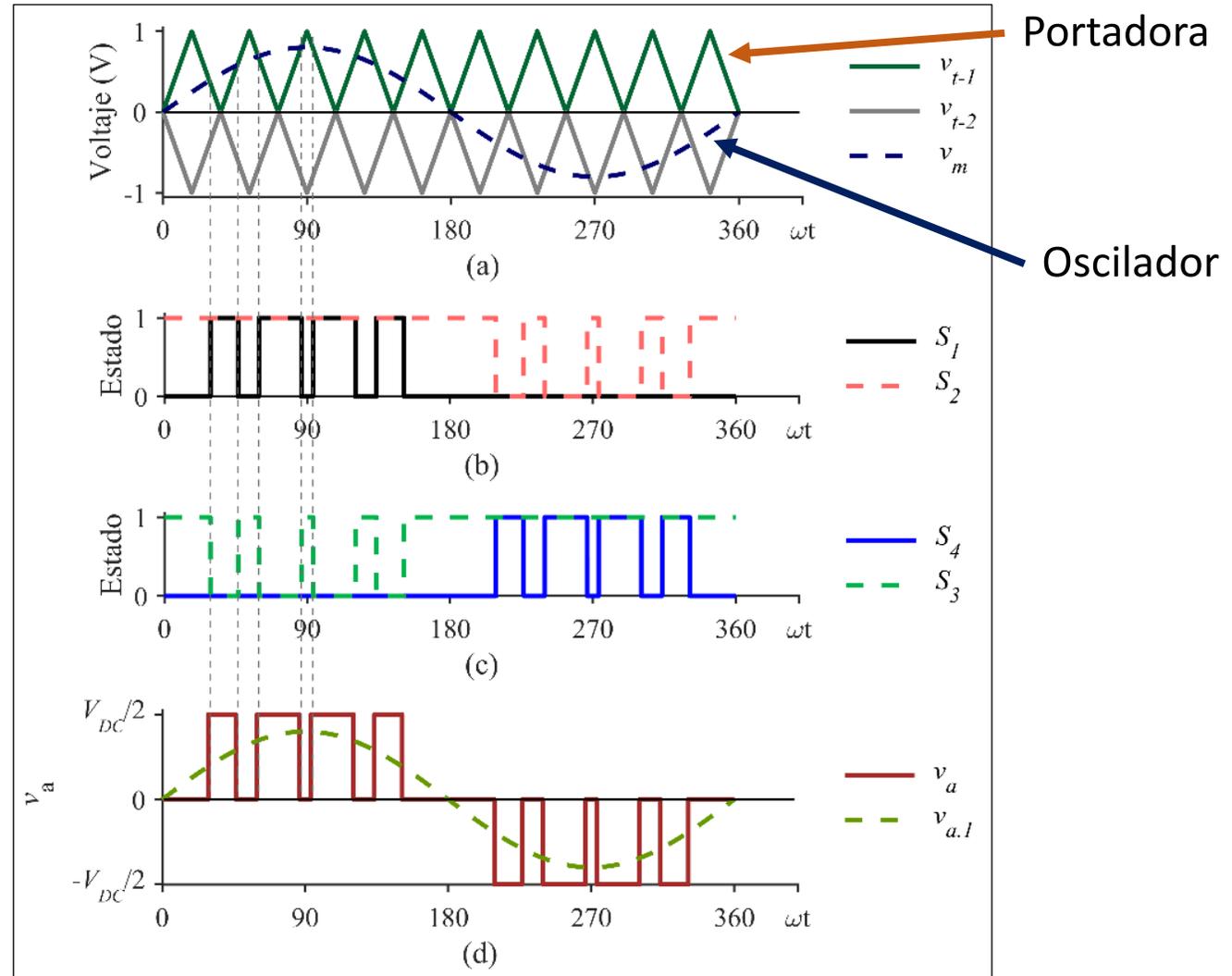
Relación de amplitud de modulación

$$m_a = \frac{V_m}{V_t}$$

Amplitud de la componente fundamental de v_a

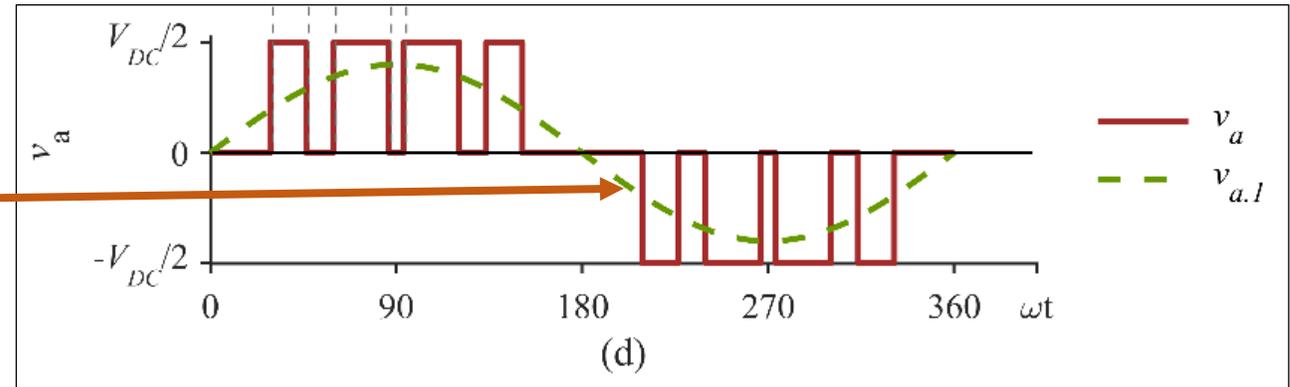
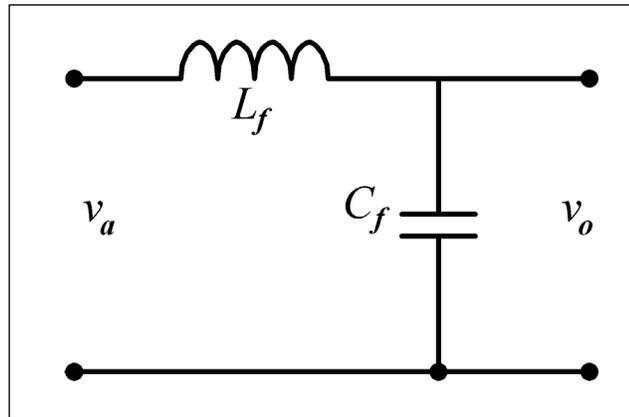
$$V_{a.1} = m_a \frac{V_{DC}}{2}$$

Modulación PWM unipolar



Filtro LC

- Permite la atenuación de los efectos de la frecuencia de conmutación y de la THD de la señal de voltaje a la salida del VSI
- Filtro de segundo orden es utilizado en los sistemas asilados de la red



Frecuencia de corte

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}}$$

$$v_o \approx v_{a.1}$$

$$V_o \approx V_{a.1}$$

Transformadas

Clarke

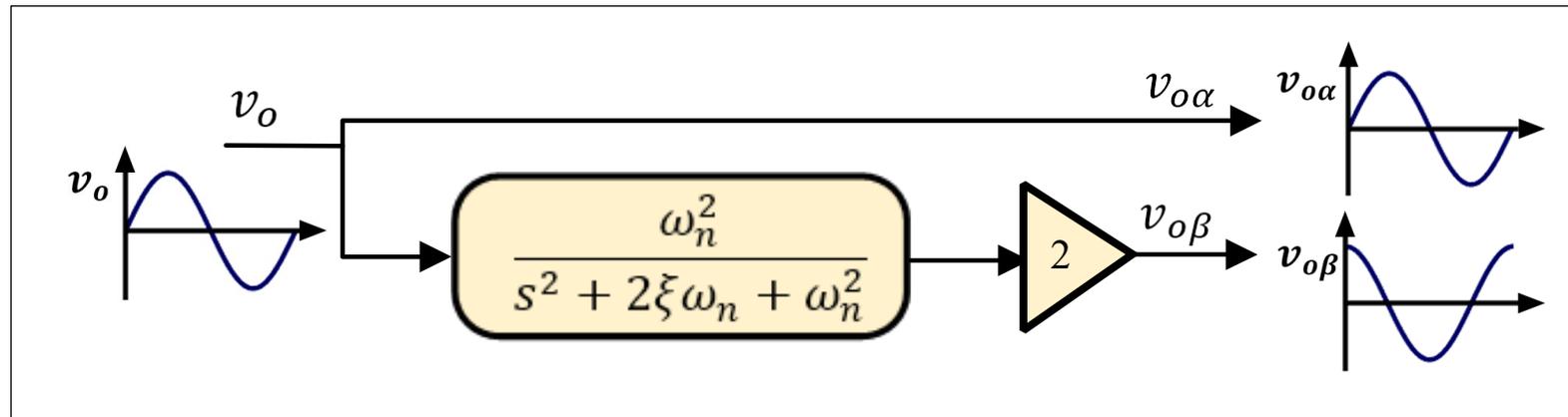
- Conocida como transformación $\alpha\beta 0$
- Realiza el cambio de coordenadas de un sistema trifásico abc a dos componentes $\alpha\beta$ en un marco ortogonal estacionario

Park

- Conocida como transformación $dq0$
- Se basa en la proyección de un sistema de coordenadas ortogonales $\alpha\beta$ a un sistema de coordenadas en un marco ortogonal rotatorio de dos ejes con una velocidad angular constante (ω)
- Eje directo (d) y eje de cuadratura (q)
- La componente q se encuentra desfasada 90° con respecto a la componente d

