

Estudio Paramétrico para la Mejora de la Respuesta Dinámica de un Inversor Fotovoltaico Conectado a la Red Mediante el Lugar Geométrico de las Raíces

Parametric Study on Improving the Dynamic Response of a Grid-Connected Photovoltaic Inverter using Root Locus

Camacho-Sifuentes, R.G.¹; Sellschopp-Sánchez, F.S.²; Ruíz-Ponce, G.E.³

Datos de Adscripción:

¹ Camacho Sifuentes, Rita Guadalupe
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón,
Coahuila, México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>

m.rgcamachos@lalaguna.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9386-1604>

² Sellschopp Sánchez, Francisco Sergio
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón,
Coahuila, México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>

fsellschopp@correo.italaguna.edu.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3516-3523>

³ Ruiz Ponce, Gerardo Enrique
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de La Laguna, Torreón,
Coahuila, México.

ROR ID: <https://ror.org/00davry38>

ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>

geruizp@lalaguna.tecnm.mx

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1423-4222>

Resumen - Este artículo presenta un estudio paramétrico orientado a la mejora de la respuesta dinámica de un inversor fotovoltaico trifásico conectado a la red eléctrica, buscando mejorar la estabilidad relativa, el factor de amortiguamiento y la agilidad de respuesta ante cambios. El análisis se centra en mitigar los efectos transitorios producidos por una conexión súbita de carga, ya que, dentro de los lazos de control del inversor, el evento induce una perturbación de tipo impulsivo con decaimiento exponencial en el voltaje del eje q, mientras que el eje d mantiene una transición monotónica tipo escalón, validando el desacoplamiento efectivo de los lazos de control. La metodología emplea las bases del Lugar Geométrico de las Raíces como marco de análisis para evaluar el desplazamiento de los polos del sistema, obtenido mediante un barrido paramétrico discreto de las ganancias de los controladores PI. A través de este enfoque analítico, se identificó una región de operación que permite la proximidad entre polos y ceros dominantes, reduciendo el residuo del modo transitorio, optimizando el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos. Los resultados, obtenidos mediante simulaciones en el entorno MATLAB/Simulink, demuestran que la sintonía derivada del estudio paramétrico logra reducir el sobreimpulso transitorio en el eje q en un porcentaje mayor al 40%. Se concluye que el uso del Lugar Geométrico de las Raíces como herramienta

de diseño proporciona una comprensión profunda de la sensibilidad del sistema, permitiendo robustecer la operación de centrales fotovoltaicas ante cambios dinámicos en la demanda de la red.

Palabras Clave - Análisis Paramétrico, Control de Inversores, Estabilidad Relativa, Lugar Geométrico de las Raíces, Respuesta Transitoria, Sistemas Fotovoltaicos.

Abstract - This article presents a parametric study aimed at improving the dynamic response of a three-phase photovoltaic inverter connected to the grid, with the goal of enhancing relative stability, damping factor, and response agility to changes. The analysis focuses on mitigating the transient effects caused by a sudden load connection, since within the inverter's control loops, the event induces an impulse-type disturbance with exponential decay in the q-axis voltage, while the d-axis maintains a step-like monotonic transition, validating the effective decoupling of the control loops. The methodology employs the foundations of the Root Locus as an analytical framework to evaluate the displacement of the system's poles, obtained through a discrete parametric sweep of the PI controller gains. Through this analytical approach, an operating region was identified that allows proximity between dominant poles and zeros, reducing the residue of the transient mode and optimizing the system damping without resorting to complex computational algorithms. The results, obtained through simulations in the MATLAB/Simulink environment, demonstrate that the tuning derived from the parametric study reduces the transient overshoot on the q-axis by more than 40%. It is concluded that the use of Root Locus as a design tool provides a deep understanding of the system's sensitivity, enabling the operation of photovoltaic power plants to be made more robust in the face of dynamic changes in grid demand.

Keywords - Inverter Control, Parametric Analysis, Photovoltaic Systems, Relative Stability, Root Locus, Transient Response.

I. INTRODUCCIÓN

Las redes eléctricas de todo el mundo han experimentado una transformación significativa, caracterizada por una mayor penetración de la generación distribuida renovable (Golpîra et al., 2021). La integración exitosa de las FER (Fuentes de Energía Renovables) distribuidas requiere un mayor nivel de visibilidad (y controlabilidad) de los inversores. Se necesita un nivel mínimo de rendimiento durante las perturbaciones, lo que a su vez requiere conocimiento de las características dinámicas del sistema y del comportamiento de las FER distribuidas.

Los estudios de sensibilidad y las técnicas de análisis basadas en datos son de especial interés, ya que pueden complementar la información sobre el comportamiento del sistema, por ejemplo, para comprender los patrones dinámicos que surgen de la integración de nueva generación eólica y fotovoltaica. (Golpîra et al., 2021).

Por ello, la rápida penetración de las fuentes de energía renovables y los sistemas de generación distribuida ha impulsado la conexión de inversores a la red eléctrica. Esto implica que los dispositivos conectados a la red que se utilizan en los sistemas de generación distribuida deben diseñarse y controlarse cuidadosamente para lograr un rendimiento aún mejor que el de las centrales eléctricas convencionales a las que sustituyen (Teodorescu et al., 2011).

Los inversores conectados a la red, inherentemente asociados a las FER, presentan una alta sensibilidad a variaciones en los parámetros del controlador, lo que puede comprometer la estabilidad del sistema (Firdaus et al., 2017). Por ello, estudios paramétricos detallados (donde se analiza el efecto de cada parámetro de manera individual) son esenciales para garantizar la robustez del control ante perturbaciones y condiciones variables de operación (Chakraborty et al., 2025).

