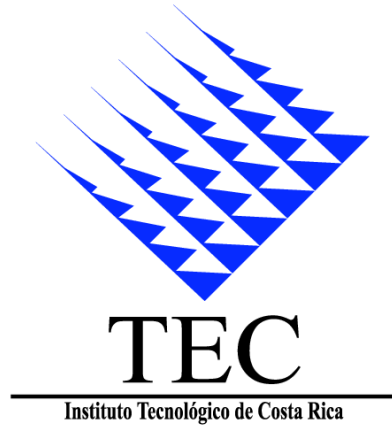


INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**Sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos**

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica  
con el grado académico de Licenciatura

Sebastián Badilla Carvajal

Cartago, Junio de 2010

## Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía, he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Fecha  
23 de junio de 2010




Sebastián Badilla Carvajal  
112400314





**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**PROYECTO DE GRADUACIÓN**  
**TRIBUNAL EVALUADOR**

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Julio Stradi Granados  
Profesor lector

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Sergio Morales Hernández  
Profesor lector

  
\_\_\_\_\_  
Ing. Carlos Meza Benavides  
Profesor asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica

Cartago, 23 de junio, 2010

## Resumen

El presente proyecto muestra una forma de implementar un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos de bajo costo, en condiciones de temperatura y radiación lumínica aproximadamente constantes. Para la construcción del sistema de caracterización es necesario entender el funcionamiento y los factores que determinan el comportamiento del generador fotovoltaico en condiciones controladas.

El sistema de caracterización se compone principalmente de una carga electrónica que consiste en un MOSFET y el sistema de control de esta carga. Por medio del control de la carga electrónica se realiza un barrido de diferentes puntos de operación de la curva característica  $i-v$  del generador. En este proyecto se estipulan tres tipos de sistemas de control: un sistema en lazo abierto, un sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional y un sistema de control en lazo cerrado con controlador proporcional e integral.

**Palabras clave:** caracterización, carga electrónica, controlador, curva característica corriente-tensión, generador fotovoltaico.

## Abstract

This project shows one way to implement a low-cost system for the photovoltaic generators characterization, under conditions of temperature and light radiation approximately constant. For the construction of the characterization system, is necessary to understand the functioning and the factors involved that determine the behavior of the photovoltaic generator under controlled conditions.

The characterization system is mainly composed of an electronic load which consists of a MOSFET and the control system of this load. By controlling the electronic load, it is possible to scan different operational points of the  $i-v$  characteristic curve of the generator. This project will provide three types of control systems: open loop system, a closed loop system with a proportional controller and a closed loop control system with proportional and integral controller.

**Keywords:** characterization, controller, current-voltage characteristic curve, electronic charge, photovoltaic generator.

## **Agradecimiento**

En primer instancia deseo agradecerle a mis padres por el apoyo, comprensión y atención durante toda mi carrera. A sido de suma importancia la visión de la vida que me han forjado y les agradezco por hacer posible esta oportunidad de estudio.

Deseo agradecerle al Doctor Ingeniero Carlos Meza Benavides por estar conmigo desde el inicio de la propuesta de este que ha sido, el proyecto más interesante que he realizado; por su extrema paciencia, perseverancia y su continua búsqueda para hacerme un mejor estudiante.

A los Profesores Ingenieros Sergio Morales Hernández, Marvin Hernández Cisneros, Johan Carvajal Godínez y Juan Scott Chaves Noguera, M.S.E.E., les agradezco sus valiosos aportes, sus consejos, por las guías y las facilidades que me brindaron.

Le agradezco a todos mis compañeros por estar presentes, especialmente a Alexander Valverde Serrano y Jeiner Alvarado Fonseca, que han sido no sólo unos excelentes estudiantes, sino que juntos, hemos destacado y aprendido de nosotros mismos durante toda la carrera. A mis compañeros Eduardo José Quesada García y Humberto José Trimiño Mora, les agradezco sus perspectivas de la realidad, su compañía y toda la ayuda.

Deseo agradecerle de forma muy especial a mi novia Sofía Ortiz Argüello, porque en el tiempo de realización del Proyecto, me brindó una cálida mano de calma y la grandiosa oportunidad de vivir algo único.

Gracias a todos aquellos que estuvieron involucrados de alguna u otra forma en la realización de este trabajo.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. Problema existente e importancia de su solución . . . . .	5
1.2. Solución seleccionada . . . . .	5
<b>2. Meta y Objetivos</b>	<b>7</b>
2.1. Meta . . . . .	7
2.2. Objetivo general . . . . .	7
2.3. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>3. Marco teórico</b>	<b>9</b>
3.1. Descripción del sistema . . . . .	9
3.2. Antecedentes bibliográficos . . . . .	10
3.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema . . . . .	10
<b>4. Procedimiento metodológico</b>	<b>11</b>
4.1. Reconocimiento y definición del problema . . . . .	11
4.2. Obtención y análisis de información . . . . .	12
4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución . . . . .	12
4.4. Implementación de la solución . . . . .	13
4.5. Reevaluación y rediseño . . . . .	13
<b>5. Descripción detallada de la solución</b>	<b>15</b>
5.1. Análisis de soluciones y selección final . . . . .	15
5.1.1. Modelo de un generador fotovoltaico . . . . .	15
5.1.2. Modelado de la carga electrónica, [3,4] . . . . .	18
5.1.3. Obtención de parámetros y curvas características de un generador fotovoltaico . . . . .	20
5.1.4. Controlador proporcional . . . . .	22
5.1.5. Controlador proporcional e integral . . . . .	22
5.2. Descripción del hardware . . . . .	25
5.2.1. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo abierto . . . . .	25
5.2.2. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	26
5.2.3. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	26

5.2.4.	Transistor MOSFET de enriquecimiento . . . . .	27
5.3.	Descripción del software . . . . .	33
<b>6.</b>	<b>Análisis de Resultados</b>	<b>35</b>
6.1.	Resultados . . . . .	35
6.1.1.	Comportamiento del sistema de caracterización del generador fotovoltaico en lazo abierto . . . . .	35
6.1.2.	Comportamiento del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	40
6.1.3.	Comportamiento del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	44
6.1.4.	Comportamiento experimental del transistor NTE492 utilizado como carga electrónica . . . . .	53
6.1.5.	Comportamiento experimental del transistor NTE2957 utilizado como carga electrónica . . . . .	53
6.1.6.	Curvas características $p-v$ en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral . . . . .	58
6.2.	Análisis . . . . .	60
6.2.1.	Controlador del sistema de control . . . . .	60
6.2.2.	Sistema de control de la carga electrónica . . . . .	62
6.2.3.	Operación del MOSFET en la región de saturación . . . . .	64
<b>7.</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>67</b>
7.0.4.	Conclusiones . . . . .	67
7.0.5.	Recomendaciones . . . . .	68

# Índice de figuras

1.1.	Diagrama respectivo a la construcción de un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos . . . . .	6
3.1.	Diagrama correspondiente a la construcción de un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos . . . . .	9
5.1.	Curvas características $i-v$ de un generador fotovoltaico con diferentes intensidades luminosas y diferentes temperaturas . . . . .	16
5.2.	Modelo eléctrico simplificado equivalente de un generador fotovoltaico .	16
5.3.	Curvas características $i-v$ y $p-v$ de un generador fotovoltaico iluminado	17
5.4.	Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico mediante el control de la tensión de salida . . . . .	18
5.5.	Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico mediante el control de la corriente de salida . . . . .	19
5.6.	Sistema retroalimentado de caracterización de un generador fotovoltaico	19
5.7.	Punto de operación ubicado en la curva característica $i-v$ de un generador fotovoltaico . . . . .	21
5.8.	Curva característica $i_D - i_{GS}$ de un transistor MOSFET . . . . .	21
5.9.	Gráfica correspondiente a la función $W$ de Lambert. . . . .	23
5.10.	Circuito correspondiente al sistema de caracterización en lazo abierto .	25
5.11.	Circuito correspondiente al sistema de caracterización mediante un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	26
5.12.	Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico con un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . .	27
5.13.	Estructura física del MOSFET . . . . .	28
5.14.	Sección transversal del MOSFET . . . . .	28
5.15.	Sección transversal de un MOSFET polarizado . . . . .	29
5.16.	Sección transversal de un MOSFET polarizado con estrechamiento de canal . . . . .	29
5.17.	Curva característica $i_D - v_{DS}$ de un transistor MOSFET . . . . .	30
5.18.	Circuito equivalente del MOSFET en la región de saturación . . . . .	30
5.19.	Curva característica $i_D - v_{DS}$ de un MOSFET con resistencia de salida $r_O$	31
5.20.	Curva característica $i_D - v_{DS}$ del MOSFET y curva característica $i-v$ de un generador fotovoltaico . . . . .	31
5.21.	Circuito básico de caracterización de un generador fotovoltaico mediante un MOSFET como carga electrónica . . . . .	32
5.22.	Diagrama correspondiente a la generación de señales analógicas a partir de la programación digital de señales . . . . .	33



5.23. Conexión interna entre los DAC y el microcontrolador Picoblaze en el kit de desarrollo Spartan 3E . . . . .	33
6.1. Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico y la señal de tensión de referencia con el sistema en lazo abierto . . . . .	36
6.2. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	36
6.3. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	37
6.4. Curva característica del generador fotovoltaico mediante el sistema en lazo abierto con una señal de tensión escalonada de control . . . . .	37
6.5. Señal de tensión de referencia para el circuito en lazo abierto . . . . .	38
6.6. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión $v_{GS}$ mediante el sistema en lazo abierto . . . . .	38
6.7. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión $v_{GS}$ mediante el sistema en lazo abierto . . . . .	39
6.8. Curva característica del generador fotovoltaico mediante el sistema en lazo abierto con una señal de tensión triangular de control . . . . .	39
6.9. Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	40
6.10. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	41
6.11. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	41
6.12. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con control proporcional . . . . .	42
6.13. Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	42
6.14. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	43
6.15. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	43
6.16. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional . . . . .	44
6.17. Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	44
6.18. Tiempo de respuesta del controlador proporcional e integral ante un escalón de tensión . . . . .	45
6.19. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	45
6.20. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	46

6.21. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	46
6.22. Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	47
6.23. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	47
6.24. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente . . . . .	48
6.25. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral . . . . .	48
6.26. Señales de tensión correspondientes a la utilización de una señal triangular de tensión en el circuito mostrado en la Fig. 5.12 . . . . .	49
6.27. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del MOSFET . . . . .	49
6.28. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del MOSFET . . . . .	50
6.29. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado de la Fig. 5.12 con una señal de tensión de referencia triangular . . . . .	50
6.30. Señales de tensión correspondientes a la señal de tensión de referencia y la tensión del generador fotovoltaico para el sistema mostrado en la Fig. 5.12, con el transistor NTE2957 . . . . .	51
6.31. Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957 . . . . .	51
6.32. Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957 . . . . .	52
6.33. Curva característica $i-v$ del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral utilizando el transistor NTE2957 . . . . .	52
6.34. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE492, con un barrido de tensión compuerta-fuente de 1.5V a 2.85V . . . . .	53
6.35. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE492, con un barrido de tensión compuerta-fuente de 1.5V a 2.4V . . . . .	54
6.36. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE492 . . . . .	54
6.37. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1V a 2V del transistor NTE492 . . . . .	55
6.38. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1.7V a 2.45V del transistor NTE492 . . . . .	55
6.39. Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE2957 . . . . .	56

6.40.	Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957 . . . . .	56
6.41.	Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1V a 3.1V del transistor NTE2957 . . . . .	57
6.42.	Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 3V a 3.3V del transistor NTE2957 . . . . .	57
6.43.	Curva característica $i_D - v_{DS}$ del MOSFET NTE2957 a una temperatura aproximada de $-30^\circ\text{C}$ . . . . .	58
6.44.	Curvas características $i_D - v_{GS}$ del MOSFET NTE2957 a una temperatura de ambiente de $29^\circ\text{C}$ y a $-30^\circ\text{C}$ . . . . .	58
6.45.	Tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión $v_{GS}$ para el sistema en lazo abierto y lazo cerrado con controlador PI . . . . .	59
6.46.	Curvas características $p_{PV} - v_{PV}$ del sistema en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral . . . . .	59
6.47.	Respuesta ante un escalón de 5V del controlador proporcional e integral con la configuración mostrada en la Fig. 6.18 . . . . .	60



# Capítulo 1

## Introducción

En los últimos años debido a la gran demanda de energía eléctrica, se ha promovido la investigación para generar energía eléctrica por medios no convencionales. Estas nuevas formas de generación de energía eléctrica deben ofrecer una solución sostenible con el medio ambiente, es decir, deben tener un impacto ambiental mínimo. Además, con tal que sean implementados en corto plazo deben ser económicamente viables, esto es, el costo por Watt de la energía generada debe de ser similar al de las fuentes de energía convencionales.

Los generadores fotovoltaicos son un medio sostenible de producción de energía eléctrica, y la cantidad de energía convertida depende principalmente de la radiación luminosa, la cual es abundante en entornos donde la luz solar incide. Estos generadores necesitan poco mantenimiento debido a que no hay sistemas mecánicos para la conversión de energía. Además existe una gran disponibilidad de generadores a nivel comercial e industrial y su vida útil es relativamente larga.

Por otra parte, los generadores fotovoltaicos posee un alto costo debido al proceso de manufactura de los paneles de silicio y además poseen una eficiencia de conversión de energía relativamente baja. Sin embargo, en la actualidad se ha avanzado con nuevas técnicas de manufactura en los generadores fotovoltaicos cristalinos que abaratan los costos de producción y nuevos diseños de sistemas de conversión de energía más eficientes.

La energía fotovoltaica consiste en la obtención de energía eléctrica a través de generadores fotovoltaicos. Un generador fotovoltaico consiste en una o más celdas o paneles fotovoltaicos que producen energía eléctrica a partir de la incidencia de radiación luminosa. Estos están hechos con diferentes tecnologías y poseen diferentes características eléctricas y físicas que dependen del fabricante.

El efecto fotoeléctrico es el principio que subyace a la generación de energía fotovoltaica. La física de este fenómeno ha sido estudiada y documentada desde hace casi un siglo, y en la actualidad es objeto de explotación comercial y científica. Con el estudio de las juntas  $p-n$  de silicio durante la década de los años cincuenta, se hizo posible generar energía eléctrica a partir de una corriente generada por el efecto fotoeléctrico junto con su consecuente caída de tensión a través de la junta. Este fenómeno hace que exista una relación no lineal entre la corriente y la tensión de un generador fotovoltaico.

Los sistemas fotovoltaicos son fuentes de energía con características eléctricas no lineales, donde la corriente y la potencia de salida dependen de la tensión de operación, y además la potencia generada depende del nivel de irradiación solar y de la temperatura.

Es necesario caracterizar los generadores fotovoltaicos para optimizar la producción

de energía eléctrica por estos medios. Teniendo un mejor conocimiento del comportamiento del generador en condiciones controladas, se puede determinar los valores máximos de operación y distintos puntos de operación dentro de los límites de funcionamiento normal. Esto incluye la obtención de las curvas características de corriente en función de la tensión,  $i-v$ , y de la potencia en función de la tensión,  $p-v$ , así como los parámetros de tensión en circuito abierto, la corriente en corto circuito y el punto de máxima potencia.

De las curvas características  $i-v$  y  $p-v$  se puede derivar información acerca los parámetros actuales del generador fotovoltaico, esto con el fin de corroborar un funcionamiento correcto de las mismos o bien para identificar algún tipo de degradación. Estas curvas características no son solamente usadas por diseñadores de circuitos de conversión de potencia, sino también en el diseño de sistemas fotovoltaicos en el contexto de sistemas más eficientes y sostenibles energéticamente.

Los fabricantes de generadores fotovoltaicos proveen de las curvas características y ciertos parámetros eléctricos de los dispositivos, obtenidas mediante las *Condiciones Estándar de Prueba* o STC, por sus siglas en inglés, donde estipula una radiación luminosa y una temperatura específicas. Sin embargo, es importante resaltar que los generadores fotovoltaicos rara vez operan en estas condiciones.

Compañías como OptoSolar, Endeas, Pasan SA, BERGER Lichttechnik, Spire Solar, ofrecen simuladores solares para la caracterización de generadores fotovoltaicos de muy alto costo. Estos sistemas de caracterización poseen estándares de prueba mediante una simulación solar con condiciones controladas de prueba. A pesar que las pruebas se pueden realizar utilizando luz solar, los sistemas de simulación solar utilizan lámparas con filtros espectrales. Con ello, estos sistemas poseen la habilidad de acelerar el proceso de caracterización y además proveen parámetros de prueba repetibles y ajustables.

Un método para lograr la caracterización de manera económica es mediante la utilización de una carga electrónica que consiste en un transistor MOSFET trabajando en la región de saturación. Al variar la tensión entre las terminales compuerta y fuente, se puede regular la corriente que pasa por el drenador, y esta corriente es equivalente a la corriente entregada por el generador fotovoltaico. Haciendo un barrido de la corriente de salida del generador fotovoltaico con una señal de tensión de control en las terminales compuerta y fuente, se logra a su vez un barrido de la tensión entregada por el generador fotovoltaico.

Haciendo un barrido de la corriente de salida del generador fotovoltaico con una señal de tensión de control en las terminales compuerta y fuente, se logra a su vez un barrido de la tensión entregada por el generador fotovoltaico. Sin embargo, este sistema de modelado de lazo abierto no permite posicionar con precisión un punto de operación en la curva característica  $i-v$ .

Por tanto se hace necesario integrar un sistema de control a la carga electrónica, que permita posicionar un punto de operación en la curva característica  $i-v$  del generador a partir de una tensión de referencia. Dada la relación no lineal existente entre la corriente entregada y la tensión del generador, el control debe estipular este comportamiento y adecuar el sistema de control para llegar a estabilizarse en un punto de operación deseado.

En el presente trabajo se estipula la caracterización de un generador fotovoltaico, a partir de la utilización de un sistema de lazo abierto. Esto mediante una carga electrónica para condiciones ambientales controladas y el desarrollo matemático que implica la obtención del sistema de control de lazo cerrado que permita ubicar de forma precisa distintos puntos de operación para la construcción de las curvas características  $i-v$  y  $p-v$ .

## 1.1. Problema existente e importancia de su solución

La caracterización de generadores fotovoltaicos consiste en la obtención de parámetros eléctricos que describen el comportamiento de los mismos en un ambiente específico. En este momento no hay precedentes de un estudio formal acerca los generadores fotovoltaicos en general, ni existe un sistema de caracterización implementado para tal fin.

El conocimiento intrínseco del funcionamiento de los generadores fotovoltaicos proporciona en un contexto general, las vías que permiten la caracterización eléctrica de estos dispositivos. Estas vías deben tomar en cuenta el control y la obtención de los parámetros deseados para así poder establecer condiciones reproducibles de experimentación.

Es por ello que surge la necesidad de realizar en primer instancia, un análisis pertinente a los generadores fotovoltaicos en condiciones ambientales controladas y obtener la descripción del comportamiento de forma matemática, para posteriormente asociar esto con el sistema de caracterización.

De esta forma, relacionando el análisis teórico con una derivación práctica que comprende la caracterización de generadores fotovoltaicos, se puede tener una definición concreta del funcionamiento de éstos bajo condiciones controladas.

Entre los beneficios del presente proyecto está la obtención de la descripción general desde el punto de vista matemático y eléctrico de los generadores fotovoltaicos, y además la creación de un sistema de caracterización que contrasta a la teoría y permite la obtención de parámetros eléctricos y las curvas características que definen el comportamiento de un generador fotovoltaico.

## 1.2. Solución seleccionada

El estudio formal del comportamiento de los generadores fotovoltaicos comprende en gran medida una relación teórica y práctica, por la cual se define en forma complementaria el funcionamiento y caracterización de éstos.

El análisis matemático y físico del comportamiento de los generadores fotovoltaicos está establecido en la literatura, y comprende los factores ambientales que afectan la respuesta del generador, el principio de funcionamiento, así como su circuito eléctrico equivalente.

De esta forma se debe realizar un compendio que represente en forma explícita y detallada el análisis teórico que describe a los generadores fotovoltaicos, desde su equivalencia matemática hasta el comportamiento en un ambiente controlado.

A partir de este compendio es que se establecen criterios de diseño para el sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos, como se muestra en la Fig. 1.1. El diseño debe ser general, es decir, éste debe funcionar para generadores fotovoltaicos de distintas características eléctricas y distintas tecnologías, contemplando condiciones ambientales controladas.

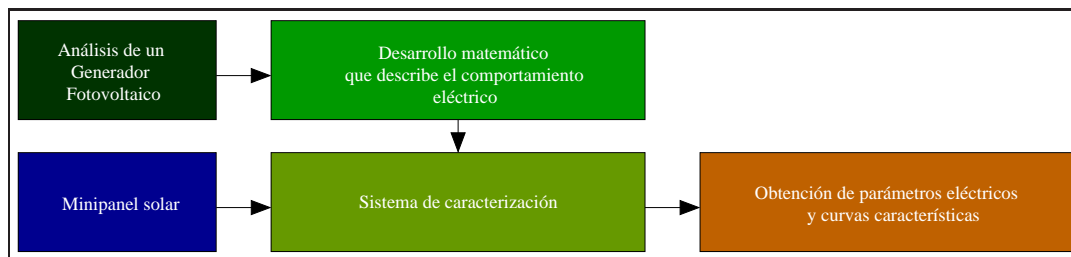


Figura 1.1: Diagrama respectivo a la construcción de un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos



## Capítulo 2

# Meta y Objetivos

### 2.1. Meta

Crear una base de conocimiento y entendimiento del funcionamiento y caracterización de los generadores fotovoltaicos a partir del diseño e implementación de un prototipo de caracterización de generadores fotovoltaicos.

### 2.2. Objetivo general

Diseñar e implementar un circuito de medición capaz de modelar el comportamiento eléctrico de un generador fotovoltaico, tal que permita obtener las curvas características de un minipanel solar en condiciones ambientales controladas.

### 2.3. Objetivos específicos

#### 1. Objetivos de hardware:

- Diseñar e implementar un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos por medio de un sistema de control en lazo abierto que permita obtener la curva característica  $i-v$  de un generador fotovoltaico en condiciones controladas.
- Diseñar e implementar un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos por medio de un sistema de control en lazo cerrado que permita obtener la curva característica  $i-v$  de un generador fotovoltaico en condiciones controladas.

#### 2. Objetivos de software:

- Implementar un programa que permita generar señales analógicas de referencia para el sistema de control, a través de la tarjeta de desarrollo digital.



## Capítulo 3

# Marco teórico

El sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos debe permitir en un sentido general, obtener parámetros y curvas características independientemente del tipo, tecnología y características eléctricas del generador. Sin embargo, existen limitaciones de diseño con las cuales el sistema debe cumplir, como por ejemplo, debe ser de bajo costo, ser modificable, y debe facilitar la obtención de mediciones directas que permiten caracterizar al generador por medio de la curva característica  $i-v$ .

### 3.1. Descripción del sistema

El sistema de caracterización debe permitir la obtención de la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico. Es por tanto, que los parámetros a evaluar en la construcción de este sistema competen solamente a corriente y tensión, manteniendo las condiciones ambientales de prueba constantes. Controlando ya sea la corriente o tensión de salida del generador fotovoltaico, se puede caracterizar el mismo a partir de la respuesta de un parámetro ante la variación del otro.