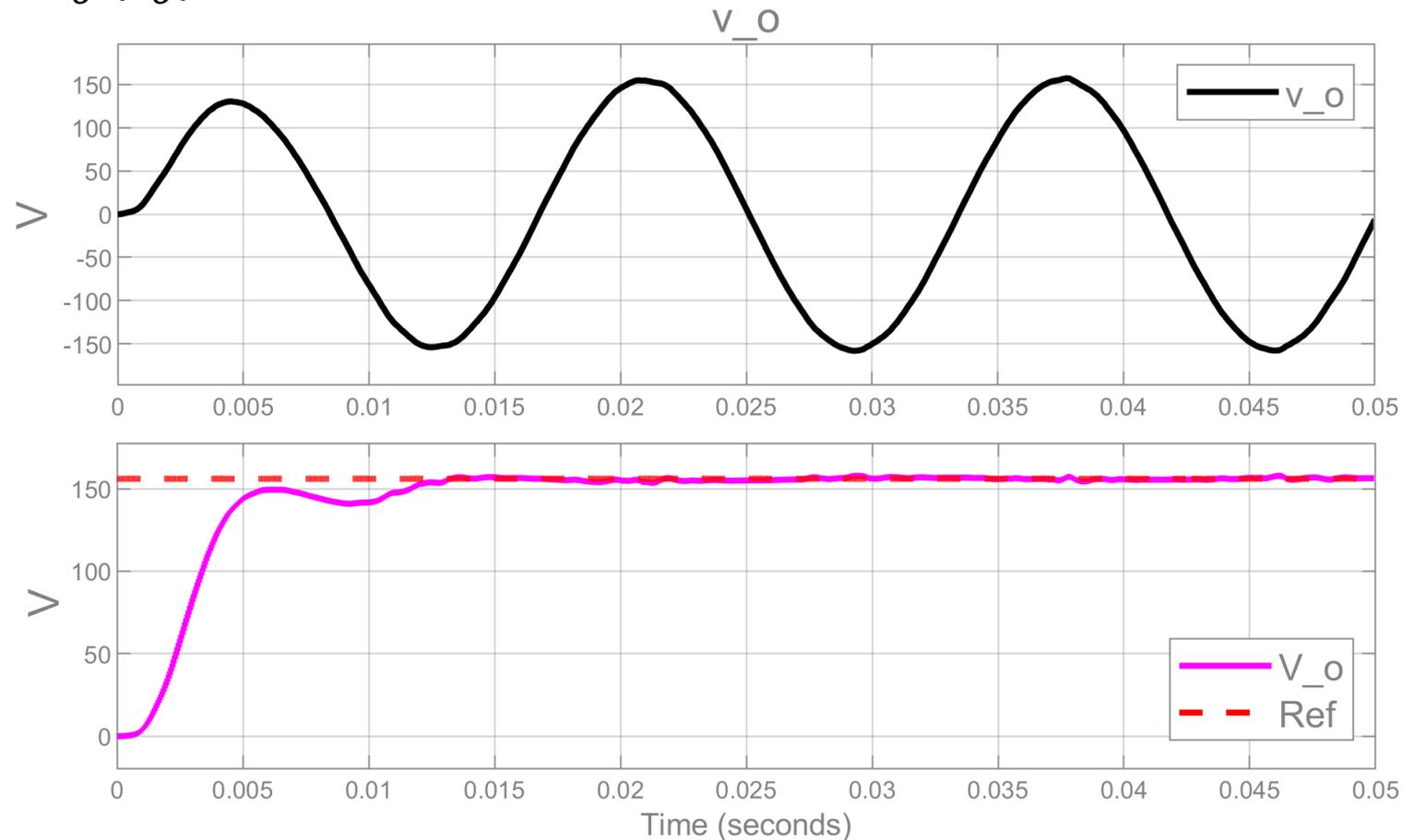
Generador de Señal Ortogonal (OSG)

- Un sistema monofásico, no está compuesto por tres señales de voltaje sino por una sola
- Un OSG permite generar un sistema ortogonal artificial
- Existen varios OSGs: basado en retraso en el transporte, basado en la transformada inversa de Park, derivativo, basado en el integrador generalizado de segundo orden, basado en filtros pasa bajos
- Un OSG basado en filtros pasa bajos presenta un alto rendimiento y menor costo computacional en comparación a los demás



OSG y Transformada de Park

El resultado de este sistema compuesto resulta en un señal de voltaje DC equivalente al voltaje pico de v_o (V_o)



Control Predictivo Generalizado

- El GPC se basa en el modelo de control integral autorregresivo con media móvil (CARIMA)
- Las acciones de control se realizan sobre el modulador a través de un conjunto de señales continuas

Expresión que representa la planta

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})z^{-d}u_c(t-1) + C_c(z^{-1})\frac{e(t)}{\Delta_c}$$

Función de costo

- El valor óptimo de predicción del sistema es obtenido al resolver la ecuación diofantina de la planta
- Se busca minimizar el error y el esfuerzo de control para que la salida futura de la planta se ajuste al valor de referencia.

$$J(N_p, N_c) = \sum_{j=1}^{N_p} \delta(j) [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \lambda(j) [\Delta_c u_c(t+j-1)]^2$$

A y B polinomios de la planta

u_c = acción de control

y = salida de la planta

e = ruido blanco con media 0

C_c = perturbación cuantificable

\hat{y} = predicción de salida óptima

N_p = horizonte de predicción

N_c = horizonte de control

δ = peso de predicción

λ = peso de control

w = set-point

Control Predictivo Generalizado

Salida óptima

El valor óptimo de predicción del sistema es:

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}\mathbf{u}_c + \mathbf{f}_c$$

\mathbf{G} (matriz) y \mathbf{f}_c (vector) son obtenidos al resolver la ecuación diofantina de la planta

Función de costo en forma matricial ($\delta=1$)

$$J = (\mathbf{G}\mathbf{u}_c + \mathbf{f}_c - \mathbf{w})^T (\mathbf{G}\mathbf{u}_c + \mathbf{f}_c - \mathbf{w}) + \lambda \mathbf{u}_c^T \mathbf{u}_c$$

Acción de control óptima

$$\mathbf{u}_c = (\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T (\mathbf{w} - \mathbf{f}_c)$$

Acción de control óptima para implementación

$$\begin{aligned} \Delta_c u_c(t) &= \mathbf{K}(\mathbf{w} - \mathbf{f}_c) \\ u_c(t) &= \mathbf{K}(\mathbf{w} - \mathbf{f}_c) + u_c(t-1) \end{aligned}$$

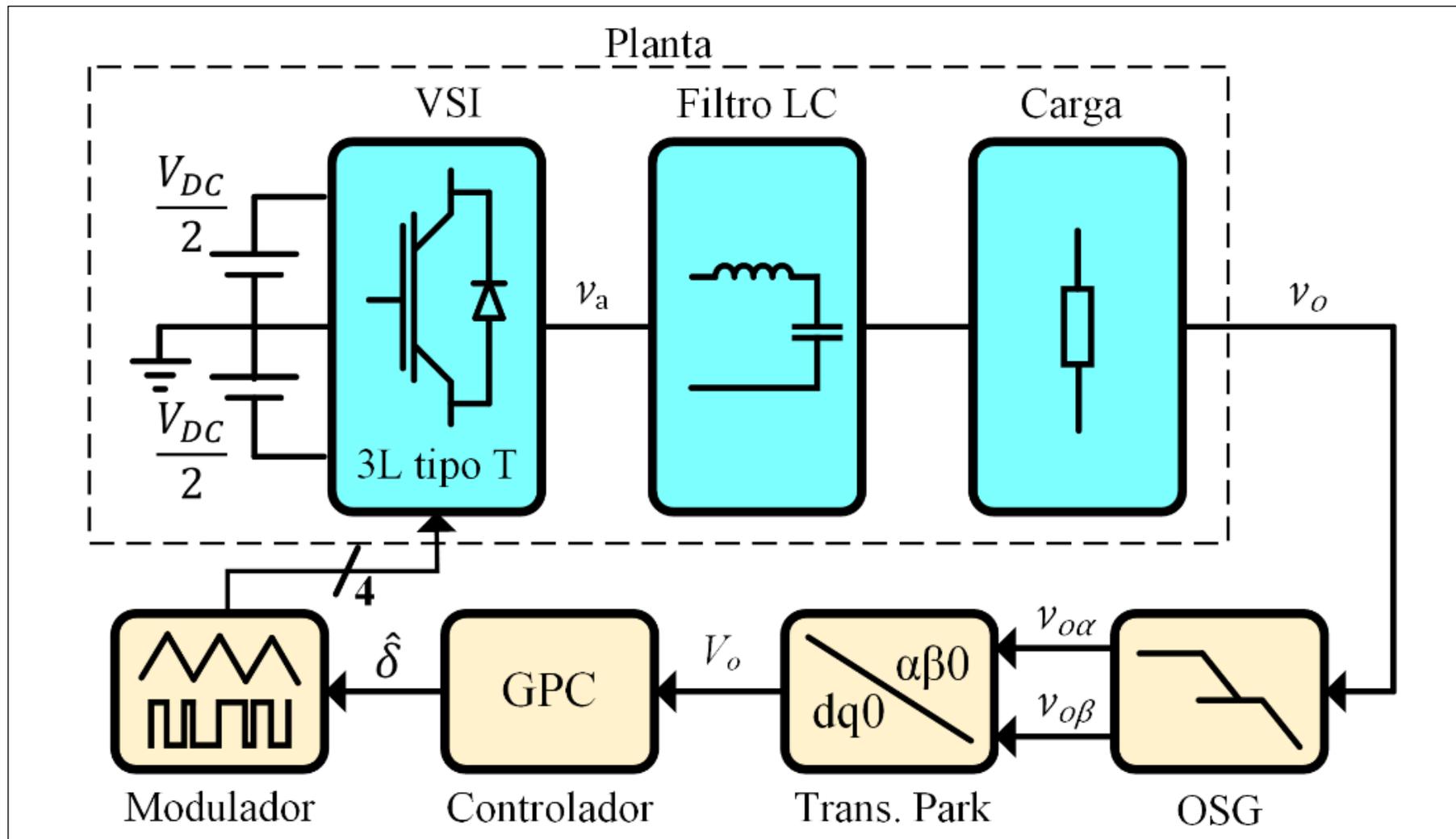
\mathbf{f}_c = respuesta libre

\mathbf{K} = primera fila de la matriz $(\mathbf{G}^T \mathbf{G} + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{G}^T$

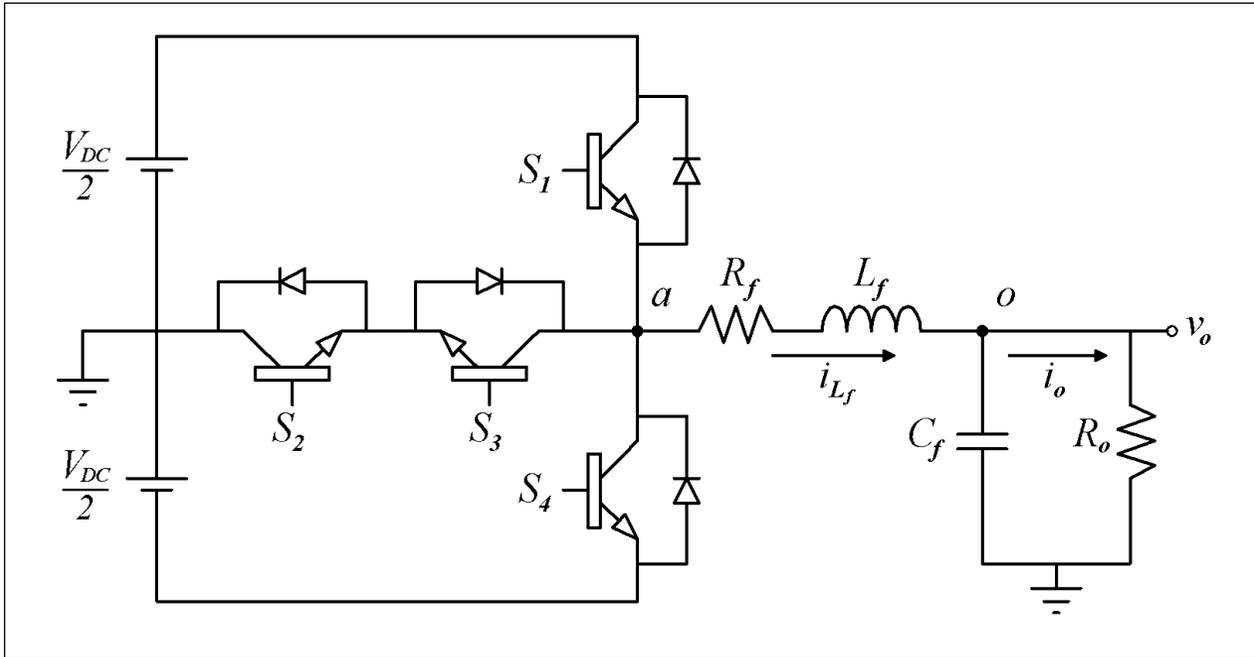
AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
- 3. *Metodología***
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