Existen diferentes investigaciones y estudios que analizan estrategias de control avanzadas para mejorar la respuesta dinámica de un inversor; por ejemplo, Zhou et al. 2021; evalúan las capacidades de estimación y rechazo de disturbios mediante funciones de transferencia y análisis en el dominio de la frecuencia. Además, hay propuestas de métodos avanzados para mejorar la respuesta dinámica y la robustez en el control de inversores, como el algoritmo de eliminación de polos dominantes que presentan Quan et al. 2020.

Sin embargo, una técnica clásica que destaca por su capacidad para interpretar la sensibilidad de un sistema de control es el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR). En este trabajo, el LGR no se construye de forma continua variando una única ganancia, sino que se emplean sus bases conceptuales como marco de análisis para interpretar el desplazamiento de los polos en lazo cerrado, los cuales se obtienen mediante un barrido paramétrico discreto de las ganancias del controlador PI. Este enfoque permite mejorar el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos,

manteniendo la esencia interpretativa del LGR. Estudios previos, como los de Feng et al. (2013), de Jadhav et al. (2015) y de De Paiva et al. (2009), han demostrado la utilidad del LGR para identificar parámetros críticos y orientar el ajuste de controladores.

Este estudio paramétrico tiene como propósito mejorar la respuesta dinámica de un inversor trifásico conectado a la red (Figura 1). Específicamente, se analiza el lazo de corriente I_q , utilizando mapas de polos-ceros para mostrar el desplazamiento de los polos dominantes e identificar cómo las ganancias proporcional (k_p) e integral (k_i) afectan el comportamiento del sistema. La perturbación considerada es la conexión súbita de una carga trifásica de 30 kW (Figura 2), que demanda corriente adicional de la central fotovoltaica y de la red, simulando un evento real que puede excitar modos transitorios no deseados.

La metodología utilizada en este desarrollo es similar a la empleada por Mao et al. (2014), que determina rangos óptimos de parámetros, los cuales aseguran estabilidad y buen rendimiento del inversor.

Figura 1
Topología del sistema eléctrico

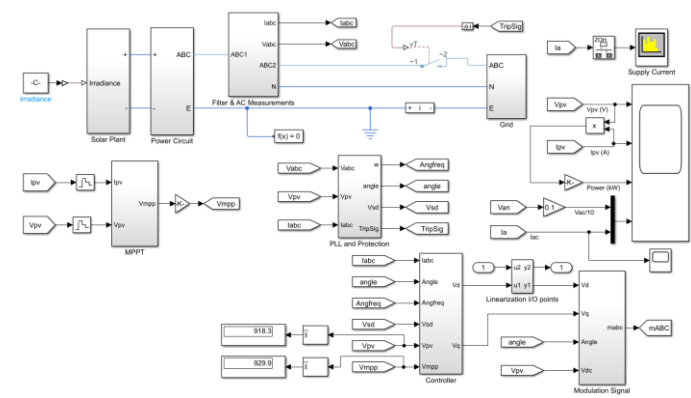
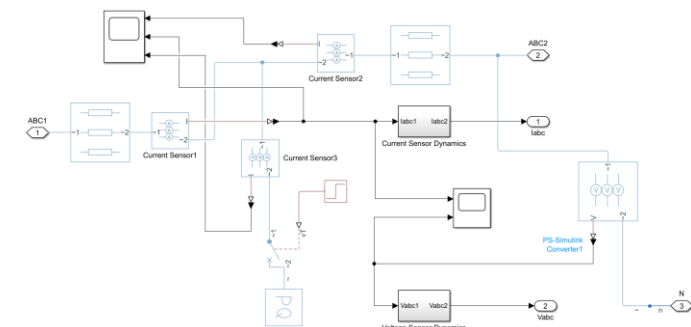


Figura 2
Conexión de una carga trifásica



La simulación se realiza en modo conectado a la red con irradiancia constante (1000 W/m²). Una vez alcanzado el estado estable (aproximadamente a los 6 segundos), se conecta la

carga y se observa la respuesta del control ante el transitorio, hasta alcanzar un nuevo estado estable. Este procedimiento se repite para cada combinación de ganancias evaluada.

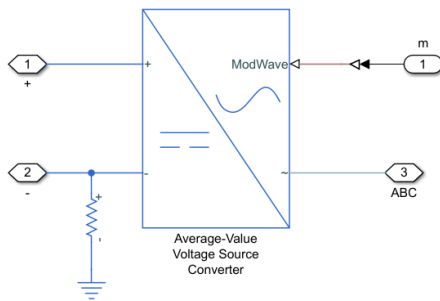
II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

2.1 Modelo del inversor

El modelo promedio del inversor muestra la dinámica de los valores promedio de las variables, ya que los compensadores y filtros en un sistema de control de lazo cerrado suelen presentar características de paso bajo y no reaccionan a los componentes de alta frecuencia. Un modelo promediado también nos permite describir la dinámica del convertidor en función de la señal moduladora. Se utilizó el bloque del inversor promedio *Average-Value Model* de la librería Simscape (Figura 3) que representa la dinámica fundamental del convertidor mediante funciones de transferencia de valor medio, eliminando las armónicas de conmutación de alta frecuencia. Este bloque utiliza señales de modulación para calcular el voltaje promedio que el convertidor entrega en cada ciclo de conmutación.

Figura 3

Bloque del modelo de valor promedio



Las ecuaciones (1) y (2) describen la dinámica de las corrientes del convertidor en el marco de referencia dq

$$L \frac{di_d}{dt} = -Ri_d + \omega Li_q + (v_{id} - v_d) \quad (1)$$

$$L \frac{di_q}{dt} = -Ri_q - \omega Li_d + (v_{iq} - v_q) \quad (2)$$

donde L y R son la inductancia y resistencia del filtro, respectivamente. Las corrientes en el marco de referencia dq están representadas como i_d e i_q , los voltajes generados por el inversor son v_{id} y v_{iq} ; v_d y v_q son los voltajes en el punto de conexión y ωLi_d , ωLi_q son los términos de acoplamiento cruzado.

Este es un sistema de etapa única sin convertidor DC-DC, lo que hace que la estabilidad del bus de corriente continua dependa directamente del desempeño del control del voltaje.