La Fig. 3.1 muestra el desarrollo del sistema implementado para la caracterización de un generador fotovoltaico. En primer instancia, existe una relación estrecha entre el análisis teórico del funcionamiento de los generadores fotovoltaicos y el sistema de caracterización, donde el comportamiento del generador fotovoltaico establece los parámetros a evaluar en la creación del sistema caracterizador. Para el sistema de caracteri-

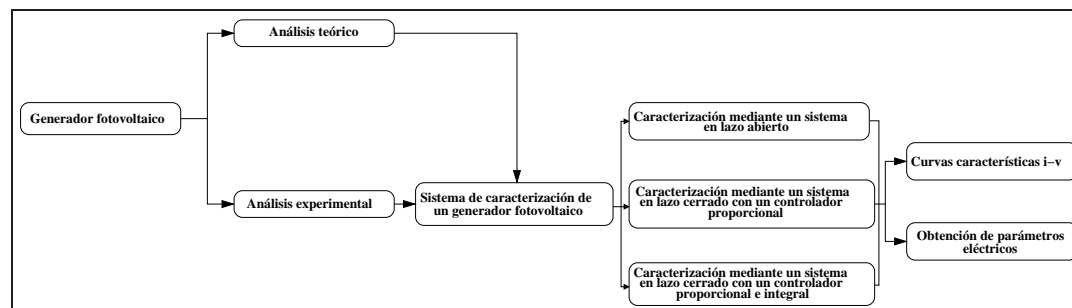


Figura 3.1: Diagrama correspondiente a la construcción de un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos

zación, se estipulan tres formas para establecer el control de la carga electrónica para

así conformar un marco de referencia de comparación. El control de la carga electrónica hace que exista una variación de la corriente a partir de una variación de tensión.

### **3.2. Antecedentes bibliográficos**

El análisis y descripción del funcionamiento de los generadores fotovoltaicos a nivel de modelo eléctrico como matemático, ha sido ampliamente desarrollado y confirmado. Los avances en la manufactura de estos dispositivos semiconductores ha permitido abaratar los costos de producción y aumentar el rendimiento en la conversión de energía.

Los sistemas de caracterización industriales utilizan condiciones controladas de prueba que no son consistentes con las condiciones irregulares del medio ambiente donde se utilizan los generadores fotovoltaicos normalmente. De aquí la necesidad de buscar medios de caracterización de simple implementación y de bajo costo que se adecuen a un entorno específico.

Existen estudios acerca del funcionamiento de la carga electrónica para caracterizar generadores fotovoltaicos por medio de un transistor con un sistema de control en lazo abierto. Estos tratan específicamente la caracterización de generadores de potencia mayor a los 100W utilizando transistores de potencia. Estos sistemas poseen aislamientos entre los aparatos de medición y el generador fotovoltaico, así como sistemas de acondicionamiento de señales para la obtención correcta de los parámetros del generador.

La descripción de los sistemas de caracterización competentes al funcionamiento de los transistores de tecnología bipolar como de efecto de campo. Básicamente estos deben operar en una región donde se controle la corriente de salida del generador fotovoltaico a partir de una tensión dada.

### **3.3. Descripción de los principales principios físicos y/o electrónicos relacionados con la solución del problema**

El sistema de caracterización en lazo abierto está conformado por una carga electrónica implementada por medio de un MOSFET y el control de la corriente de salida del generador fotovoltaico es por medio de la tensión compuerta-fuente. Existe una resistencia en el lazo entre el transistor y el generador que permite hacer la medición de la corriente de salida del generador.

Ahora bien, la señal de tensión en las terminales compuerta-fuente debe estipular un barrido por toda la región de la curva característica  $i-v$  del generador, esto es, tomar en cuenta la tensión y corriente máxima generada y el comportamiento no lineal en condiciones de prueba determinadas. Las condiciones de prueba deben ser prácticamente constantes con el fin de hacer reproducibles los experimentos. Es por ello que para las pruebas del sistema de caracterización se debe estipular el nivel de luminosidad y temperatura.

Para hacer un sistema más robusto de control, es necesario hacer el control del sistema en lazo cerrado, por medio del cual, se adecúa la señal de actuación del transistor de acuerdo a un punto de operación en la curva característica  $i-v$  deseado.

El sistema de control analógico a ser implementado consiste en la utilización de elementos activos y pasivos que permiten adecuar la tensión de salida del generador fotovoltaico de acuerdo a una señal de tensión de referencia.

## Capítulo 4

# Procedimiento metodológico

En primer instancia, el modelado eléctrico de un generador fotovoltaico describe el principio de funcionamiento así como los parámetros que afectan implícitamente el comportamiento del generador en condiciones específicas.

A partir de este modelado, es posible estipular un sistema de caracterización ante condiciones ambientales controladas de prueba, esto es, obtener una respuesta del generador fotovoltaico ante una entrada adecuada por un sistema de control.

### 4.1. Reconocimiento y definición del problema

Actualmente no existe un sistema de caracterización de generadores fotovoltaicos de bajo costo y de implementación sencilla en la Escuela de Ingeniería Electrónica del I.T.C.R.. Más aún, no existe un estudio formal del funcionamiento de los generadores fotovoltaicos que contraste la caracterización experimental de los generadores.

Es por ello que resulta necesario, iniciar con una investigación que describa el modelo eléctrico de un generador fotovoltaico. La descripción a nivel matemático permite evaluar la construcción de un sistema de caracterización tomando en cuenta las variables inmersas en el modelado.

La construcción del sistema de caracterización debe tener un sistema de control que permita evaluar la respuesta del generador ante un estímulo. Este estímulo debe permitir la obtención de distintos puntos de operación de la curva característica  $i-v$ .

La Escuela de Ingeniería Electrónica posee minipaneles solares disponibles, sin embargo, estos no han sido caracterizados. Es por ello, que en primer instancia se debe estipular la construcción de un sistema caracterizador de generadores fotovoltaicos basado en las características eléctricas que el fabricante del minipanel provee.

El sistema caracterizador en un sentido general, debe funcionar para distintos tipos y tecnologías de generadores fotovoltaicos, y por ello, el sistema debe ser versátil y fácilmente modificable.

Uno de los principales métodos de bajo costo para caracterizar un generador fotovoltaico es por medio de la utilización de una carga electrónica. Es por ello que se debe adecuar un sistema de control que permita de manera adecuada, realizar las mediciones que permiten obtener la curva características que describen el comportamiento de un generador fotovoltaico en condiciones específicas.

## 4.2. Obtención y análisis de información

La información analítica acerca el modelado del funcionamiento de los generadores fotovoltaicos, abarca el modelado con un solo diodo, y haciendo aproximaciones válidas que simplifican la descripción y desarrollo matemático.

Esta información se encuentra ampliamente distribuida en la red en documentos, artículos y publicaciones. Los estudios más actuales competen a la búsqueda para aumentar la eficiencia tanto en la de recolección energía fotovoltaica como en la conversión a energía eléctrica.

Dado los altos costos implicados en la caracterización de generadores fotovoltaicos con estándares de condiciones de prueba, se han buscado métodos alternativos de bajo costo. Estos métodos alternativos son fáciles de implementar y permiten obtener rápidamente los parámetros que describen el comportamiento del generador fotovoltaico.

La información de la implementación de sistemas de caracterización de bajo costo se ubica en el contexto de paneles solares de potencia relativamente alta, y es por ello que para fines de este proyecto, los circuitos se deben adecuar bajo el mismo principio utilizado para dispositivos de alta potencia pero para generadores fotovoltaicos de baja potencia.

## 4.3. Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

El método de caracterización a través de la utilización de una carga electrónica que consiste en un transistor tipo MOSFET posee una única topología de conexión, donde se contempla la interconexión entre el generador fotovoltaico, la carga electrónica y una resistencia de medición.

Existe dos métodos principales para la operación de un MOSFET como carga electrónica de acuerdo a la región en que se encuentre el punto de operación. En ambos casos se regula la corriente de salida del generador fotovoltaico de acuerdo a la variación de la tensión compuerta-fuente.

El sistema de caracterización mencionado anteriormente es un sistema que trabaja en lazo abierto. Para hacer el sistema más robusto, se debe cerrar el sistema con un lazo de retroalimentación, abarcando de forma precisa y controlada, distintos puntos de operación de la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico.

Para ubicar exactamente un punto de operación resulta necesario un sistema de control que evalúe parámetros de salida del generador con respecto a un parámetro de referencia.

Para ello se simuló un sistema de control analógico que evalúa la diferencia de la salida del sistema de caracterización con respecto a un valor de referencia fijo, esto es una señal de error. Mediante la utilización de la dinámica del error, se hace converger la señal de error a ser cero en un tiempo determinado, indicando así, que la salida del sistema de caracterización es igual al valor de referencia.

En este sistema de control se debe estipular topologías que de acuerdo a la teoría de control automático, posean un mejor rendimiento utilizando la dinámica del error. Además este sistema debe ser de fácil implementación y debe permitir ser modificable, en el sentido que se puedan variar valores de los componentes del circuito de forma sencilla.

#### 4.4. Implementación de la solución

En primer lugar, el sistema de caracterización en lazo abierto permite obtener de manera rápida la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico utilizando una señal de barrido adecuada, esto es, una señal que permite hacer un barrido de distintos puntos de operación a lo largo de la curva característica.

De esta manera se confirma el funcionamiento correcto de la carga electrónica como un regulador de corriente por medio del control de tensión. La forma de la señal resulta de suma importancia debido a que se debe ajustar de acuerdo al comportamiento no lineal del generador fotovoltaico.

Por otra parte, el sistema de control debe permitir ubicar un punto de operación en la salida del generador de acuerdo a un valor de referencia. El sistema de control debe poseer un controlador que permite hacer el error entre una señal de referencia y la salida del sistema de caracterización converja a cero en un tiempo determinado.

Si el sistema de control permite la ubicación de un punto de operación en la salida del generador con un valor de referencia fijo, se puede variar la señal de referencia en el tiempo y de esta forma existiría un seguimiento de la tensión de salida del generador respecto a la señal de referencia.

De esta forma se puede establecer una caracterización de acuerdo a la respuesta del generador fotovoltaico ante un estímulo controlado, que corresponde a la señal de referencia.

Cabe destacar que las condiciones de prueba de temperatura y luminosidad son prácticamente constantes, tanto para el sistema en lazo abierto como en lazo cerrado. La señal de control para el sistema en lazo abierto es exactamente igual que la utilizada como señal de referencia para el sistema en lazo cerrado en cuanto magnitud y frecuencia. Esta señal se produce digitalmente y convertida a una señal analógica por medio de un kit de desarrollo digital programable.

Resulta de suma importancia la comparación entre el sistema de caracterización en lazo abierto y el sistema en lazo cerrado con un controlador, ya que este segundo debe permitir de manera más precisa trazar la curva característica del generador fotovoltaico.

#### 4.5. Reevaluación y rediseño

Gran parte del diseño del sistema de caracterización resulta ser independiente del tipo de generador fotovoltaico, sin embargo, las características y parámetros eléctricos resultan tener suma importancia en la implementación de este diseño. La corriente y tensión máxima generada ante condiciones de iluminación y temperaturas específicas establecen los límites que debe soportar el sistema de caracterización, principalmente el transistor utilizado como carga electrónica.

El sistema de caracterización utilizando una carga electrónica mediante un MOSFET, idealmente posee un control lineal de la corriente que pasa por el drenador a partir de la regulación de la tensión en las terminales compuerta-fuente, sin embargo, se debe adecuar las señales de tensión en las terminales del transistor, de forma tal que opere en una región que permita el funcionamiento descrito anteriormente de forma correcta.





## Capítulo 5

# Descripción detallada de la solución

### 5.1. Análisis de soluciones y selección final

#### 5.1.1. Modelo de un generador fotovoltaico

Los generadores fotovoltaicos están hechos de material semiconductor que convierte la radiación incidente de un espectro luminoso determinado en corriente eléctrica. Este tipo de convertidores de energía, poseen al menos dos capas de material semiconductor, una que está cargada positivamente y otra negativamente. Cuando hay incidencia de luz sobre el material semiconductor, el campo eléctrico existente en la juntura entre las dos capas, hace fluir una corriente eléctrica.

Cuando un fotón es absorbido por el material semiconductor, este incrementa la energía de un electrón de una banda de valencia, moviéndolo hacia la banda de conducción. A este fenómeno se le llama efecto fotovoltaico. Esto ocurre cuando la energía incidente de los fotones es mayor que la energía de la banda prohibida, y el movimiento de electrones en la banda de conducción produce una corriente eléctrica que se mueve a través del material semiconductor.

La cantidad de corriente generada por la excitación de un fotón en un generador fotovoltaico, es afectado por la cantidad de radiación lumínica incidente tanto por su intensidad como por la longitud de onda de los rayos, y también es afectada por la temperatura como se muestra en la Fig. 5.1.

Cada material semiconductor posee una frecuencia umbral de radiación incidente, donde debajo de esta, ningún electrón será sometido al efecto fotovoltaico. Encima de esta frecuencia umbral, la energía cinética del fotoelectrón emitido varía con respecto a la longitud de onda de la radiación incidente, pero no tiene relación con la intensidad de la luz. Incrementando la intensidad de la radiación luminosa, esto proporcionalmente incrementará la razón de emisión de fotoelectrones en el material fotovoltaico.

Los generadores fotovoltaicos se pueden modelar como una fuente de corriente en paralelo con un diodo, como lo muestra la Fig. 5.2, donde si no hay una fuente emisora de fotones que genere una corriente eléctrica, el generador se comportará como un diodo. Conforme la intensidad de la luz incidente incrementa, se generará una corriente eléctrica mayor.

En un generador ideal, la corriente de salida total,  $i$ , está dada por

$$i(t) = i_{ph} - I_S \left( e^{\left( \frac{v(t) + i(t)R_S}{N V_t} \right)} - 1 \right) - \frac{v(t) + i(t) \cdot R_S}{R_{SH}} \quad (5.1)$$

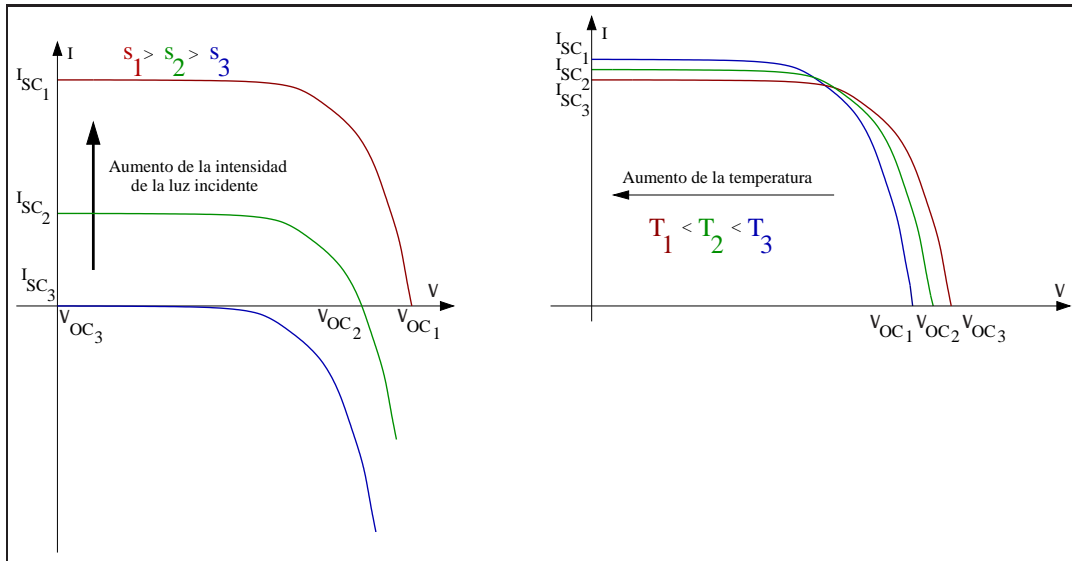


Figura 5.1: Curvas características  $i-v$  de un generador fotovoltaico con diferentes intensidades luminosas y diferentes temperaturas

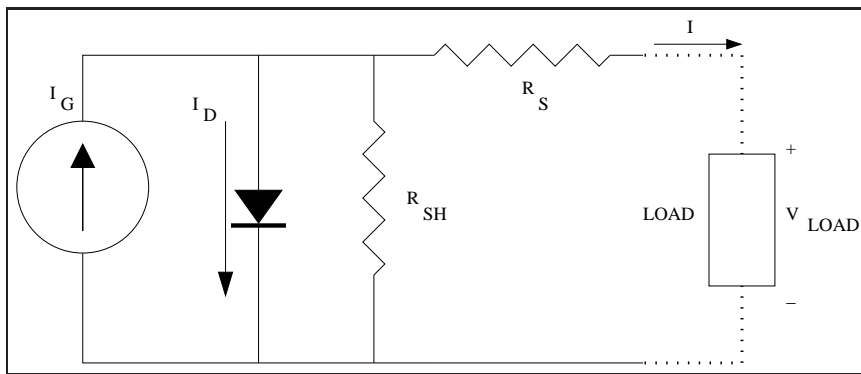


Figura 5.2: Modelo eléctrico simplificado equivalente de un generador fotovoltaico

en donde  $i_{ph}$  es la corriente inducida por radiación luminosa que depende de la irradiancia que incide sobre la superficie del generador fotovoltaico, i.e.,

$$i_{ph} = I_{ph0} \frac{I_r}{I_{r0}}$$

donde:

- $I_r$  es la irradiancia sobre el generador fotovoltaico.
- $I_{ph0}$  es la corriente generada por la luz incidente para una irradiancia  $I_{r0}$ .
- $I_s$  es la corriente de saturación del diodo.
- $N$  es el factor de calidad del diodo (coeficiente de emisión del diodo).
- $v(t)$  es la tensión a través de las terminales del generador fotovoltaico, que es tanto producido (primer cuadrante) o bien aplicado (tensión de polarización).

- $V_T$  es la tensión térmica de operación del dispositivo semiconductor.
- $R_{SH}$  es la resistencia en paralelo a la salida del generador fotovoltaico.
- $R_S$  es la resistencia en serie a la salida del generador fotovoltaico.

Sin embargo, el modelo del generador fotovoltaico se puede simplificar considerando la resistencia  $R_{SH}$  infinita, la resistencia  $R_S$  como un corto circuito. Para facilitar el análisis se utilizará la siguiente ecuación

$$i = \Lambda - \psi e^{\alpha v(t)} \quad (5.2)$$

en donde:

$$\alpha = \frac{1}{NV_T}$$

$$\Lambda = i_{ph} + I_S$$

$$\psi = I_S$$

La curva  $i-v$  de un generador fotovoltaico iluminado tiene la forma mostrada en la Fig. 3, donde conforme la tensión en la carga aumenta desde cero hasta la tensión  $V_{OC}$ , se puede obtener otros parámetros de medición, incluyendo la potencia máxima de salida, la corriente máxima de salida del generador, la eficiencia, entre otros.

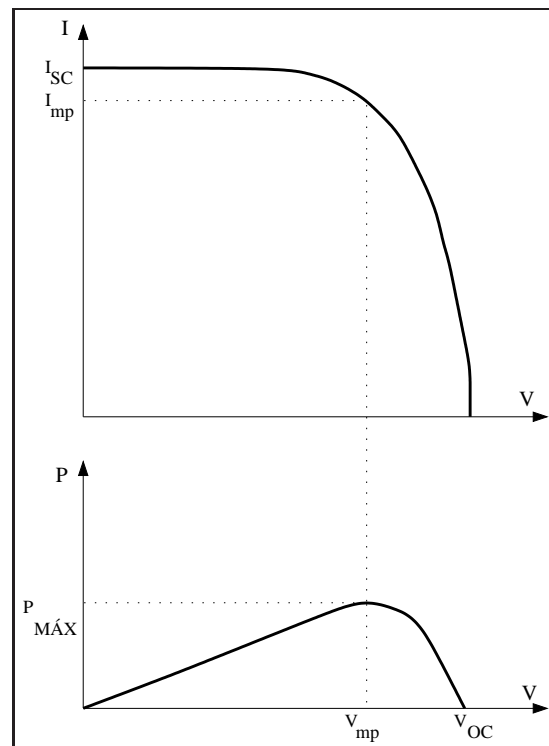


Figura 5.3: Curvas características  $i-v$  y  $p-v$  de un generador fotovoltaico iluminado

### 5.1.2. Modelado de la carga electrónica, [3,4]

Para condiciones ambientales controladas, se puede obtener de la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico haciendo un barrido de tensión o de corriente de salida del generador de forma controlada como lo muestran las Figs. 5.4 y 5.5 respectivamente.

En la Fig. 5.4 se puede observar que la tensión de salida es controlada de forma

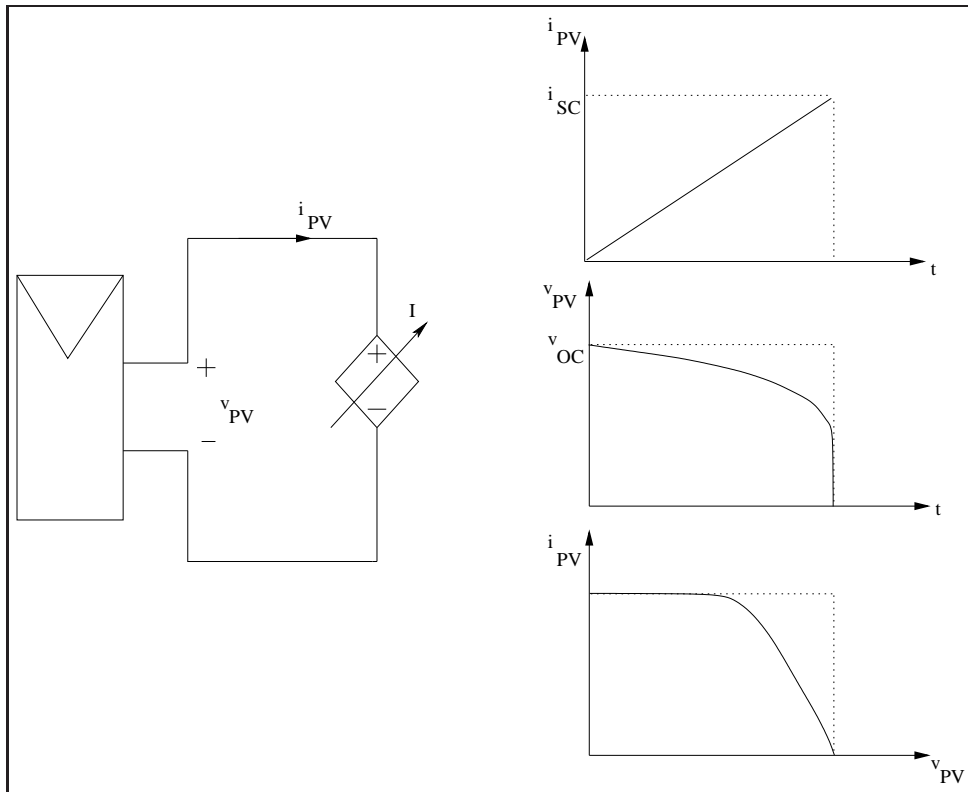


Figura 5.4: Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico mediante el control de la tensión de salida

lineal, y la corriente de salida es medida para la obtención de la curva característica  $i-v$ . En la Fig. 5.5, la corriente de salida es controlada, y de esta forma la medición de la tensión de salida permite la obtención de la curva característica.

El dispositivo semiconductor utilizado como carga electrónica mostrado en la Fig. 5.6, posee un control de la corriente que pasa por el drenador dependiente de la tensión  $v_{GS}(t)$  definido por

$$i_D = K_N(v_{GS}(t) - v_{TH})^2 \quad (5.3)$$

donde  $K_N$  es una constante del dispositivo semiconductor.