Lazo de control basado en el GPC propuesto para VSI 3L NPC tipo T



Modelamiento del sistema



$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{L_f}(t) \\ \dot{v}_{C_f}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{R_o C_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L_f}(t) \\ v_{C_f}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u_v(t)$$

$$v_o(t) = [0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} i_{L_f}(t) \\ v_{C_f}(t) \end{bmatrix}$$

$$\forall u_v \in \left[-\frac{V_{DC}}{2}, 0, \frac{V_{DC}}{2} \right]$$

Función de transferencia

$$G_P(s) = \frac{1}{L_f C_f} \frac{1}{s^2 + s \left(\frac{R_f}{L_f} + \frac{1}{R_o C_f} \right) + \frac{R_o + R_f}{R_o L_f C_f}}$$

Dimensionamiento del Sistema

Se ha considerado un sistema de 2.2 kW a 110 V_{rms} , el cual considera las principales cargas pertenecientes a una zona aislada en Ecuador

Dimensionamiento del Filtro LC

Voltaje en el Inductor

$$V_{L_f} = V_a - V_o$$

$$V_o = m_a \frac{V_{DC}}{2}$$

$$V_{L_f} = \frac{V_{DC}}{2} (1 - \hat{\delta}); \forall \hat{\delta} = m_a \quad (a)$$

En función de la frecuencia de control

$$V_{L_f} = L_f \frac{\Delta \hat{I}_{L_f}}{\hat{\delta}} f_s \quad (b)$$

Valor del Inductor

$$L_f = V_{DC} \frac{\hat{\delta} (1 - \hat{\delta})}{2 \Delta \hat{I}_{L_f} f_s} \quad (a) = (b)$$

Valor del Capacitor

$$f_c \leq \frac{f_s}{15}$$

$$C_f \geq \frac{15^2}{(2\pi f_s)^2 L_f}$$

Parámetros del VSI 3L NPC tipo T

Parámetro	Descripción	Valor	Unidad
V_{DC}	Voltaje de enlace DC	400	V
v_o	Voltaje nominal de enlace AC	110	V_{RMS}
f	Frecuencia nominal AC	60	Hz
f_s	Frecuencia de control	20	kHz
L_f	Inductancia del filtro LC	0.75	mH
R_f	Resistencia en el inductor L	0.1	Ω
C_f	Capacitancia del filtro LC	56	μF
R_o	Carga de salida	40	Ω

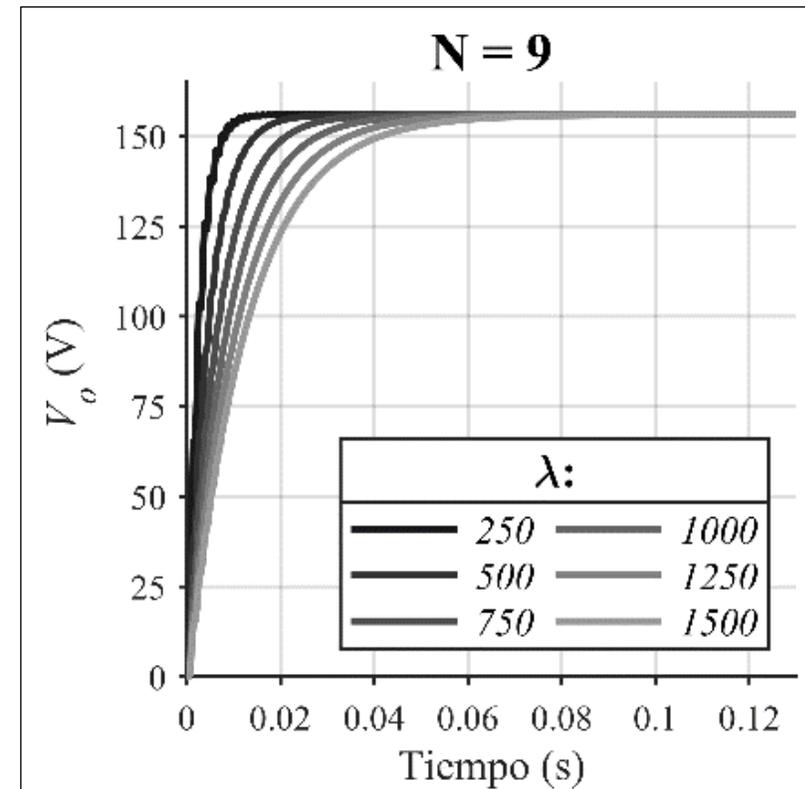
Función de transferencia

$$G_p(s) = \frac{2.381 \times 10^7}{s^2 + 579.8 s + 2.387 \times 10^7}$$

$$G_p(z) = \frac{0.02933z^{-1} + 0.02905z^{-2}}{1 - 1.9129z^{-1} + 0.97143z^{-2}} \quad \forall t_s = 50\mu s$$

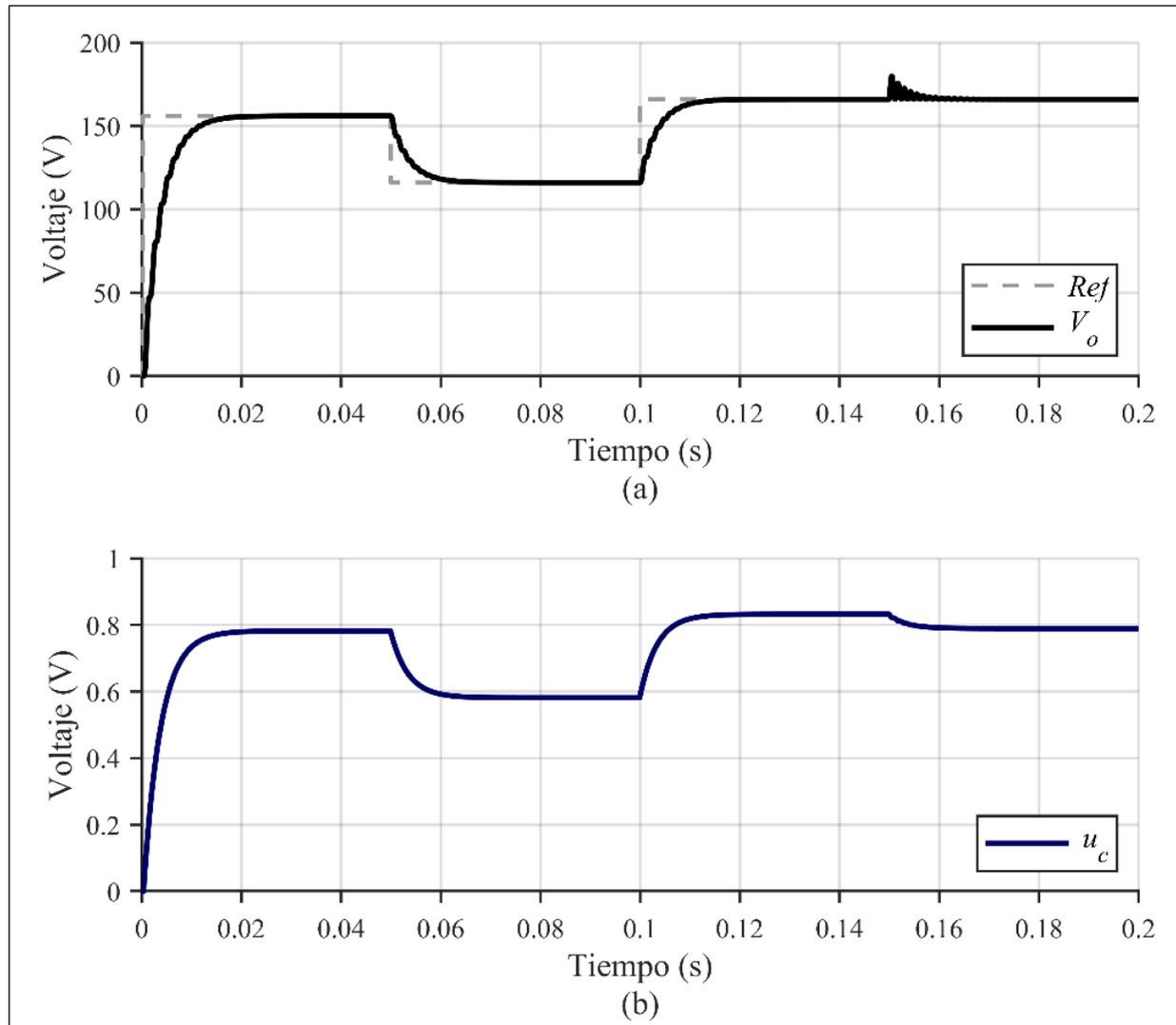
Parámetros del GPC

- THD en estado transitorio disminuye a medida que los horizontes N_p y N_c se incrementan
- Se ha considerado $N_p = N_c = N = 9$