La estructura del controlador está formada por controladores PI (Proporcionales-Integrales) que son ampliamente utilizados en los inversores conectados a la red para seguir una corriente de

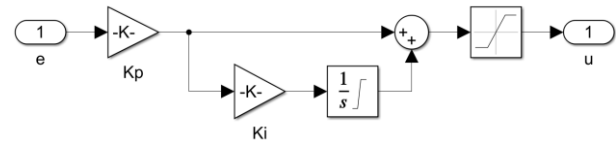
referencia de modo que se pueda inyectar una corriente deseada a la red; la estructura del controlador PI utilizado dentro del control del inversor analizado en este estudio se muestra en la Figura 4. La ecuación (3) representa la función de transferencia de un controlador PI típico.

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3)$$

donde K_p y K_i son las ganancias proporcional e integral, respectivamente.

Figura 4

Controlador PI utilizado dentro del control del inversor



La estructura del control del inversor tiene dos lazos independientes:

- **Lazo del eje d :** encargado de regular la magnitud del voltaje V_d (Figura 5).
- **Lazo del eje q :** encargado de mantener V_q en su referencia (Figura 6), asegurando la estabilidad ante perturbaciones.

Figura 5

Lazo de control I_d

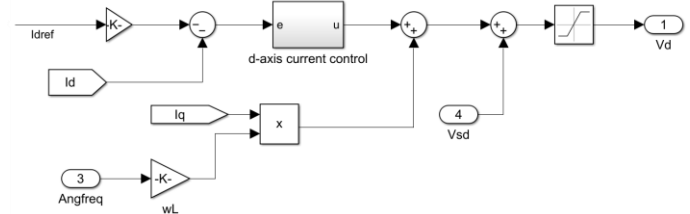
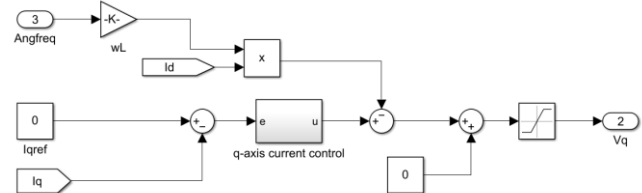


Figura 6

Lazo de control I_q



Se utilizan dos controladores PI para regular las corrientes I_d e I_q , de acuerdo con la señal de referencia $I_{d,ref}$ (señal de salida del control de voltaje) e $I_{q,ref}$, que se comparan con las señales de $I_{d,q}$ medidas con referencia a la corriente trifásica I_{abc} de la red eléctrica, para obtener las señales de V_d y V_q respectivamente.

Para que el lazo de control de V_q no se vea afectado por cambios en I_d y viceversa, se suman términos de compensación proporcionales ωL .

La señal de control final que va al bloque *Average-Value Model* se representa con las ecuaciones (4) y (5).

$$v_{id}^* = v_{id} - \omega L i_q + v_{sd} \quad (4)$$

$$v_{iq}^* = v_{iq} + \omega L i_d \quad (5)$$

Esto permite que el sistema se vea como dos plantas lineales de primer orden independientes (Yazdani, A, et al., 2010).

Se utiliza un PLL (Phase-Locked Loop) para proporcionar la información de fase de la tensión de la red, que es necesaria para transformar las corrientes de la red en sus componentes del marco de referencia dq y luego transformar la señal de control de tensión de vuelta al marco original abc (Figuras 7 y 8). Esta etapa forma una interfaz entre el algoritmo de control de voltaje y la etapa de potencia, garantizando que el inversor replique las componentes de los ejes d y q , en las terminales de corriente alterna del sistema.

Figura 7
Modulación de la señal

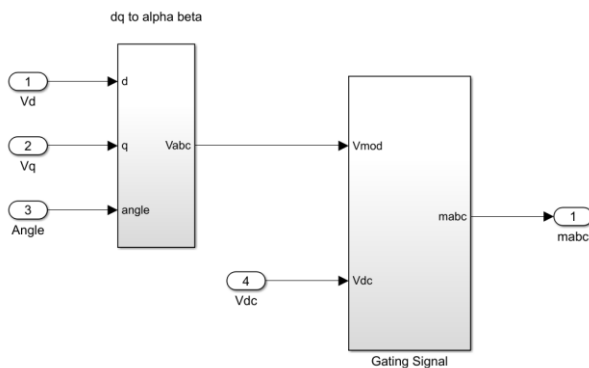
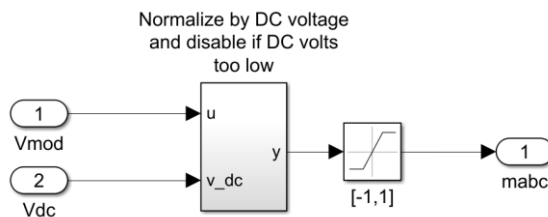


Figura 8
Regulación del voltaje CD

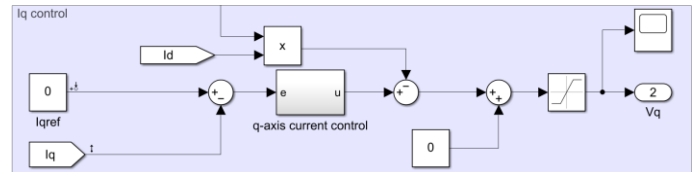


2.2 Metodología de linealización y estudio paramétrico

Debido a que el lazo de control de la corriente I_q es el más afectado durante la conexión de la carga, la planta se linealizó en este punto, Figura 9. Se utilizó la herramienta Model Linearizer de MATLAB/Simulink para obtener el modelo lineal del sistema. Para ello, se definió un punto de operación en el lazo de control de corriente I_q que controla el voltaje V_q , donde

se definieron las señales de entrada $I_{q,ref}$ y de salida I_q como referencia para la aplicación de la simulación. El software aplica una pequeña perturbación en el punto especificado para extraer una función de transferencia linealizada que representa la dinámica del inversor en ese régimen.