Suponiendo que el transistor se encuentra en la región constante, es decir, que  $v_{GS} \geq v_{TH}$ , la corriente que atraviesa el drenador y el generador, dado que ambos se encuentran conectados en serie, está dada por

$$i = i_D = i_{PV} = I_{SC} - I_S e^{\alpha V_{PV}} \quad (5.4)$$

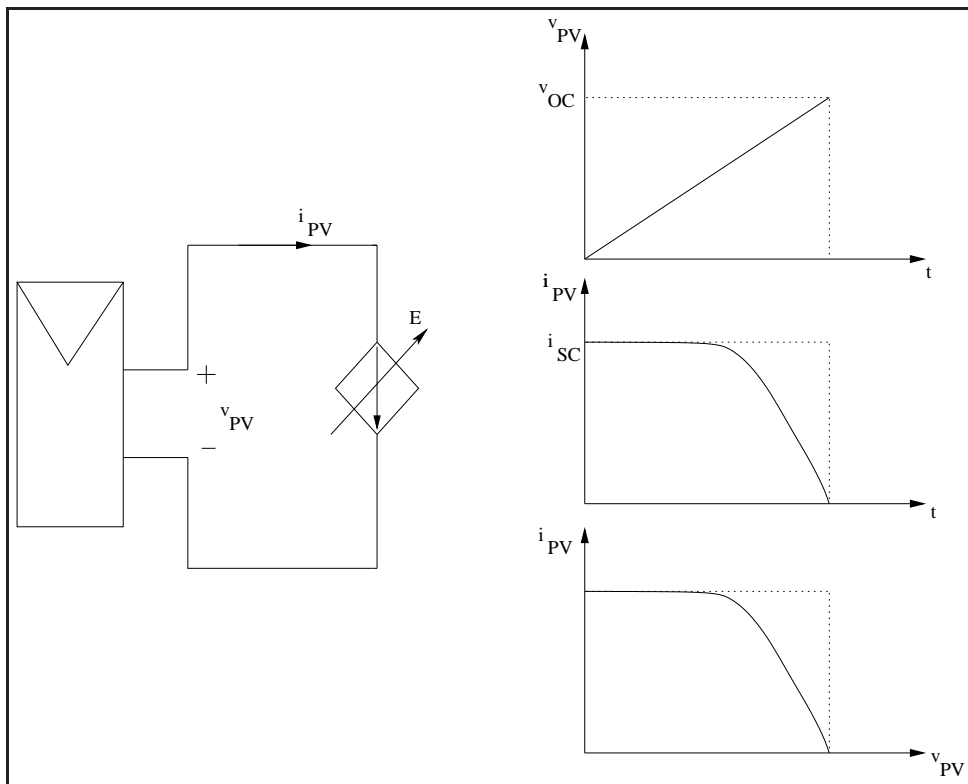


Figura 5.5: Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico mediante el control de la corriente de salida

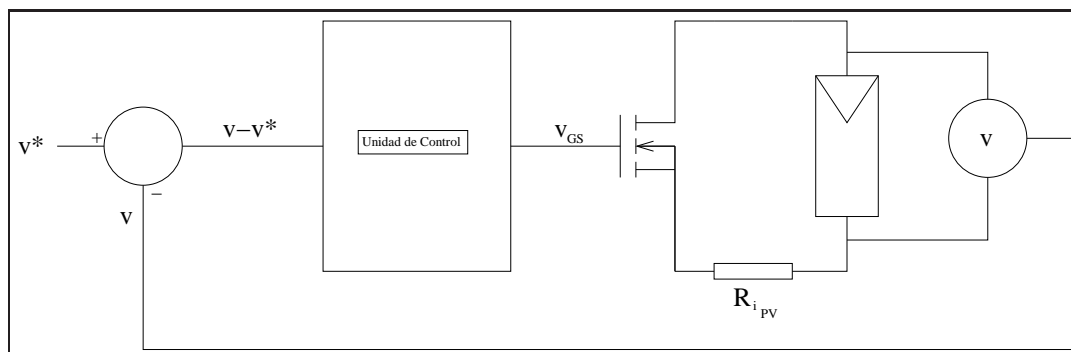


Figura 5.6: Sistema retroalimentado de caracterización de un generador fotovoltaico

Al igualar (5.3) y (5.4) y despejando para  $V_{PV}$ , tenemos que la tensión de salida del generador fotovoltaico

$$v_{PV} = \frac{1}{\alpha} \ln \left( \frac{I_{SC} - K_N(v_{GS} - v_{TH})^2}{I_S} \right) \quad (5.5)$$

Se puede observar en (5.3), que la corriente máxima entregada por el generador fotovoltaico, idealmente  $I_{SC}$ , está dado por una tensión  $v_{GS}(t)$  máxima. Así mismo, en (5.5), la tensión  $v_{PV}$  resulta mínima cuando la tensión  $v_{GS}(t)$  es máxima, produciendo una corriente máxima en la salida del generador.

Hay que tomar en cuenta que cuando  $v_{GS} < v_{TH}$ , el transistor estará en la región de corte, donde la corriente del generador resulta prácticamente nula y la tensión de salida del generador se aproxima a  $V_{OC}$ .

La tensión de salida del generador fotovoltaico,  $v(t)$ , depende de la tensión  $v_{GS}(t)$  aplicada al transistor, y esto permite por medio de la unidad de control, establecer un punto de operación específico de tensión y corriente pertenecientes al generador fotovoltaico. Esto implica que se puede obtener una serie de puntos que caracterizan al generador a través de la curva característica  $i-v$ .

### 5.1.3. Obtención de parámetros y curvas características de un generador fotovoltaico

El sistema a lazo abierto es poco robusto e impide posicionar el punto de operación del generador fotovoltaico en un punto específico. Una solución adecuada consiste en agregar un sistema de retroalimentación tal y como se detalla en la Fig. 5.7.

El lazo de retroalimentación unitario permite estimar el error entre la tensión de referencia y la tensión de salida del generador fotovoltaico y de esta forma, el controlador realiza la corrección pertinente para ubicar la tensión de salida acorde al valor de referencia.

$v^*$  es un valor constante positivo de referencia de la tensión del generador. Tomando en cuenta que la relación entre la tensión y la corriente del generador fotovoltaico es biyectiva, entonces al regular la tensión de salida,  $v$ , se está regulando también un valor determinado de corriente del generador. Esto se ilustra gráficamente mediante la curva  $i-v$  del generador fotovoltaico en la Fig. 5.7.

Para determinar el control de la carga electrónica de la Fig. 5.6, se partirá del siguiente modelo para el generador fotovoltaico mostrado por (5.2), donde la corriente,  $i$ , es positiva. Resulta correcto suponer que  $\Lambda$ ,  $\psi$  y  $\alpha$  son positivos y que para ambientes controlados son constantes.

Para simplificar la notación se asumirá que

$$u(t) = K_N(v_{GS}(t) - v_{TH})^2 = i(t) \quad (5.6)$$

en donde  $u(t)$  es una señal generada por el controlador. La Fig. 5.8 muestra la curva característica  $i_D - i_{GS}$  de un MOSFET. Para la región lineal, existe la siguiente relación de aproximación

$$u(t) = K_N v_{GS} = i(t) \quad (5.7)$$

Se supondrá dos controladores:

1. Controlador proporcional:

$$u(t) = K_P(v^* - v(t)) \quad (5.8)$$

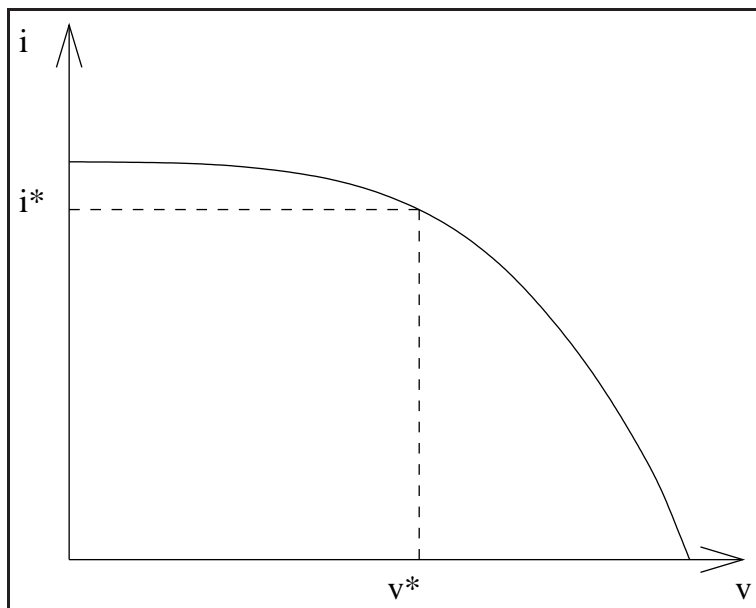


Figura 5.7: Punto de operación ubicado en la curva característica  $i-v$  de un generador fotovoltaico

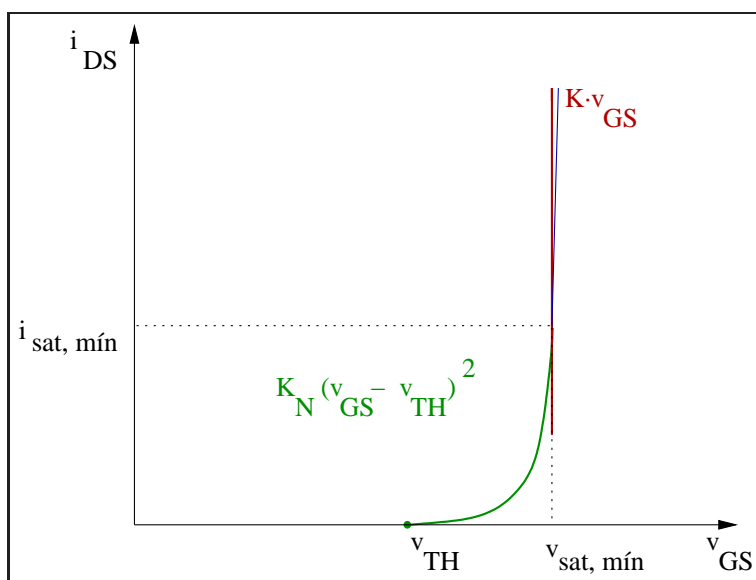


Figura 5.8: Curva característica  $i_D - i_{GS}$  de un transistor MOSFET

2. Controlador proporcional e integral:

$$u(t) = K_P(v^* - v(t)) + K_I x(t) \quad (5.9)$$

donde

$$\dot{x}(t) = v^* - v(t) \quad (5.10)$$

#### 5.1.4. Controlador proporcional

El control proporcional hace que exista una relación entre la tensión  $v_{GS}(t)$  y la señal de error con una ganancia específica que le permite alcanzar un punto de operación en la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico. Al relacionar (5.2) con (5.7) y (5.8) se puede establecer que

$$\Lambda - \psi e^{\alpha v(t)} = K_P(v^* - v(t)) \quad (5.11)$$

Se utilizará la función  $W$  de Lambert para obtener  $v(t)$  de (5.11) en forma explícita, [5]. Sea  $\theta = \left(v^* - \frac{\Lambda}{K_P}\right)$  y  $\beta = \frac{\alpha\psi}{K_P}$ , tenemos que

$$v(t) = \theta + \beta e^{\alpha v(t)}$$

y es equivalente a

$$-\alpha\beta e^{\alpha\theta} = \alpha(\theta - v(t))e^{\alpha(\theta - v(t))}$$

En donde  $z = -\alpha\beta e^{\alpha\theta}$  y  $W(z) = \alpha(\theta - v(t))$ . Por tanto, la tensión de salida del generador fotovoltaico puede representarse como

$$v(t) = \theta - \frac{W(z)}{\alpha} = \theta - \frac{W(-\alpha\beta e^{\alpha\theta})}{\alpha} = \left(v^* - \frac{\Lambda}{K_P}\right) - \frac{W\left(-\alpha\frac{\alpha\psi}{K_P}e^{\alpha\left(v^* - \frac{\Lambda}{K_P}\right)}\right)}{\alpha} \quad (5.12)$$

La función  $W$  de Lambert se define como  $z = W(z)e^{W(z)}$ , y esta posee un máximo en  $W(z) = -1$ , donde  $z = -1/e$ . Además la función se torna creciente a partir de este punto si  $z \geq -1/e$ , como lo muestra la gráfica de la Fig. 5.9, [5].

Además,  $z$  depende de las constantes  $\alpha$ ,  $\psi$ , la tensión de referencia  $v^*$  y de la ganancia  $K_P$ , que en este caso específico, son valores reales positivos. Al aumentar el valor de la ganancia  $K_P$ , se disminuye el valor de  $z$  y al observar (5.12), también esto hace que la tensión  $v(t)$  tienda al valor de  $v^*$ .

Por tanto, si se desea que se cumpla la condición  $v(t) = v^*$ , se debe aumentar la ganancia de forma tal, que los términos dependientes de este valor en (5.12), tiendan a cero. Sin embargo, al observar (5.8), la diferencia entre  $v^*$  y  $v(t)$  se verá afectada también por esta ganancia, y esto hará que la tensión  $u(t)$ , tienda a un valor que no pueda ser soportado por el transistor, invalidando este tipo de control para el sistema de caracterización del generador fotovoltaico.

#### 5.1.5. Controlador proporcional e integral

Este tipo de controlador por retroalimentación conduce a la tensión de salida del generador fotovoltaico hacia una tensión de referencia. La diferencia entre estas dos tensiones, es tomada y se disminuye para tener un error en estado estacionario nulo. Ahora bien, la tensión de salida del generador depende de la tensión  $v_{GS}(t)$ , y de esta



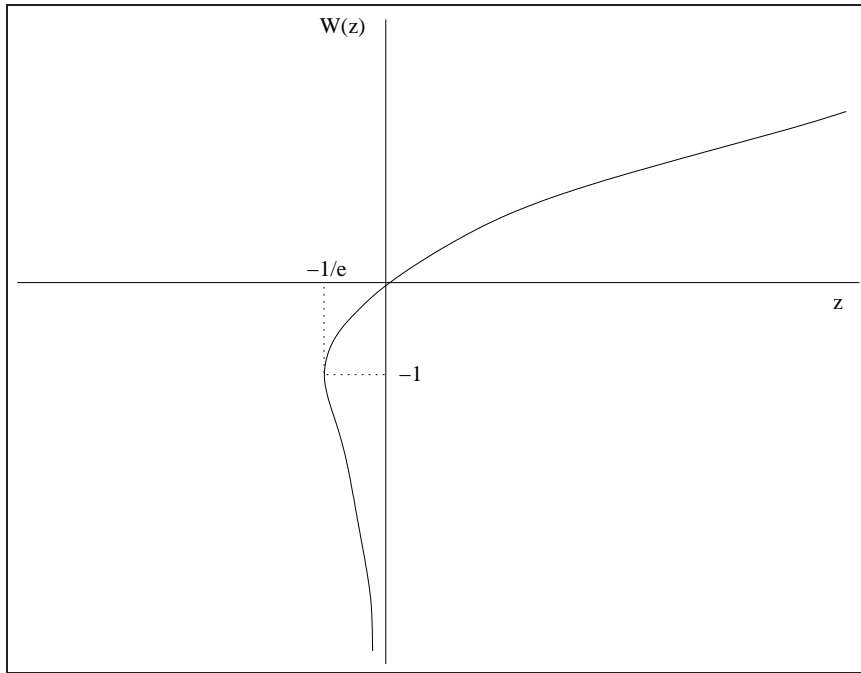


Figura 5.9: Gráfica correspondiente a la función W de Lambert.

forma, el controlador debe adecuar la señal de control de forma que la señal de error se haga cero en un tiempo determinado.

Al relacionar (5.2) con (5.7) y (5.9), y definiendo  $\tilde{v} = v^* - v(t)$ , se obtiene

$$\Lambda - \psi e^{\alpha v(t)} = K_p \tilde{v}(t) + K_i x(t) \quad (5.13)$$

Al derivar (5.13) con respecto al tiempo, y sustituyendo (5.10) tenemos

$$-\alpha \psi e^{\alpha v(t)} \dot{v}(t) = K_p \dot{\tilde{v}}(t) + K_i \tilde{v}(t) \quad (5.14)$$

Suponiendo que la tensión de referencia  $v^*$  es una constante, se obtiene que  $\dot{\tilde{v}} = -\dot{v}$ , i.e.,

$$\alpha \psi e^{\alpha v(t)} \dot{\tilde{v}}(t) = K_p \dot{\tilde{v}}(t) + K_i \tilde{v}(t) \quad (5.15)$$

Al despejar (5.15) en función de  $\dot{\tilde{v}}$  tenemos

$$\dot{\tilde{v}}(t) = \frac{K_i}{\alpha \psi e^{\alpha v(t)} - K_p} \tilde{v}(t) \quad (5.16)$$

Se desea que la tensión  $v(t)$  alcance el valor de la tensión de referencia  $v^*$ , y esto ocurre cuando  $\tilde{v} = 0$ . Al observar la Fig. 5.7, se puede establecer que la pendiente a lo largo de la curva  $i-v$ , está definida por la razón de cambio de la corriente, definida en (5.2), con respecto al cambio de tensión, i.e.,

$$\frac{di}{dv} = -\alpha \psi e^{\alpha v(t)} = -m \quad (5.17)$$

en donde  $m$  es el valor absoluto de la pendiente de la curva  $i-v$  del generador fotovoltaico.

La pendiente definida en (5.17) resulta máxima cuando la tensión del generador

fotovoltaico es cercana a su valor nominal  $V_{OC}$  y su corriente es prácticamente nula. Por otra parte, la pendiente resulta mínima cuando la tensión resulta mínima y la corriente es máxima, cercana a  $I_{SC}$ .

Supóngase que nos interesa conocer el comportamiento del sistema descrito en (5.16) en un punto de operación específico. Para ello el término no lineal mostrado en la parte izquierda de (5.13), se desea linealizar en un punto arbitrario  $v^*$  mediante la expansión de series de Taylor

$$\Lambda - \psi e^{\alpha v(t)} = \Lambda - \psi e^{\alpha v^*} + -\alpha \psi e^{\alpha v^*} (v(t) - v^*) + T.O.S.$$

en donde T.O.S. representa los términos de orden superior en la expansión de Taylor, [6], definiendo que

$$\frac{d(\Lambda - \psi e^{\alpha v(t)})}{dv} \Big|_{v=v^*} = -m(v^*)(v(t) - v^*) = -m(v^*)\tilde{v} \quad (5.18)$$

Donde la función de (5.13) linealizada en un punto arbitrario  $v^*$  esta dada por

$$-m(v^*)\tilde{v} = K_P \tilde{v}(t) + K_I x(t) \quad (5.19)$$

Al derivar (5.19) con respecto al tiempo y al sustituir (5.10), despejando para  $\dot{\tilde{v}}(t)$  tenemos

$$\dot{\tilde{v}}(t) = \frac{-K_I}{m(v^*) + K_P} \tilde{v}(t) \quad (5.20)$$

Definiendo

$$a = \frac{-K_I}{m(v^*) + K_P} \quad (5.21)$$

Si las ganancias  $K_P$  y  $K_I$  son ambas positivas en (5.21), entonces implica que  $a < 0$ . Ahora bien, la representación de la dinámica del error del sistema en lazo cerrado mostrado por (5.21), se puede representar como

$$\dot{\tilde{v}}(t) = a\tilde{v}(t) \quad (5.22)$$

y además la solución de este sistema lineal de primer orden está dada por

$$\tilde{v}(t) = C_i e^{-|a|t} \quad (5.23)$$

Se necesita que el sistema converja en un punto en un tiempo determinado, esto con la condición que  $\tilde{v}(t) = 0$ , ya que implica que  $\dot{\tilde{v}}(t) = 0$ . La función exponencial inversa alcanza un valor cercano a cero en aproximadamente 5 constantes de tiempo y de esta forma, podemos establecer que

$$\begin{aligned} e^{-|a|t} &= 0 \\ -|a|t &= -5 \\ a &= \frac{5}{t} \end{aligned} \quad (5.24)$$

A través de (5.21) y (5.24) se pueden definir los valores respectivos de las ganancias de los controladores del sistema. Así mismo, existe una relación entre la pendiente de la curva  $i-v$  y la dinámica de la ganancia del sistema para una tensión de referencia, establecida por

$$\left( \frac{K_I}{\frac{5}{t}} + K_P \right) = -m(v^*) = -\alpha \psi e^{\alpha v^*} \quad (5.25)$$

y en la misma podemos ver la dependencia que existe entre la ganancia de los controladores proporcional e integral y las constantes  $\alpha$  y  $\psi$ , así como la tensión de referencia.

Al analizar el generador fotovoltaico podemos ver dos casos extremos en la tensión de salida, una tensión máxima,  $V_{OC}$  y una tensión mínima de  $0V$ . Es por tanto que la ganancia estará dada dentro de los límites de las siguientes condiciones

$$\begin{cases} \left( \frac{K_I}{s} + K_P \right) = -\alpha\psi e^{\alpha V_{OC}} \\ \left( \frac{K_I}{s} + K_P \right) = -\alpha\psi \end{cases} \quad (5.26)$$

Al tener un sistema no lineal definiendo la curva característica  $i-v$  de un generador fotovoltaico, debe existir una serie de ganancias de la dinámica del error del sistema en lazo cerrado que le permitan al sistema de medición, obtener una la tensión de salida del generador igual a la tensión de referencia en un tiempo determinado. Al hacer un barrido de todas las tensiones de salida que el generador pueda suplir a través del seguimiento de la tensión de referencia, se puede caracterizar el generador a través de la carga electrónica.

## 5.2. Descripción del hardware

### 5.2.1. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo abierto

El sistema de caracterización en lazo abierto corresponde al circuito configurado como se muestra en la Fig. 5.10. En este sistema, básicamente con una variación de la tensión entre las terminales compuerta y fuente, se regula la cantidad de corriente entregada por el generador, y esta es medida a través de la resistencia  $R_{ipv}$ .

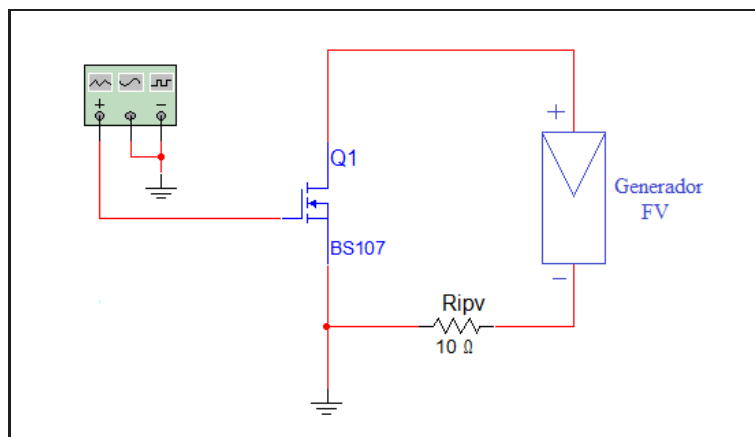


Figura 5.10: Circuito correspondiente al sistema de caracterización en lazo abierto

### 5.2.2. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional

El sistema de caracterización con un control en lazo cerrado con un controlador proporcional se muestra en la Fig. 5.11. La señal de control de la carga electrónica es ajustada de acuerdo a la dinámica de error entre dos señales de tensión,  $v(t)$  y  $v^*(t)$ .

La señal de error se obtiene invirtiendo la tensión de referencia,  $v^*(t)$ , a través del amplificador  $U3A$  con ganancia unitaria, la cual es previamente amplificada mediante  $U2A$ , y sumándola a la tensión de salida del generador,  $v(t)$ , por medio del amplificador  $U3B$  con ganancia unitaria.

El resultado de la diferencia de tensiones se invierte a través del amplificador  $U3C$  obteniendo la señal que corresponde a la entrada de los controladores proporcionales con ganancia  $K_{P1}$  y  $K_{P2}$ . Luego, la salida de los controladores se suma a través del amplificador  $U1C$  en configuración inversora con ganancia unitaria y el resultado es la tensión de control de la carga electrónica.

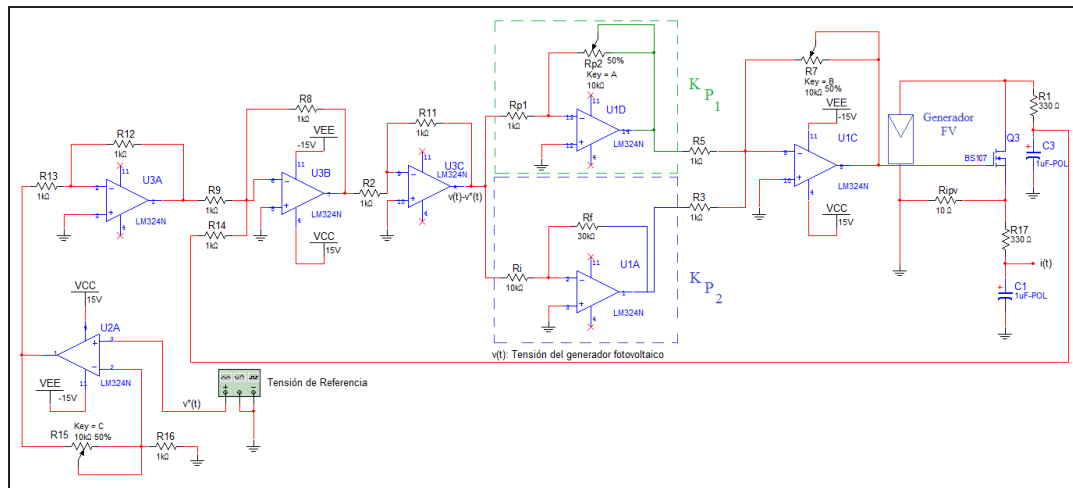


Figura 5.11: Circuito correspondiente al sistema de caracterización mediante un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional

### 5.2.3. Implementación del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

La Fig. 5.12 muestra el diagrama de conexión de la unidad de control acoplada a la carga electrónica. Cabe destacar que este sistema de control analógico posee un lazo de retroalimentación unitario, y la señal de error consiste en la diferencia entre la tensión de referencia y la tensión de salida del generador fotovoltaico. La señal de control de la tensión  $v_{GS}$  se obtiene de la misma manera que para el sistema de control con el controlador proporcional.