- Se ha considerado $\lambda = 390$

Comportamiento de la planta bajo el control GPC

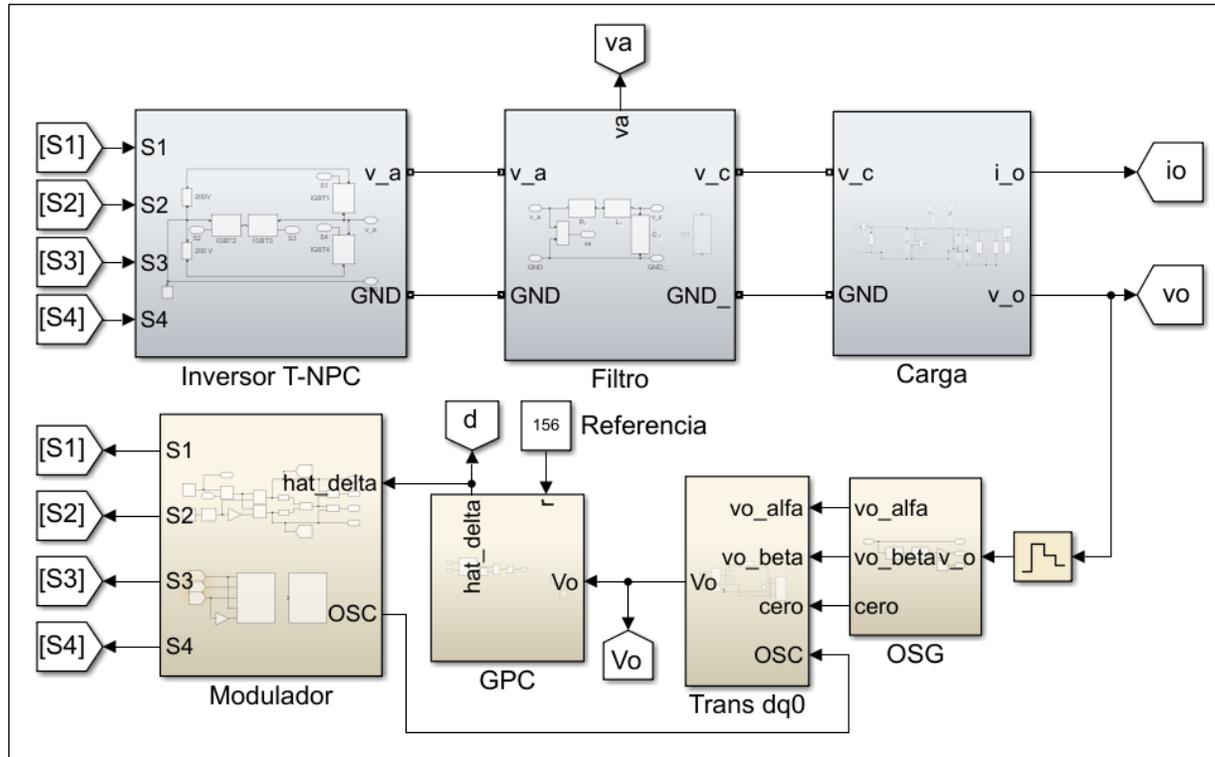
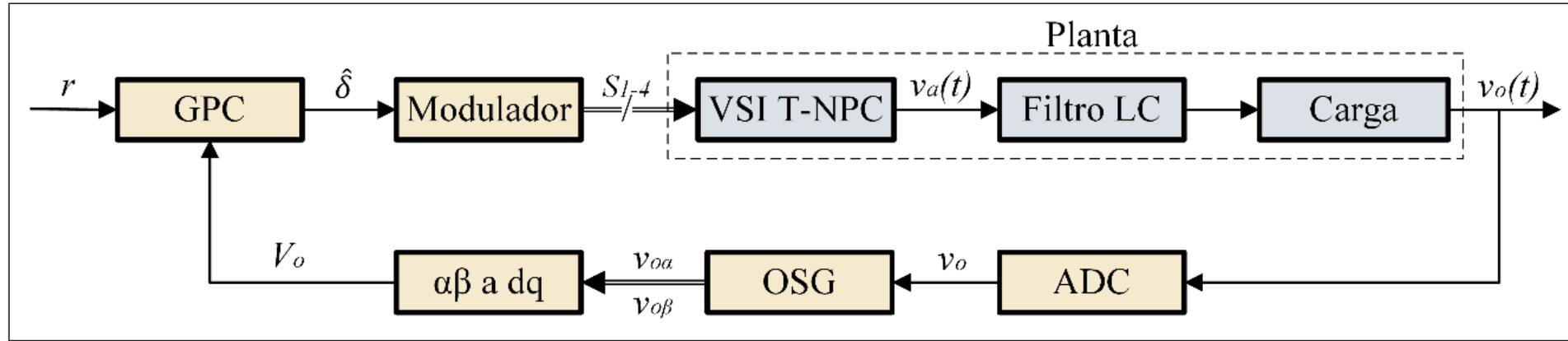


Respuesta del sistema controlado por un GPC con $d = 0$, $N = 9$, $\delta = 1$ y $\lambda = 390$. El sistema es simulado con una perturbación en $t = 0.15$ s.

- Seguimiento de referencia y rechazo de perturbaciones del sistema.
- Acción de control del GPC para el sistema VSI 3L NPC tipo T.

AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
3. Metodología
- 4. *Simulación***
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros



Simulación

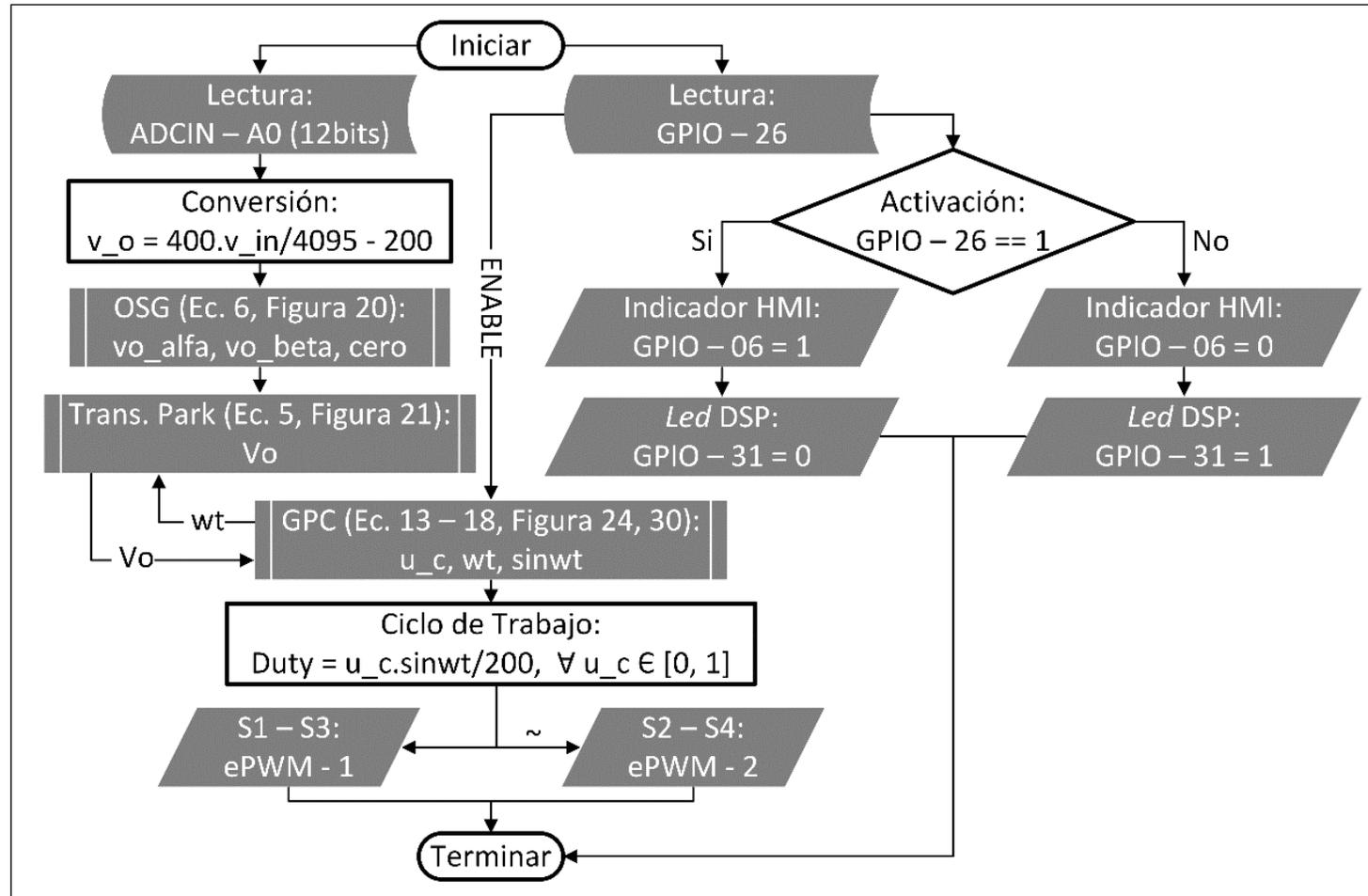
- Se realizó la simulación en Matlab Simulink

AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
3. Metodología
4. Simulación
- 5. Implementación de sistema en tiempo real***
6. Resultados
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

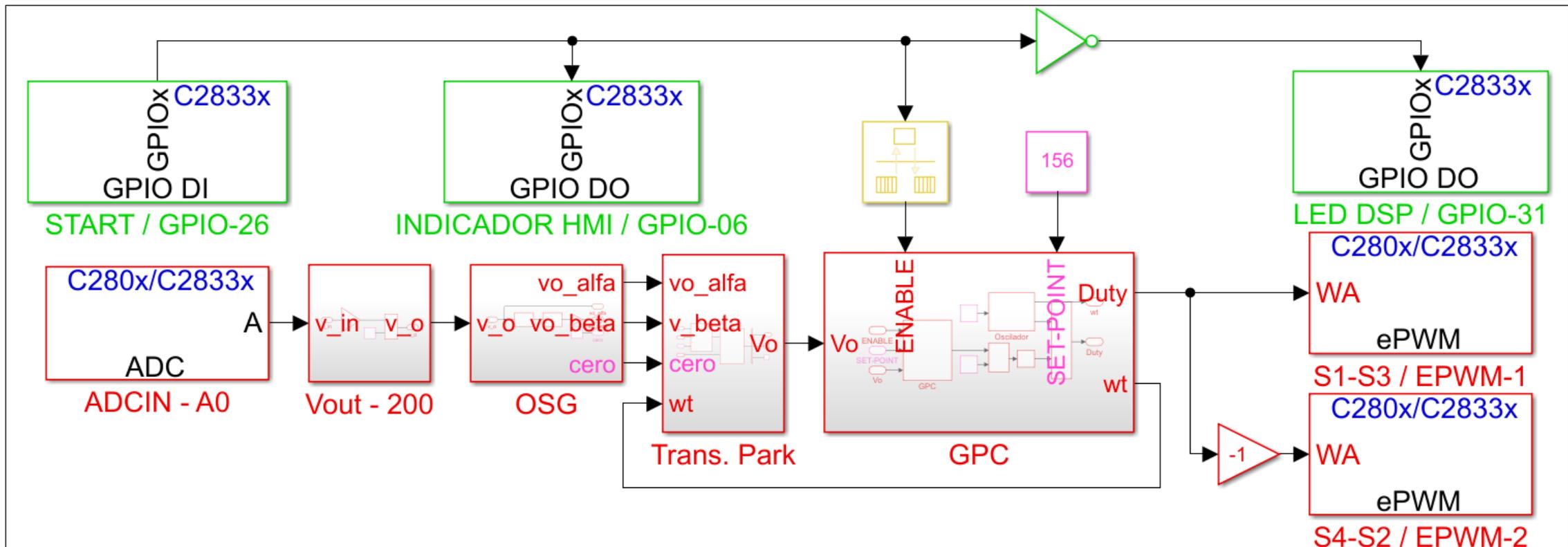
Programación del DSP F28335 mediante la Librería de Código Embebido