Figura 9
Identificación de las señales de referencia



Para evaluar la eficacia del ajuste de los valores de las ganancias, se definió una métrica basada en la estabilidad relativa y la ubicación de las raíces:

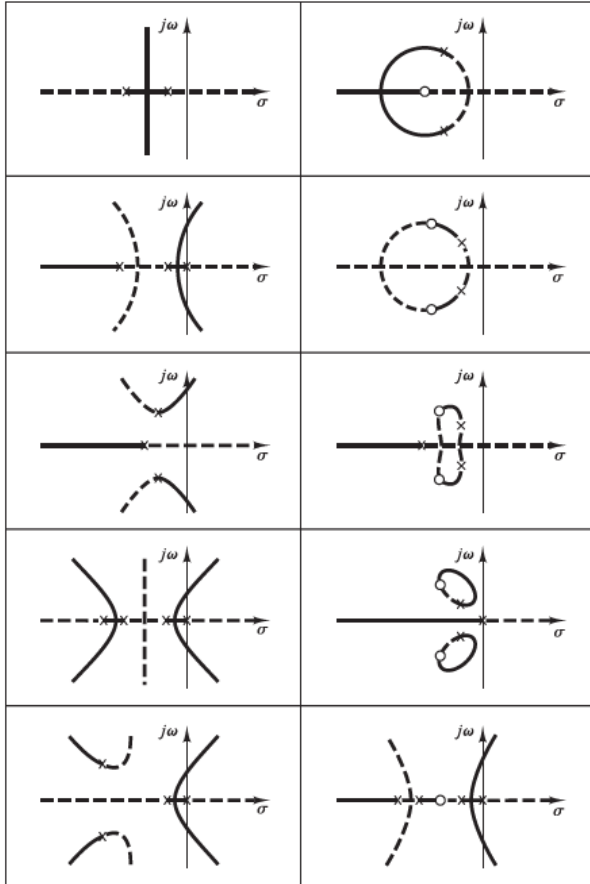
- **Indicador en el dominio del tiempo:** Se utiliza la reducción porcentual del sobreimpulso transitorio en la corriente del eje q . Un sobreimpulso menor indica un control de voltaje más robusto, ya que el sistema absorbe las perturbaciones de la carga con menor oscilación.
- **Indicador en el dominio de la frecuencia:** distancia entre el cero dominante y el polo dominante. En el "Mejor Caso", esta cercanía o distancia reduce el residuo de la respuesta transitoria, forzando al sistema a comportarse como uno de primer orden aun cuando es de segundo orden.
- **Desplazamiento de polos dominantes:** Se identifica el polo dominante como aquel cuya parte real está más próxima al eje imaginario del plano complejo s o más cercano al círculo unitario en el plano discreto z , es decir, es el que determina la velocidad de convergencia del sistema. Este polo representa el modo más lento y, por tanto, el que más influye en la respuesta transitoria. Se monitorea la trayectoria de los polos dominantes respecto al círculo unitario. Un polo más cercano al origen en el plano discreto garantiza una convergencia más rápida hacia el estado estable.

En sistemas lineales, el Lugar Geométrico de las Raíces (LGR) es una herramienta conceptual que permite interpretar cómo la ubicación de los polos de lazo cerrado se relaciona con la respuesta transitoria (Ogata, 2010). Si bien el LGR clásico construye trayectorias continuas al variar una ganancia multiplicativa, en este trabajo se emplea su fundamento conceptual para analizar el desplazamiento de los polos a partir de un barrido paramétrico discreto de las ganancias k_p y k_i . Para ello, se linealiza el modelo en un punto de operación (Figura 9) y se calculan los polos en lazo cerrado únicamente para los valores discretos de ganancia definidos en la Tabla 1. A partir de estos puntos, se observa la tendencia de movimiento de los polos dominantes y se correlaciona con la respuesta temporal. De esta forma, el LGR actúa como una guía de interpretación –no como una herramienta de trazado continuo– permitiendo analizar cualitativamente aspectos como el amortiguamiento (polos con parte real más negativa), la

presencia de oscilaciones (polos cercanos al eje imaginario) o la velocidad de respuesta (polos cercanos al origen). Tal como expone Ogata (2010) y se ilustra en la Figura 10, el LGR permite visualizar la evolución progresiva de la estabilidad y el amortiguamiento. A través de este enfoque analítico, se identificó una región de operación donde la proximidad entre polos y ceros dominantes reduce el residuo del modo transitorio, optimizando el amortiguamiento del sistema sin recurrir a algoritmos computacionales complejos.

Figura 10

Trayectoria de las raíces de sistemas con realimentación negativa y positiva, extraída de K. Ogata, (2010).



En el control de inversores, donde la dinámica suele ser dominada por modos de segundo orden asociados al lazo de corriente y al lazo de tensión, el LGR resulta particularmente valioso porque permite analizar cómo el amortiguamiento, la frecuencia natural y la estabilidad relativa evolucionan al modificar las ganancias del controlador. Además, la presencia del controlador PI introduce un cero real que modifica la ubicación de las raíces y puede mejorar o empeorar la respuesta transitoria (Ogata, K. 2010). Esta visualización facilita comprender cómo los ajustes en k_p y k_i influyen en la respuesta transitoria del inversor y en su capacidad para rechazar perturbaciones.

La conexión súbita de una carga trifásica introduce un escalón en la demanda de corriente, lo que excita los modos dinámicos del lazo de control de I_q . Considerando la afectación de las variables en el sistema, empleando los principios del LGR es posible interpretar, para cada combinación de ganancias evaluada, si el sistema presentará sobreimpulso (polos con bajo amortiguamiento), si habrá oscilaciones (polos cercanos al eje imaginario), si la respuesta será lenta (polos muy cercanos al origen), (Figura 11). Esta interpretación facilita entender cómo las ganancias k_p y k_i modifican la ubicación de polos y ceros dominantes y por qué su ajuste afecta la dinámica del sistema (Figura 12). Por ejemplo, la ganancia proporcional desplaza las raíces hacia la izquierda en el plano complejo s , aumentando la rapidez de respuesta del sistema, y la ganancia integral introduce un polo en el origen y un cero real, lo que puede mejorar el seguimiento de la señal de referencia en estado estacionario, pero puede reducir el amortiguamiento si el cero no está bien ubicado.