La ganancia del controlador proporcional está dado por

$$K_P = \frac{-R_{P2}}{R_{P1}} \quad (5.27)$$

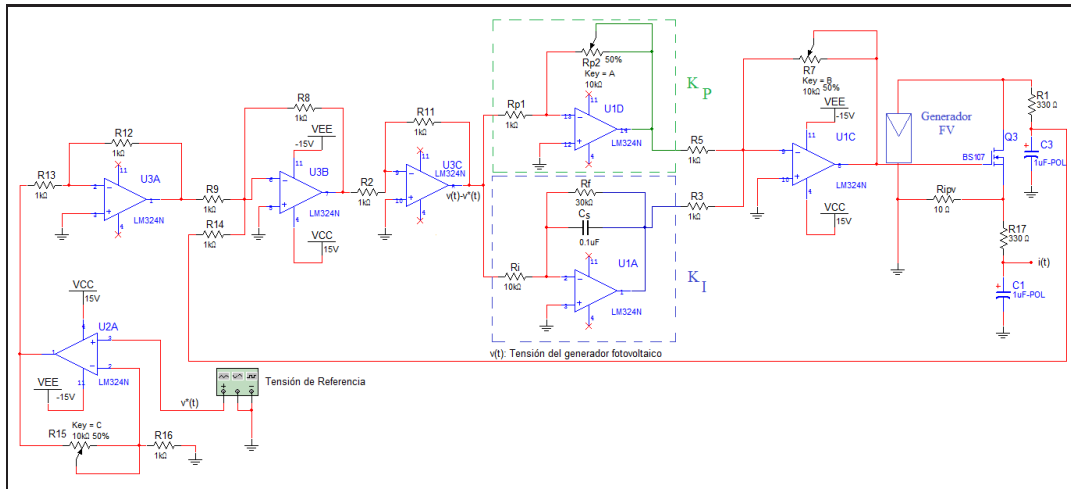


Figura 5.12: Sistema de caracterización de un generador fotovoltaico con un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

y por otra parte la ganancia del controlador integral está definido por

$$K_I = \frac{-\frac{R_F}{R_I}}{R_F \cdot C_S \cdot s + 1} \quad (5.28)$$

En (5.27) se observa que la relación de ganancia del amplificador  $U1D$  depende de dos valores resistivos solamente, y de igual forma esto se cumple en (5.28), donde la relación de ganancia del amplificador  $U1A$  depende de  $R_F$  y  $R_I$ , sin embargo la acción integradora depende del valor capacitivo  $C_S$  y de  $R_F$ .

Si la constante de tiempo de integración del controlador proporcional e integral es grande, este actúa lentamente, primero como controlador proporcional y luego el comportamiento integrador lleva una desviación de error en estado estacionario igual a cero.

Si la constante de tiempo es pequeña, entonces el término proporcional así como el integrador, actúan desde el inicio, haciendo el sistema más rápido pero la señal de salida tiende a oscilar, donde con pequeños cambios en el sistema, éste puede volverse inestable.

#### 5.2.4. Transistor MOSFET de enriquecimiento

Este tipo de transistor es ampliamente utilizado como transistor de efecto de campo. La estructura física de este tipo de transistor se muestra en las Figs. 5.13 y 5.14. Las dimensiones físicas típicas del largo y ancho del canal son  $L = 0,1$  a  $0,3\mu m$  y  $W = 0,2$  a  $100\mu m$ , con un espesor de la capa de óxido de  $0,02$  a  $0,1\mu m$ , sin embargo, estas dimensiones están sujetas a la resolución del proceso litográfico a la hora de crear el dispositivo. En las Figs. 5.13 y 5.14 se muestra un dispositivo de cuatro terminales, sin embargo, normalmente el encapsulado y la fuente están interconectados formando un dispositivo de tres terminales. Si no existe una tensión de polarización aplicada a la compuerta, entonces las dos junturas  $pn$  entre las terminales drenador y fuente hacen que haya una resistencia (en el orden de  $10^{12}\Omega$ ) que limita el flujo de la corriente a ser prácticamente nula.

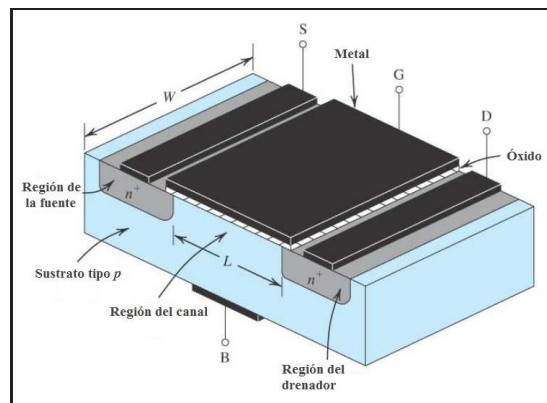


Figura 5.13: Estructura física del MOSFET

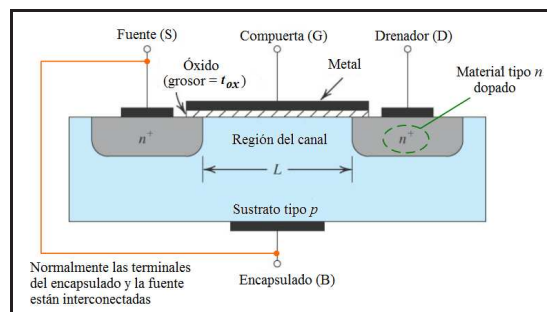


Figura 5.14: Sección transversal del MOSFET

Las regiones del canal y la compuerta forman un capacitor de placas paralelas, y al aplicarse una tensión en las terminales compuerta-fuente los huecos del sustrato de la capa  $p$  son repelidos de la región debajo de la compuerta, y además los electrones de las regiones dopadas de material  $n$ , en este caso el drenador y la fuente, son atraídos debajo de la compuerta.

Los dos efectos mencionados anteriormente se combinan, se induce un canal de material tipo  $n$  como se muestra en la Fig. 5.15. Si una tensión entre las terminales drenador y fuente es aplicada, existe un movimiento de electrones desde la fuente hacia el drenador, esto es, una corriente. La tensión  $v_{GS}$  requerida para acumular suficiente número de electrones móviles en el canal se le llama la tensión umbral.

En este modo de operación, el transistor se comporta como una resistencia entre las terminales drenador y fuente, la cual es controlada mediante la tensión  $v_{GS}$ . Así, la transconductancia de este canal es proporcional a la diferencia entre las tensiones  $v_{GS}$  y  $v_{TH}$ .

Al aumentar la tensión entre el drenador y la fuente cuando el transistor está polarizado, se crea un campo eléctrico entre estas dos terminales que altera la forma del canal. Puesto que en la terminales de la fuente existen más cargas negativas, el canal se hace más estrecho en esta terminal, como se observa en la Fig. 5.16.

Debido a esta forma que toma el canal, la resistencia del mismo incrementa, y es por ello que la curva característica  $i_D - v_{DS}$  pierde la linealidad como se observa en la Fig. 5.17. Es posible aumentar la tensión  $v_{DS}$  lo suficiente para reducir el grosor del canal hasta cero, y la tensión en este punto se llama tensión de estrangulamiento, donde se

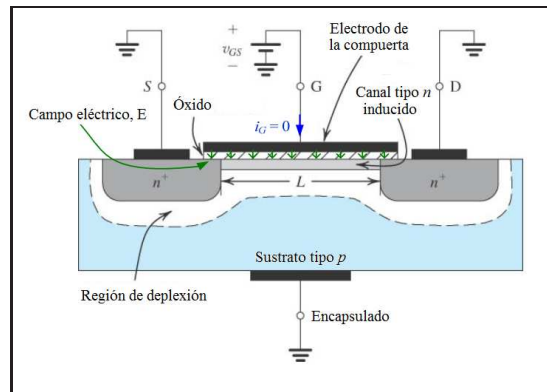


Figura 5.15: Sección transversal de un MOSFET polarizado

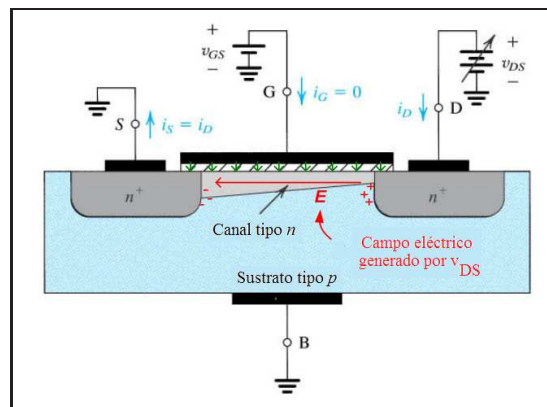


Figura 5.16: Sección transversal de un MOSFET polarizado con estrechamiento de canal

cumple que  $v_{DS} \geq v_{GS} - v_{TH}$ .

De este modo se pueden establecer tres regiones de operación para el transistor:

- región de corte, donde  $i_D = 0A$
- región óhmica, donde  $v_{DS} < v_{GS} - v_{TH} = v_{DS_{Sat}}$
- región de saturación, donde  $v_{DS} \geq v_{GS} - v_{TH}$

En la región óhmica, la corriente de drenador está dada por

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} \left[ (v_{GS} - v_{TH})v_{DS} - \frac{v_{DS}^2}{2} \right]$$

y en la región de saturación tenemos

$$i_D = k'_n \frac{W}{L} (v_{GS} - v_{TH})^2$$

donde  $k'_n$  es el parámetro de transconductancia del proceso,  $W$  y  $L$ , son los valores del ancho y largo del canal respectivamente.

En este modo de operación, el transistor se comporta como una fuente de corriente ideal, sin embargo para el modelo real, mostrado en la Fig. 5.18, se contempla una

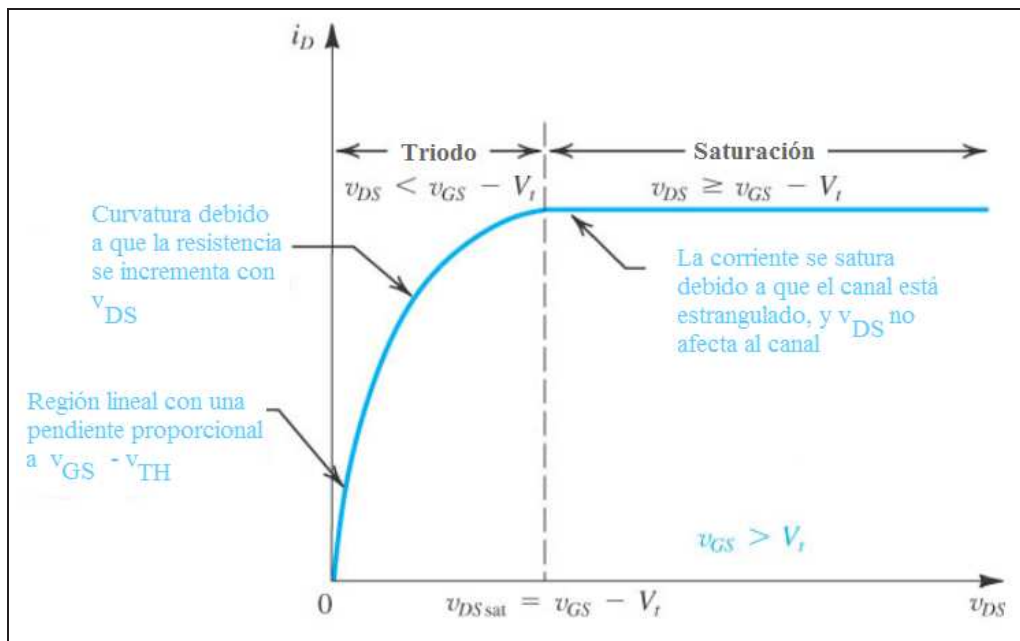


Figura 5.17: Curva característica  $i_D - v_{DS}$  de un transistor MOSFET

resistencia de salida, donde  $r_o = \frac{1}{\lambda}$ , donde  $\lambda$  es el parámetro de modulación de ancho de canal, y esta resistencia es quién hace que exista una pendiente en la curva característica  $i_D - v_{DS}$  como se muestra en la Fig. 5.19.

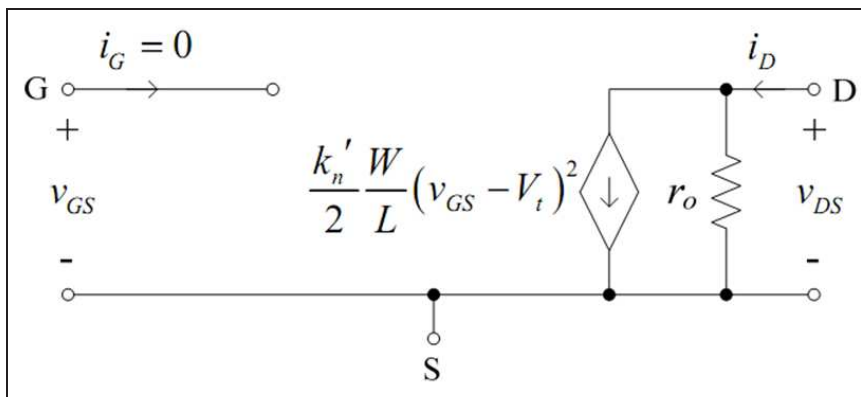


Figura 5.18: Circuito equivalente del MOSFET en la región de saturación

La curva característica  $i_D - v_{DS}$  del MOSFET, así como la curva característica  $i-v$  de  $i_D - v_{DS}$  un generador fotovoltaico se muestran superpuestas en la Fig. 5.20.

El circuito básico para caracterizar un generador fotovoltaico mediante un MOSFET como carga electrónica se muestra en la Fig. 5.21. Se puede observar que la corriente del drenador es igual a la corriente de salida del generador fotovoltaico y el punto de operación se establece igualando las corrientes de los dispositivos.

Para la región óhmica o lineal del MOSFET, donde  $v_{DS} < v_{GS} - v_{TH}$ , la corriente del drenador está definida como

$$i_D = K(2(v_{GS} - v_{TH})v_{DS} - v_{DS}^2) \approx 2K(v_{GS} - v_{TH})$$



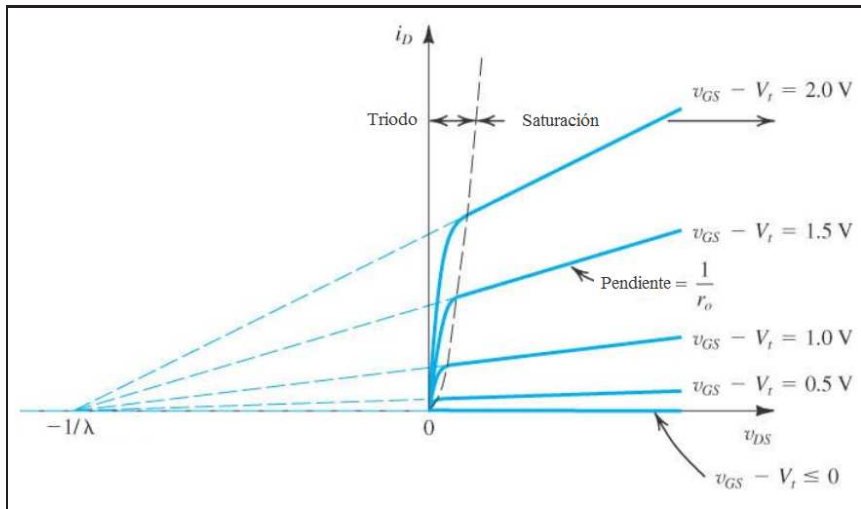


Figura 5.19: Curva característica  $i_D - v_{DS}$  de un MOSFET con resistencia de salida  $r_o$

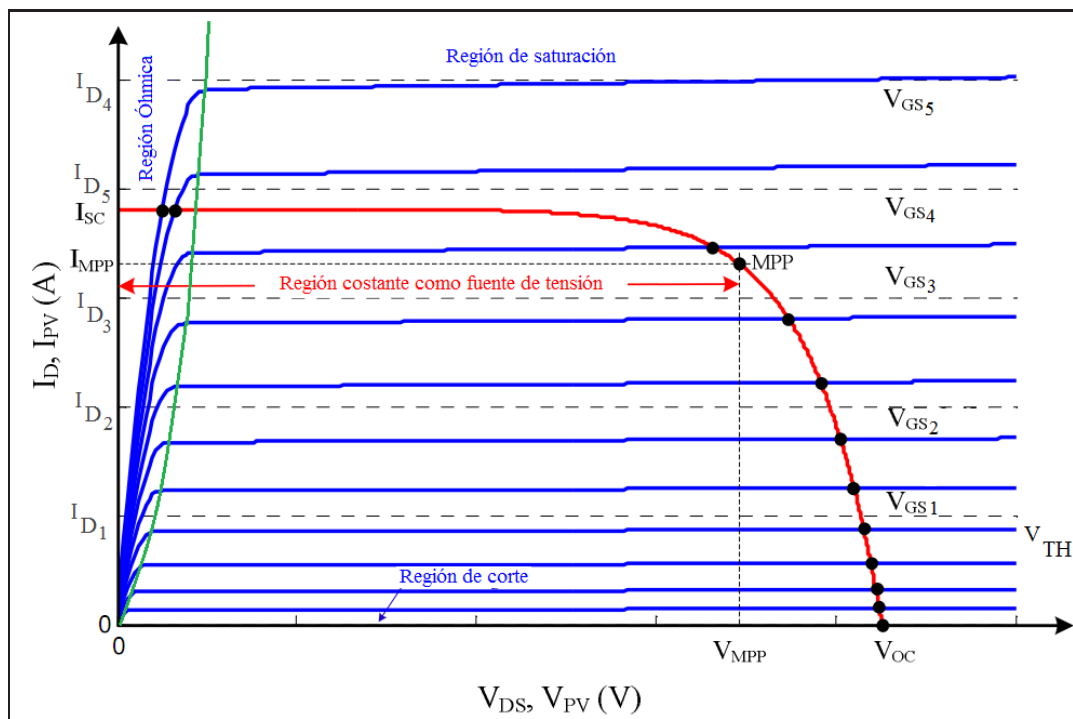


Figura 5.20: Curva característica  $i_D - v_{DS}$  del MOSFET y curva característica  $i-v$  de un generador fotovoltaico

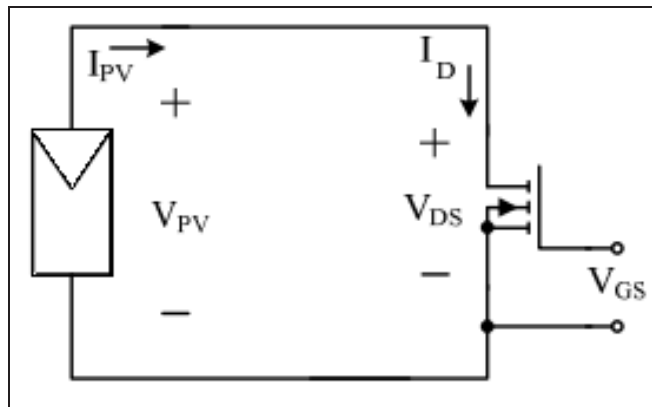


Figura 5.21: Circuito básico de caracterización de un generador fotovoltaico mediante un MOSFET como carga electrónica

y para la región de saturación se tiene que

$$i_D = K(v_{GS} - v_{TH})^2(1 + \lambda v_{DS})$$

donde  $K$  y  $v_{TH}$  son parámetros que dependen del dispositivo semiconductor.

Cuando la tensión  $v_{GS}$  supera la tensión  $v_{TH}$ , el transistor opera en la región de saturación, donde la corriente del drenador varía de forma aproximadamente lineal con respecto a  $v_{GS}$ . De esta forma el punto de operación corresponde a la intersección de las características de corriente y tensión de salida del generador y del MOSFET ante una tensión  $v_{GS}$  dada.

Haciendo un barrido de la tensión  $v_{GS}$  con una señal adecuada, se hace un barrido de distintos puntos de operación de la curva característica  $i-v$  del generador. Cuando la tensión de salida del generador fotovoltaico supera la tensión de máxima potencia,  $V_{MPP}$ , éste se comporta como una fuente de tensión. Antes de este punto, el generador se comporta como una fuente de corriente.

En la región donde la tensión de salida del generador es mayor que la tensión del máximo punto de operación de la curva característica del generador de la Fig. 5.20, la tensión de salida del generador es susceptible a pequeñas variaciones de la corriente de salida del generador, y por tanto también a variaciones pequeñas de la tensión  $v_{GS}$ . Debido a esta alta sensibilidad en esta región, el punto de operación se moverá muy rápido al menos que se utilice una señal adecuada de barrido.

Esta señal de barrido debe contemplar que la tensión mínima de  $v_{GS}$  siempre sea mayor o igual a  $v_{TH}$ , de esta manera se asegura que la señal está optimizada para la región luego del máximo punto de potencia de la curva característica  $i-v$  del generador, donde este se comporta como una fuente de corriente.

Para esta señal de barrido se debe estipular que la tensión de salida del generador puede variar rápidamente desde  $v_{GS}$  hasta  $V_{MPP}$ , y luego de ello, debe haber una variación más lenta de forma tal que se obtengan más puntos de operación de la región posterior al máximo punto de operación de la curva característica.

Adicionalmente, se debe tomar en cuenta que la corriente  $i_{SC}$  no puede ser alcanzada debido a que el generador fotovoltaico nunca se encuentra en corto circuito debido a la resistencia de medición  $R_{iPV}$  y la resistencia interna del MOSFET. Lo mismo sucede para la tensión de circuito abierto, y para compensar estas pérdidas, se puede conectar una fuente de tensión en serie con el generador fotovoltaico de forma tal, que la curva

característica es desplazada en el eje horizontal.

### 5.3. Descripción del software

El diagrama de bloques mostrado en la Fig. 5.22, muestra la forma en que se obtuvo la señal analógica que para el sistema en lazo cerrado consiste en la tensión  $v_{GS}$  y para el sistema en lazo abierto, consiste la señal de tensión de referencia.

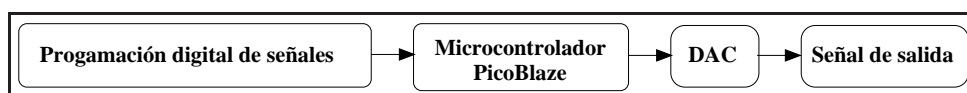


Figura 5.22: Diagrama correspondiente a la generación de señales analógicas a partir de la programación digital de señales

La tarjeta de desarrollo Spartan 3E de Xilinx, posee internamente cuatro convertidores digital-analógico. Se utilizó a su vez un microprocesador interno que coordina el protocolo SPI de comunicación entre los dispositivos como se observa en la Fig. 5.23. Existe la limitante que a la salida de los DAC, solo pueden existir señales de amplitud positiva.