Diagrama de bloques del programa implementado en el DSP



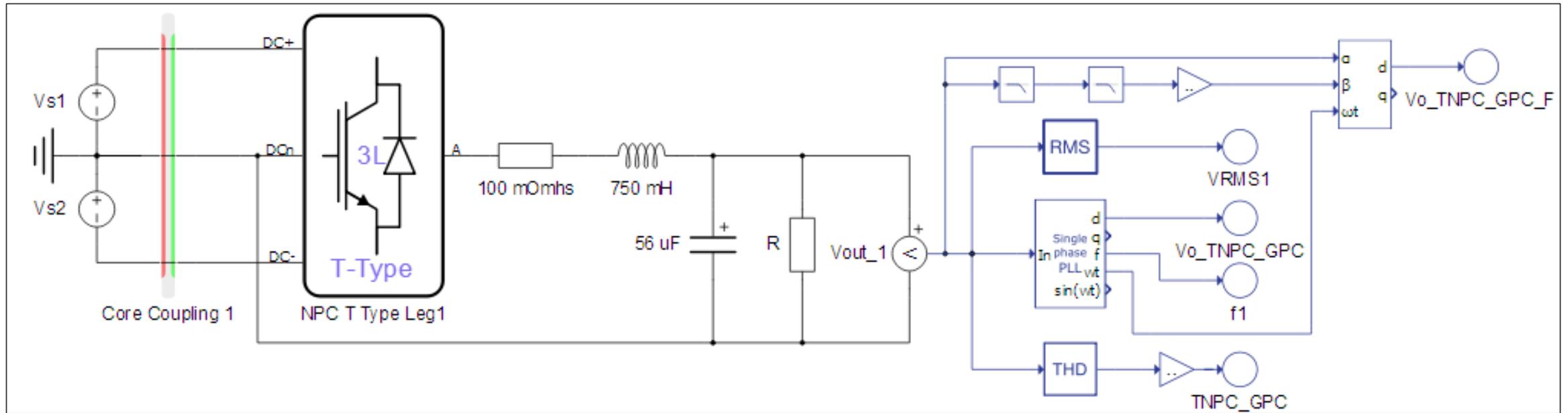
Programación del DSP F28335 mediante la Librería de Código Embebido

Esquema de implementación del sistema de control basado en GPC



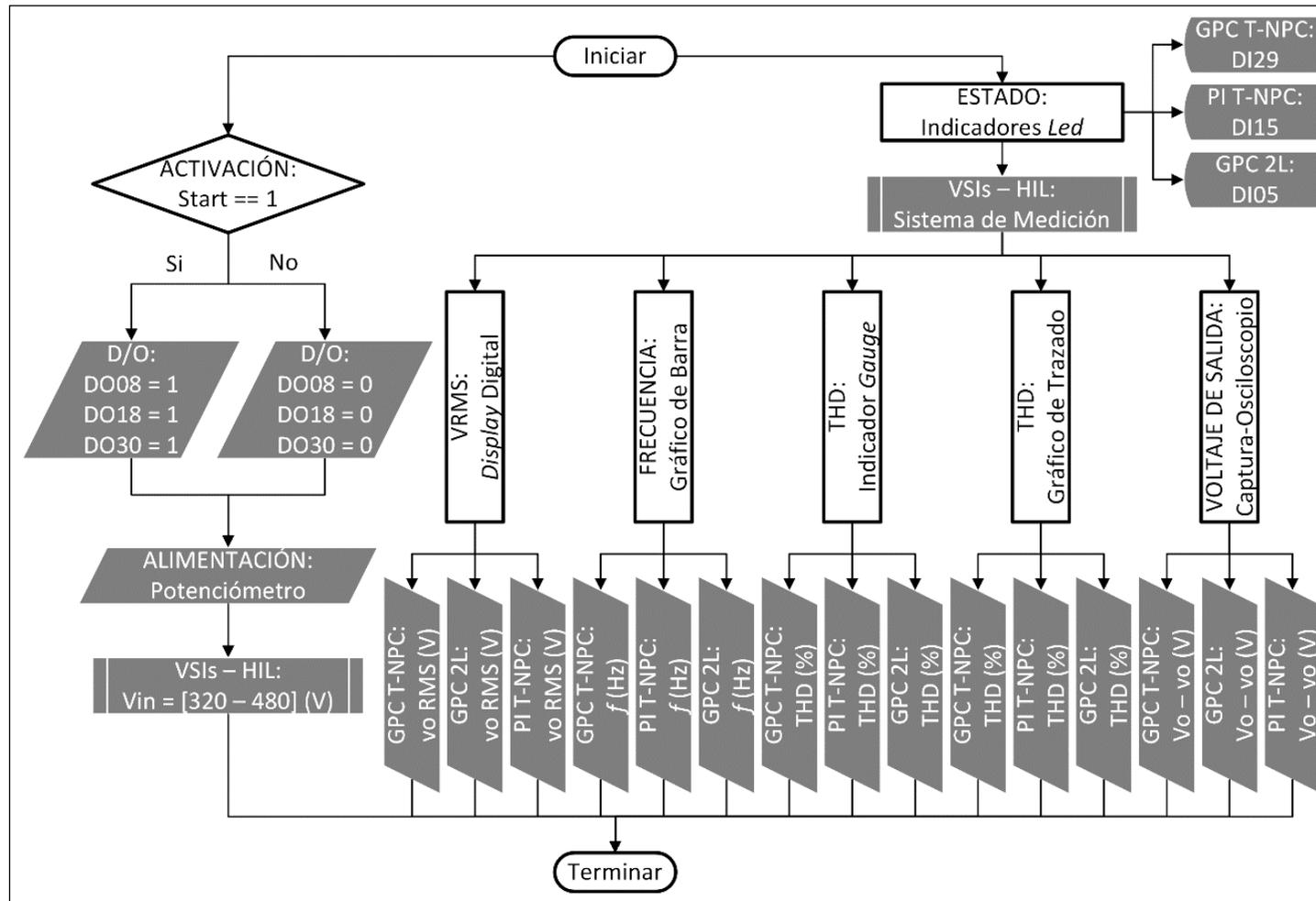
Implementación de la planta en Hardware-in-the-Loop HIL402

Esquema de implementación del VSI NPC tipo T



Implementación de la planta en Hardware-in-the-Loop HIL402

Diagrama de flujo de la interfaz HMI

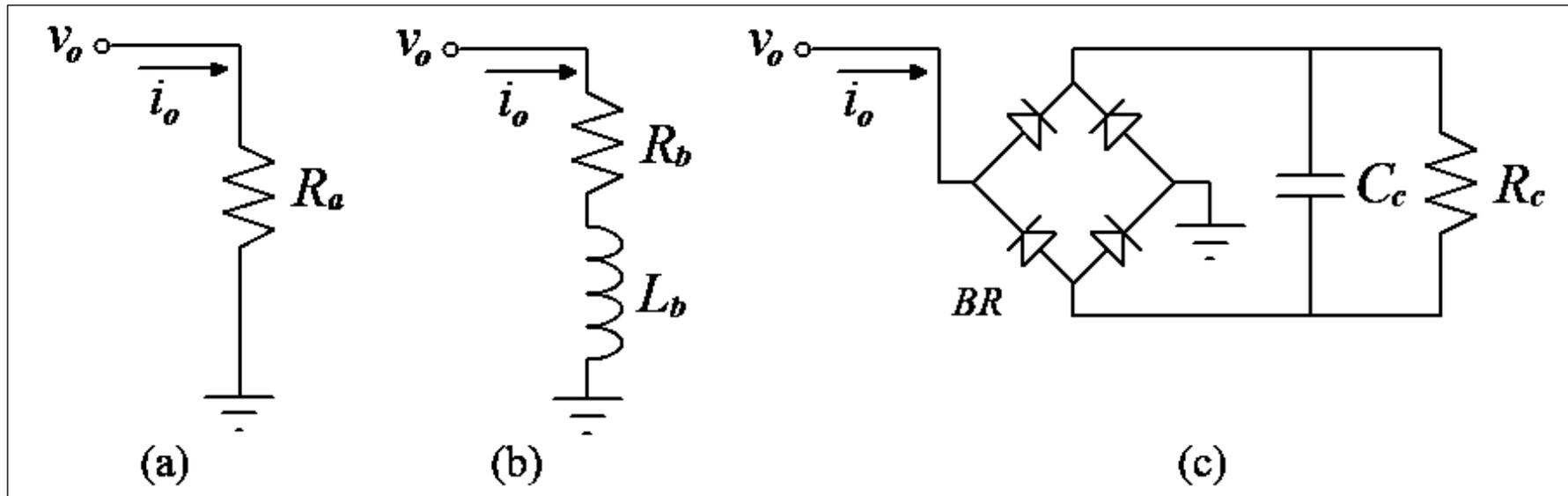


AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
3. Metodología
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
- 6. *Resultados***
7. Conclusiones y Trabajos Futuros