Figura 11

Respuesta de un sistema de segundo orden en función del coeficiente de amortiguamiento, extraída de N. S. Nise, 2011.

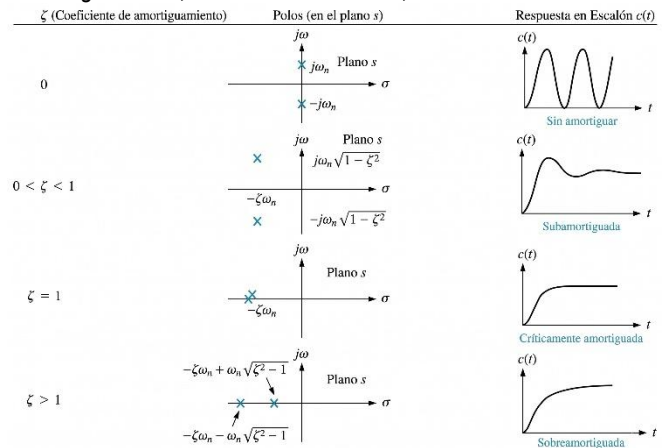
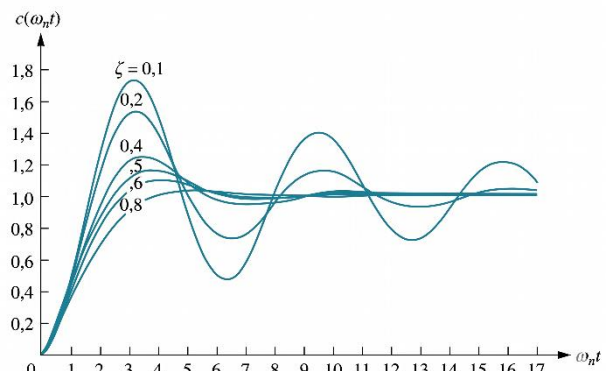


Figura 12

Gráfica de la respuesta de un sistema de segundo orden en función del coeficiente de amortiguamiento



III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El caso propuesto considera que el sistema fotovoltaico recibe una irradiancia constante de $1,000 \text{ W/m}^2$, en donde el algoritmo del MPPT (Maximum Power Point Tracking) suministra la máxima potencia, a partir de los 6 segundos transcurridos. En este punto se toma un *snapshot* indicándole a la herramienta de simulación el momento en que se debe linealizar el sistema para extraer la función de transferencia equivalente y el mapa de Polos-Ceros en el plano discreto.

Para evaluar la sensibilidad del lazo de control de I_q ante variaciones de K_p y K_i se realizó un barrido uno a uno en un rango del $\pm 40\%$ respecto a los valores originales (o nominales) del sistema a simular ($K_{p_{nominal}} = 30.016$, $K_{i_{nominal}} = 29.6166$). Primero se varió K_i manteniendo K_p nominal, observándose cambios moderados en la respuesta. El valor $K_i = K_{i_{nominal}} + 10\%$ (32.57826) mostró el mejor comportamiento, por lo que se fijó para el siguiente paso. Luego se varió K_p desde -40% hasta $+40\%$ con K_i fija en 32.57826 . La sensibilidad fue mucho mayor: el sobreimpulso de I_q disminuyó notablemente al aumentar K_p . La combinación $K_p = K_{p_{nominal}} + 40\%$ (40.0223) con $K_i = 32.57826$ se identificó como el mejor caso, mientras que $K_p = K_{p_{nominal}} - 40\%$ (18.0096) con la misma K_i fue el peor caso. La Tabla 1 resume todas las combinaciones evaluadas en este estudio.

Realizando un análisis fundamentado en los principios del LGR, se definieron dos escenarios críticos para la comparación: el "Peor Caso", caracterizado por una sintonía que provoca una separación significativa entre polos y ceros dominantes, y el "Mejor Caso", donde se logra una mayor proximidad entre ellos. Esta proximidad reduce el residuo del modo transitorio, contribuyendo a la disminución del sobreimpulso y a una respuesta con mejor amortiguamiento relativo.

Tabla 1

Valores de las ganancias en cada escenario de simulación

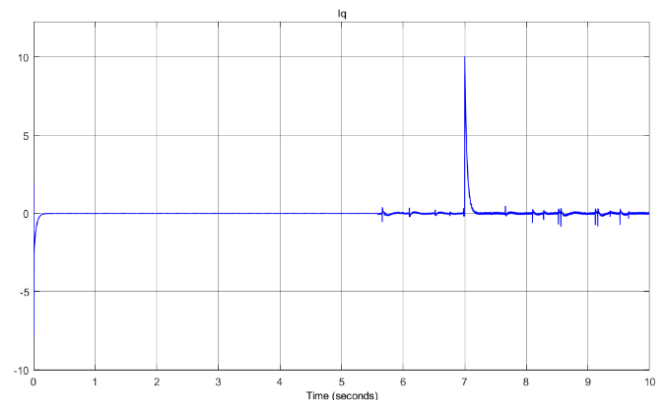
Escenario	K_p	K_i	Comentario
Nominal	30.0160	29.6166	Punto de referencia
$K_i - 40\%$	30.0160	17.76996	-
$K_i - 30\%$	30.0160	20.73162	-
$K_i - 20\%$	30.0160	23.69328	-
$K_i - 10\%$	30.0160	26.65494	-
$K_i + 10\%$	30.0160	32.57826	-
$K_i + 20\%$	30.0160	35.53992	-
$K_i + 30\%$	30.0160	38.50158	-
$K_i + 40\%$	30.0160	41.46324	-
$K_p - 40\%$	18.0096	32.57826	Peor Caso
$K_p - 30\%$	21.0112	32.57826	-
$K_p - 20\%$	24.0128	32.57826	-
$K_p - 10\%$	27.0144	32.57826	-
$K_p + 10\%$	33.0176	32.57826	-
$K_p + 20\%$	36.0192	32.57826	-
$K_p + 30\%$	39.0207	32.57826	-
$K_p + 40\%$	42.0223	32.57826	Mejor Caso