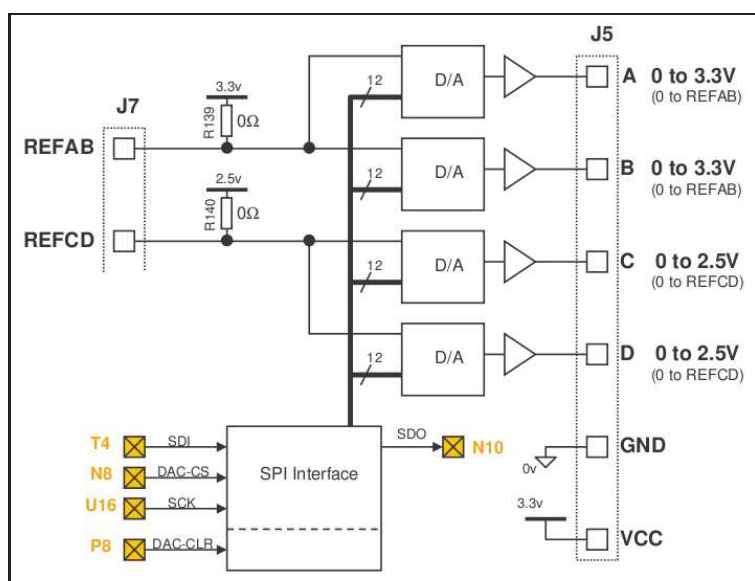


Figura 5.23: Conexión interna entre los DAC y el microcontrolador PicoBlaze en el kit de desarrollo Spartan 3E

Básicamente, la señal se programa con una resolución de 12 bits, y con una frecuencia de operación es de 8Mhz. Por medio de operaciones básicas y funciones digitales en un lenguaje de bajo nivel, es que se construye la señal digital. Luego de ello, se transmite hacia un DAC que convierte la señal digital en analógica que puede ser utilizada posteriormente por el sistema de caracterización.



## Capítulo 6

# Análisis de Resultados

### 6.1. Resultados

Para obtener el comportamiento experimental del sistema de caracterización se evaluó la respuesta del sistema en lazo abierto, lazo cerrado con un controlador proporcional y en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral. Los circuitos de medición se acoplaron a un generador fotovoltaico con las siguientes características eléctricas:

$$V_{OC} = 9,68V$$

$$I_{SC} = 19,79mA$$

Las mediciones realizadas se hicieron a una temperatura promedio de 29°C y la fuente de luz consiste en un bombillo *Twister* del fabricante Phillips, con las siguientes características:

$$P = 23W$$

$$F = 1450lm$$

$$LER = 63Lm/W$$

Cabe destacar que las señales de tensión de control de los sistemas de caracterización poseen un periodo menor a 1s. Esto se debe a que se desea que las condiciones ambientales de prueba se mantengan constantes, principalmente la temperatura, a la hora de realizar las mediciones correspondientes a la caracterización del generador fotovoltaico.

#### 6.1.1. Comportamiento del sistema de caracterización del generador fotovoltaico en lazo abierto

Al utilizar una señal de tensión escalonada para el sistema mostrado en la Fig. 5.9, con escalones de aproximadamente 0.31V cada 20ms, se obtuvo la respuesta de la tensión de salida del generador mostrada en la Fig. 6.1.

Las Figs. 6.2 y 6.3 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ . La curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico se muestra en la Fig. 6.4.

Posteriormente la señal de tensión en las terminales compuerta fuente se ajustó con la señal triangular mostrada en la Fig. 6.5. En las Figs. 6.6 y 6.7 se observa el comportamiento de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión  $v_{GS}$  del transistor correspondientemente. La Fig. 6.8 muestra la curva

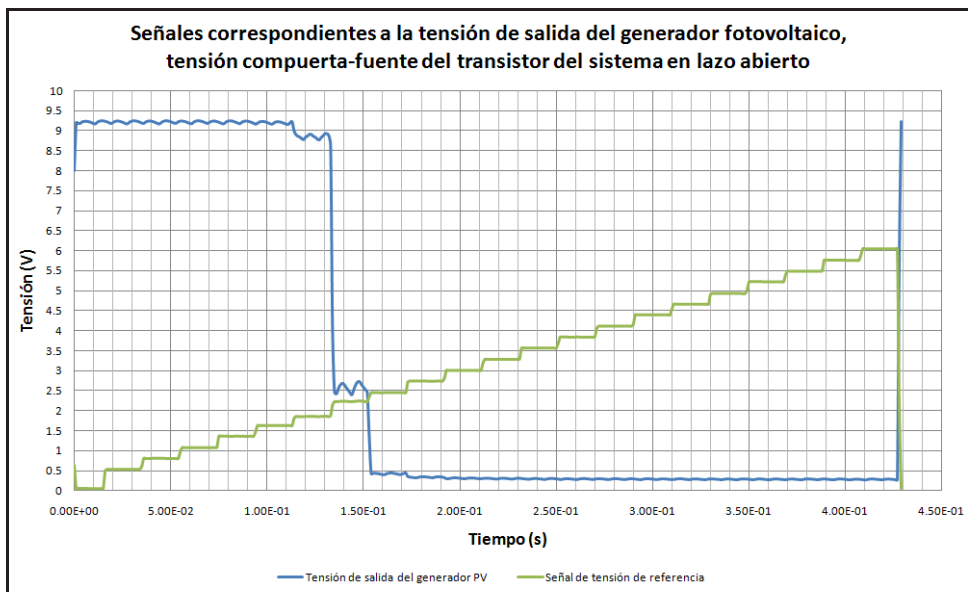


Figura 6.1: Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico y la señal de tensión de referencia con el sistema en lazo abierto

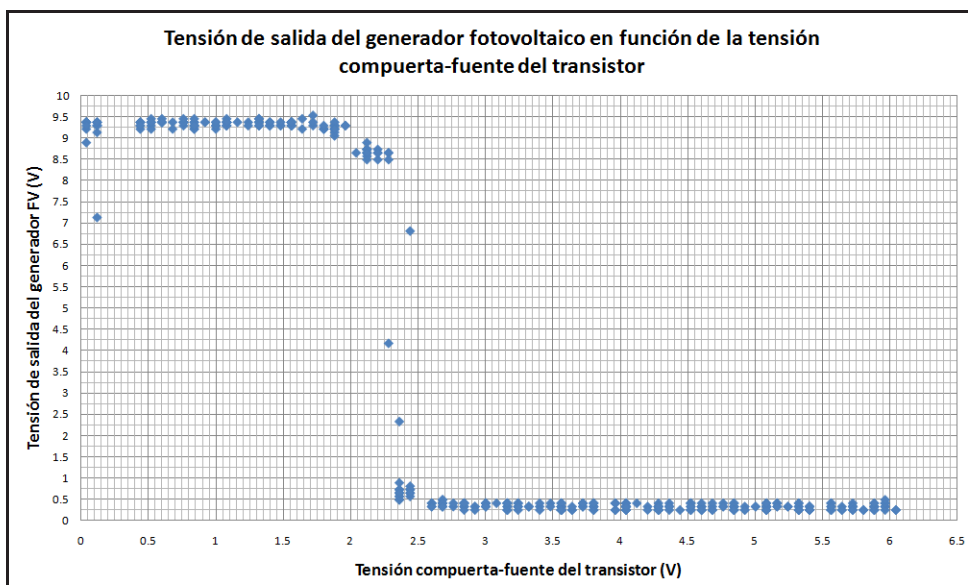


Figura 6.2: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

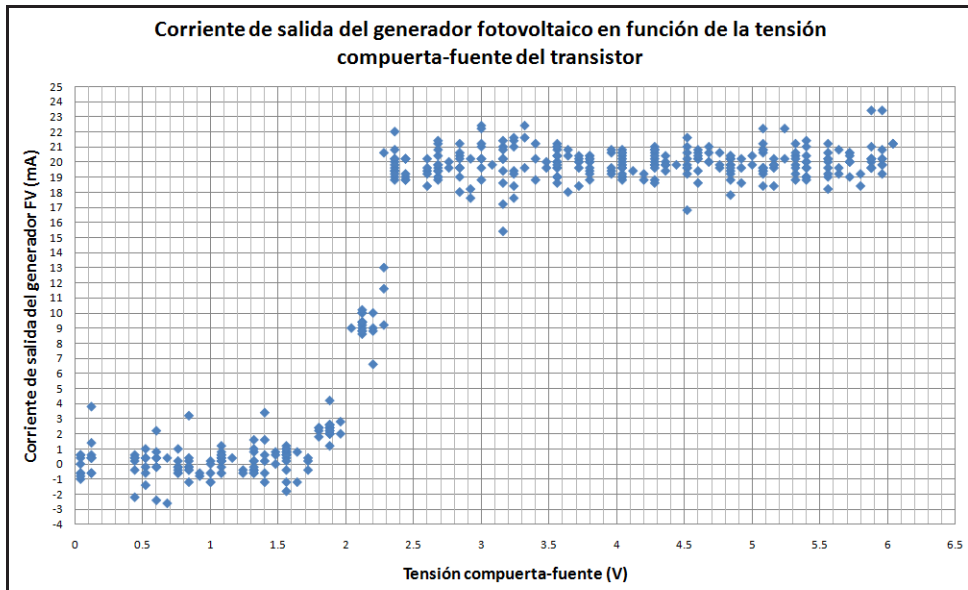


Figura 6.3: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

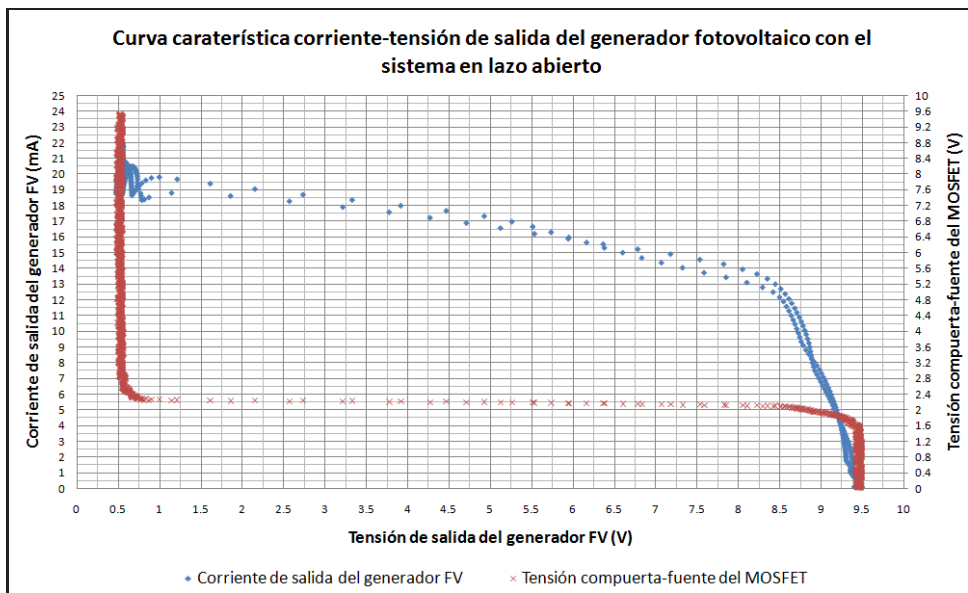


Figura 6.4: Curva característica del generador fotovoltaico mediante el sistema en lazo abierto con una señal de tensión escalonada de control

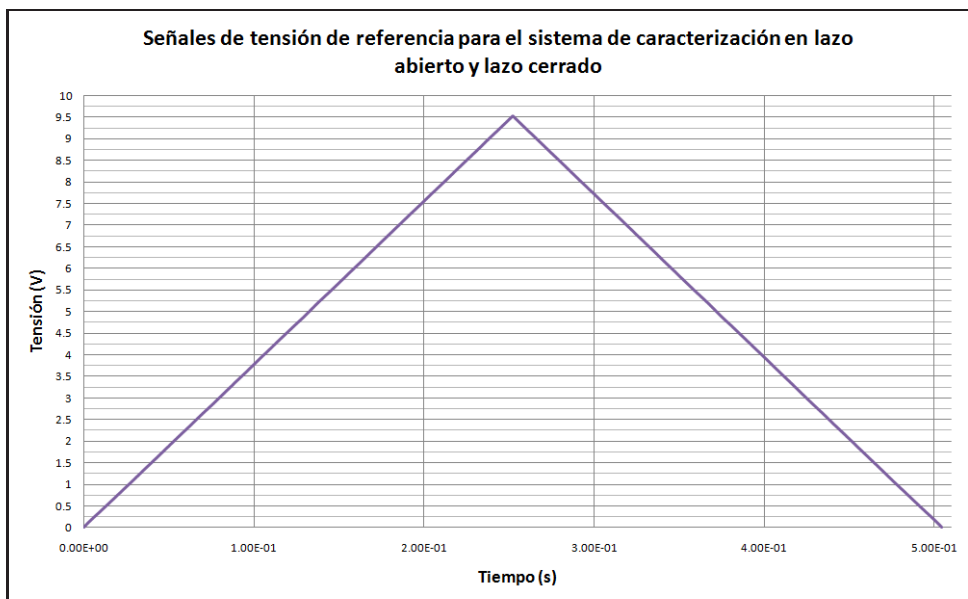


Figura 6.5: Señal de tensión de referencia para el circuito en lazo abierto

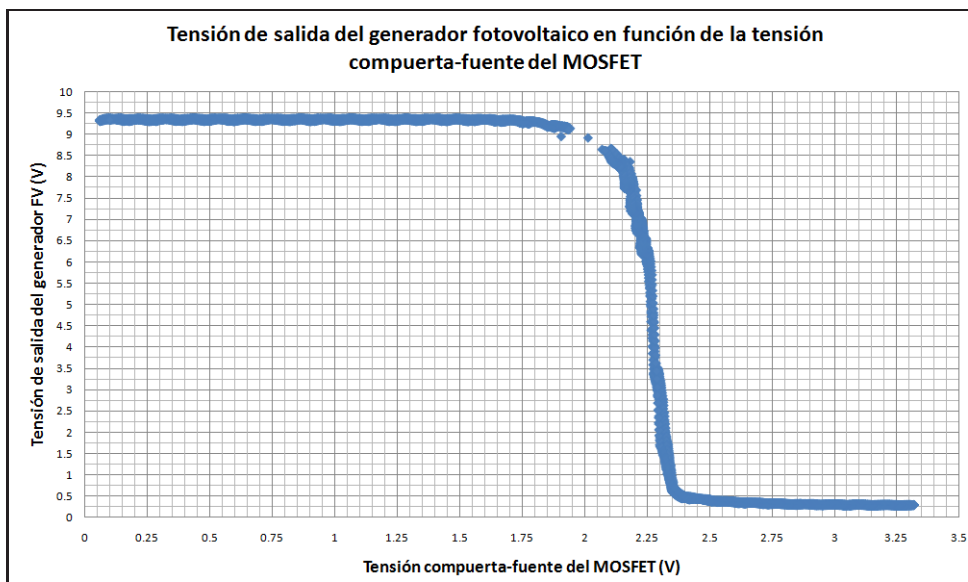


Figura 6.6: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión  $v_{GS}$  mediante el sistema en lazo abierto



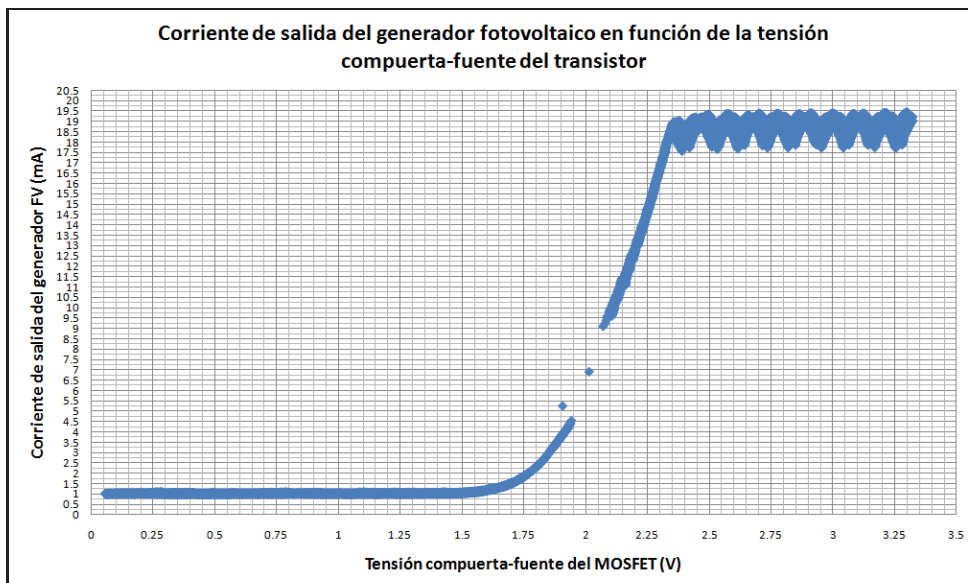


Figura 6.7: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión  $v_{GS}$  mediante el sistema en lazo abierto

característica  $i-v$  del generador fotovoltaico obtenida mediante el sistema en lazo abierto de la Fig. 5.10.

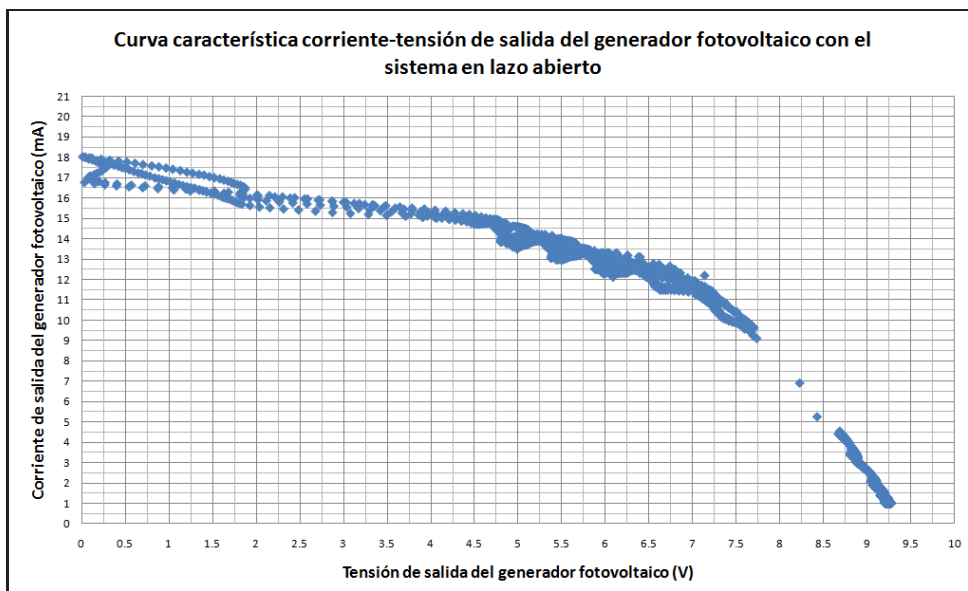


Figura 6.8: Curva característica del generador fotovoltaico mediante el sistema en lazo abierto con una señal de tensión triangular de control

### 6.1.2. Comportamiento del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional

Al aplicar una señal de tensión escalonada al sistema mostrado en la Fig. 6.9, con escalones de 0.31V cada 20ms, como tensión de referencia al sistema de la Fig. 5.11, se obtuvo el comportamiento de la tensión de salida del generador y la tensión  $v_{GS}$  mostrado en la Fig. 6.9.

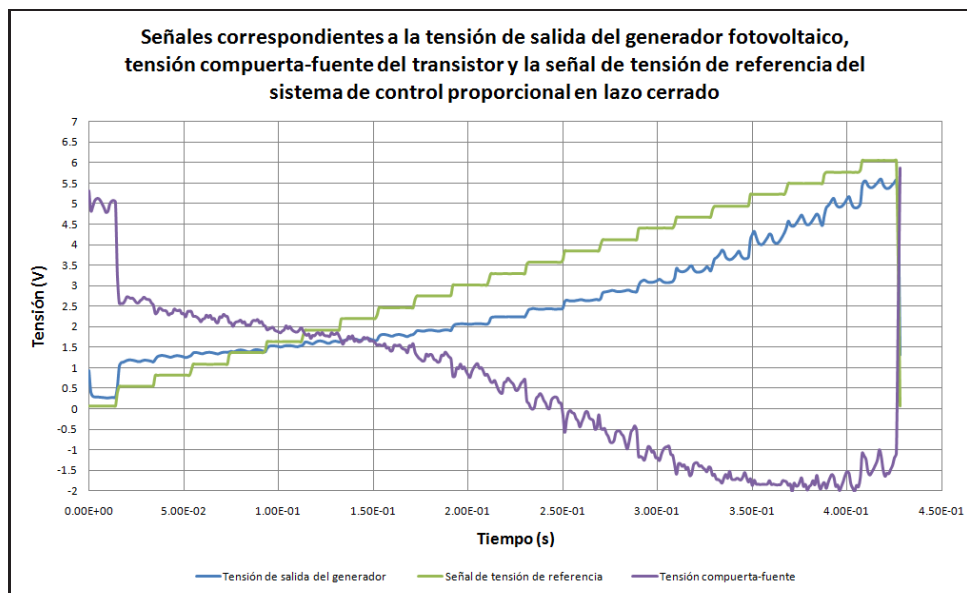


Figura 6.9: Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional

Las Figs. 6.10 y 6.11 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ .

La Fig. 6.12, muestra la curva característica  $i-v$  obtenida a partir de los valores de tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con el sistema de caracterización en lazo cerrado con un controlador proporcional.

Modificando la señal de tensión escalonada, ahora con escalones de aproximadamente 0.93V cada 60ms, y utilizándola como tensión de referencia en el sistema de la Fig. 5.11, se obtuvo el comportamiento de la tensión de salida del generador, así como de la tensión  $v_{GS}$  como se muestra en la Fig. 6.13.

Las Figs. 6.14 y 6.15 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ .

La Fig. 6.16, muestra la curva característica  $i-v$  obtenida a partir de los valores de tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con el sistema de caracterización en lazo cerrado con un controlador proporcional.