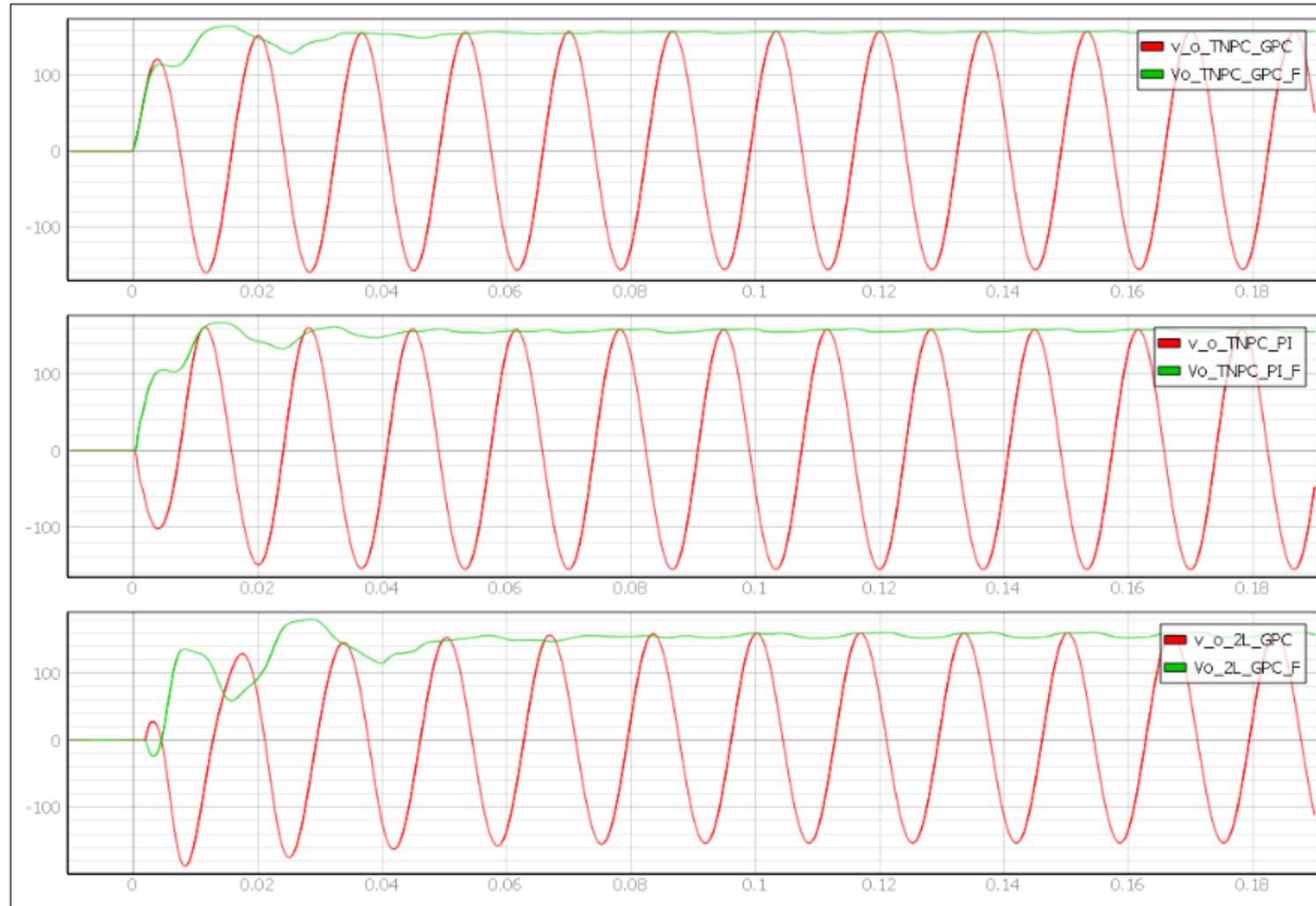
Resultados de Implementación

Escenarios de Cargas



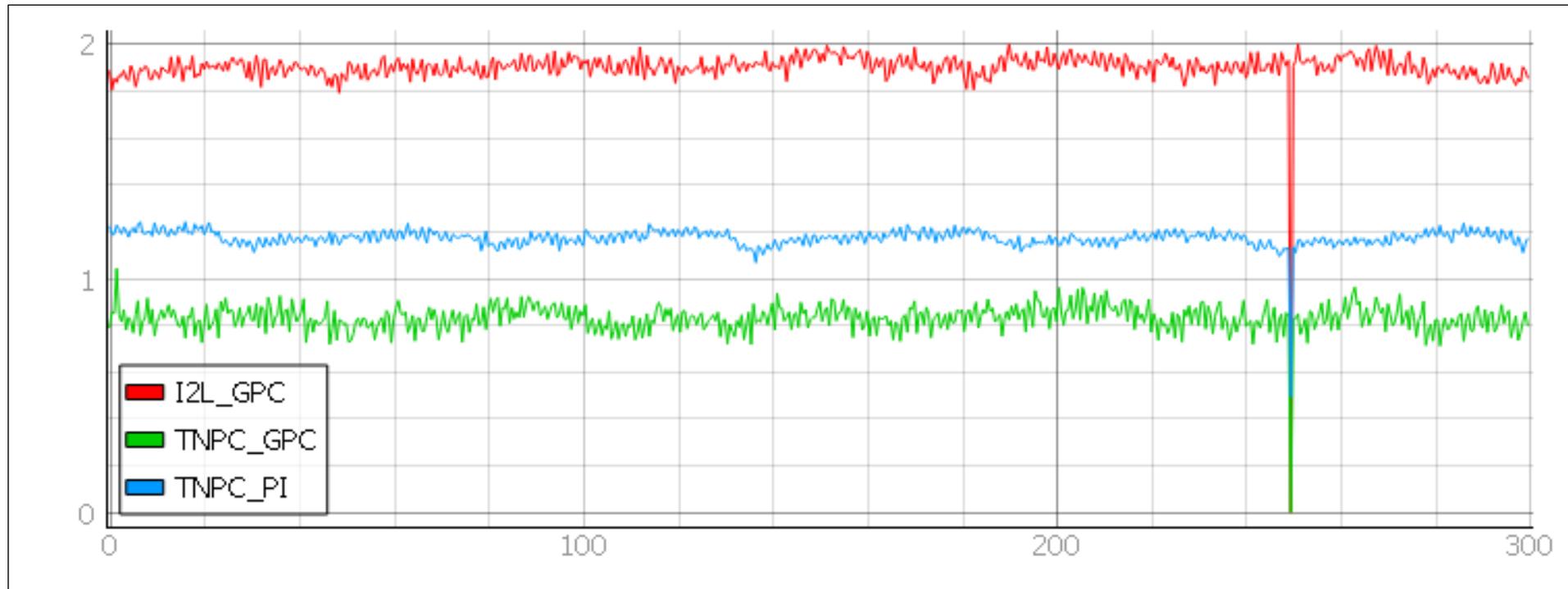
Resultados de Implementación

Carga $R = 5.5 \Omega$



Resultados de Implementación

Carga R = 5.5 Ω THD



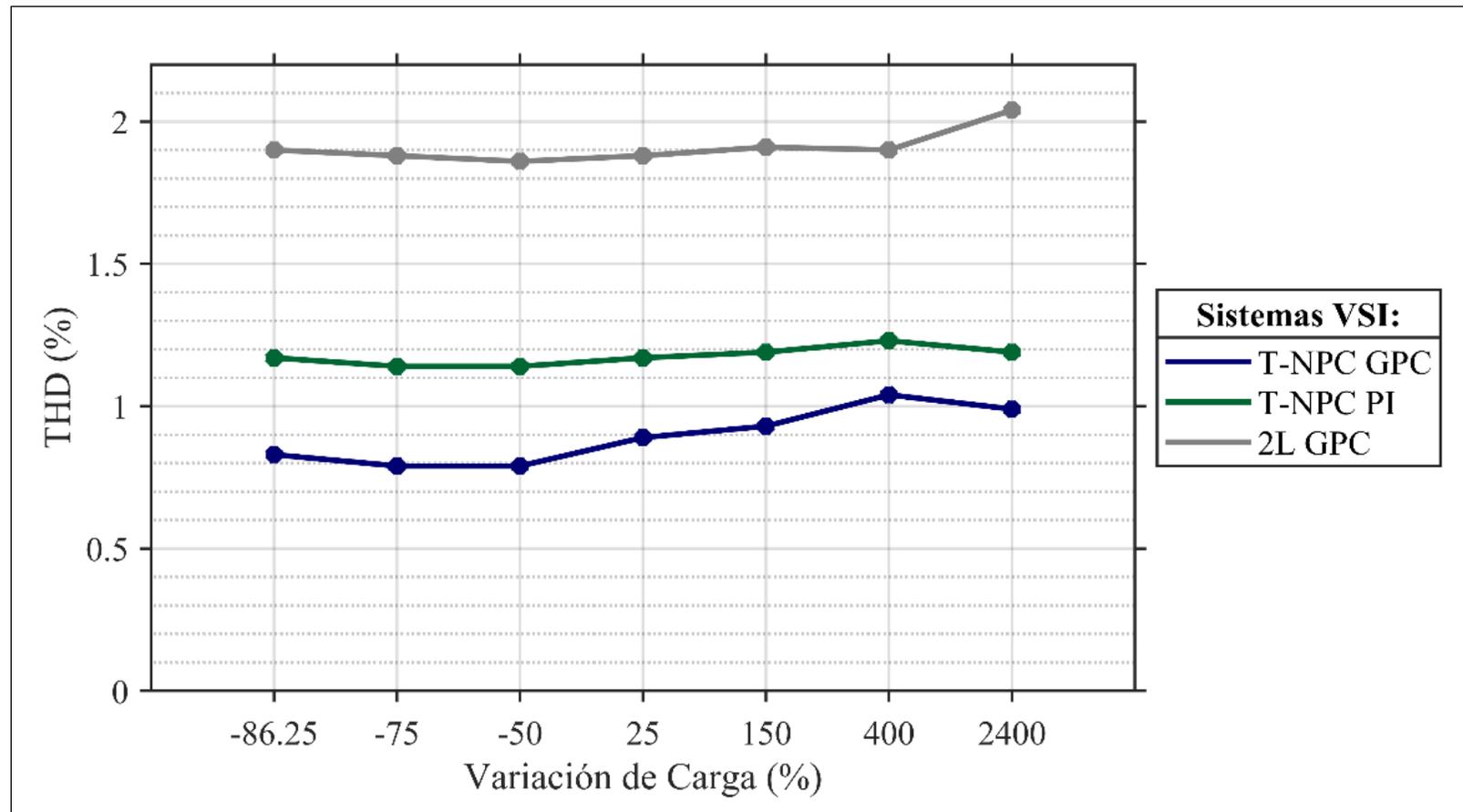
Resultados de Implementación

Resultados del funcionamiento con respecto a cargas resistivas

Caso	Carga R (Ω)	Variación de Resistencia (%)	THD (%)		
			VSI NPC tipo T - GPC	VSI NPC tipo T - PI	VSI 2L - GPC
1	5.5	- 86.25	0.83	1.17	1.90
2	10	- 75.00	0.79	1.14	1.88
3	20	- 50.00	0.79	1.14	1.86
4	50	25.00	0.89	1.17	1.88
5	100	150.00	0.93	1.19	1.91
6	200	400.00	1.04	1.23	1.90
7	1000	2400.00	0.99	1.19	2.04