La conexión de la carga trifásica se realiza a los 7 segundos (después de que el sistema se estabiliza), y monitoreando la respuesta de la señal de I_q después de esa perturbación, se observa un sobreimpulso con una duración aproximada de 0.2 segundos. Esta perturbación afecta directamente a la componente V_q de salida al inversor.

En las gráficas de las señales en el "Peor Caso" se identifica un incremento en el valor del sobreimpulso transitorio donde $I_q = 10.054$, además se muestra una señal perturbada y con oscilaciones.

Figura 13

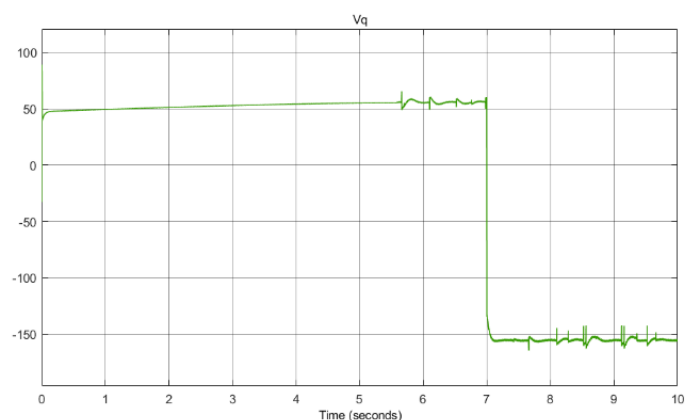
Gráfica de la respuesta de la señal I_q en el "Peor Caso"



Afectando también la respuesta de la señal de V_q que se muestra distorsionada y decremента su valor hasta -158V sin llegar a estabilizarse después del transitorio (Figura 14).

Figura 14

Gráfica de la respuesta de la señal V_q en el "Peor Caso"



Además, hay una afectación en la corriente trifásica I_{abc} después de la conexión de la carga, ya que se estabiliza lentamente (Figura 15).

Por otra parte, se puede apreciar una mejora en la respuesta del control al ver las señales en el "Mejor Caso" donde el sobreimpulso transitorio se reduce $I_q = 4.901\text{A}$ y la señal se aprecia estable y sin oscilaciones (figura 16).

Figura 15
Gráfica de la respuesta de la corriente trifásica i_{abc} en el “Peor Caso”

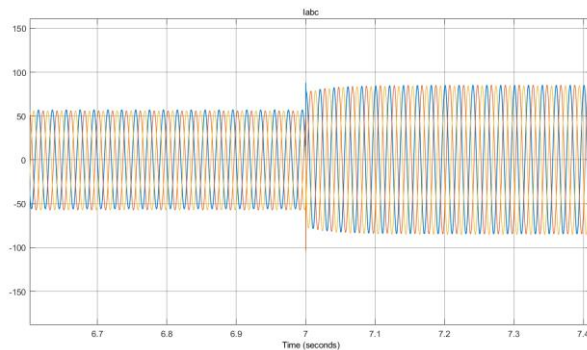
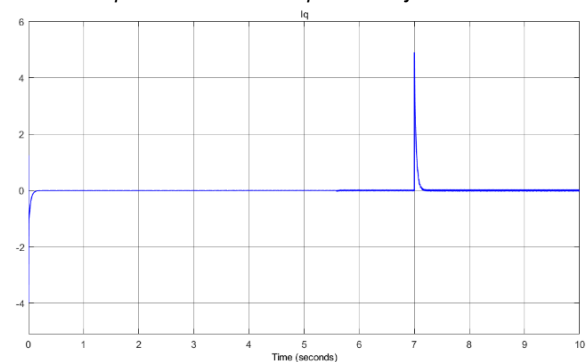
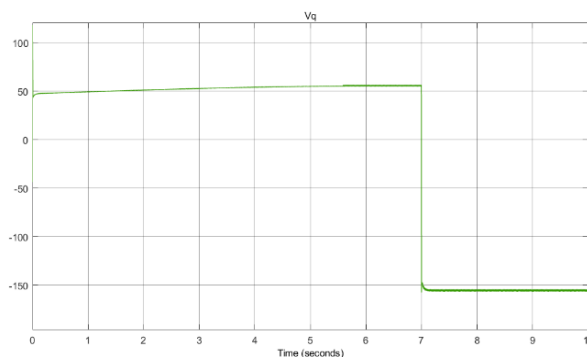


Figura 16
Gráfica de la respuesta de la señal I_q en el “Mejor Caso”



De la misma manera, como se muestra en la Figura 17, el impacto en el decremento de la magnitud la señal I_q se ve favorecido $V_q = -156V$ y muestra una respuesta nítida y estable.

Figura 17
Gráfica de la respuesta de la señal V_q en el “Mejor Caso”



El análisis de las diferencias en las gráficas temporales de las señales (Figuras 13 y 16) evidencia la reducción del sobreimpulso transitorio en el eje q en un 51.24%. Estas evidencias se pueden comparar al observar la trayectoria de los polos en el plano discreto presentado en las Figuras 18 y 19, junto con las gráficas de las Figuras 20 y 21, que muestran las diferentes posiciones de los polos de acuerdo con los valores de las ganancias.