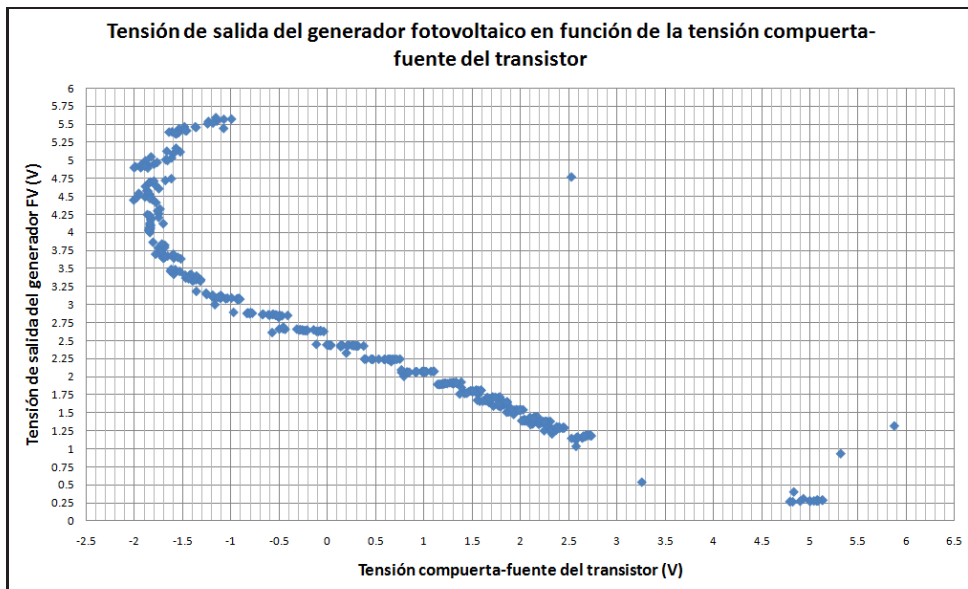


Figura 6.10: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

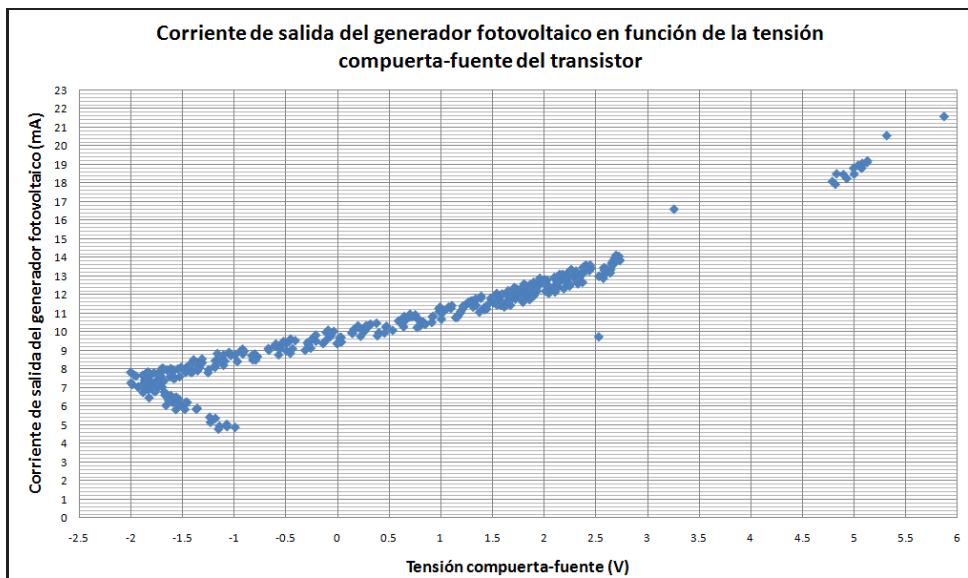


Figura 6.11: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

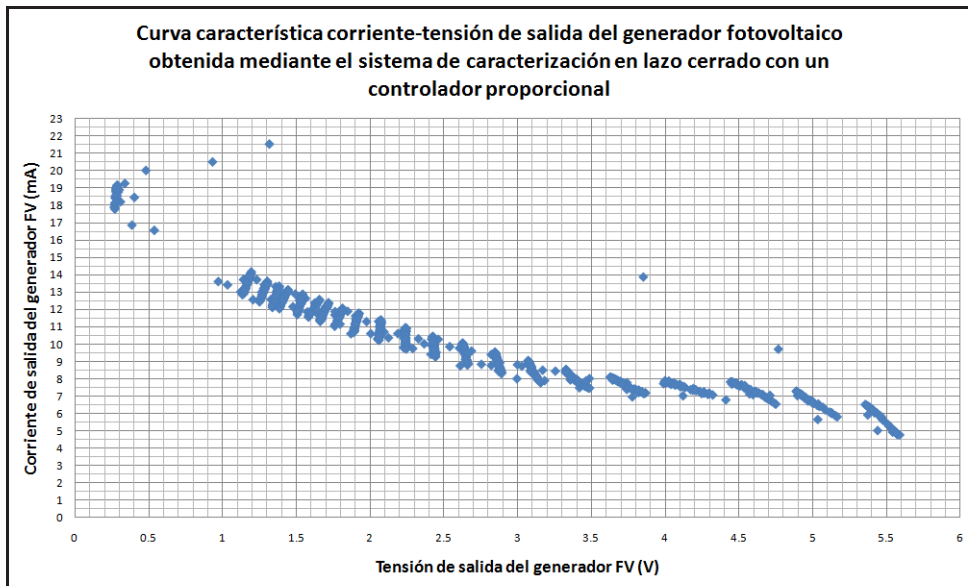


Figura 6.12: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con control proporcional

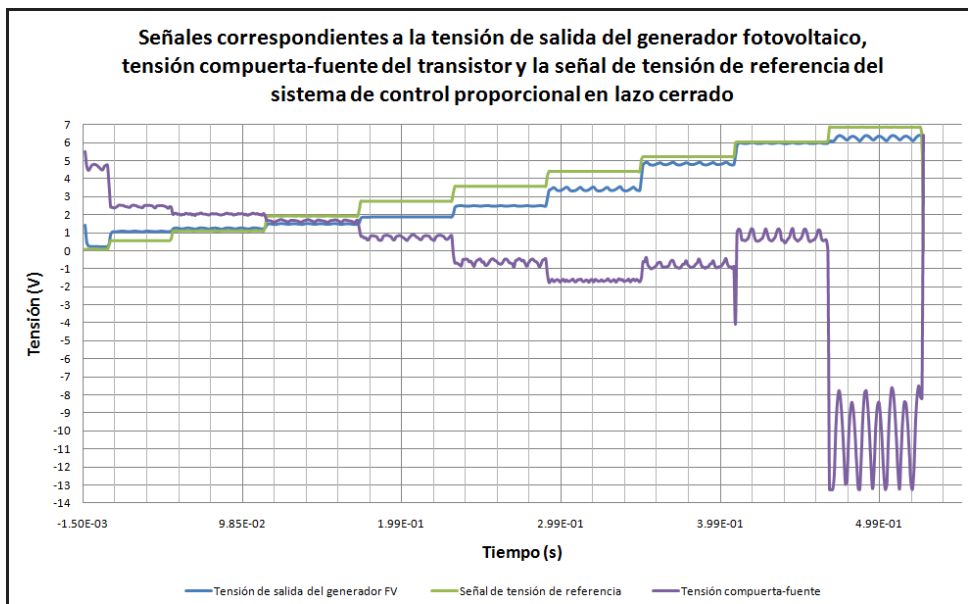


Figura 6.13: Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional

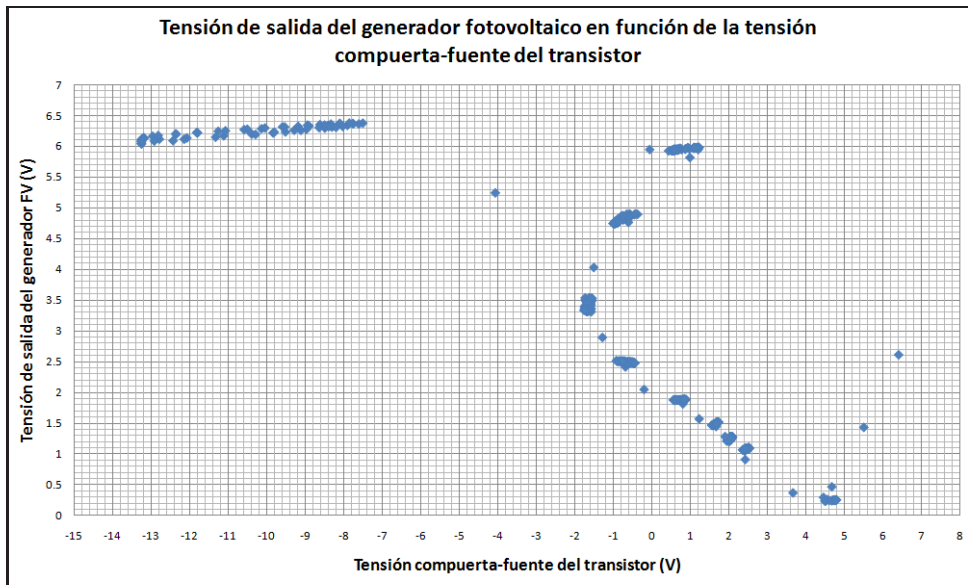


Figura 6.14: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

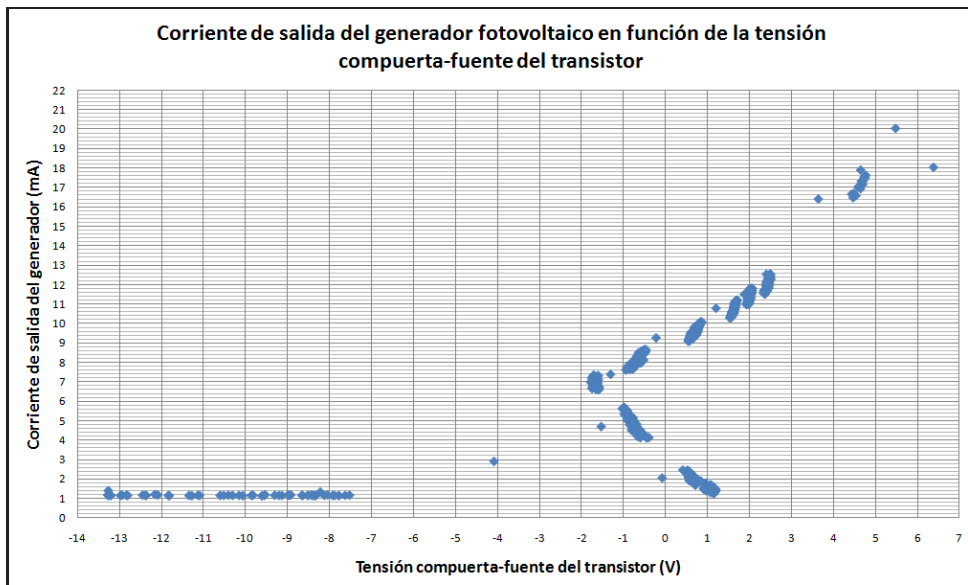


Figura 6.15: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

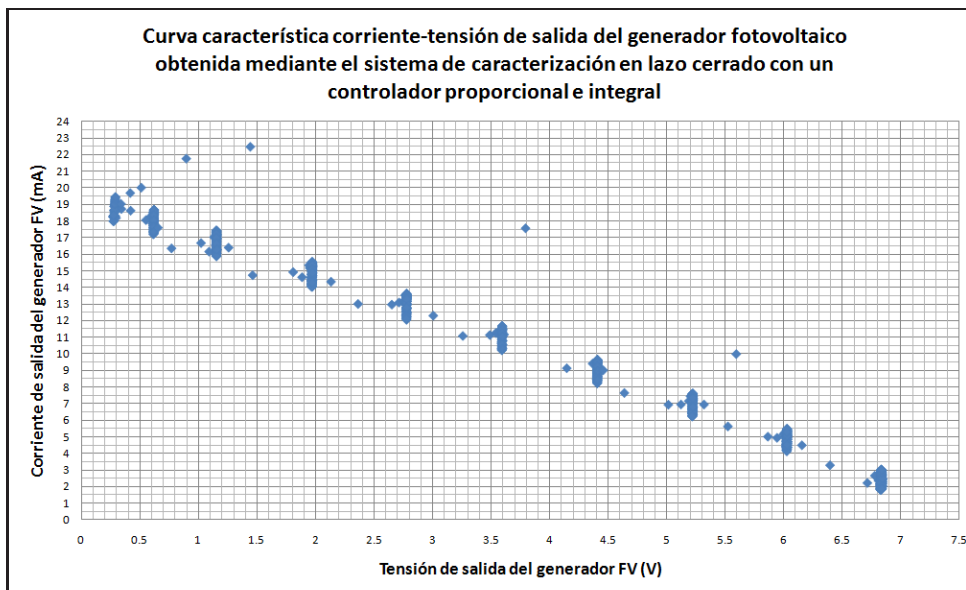


Figura 6.16: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional

### 6.1.3. Comportamiento del sistema de caracterización de un generador fotovoltaico utilizando un sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

Al aplicar la señal de tensión escalonada, con escalones de 0.31V cada 20ms, como tensión de referencia al sistema de la Fig. 5.12, se obtuvo el comportamiento de la tensión de salida del generador y de la tensión  $v_{GS}$  mostrado en la Fig. 6.17.

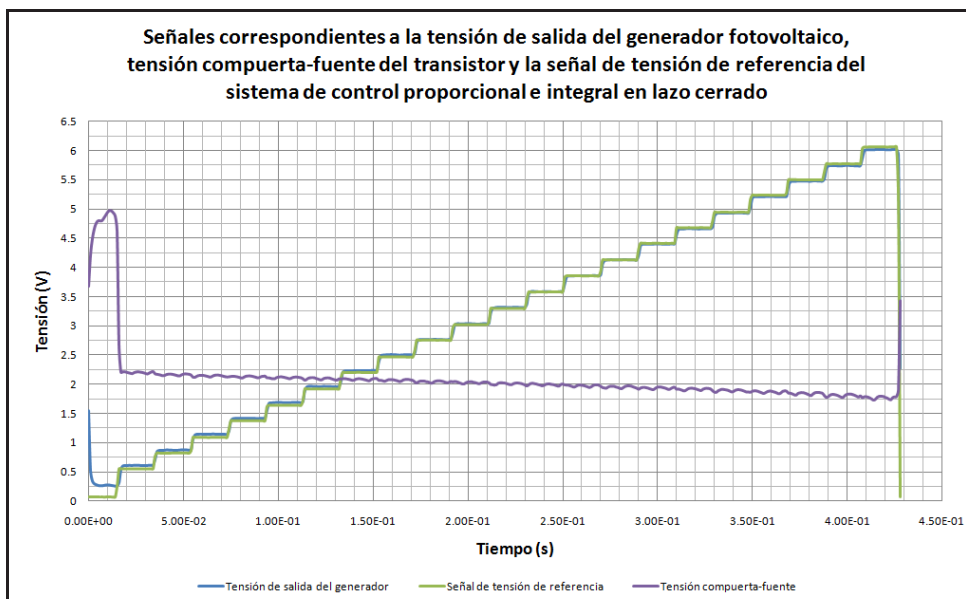


Figura 6.17: Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

La Fig. 6.18 muestra el tiempo que tarda la tensión de salida del generador fotovoltaico ante un cambio de tensión en la señal de tensión de referencia.

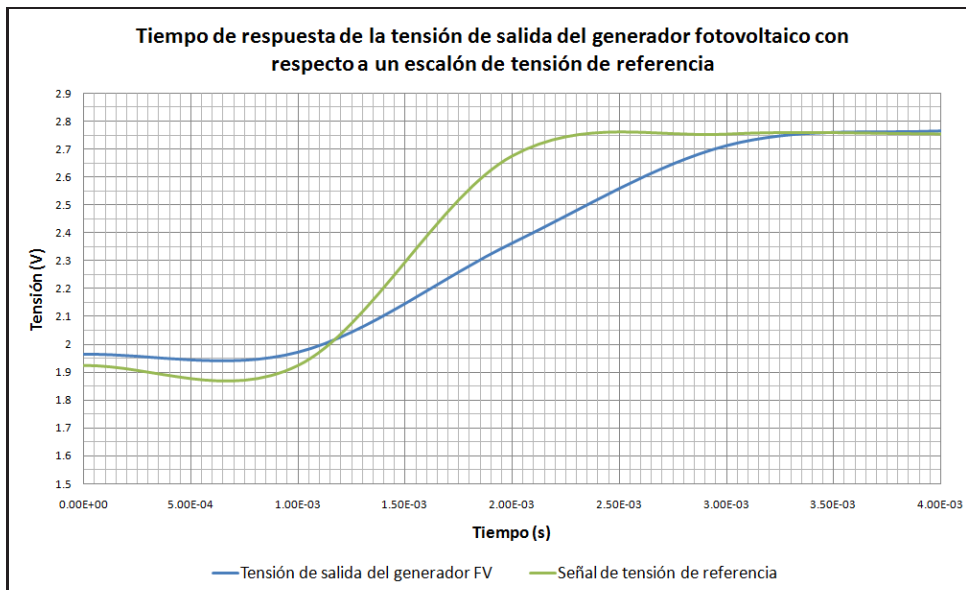


Figura 6.18: Tiempo de respuesta del controlador proporcional e integral ante un escalón de tensión

Las Figs. 6.19 y 6.20 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ .

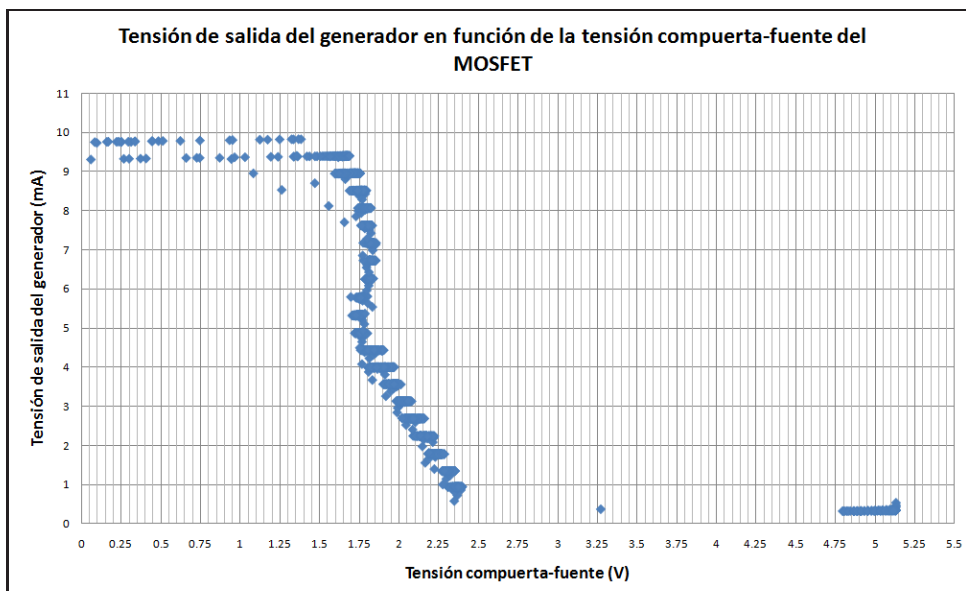


Figura 6.19: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

La Fig. 6.21, muestra la curva característica  $i-v$  obtenida a partir de los valores de tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con el sistema de caracterización en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral.

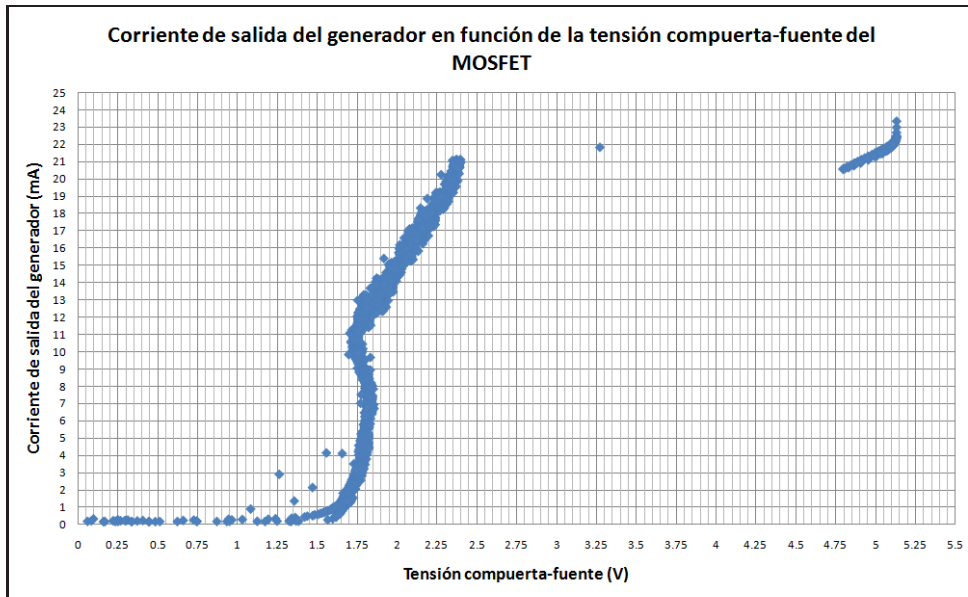


Figura 6.20: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

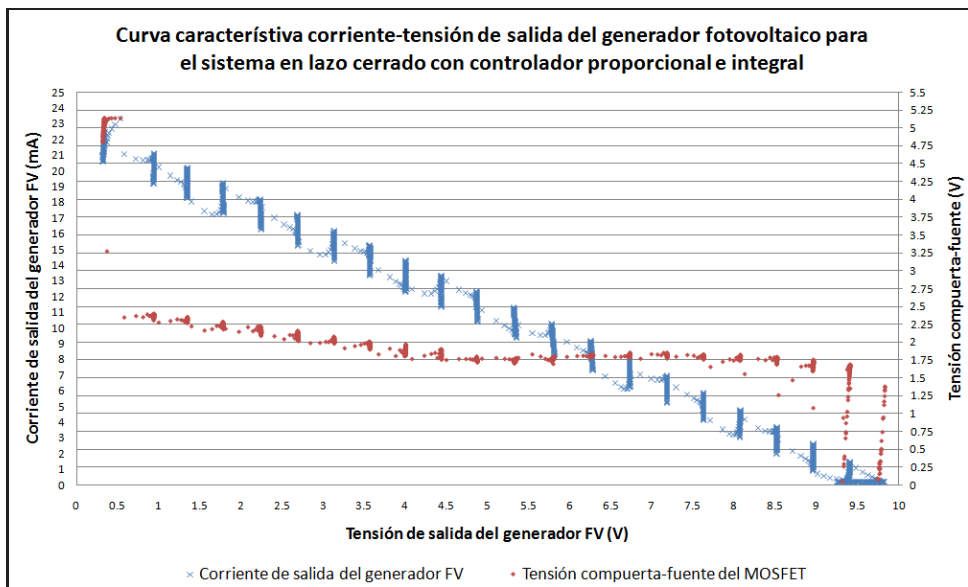


Figura 6.21: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral



Variando la amplitud de los escalones de la señal de tensión de referencia anterior a un valor aproximado de 0.93V y ampliando su periodo a 60ms, y usándola como tensión de referencia en el sistema de la Fig. 5.12, se obtuvo el comportamiento de la tensión de salida del generador, así como de la tensión  $v_{GS}$  mostrado en la Fig. 6.22.

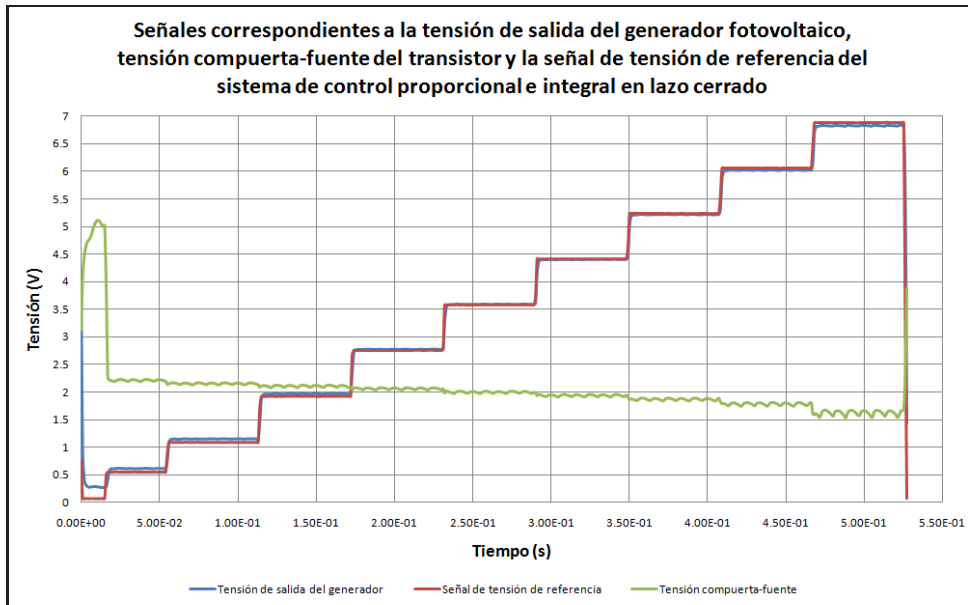


Figura 6.22: Señales correspondientes a la tensión de salida del generador fotovoltaico, la señal de tensión de referencia y la tensión compuerta-fuente del transistor con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

Las Figs. 6.23 y 6.24 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ .

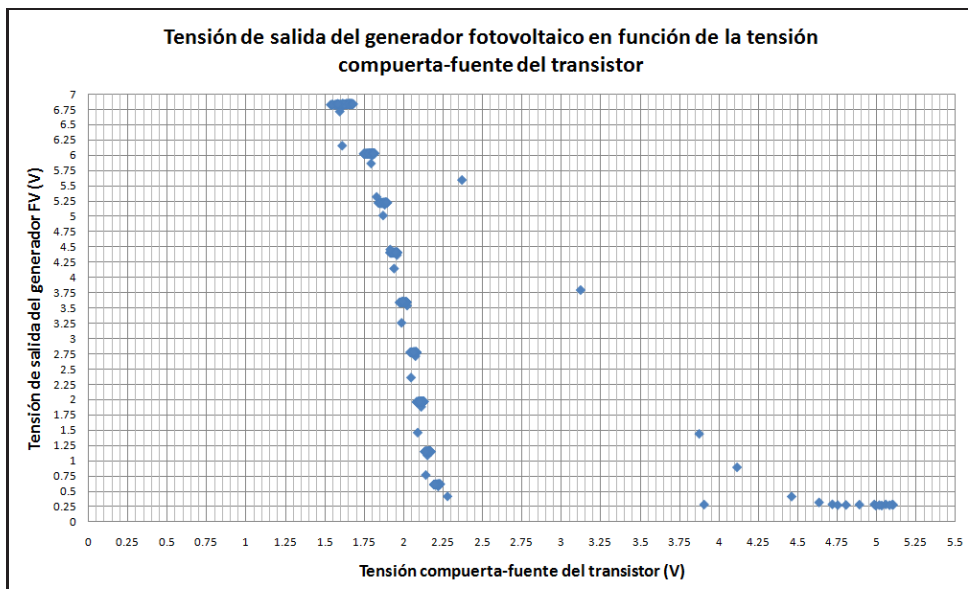


Figura 6.23: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

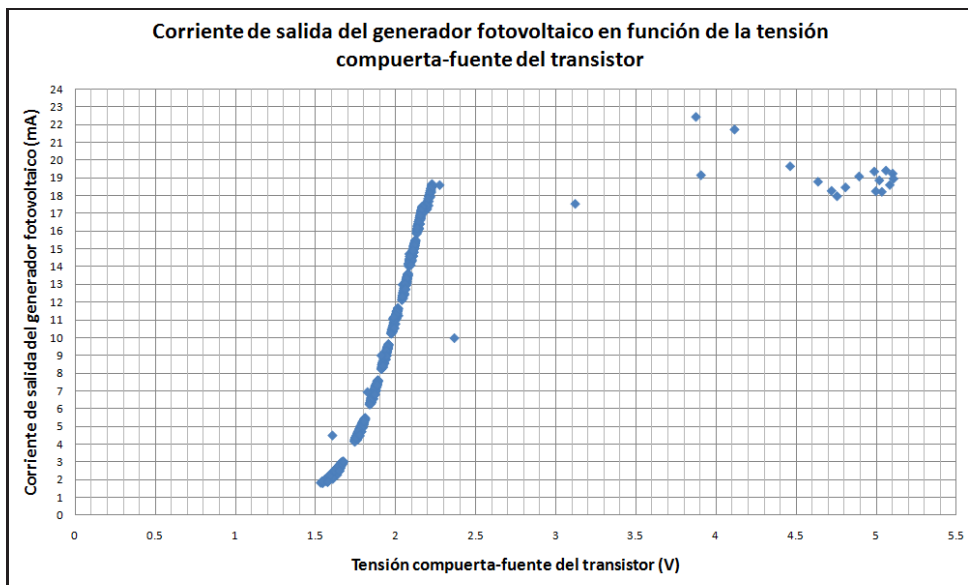


Figura 6.24: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente

La Fig. 6.25, muestra la curva característica  $i-v$  obtenida a partir de los valores de tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con el sistema de caracterización en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral.

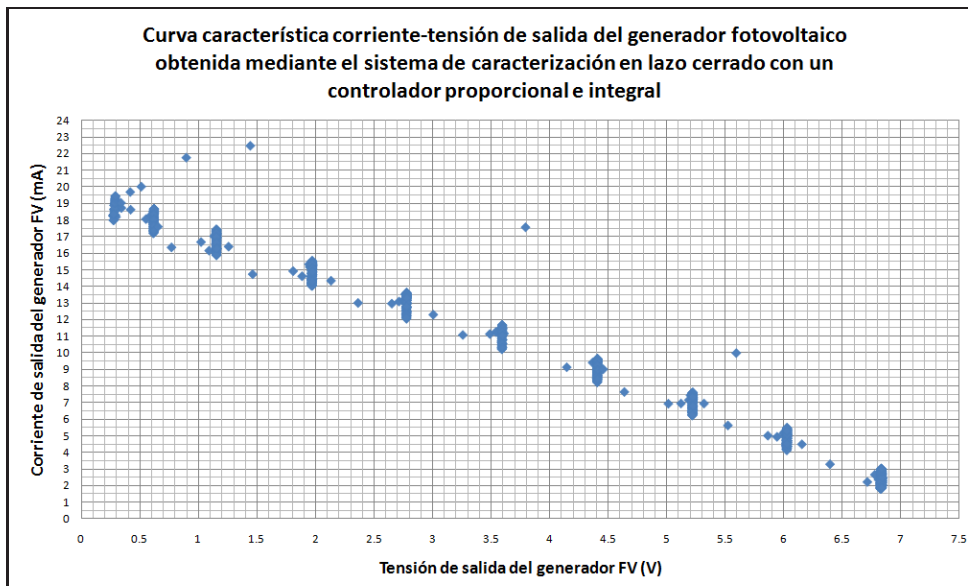


Figura 6.25: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral

Al utilizar una señal de tensión de referencia triangular en el circuito de medición de la Fig. 5.12, se obtuvo el comportamiento descrito por la Fig. 6.26.

El comportamiento de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico ante la señal de tensión de referencia triangular se muestra en las Figs. 6.27 y 6.28 respectivamente.

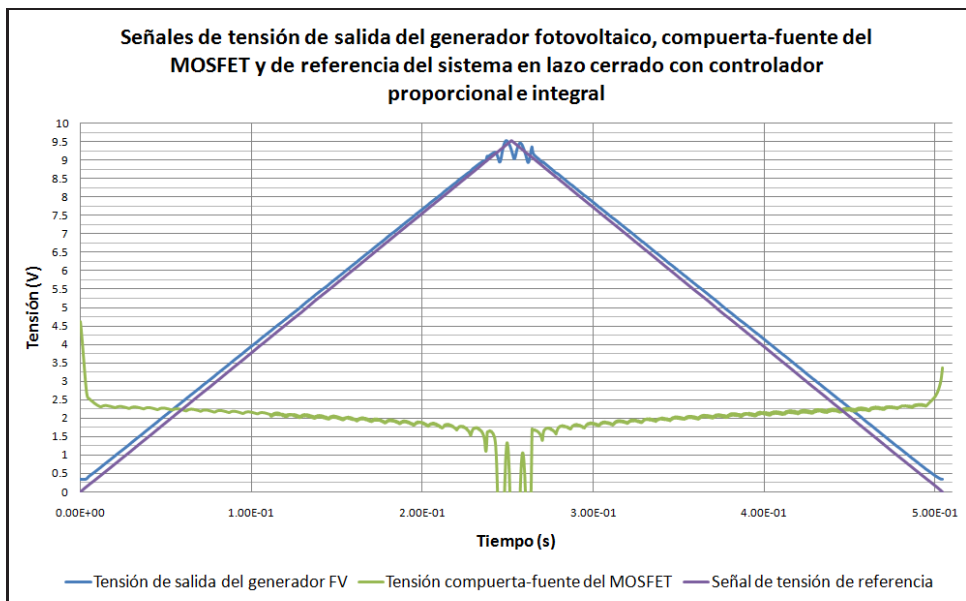


Figura 6.26: Señales de tensión correspondientes a la utilización de una señal triangular de tensión en el circuito mostrado en la Fig. 5.12

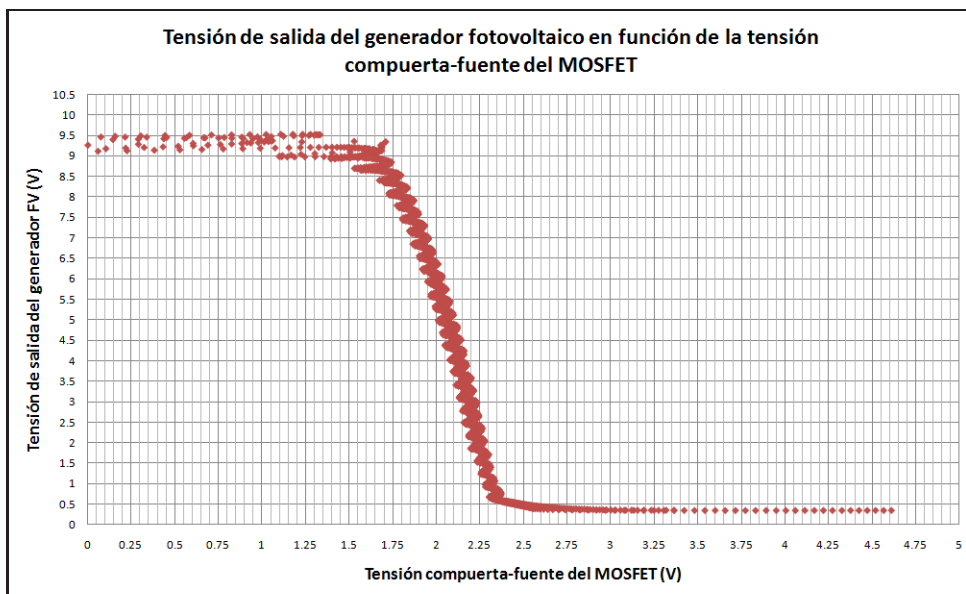


Figura 6.27: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del MOSFET

En la Fig. 6.29 se muestra la curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico utilizando el sistema en lazo cerrado con un control proporcional e integral utilizando como señal de tensión de referencia, una señal triangular. Al cambiar el transistor del circuito mostrado en la Fig. 5.12 por el modelo NTE2957, y utilizando una señal de tensión triangular de referencia, se obtuvo el comportamiento de la tensión de salida del generador, así como de  $v_{DS}$  mostrado en la Fig. 6.30

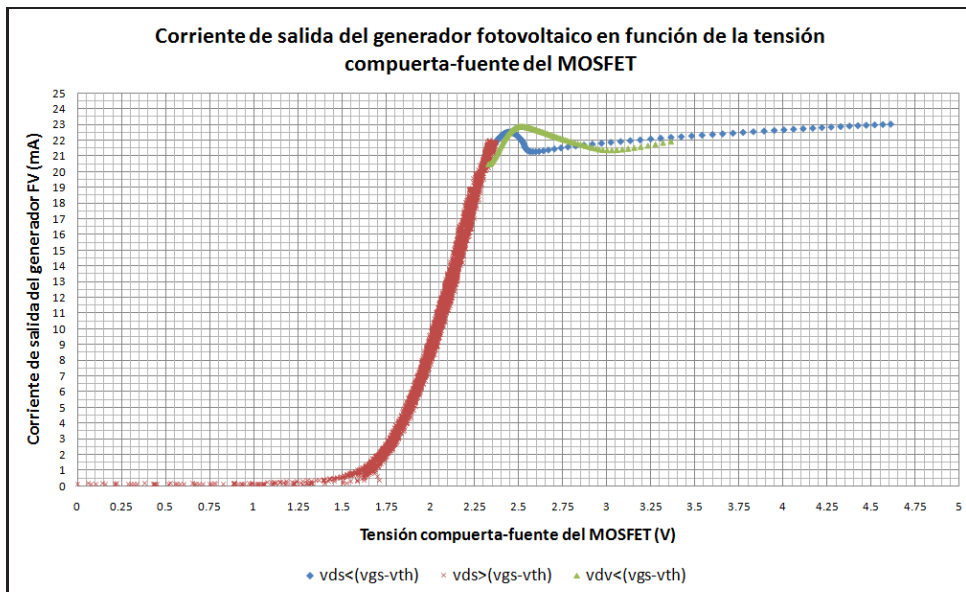


Figura 6.28: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del MOSFET

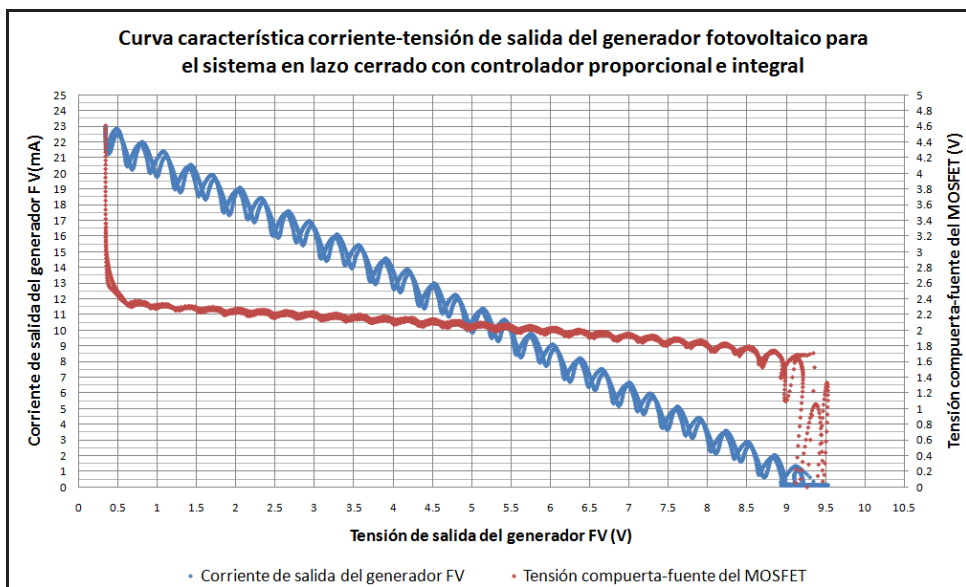


Figura 6.29: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado de la Fig. 5.12 con una señal de tensión de referencia triangular

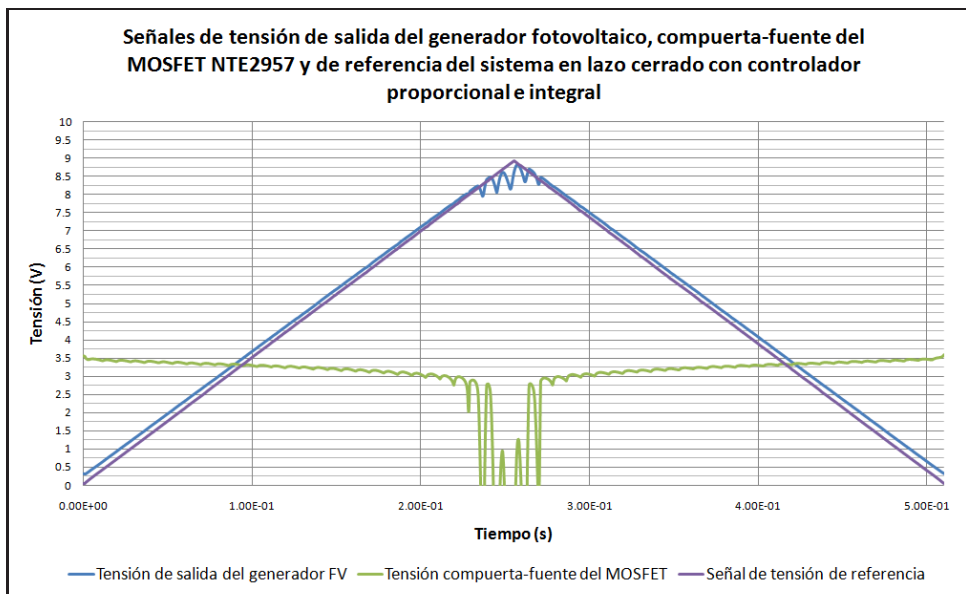


Figura 6.30: Señales de tensión correspondientes a la señal de tensión de referencia y la tensión del generador fotovoltaico para el sistema mostrado en la Fig. 5.12, con el transistor NTE2957

Las Figs. 6.31 y 6.32 muestran la respuesta de la tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con respecto a la variación de la tensión  $v_{GS}$ .

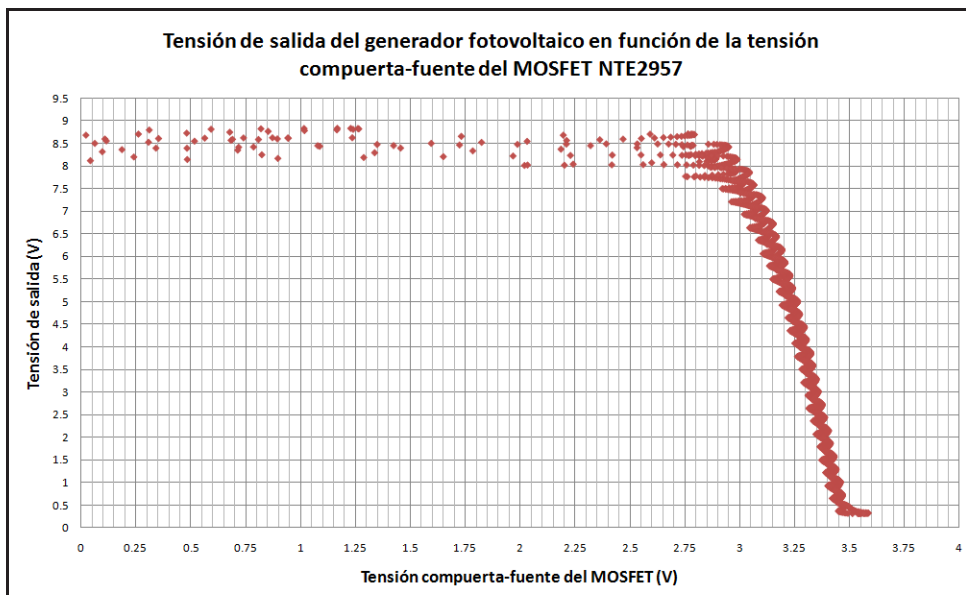


Figura 6.31: Tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957

La Fig. 6.33, muestra la curva característica  $i-v$  obtenida a partir de los valores de tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico con el sistema de caracterización en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral.

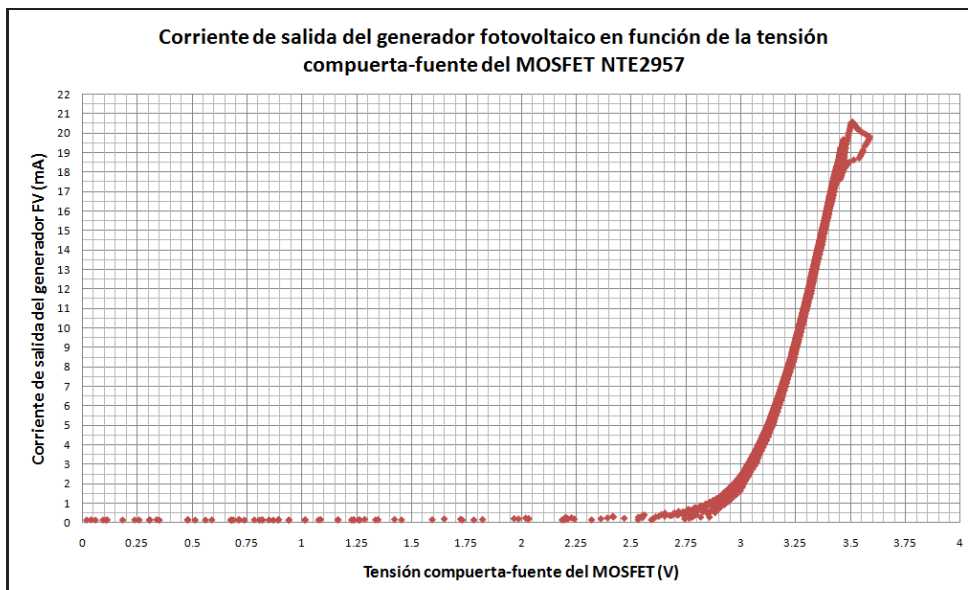


Figura 6.32: Corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957

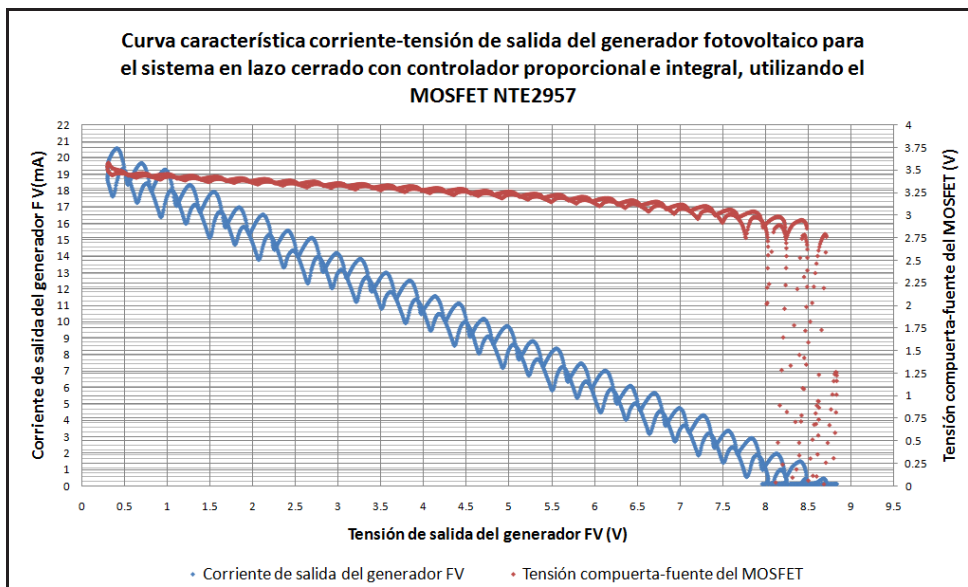


Figura 6.33: Curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico con el sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral utilizando el transistor NTE2957

#### 6.1.4. Comportamiento experimental del transistor NTE492 utilizado como carga electrónica

El comportamiento experimental del transistor NTE492 se muestra a través de las curvas  $i_D - v_{DS}$  y  $i_D - v_{GS}$  y la caracterización del dispositivo semiconductor se efectuó mediante el dispositivo *Keithley 2636A System Sourcemeter*. Este dispositivo suple la función tanto como de fuente como aparato de medición de gran precisión al mismo tiempo. A su vez, existe una interfaz gráfica que permite la programación de la forma que se desea realizar la prueba de caracterización.

La curva mostrada en la Fig 6.34, se caracterizó con un barrido de tensión entre las compuertas drenador y fuente variable, desde 0 hasta 10V, y además con variaciones de la tensión compuerta-fuente de 1.5V a 2.85V, en pasos de 0.15V. La curva de la Fig. 6.35, establece las mismas condiciones mencionadas anteriormente, pero el barrido de tensión  $v_{GS}$  es de 1.5V a 2.4V

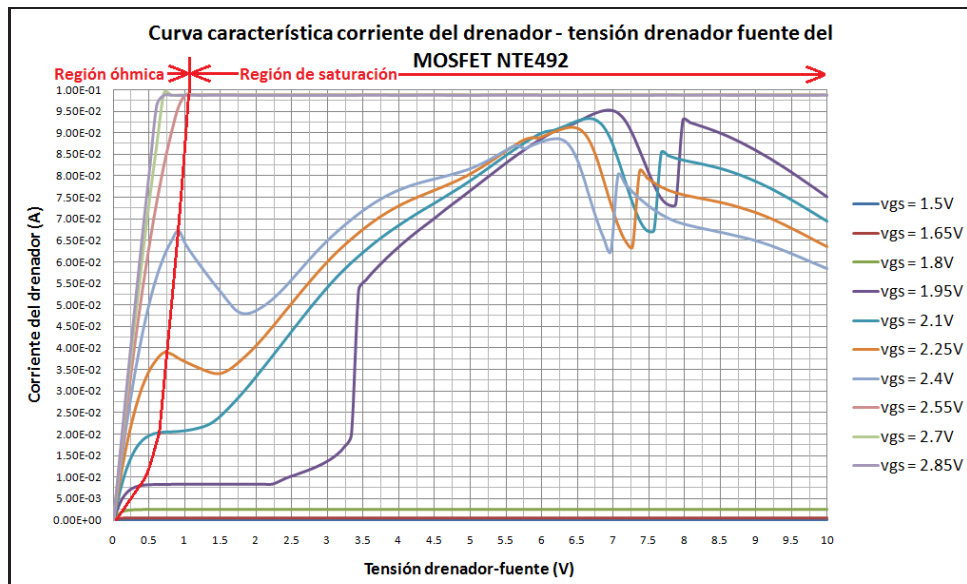


Figura 6.34: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE492, con un barrido de tensión compuerta-fuente de 1.5V a 2.85V

Por otra parte, la curva de la Fig. 6.36, se realizó con un barrido de tensión en la terminales compuerta-fuente desde 0V hasta 3V, con una tensión de polarización en las terminales drenador-fuente de 1V.