Resultados de Implementación

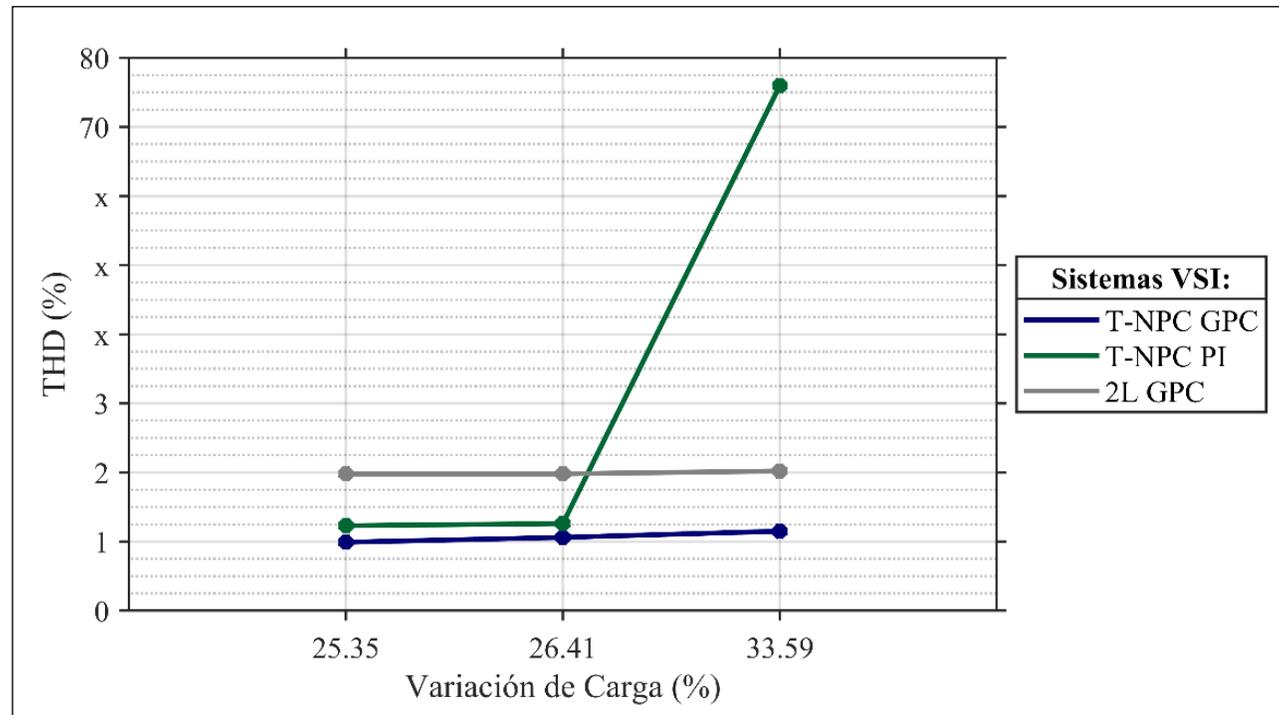
Resultados del funcionamiento con respecto a cargas resistivas



Resultados de Implementación

Resultados del funcionamiento con respecto a cargas RL

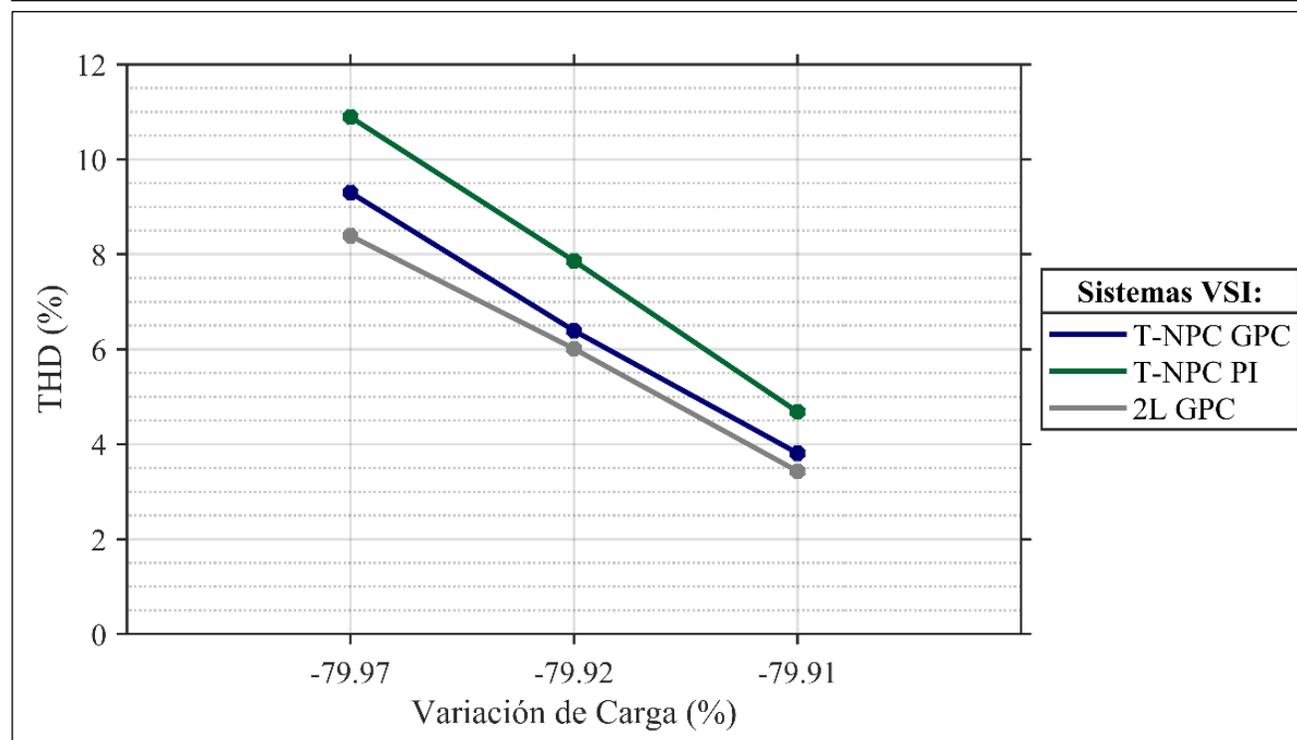
Caso	Carga		Variación del Fasor (%)	THD (%)		
	R (Ω)	L (mH)		VSI NPC tipo T - GPC	VSI NPC tipo T - PI	VSI 2L - GPC
1	50	10	25.35	0.99	1.23	1.98
2	50	20	26.41	1.06	1.26	1.98
3	50	50	33.59	1.15	75.97	2.02



Resultados de Implementación

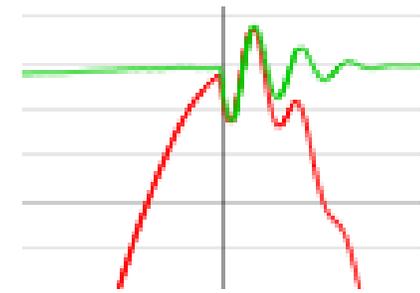
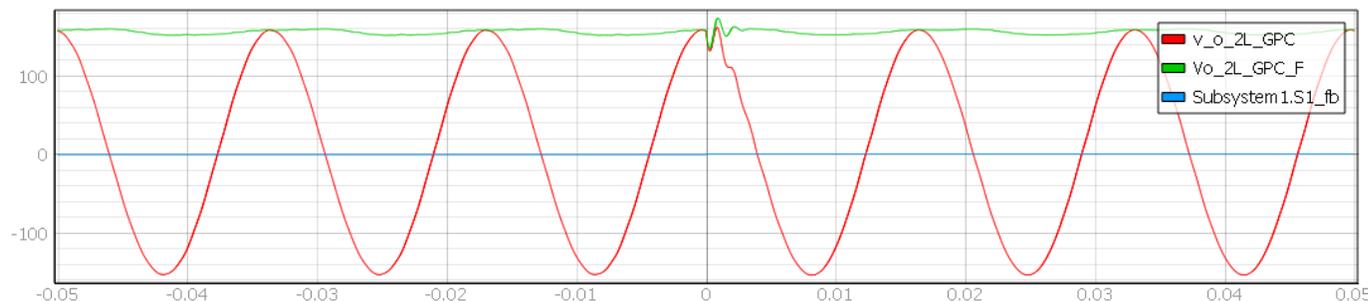
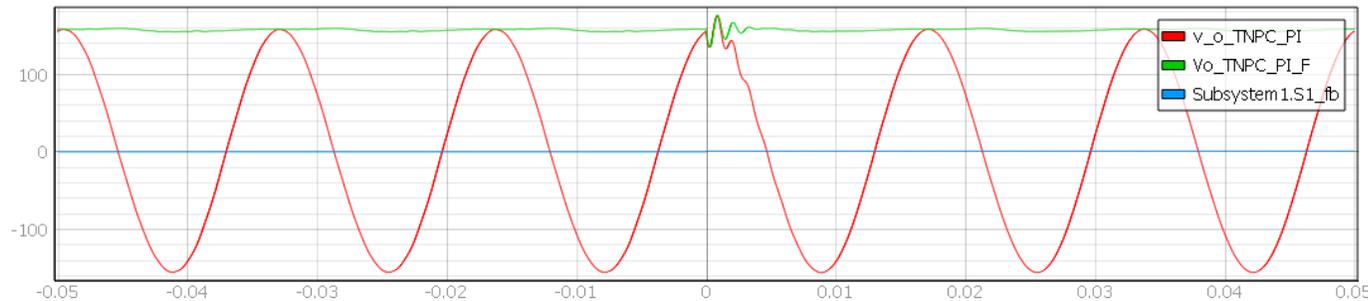
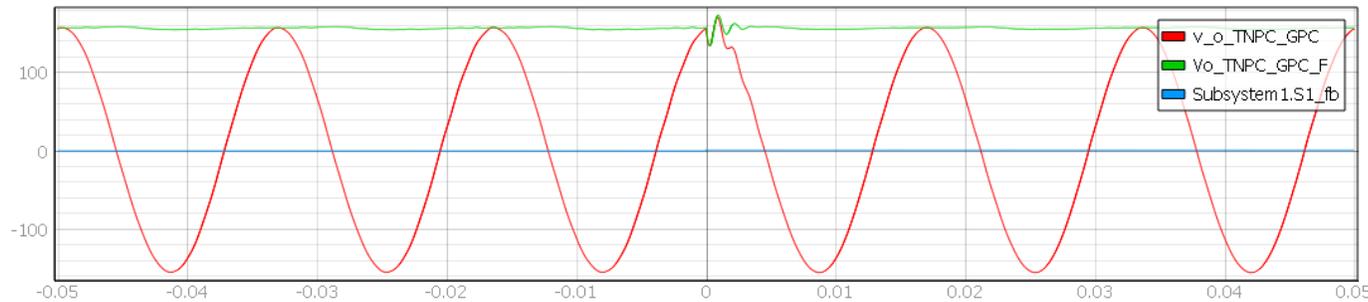
Resultados del funcionamiento con respecto a cargas NL

Caso	Carga		Variación del Fasor (%)	THD (%)		
	R (Ω)	C (μ F)		VSI NPC tipo T - GPC	VSI NPC tipo T - PI	VSI 2L - GPC
1	100	330	- 79.97	9.30	10.89	8.39
2	200	330	- 79.92	6.39	7.86	6.01
3	500	330	- 79.91	3.81	4.68	3.43