Figura 18
Mapa Polos-Ceros “Peor Caso”

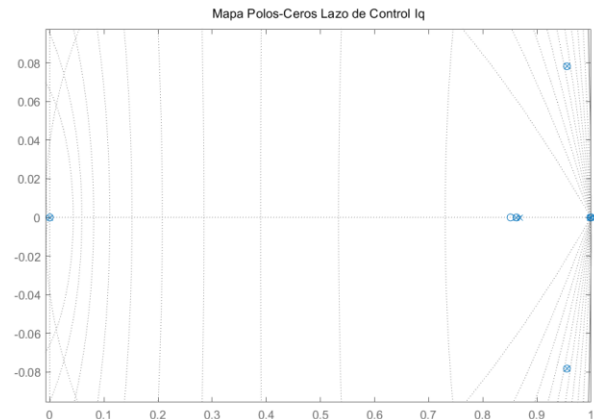


Tabla 2
Ubicación de Polos-Ceros en el “Peor Caso”

Polo	ζ	(rad/s)	Cero	ζ	(rad/s)
[0.862, 0]	1.0	29.6	[0.851, 0]	1.0	32.3
[0.868, 0]	1.0	28.3	[0.862, 0]	1.0	29.6
[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4
[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4
[0.999, 0]	1.0	0.298	[0.999, 0]	1.0	0.298
[1, 0]	1.0	$3.81e^{-11}$	[1, 0]	1.0	$3.78e^{-11}$

En las Tablas 2 y 3 se identifica el modo dominante del sistema en cada caso, marcado con color azul. Digamos que en el “Peor Caso”, la separación entre el polo y el cero es máxima; esto impide una mitigación efectiva del sobreimpulso. También sabemos que es un modo lento (baja frecuencia), esto permite que el error crezca antes de ser corregido, lo que resulta en un sobreimpulso más pronunciado en I_q .

Figura 19
Mapa Polos-Ceros “Mejor Caso”

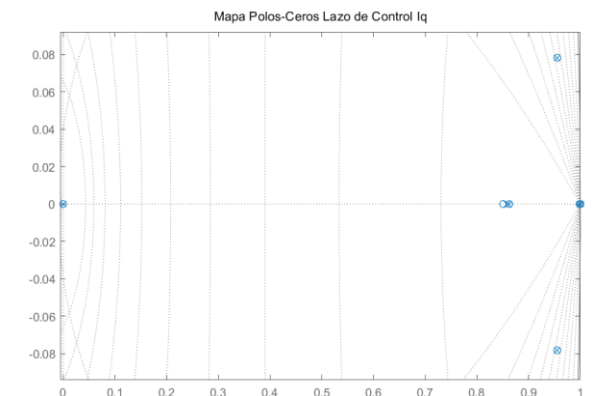


Tabla 3
Ubicación de Polos-Ceros en el “Mejor Caso”

Polo	ζ	(rad/s)	Cero	ζ	(rad/s)
[0.858, 0]	1.0	30.6	[0.85, 0]	1.0	32.4
[0.862, 0]	1.0	29.6	[0.862, 0]	1.0	29.6
[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, +0.0782i]	0.46	18.4
[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4	[0.955, -0.0782i]	0.46	18.4
[0.999, 0]	1.0	0.298	[0.999, 0]	1.0	0.298
[1, 0]	1.0	2.07e ⁻¹¹	[1, 0]	1.0	2.08e ⁻¹¹

Al contrastar el mapa de polos-ceros del “Mejor Caso” con el análisis previo, la posición de los polos revela exactamente esa mejora drástica en el desempeño del control. En este caso, existe un desplazamiento del polo dominante hacia el origen; esto incrementa la velocidad de respuesta del sistema, permitiendo que el controlador reaccione más rápido ante el escalón que ocasiona la conexión de la carga. Al reducir la distancia entre el polo y el cero a menos de la mitad, se produce una cancelación casi total del modo transitorio.

Figura 20
Movimiento de los polos dominantes para diferentes valores de K_i

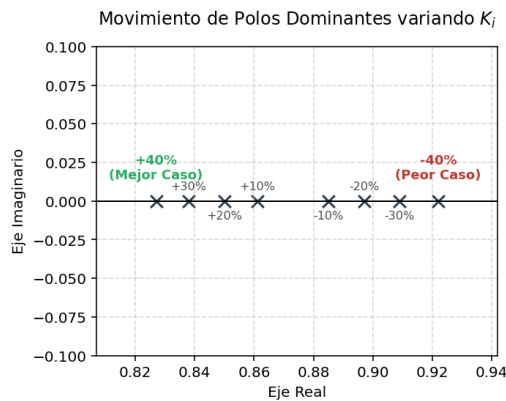
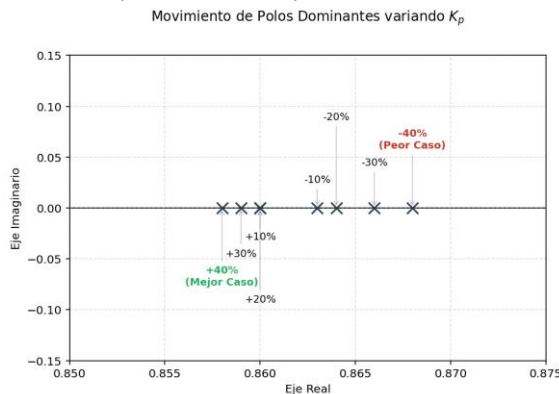


Figura 21
Movimiento de los polos dominantes para diferentes valores de K_p



Aquí se observa que la respuesta dinámica del sistema frente a perturbaciones de carga está intrínsecamente ligada a la ubicación de las raíces. Con esto se identifican algunos

aspectos que justifican la optimización alcanzada; el estudio paramétrico demostró que el aumento controlado de las ganancias de control desplaza los polos dominantes hacia el origen.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones confirman que la optimización del desempeño transitorio de inversores trifásicos conectados a la red no se limita únicamente a garantizar la estabilidad, sino que requiere comprender cómo las ganancias del controlador modifican la dinámica del sistema. El estudio paramétrico realizado muestra que la reducción del sobreimpulso en la corriente I_q (del 51.2% en su valor pico) está asociada al desplazamiento de los polos dominantes hacia el origen en el plano discreto, inducido por el aumento de la ganancia proporcional K_p en un 40% (con un incremento del 10% en K_i).