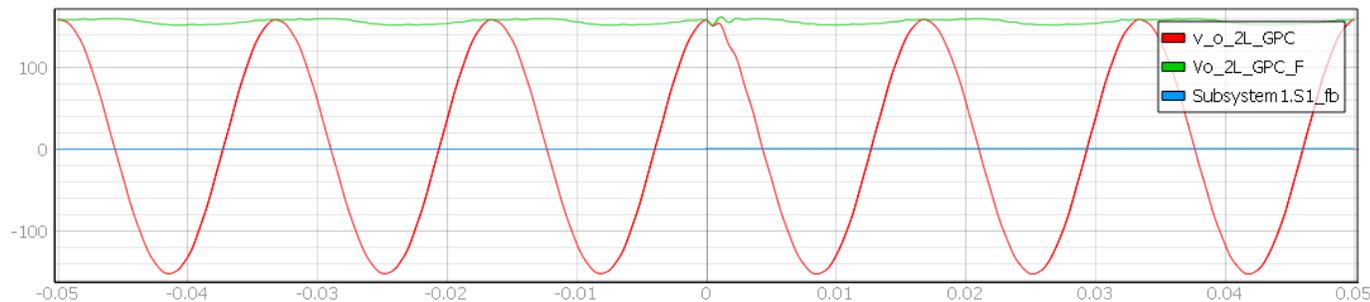
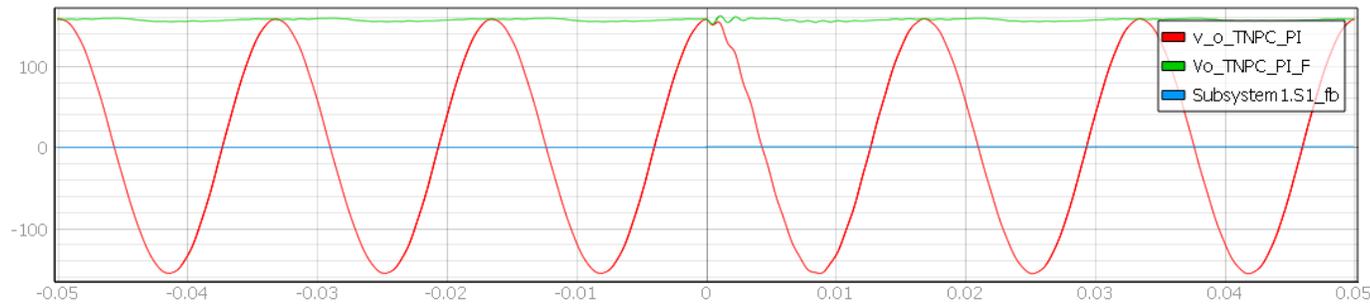
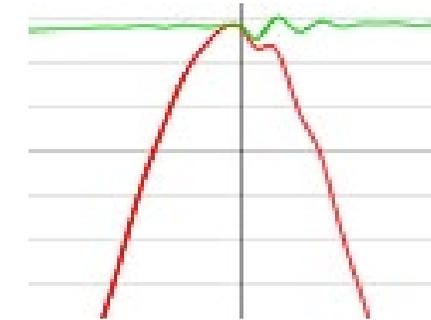
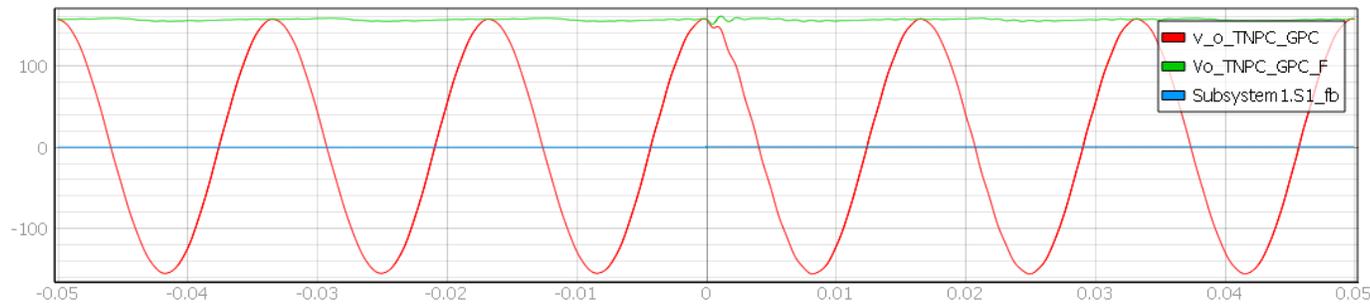
Resultados de Implementación

Resultados del funcionamiento frente a una perturbación con carga $R=20\Omega$



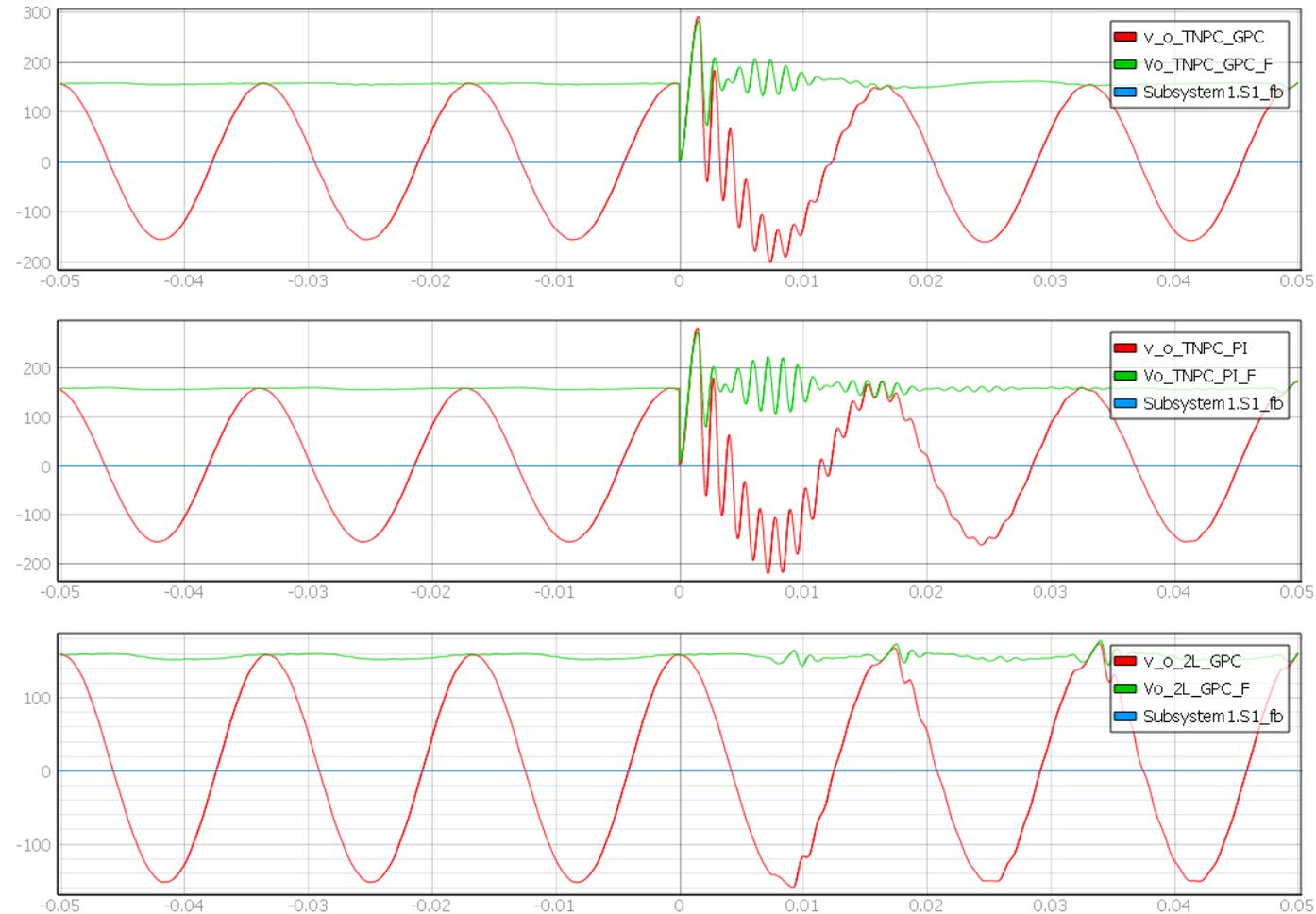
Resultados de Implementación

Resultados del funcionamiento frente a una perturbación con carga RL (50 Ω – 20 mH)



Resultados de Implementación

Resultados del funcionamiento frente a una perturbación con carga NL ($200\ \Omega$ y $330\ \mu\text{F}$)



AGENDA

1. Introducción
2. Conceptos Generales
3. Metodología
4. Simulación
5. Implementación de sistema en tiempo real
6. Resultados
- 7. Conclusiones y Trabajos Futuros**

Conclusiones

- En este trabajo de investigación, se ha propuesto una metodología de control basada en el GPC aplicado a VSI fotovoltaicos monofásicos de tres niveles en operación aislada.
- Se ha utilizado un voltaje DC equivalente para garantizar que el control responda con mayor velocidad, con lo que se ha logrado que la distorsión armónica provocada por las perturbaciones de carga dure intervalos de tiempo cortos y reduzcan la afectación sobre la red eléctrica.
- La metodología de control propuesta en este trabajo de investigación ha sido válida y probada mediante la implementación del controlador en una DSP y del inversor de voltaje en un Hardware-in-the-Loop HIL402.
- El sistema de control GPC propuesto se implementó en un DSP F28335 de Texas Instruments con una frecuencia de discretización y control de 20 kHz. El tiempo de ejecución del sistema de control fue de $30 \mu s$.

Conclusiones

- Se llegó a la conclusión que para cargas lineales el inversor multinivel controlado por GPC logró mejores resultados que los otros dos sistemas. Así, la THD para cargas de tipo R y RL no sobrepasó el 1.2% para todos los casos analizados.
- A pesar de que el VSI 2L logró mejores resultados de la THD para cargas NL, los controladores implementados en esta investigación no logran mantener un THD menor al 8% para cargas no lineales de alta potencia.
- Las interrupciones de carga lineal son manejadas de mejor manera por el sistema de control propuesto, en donde se ha alcanzado un tiempo de respuesta menor a 5 ms.
- El sistema VSI tipo T controlado por GPC requiere de casi un ciclo (17 ms) para lograr controlar el sistema frente a perturbaciones de carga no lineal.
- Se ha demostrado que el sistema de control propuesto es robusto y puede ser aplicado en sistemas de inversión fotovoltaica basada en cargas lineales. Se puede concluir que el controlador puede manejar a los cambios de carga como perturbaciones, y no es necesario la identificación paramétrica del sistema.

Trabajos Futuros

- Desarrollo e implementación de un controlador GPC con restricciones aplicado a VSIs de tipo T.
- Desarrollar una arquitectura basada en FPGA para la implementación de la metodología propuesta en este trabajo con el objetivo de analizar mejoras en rapidez y disminución de la THD.
- Se propone el desarrollo de un sistema simulado basado en redes neuronales que emule el funcionamiento del sistema de control propuesto para disminuir el costo computacional en la implementación del algoritmo.
- Se propone el estudio de una metodología de optimización paramétrica recursiva para encontrar los valores del horizonte de control y los pesos de la función de costo óptimos para alcanzar el mayor rendimiento del sistema propuesto en esta investigación.

Gracias por su atención!