En particular, la variación sistemática de K_i y K_p permitió identificar cómo cada parámetro afecta la ubicación de los polos y cómo estos desplazamientos se traducen en mejoras o degradaciones del comportamiento transitorio. El análisis se apoyó en los principios conceptuales del Lugar Geométrico de las Raíces como marco de interpretación, no en la construcción de trayectorias continuas. A partir de los polos calculados en puntos discretos (barrido paramétrico), se observó que la proximidad entre polos y ceros dominantes reduce el residuo del modo transitorio, lo que contribuye a una respuesta más amortiguada. No se logró una cancelación exacta, pero la cercanía obtenida es suficiente para atenuar las oscilaciones.

En conjunto, este estudio valida que la combinación de un estudio paramétrico estructurado y el uso interpretativo del LGR constituye una estrategia eficaz para mejorar la respuesta dinámica del lazo de corriente I_q . La metodología aplicada permitió cuantificar la reducción del sobreimpulso y comprender cómo las variaciones en las ganancias modifican la dinámica del sistema. Como limitación principal, los resultados se obtienen en simulación con condiciones ideales (irradiación constante, red rígida); se recomienda como trabajo futuro la validación experimental y el análisis de robustez ante variaciones en la impedancia de red y en la irradiación solar.

V. AGRADECIMIENTOS

R. G. Camacho Sifuentes agradece a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico recibido para el estudio del posgrado. También a la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de la Laguna por las facilidades brindadas para la conclusión de este proyecto.

VI. REFERENCIAS

- Chakraborty, S., Umathe, B., y Wang, J. (19-23 de octubre del 2025). IEEE Energy Conversion Conference Congress and Exposition (ECCE). Control Parameter Sensitivity Study for Inverter-Based-Resource Dominated Grids: A Small Signal Stability Approach and Framework. DOI: <https://doi.org/10.1109/ECCE58356.2025.11259859>
- De Paiva, E.P., Vieira, J.B. Jr., De Freitas, L.C., Farias, V.J., y Alves Coelho, E.A. An Improved Power Controller for a Single-Phase Grid-Connected Inverter with Root Locus Analysis. *Electrónica de Potencia*, Vol. 14, No.1. 2009.
<https://doi.org/10.18618/REP.2009.1.017023>.
- Feng, W., Guan, Y., Yibo, W., y Xu, H. Stability Analysis of Hydraulic-PV Hybrid Microgrid Based on Small-signal Dynamic Model. *International Conference on Electrical Machines and Systems*, 26–29 October 2013, Busan, Korea. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2013.6754454>.
- Firdaus, A., Mishra, S., y Bhende, C.N. Modelling a Droop-Controlled Multi PV Inverter System to Study Effects of System Parameters on Oscillatory Modes. *Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, 24 – 26 October, 2017.
<https://doi.org/10.1109/ACEPT.2017.8168580>.
- Golpîra, H., Román-Messina, A., y Bevrani H. (2021) . *Renewable Integrated Power System Stability and Control*. John Wiley & Sons, Inc.
- Jadhav, S., y George, S. Desing of PI Controller for Grid-connected DG unit using Root Locus Technique. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, Volumen 3, 01, 2015.
<https://www.ijert.org/research/design-of-pi-controller-for-grid-connected-dg-unit-using-root-locus-technique-IJERTCONV3IS01046.pdf>
- Mao, M., Dong, Z., Dong, Y., Huang, H., Chang, L. Parameters Sensitivity Analysis of the Controller Based on Unified Control Strategy in a Photovoltaic Microgrid. *IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 24 – 27 Junio, 2014. <https://doi.org/10.1109/PEDG.2014.6878626>.
- MathWorks. (2026). Three-phase grid-connected PV system (Sandscape Electrical example). Retrieved February 23, 2026.
<https://la.mathworks.com/help/sps/ug/three-phase-grid-connected-in-pv-system.html>.
- Molina, M.G., Espejo, E.J. Modeling and Simulation of Grid-connected Photovoltaic Energy Conversion Systems. *International Journal of Hydrogen Energy* (2013).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.048> .
- Nise, N. S. (2011). *Control systems engineering* (6.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna* (5.^a ed.). Prentice Hall.
- Quan, X. Improved Dynamic Response Desing for Proportional Resonant Control Applied to Three-Phase Grid-Forming Inverter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 68, 10, (9919 – 9930)
- Octubre 2021. <https://doi.org/10.1109/TIE.2020.3021654>.
- Teodorescu, R., Liserre, M. y Rodríguez Cortés, P. (2011). *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Yazdani, A., Iravani, R. (2010). *Voltage-Source Converters in Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc. DOI:10.1002/9780470551578 .
- Zhou, X., Liu, Q., Ma, Y., Li, W., y Xie, B. A Modified LADRC-Based DC-Link Voltage Controller for Photovoltaic Grid-connected Inverters. *Electronics*, 10, 877, 2021.
<https://doi.org/10.3390/electronics10080877>.

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización [Conceptualization]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
2	Curación de datos [Data curation]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
3	Análisis formal [Formal analysis]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
4	Obtención de fondos [Funding acquisition]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
5	Investigación [Investigation]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
6	Methodología [Methodology]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
7	Administración del proyecto [Project administration]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
8	Recursos [Resources]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes
9	Software [Software]	Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
10	Supervision [Supervision]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
11	Validación [Validation]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez
12	Visualización [Visualization]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
13	Redacción - borrador original [Writing – original draft]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce
14	Redacción - revisión y edición [Writing – review & editing]	Rita Guadalupe Camacho Sifuentes Francisco Sergio Sellschopp Sánchez Gerardo Enrique Ruíz Ponce