Para las curvas mostradas en la Fig. 6.37 y 6.38, se ajustó con una tensión del drenador variable de 4V a 10V, y se varió la tensión compuerta-fuente de 1V a 2V y de 1.7V a 2.45V, respectivamente.

#### 6.1.5. Comportamiento experimental del transistor NTE2957 utilizado como carga electrónica

La curva característica  $i_{DS} - v_{DS}$  obtenida se muestra en la Fig. 6.39. En esta se hizo un barrido de la tensión  $v_{GS}$  desde 3V hasta 3.9V, y variando  $v_{DS}$  de 0V a 10V.

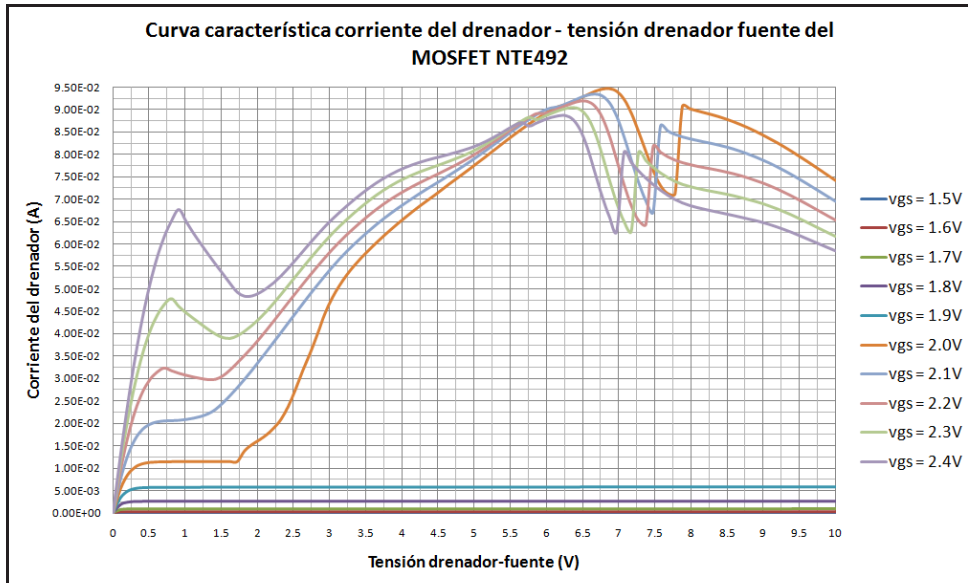


Figura 6.35: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE492, con un barrido de tensión compuerta-fuente de 1.5V a 2.4V

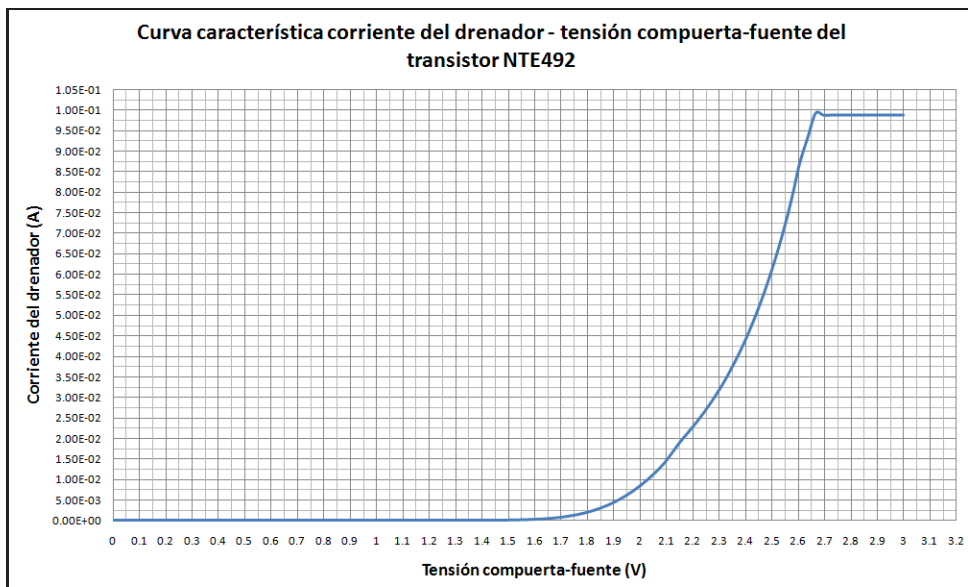


Figura 6.36: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE492



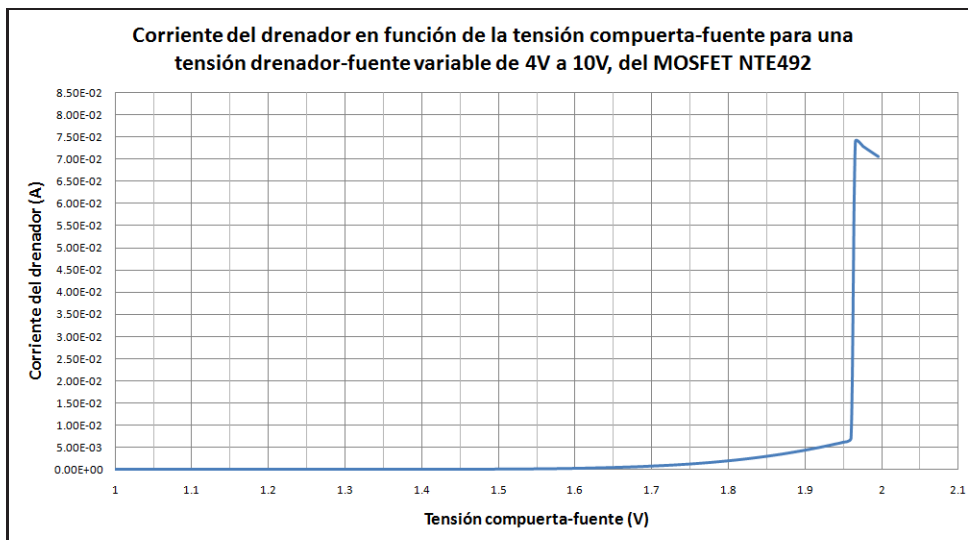


Figura 6.37: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1V a 2V del transistor NTE492

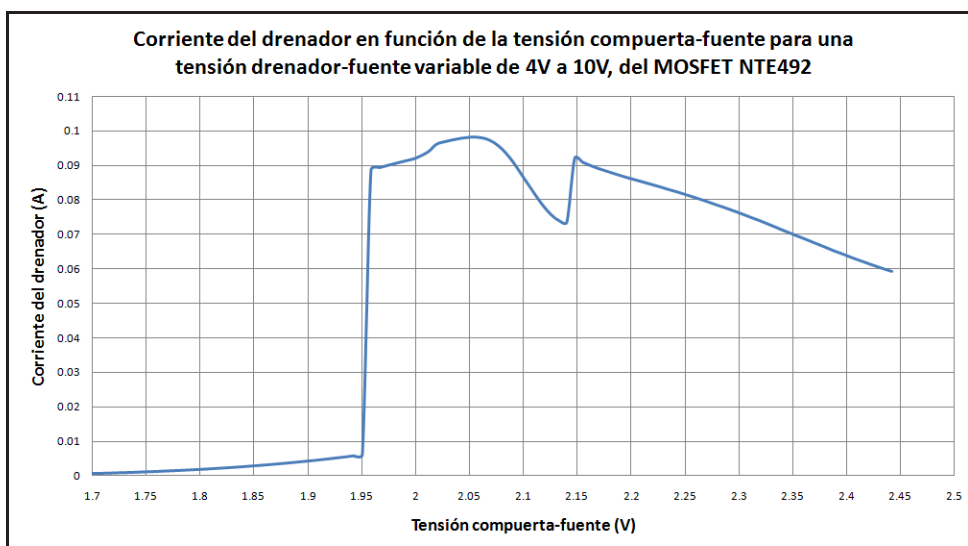


Figura 6.38: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1.7V a 2.45V del transistor NTE492

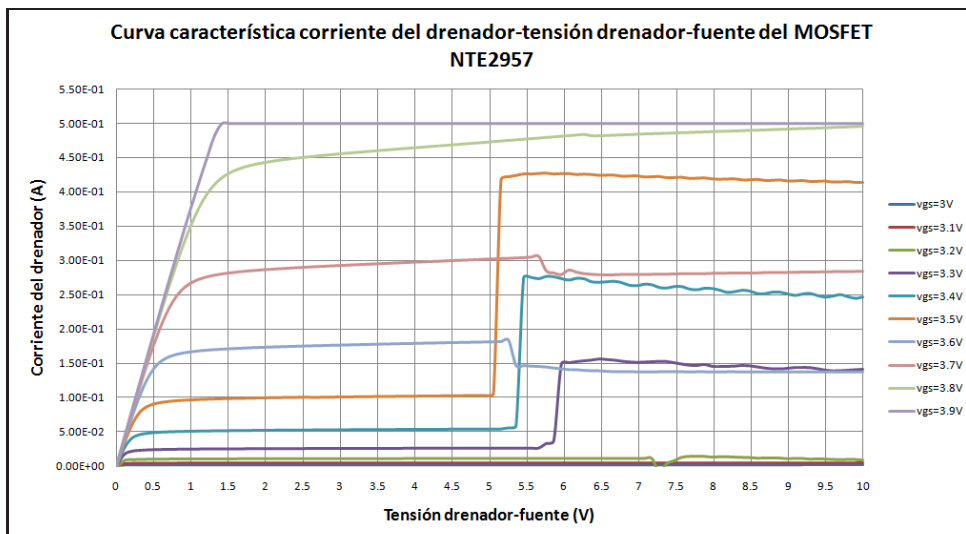


Figura 6.39: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión drenador-fuente del transistor NTE2957

La curva característica  $i_{DS} - i_{GS}$  obtenida se muestra en la Fig. 6.40. Para la medición se mantuvo fijada la tensión  $v_{DS}$  en 1V, y se realizó un barrido de  $v_{GS}$  desde 0V hasta 5V. Para las curvas mostradas en la Fig. 6.41 y 6.42, se ajustó con una tensión del drenador variable de 4V a 10V, y se varió la tensión compuerta-fuente de 1V a 3.1 y de 3V a 3.3V, respectivamente.

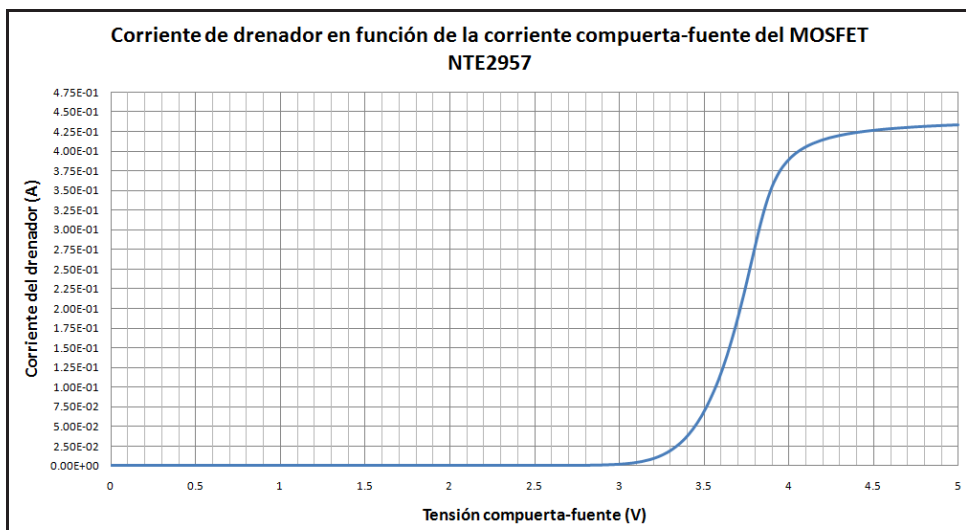


Figura 6.40: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente del transistor NTE2957

Experimentalmente, al caracterizar el MOSFET NTE2957 a través de la curva mostrada en la Fig. 6.43, se realizó una prueba congelando el encapsulado del transistor con aire comprimido a una temperatura aproximadamente de  $-30^{\circ}\text{C}$ . Se notó un cambio en la forma de la curva característica  $i_D - v_{DS}$  de la Fig. 6.39.

La Fig. 6.44 muestra la curva característica  $i_D - v_{GS}$  del transistor NTE2957 para

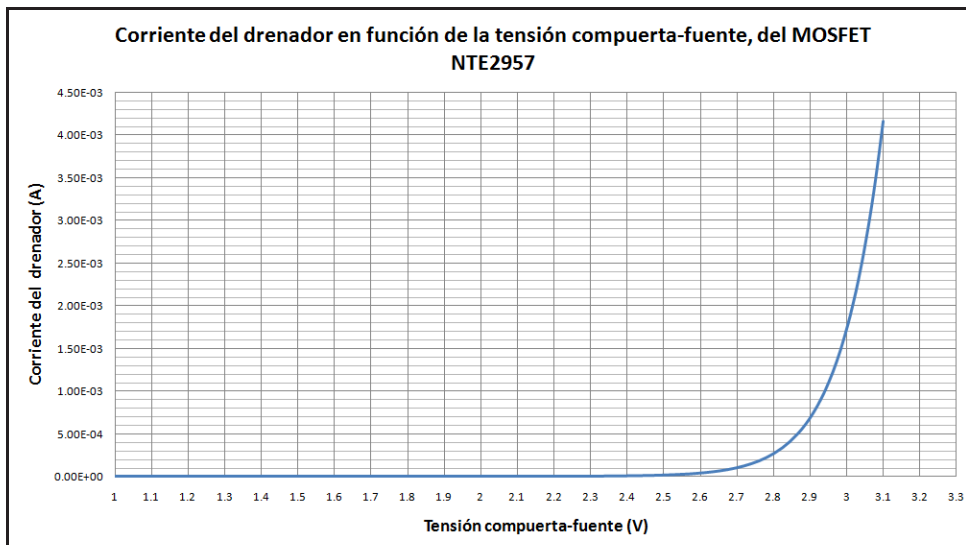


Figura 6.41: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 1V a 3.1V del transistor NTE2957

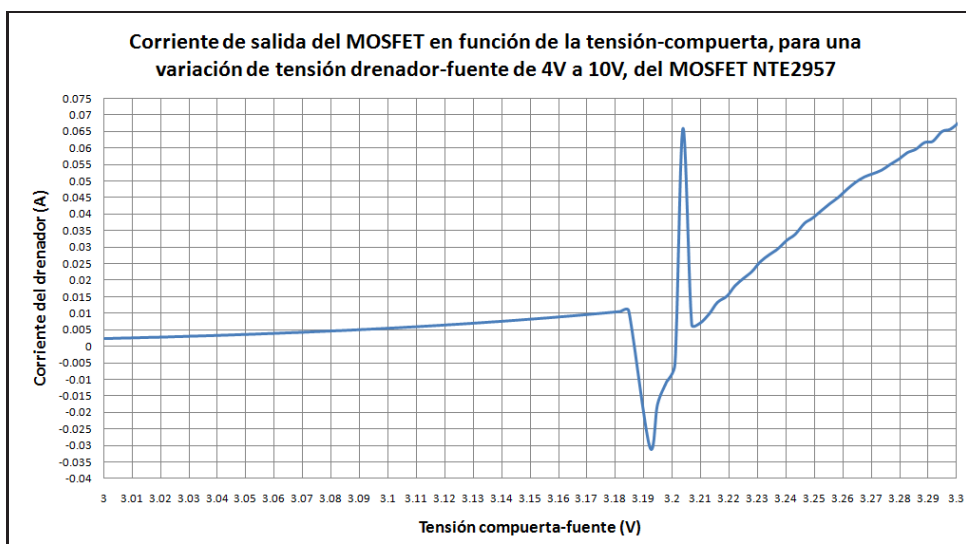


Figura 6.42: Curva experimental correspondiente a la corriente del drenador en función de la tensión compuerta-fuente en un rango de 3V a 3.3V del transistor NTE2957

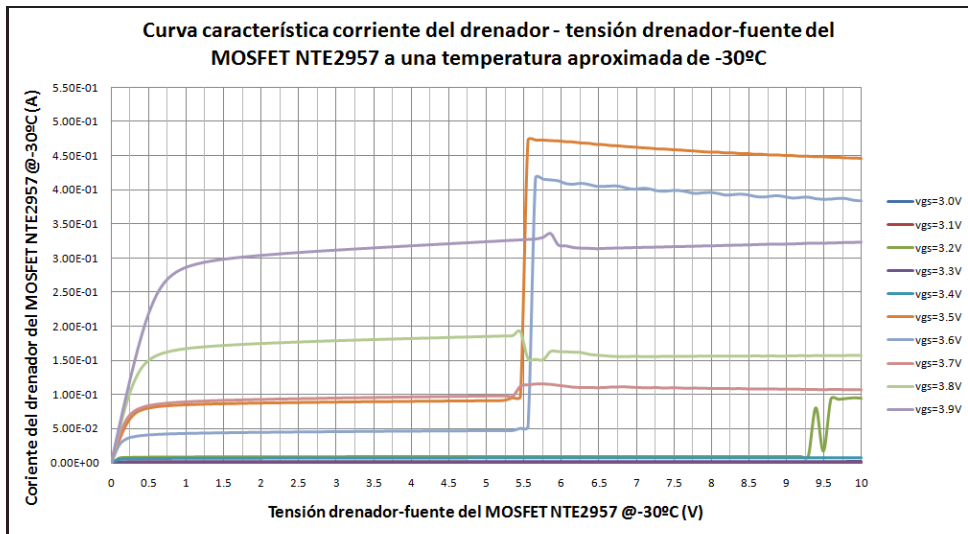


Figura 6.43: Curva característica  $i_D - v_{DS}$  del MOSFET NTE2957 a una temperatura aproximada de  $-30^\circ\text{C}$

diferentes temperaturas.

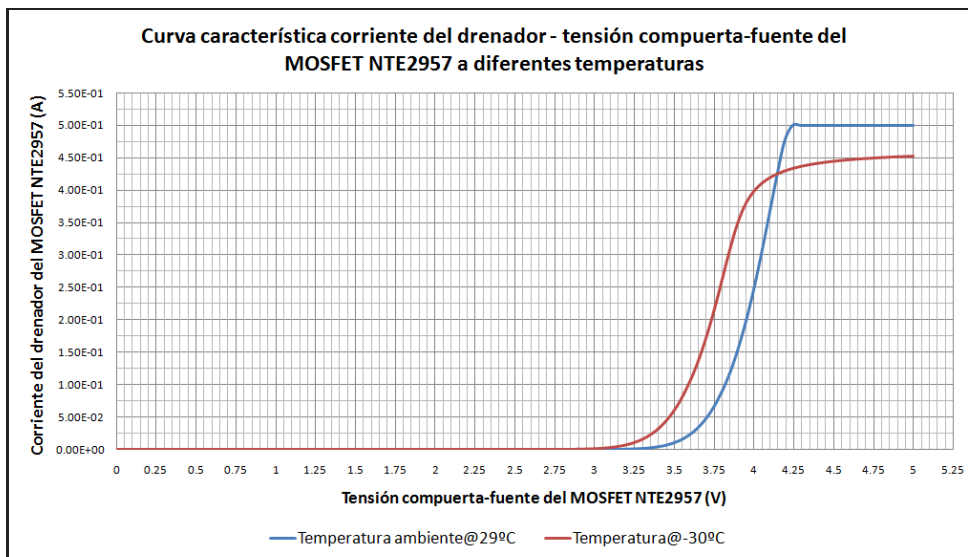


Figura 6.44: Curvas características  $i_D - v_{GS}$  del MOSFET NTE2957 a una temperatura de ambiente de  $29^\circ\text{C}$  y a  $-30^\circ\text{C}$

### 6.1.6. Curvas características $p-v$ en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral

La Fig. 6.45 muestra el comportamiento de la corriente y tensión de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión  $v_{GS}$ .

Las curvas características  $p-v$  para el sistema en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral se muestran en la Fig. 6.46.

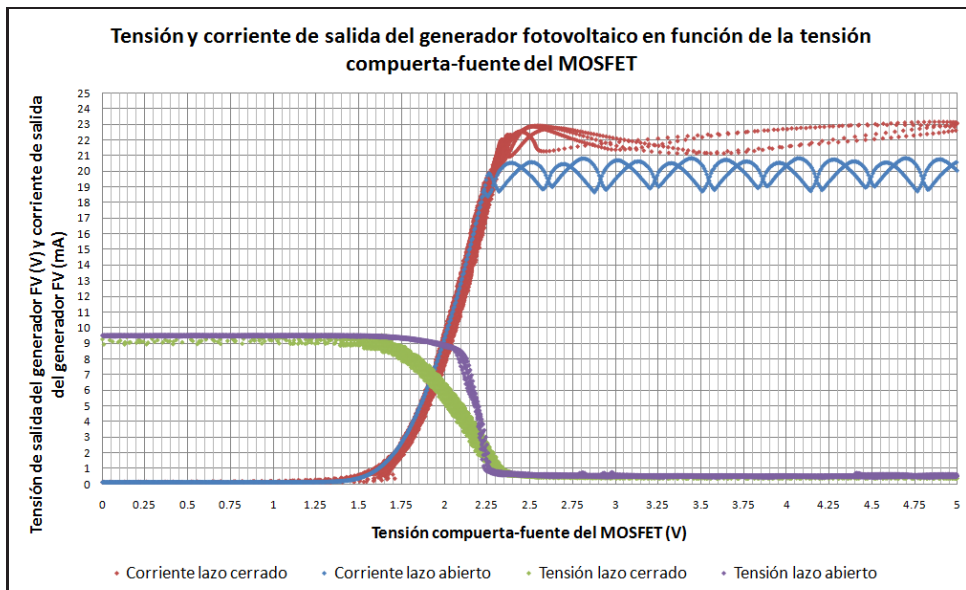


Figura 6.45: Tensión y corriente de salida del generador fotovoltaico en función de la tensión  $v_{GS}$  para el sistema en lazo abierto y lazo cerrado con controlador PI

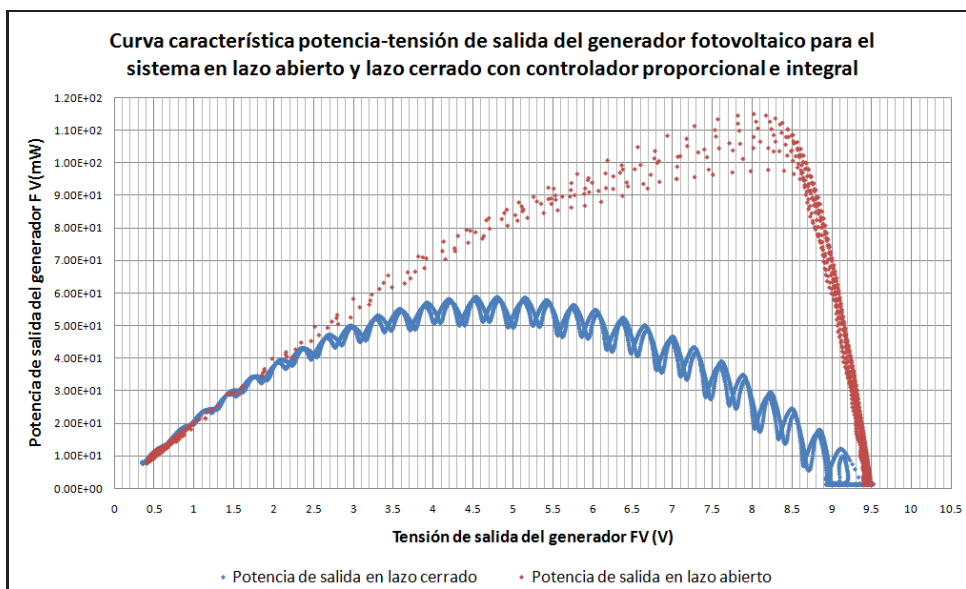


Figura 6.46: Curvas características  $p_{PV} - v_{PV}$  del sistema en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral

## 6.2. Análisis

### 6.2.1. Controlador del sistema de control

El sistema de caracterización al operar en lazo abierto, la transición de una tensión máxima a una tensión mínima ocurre en una pequeña región de la señal perteneciente a  $v_{GS}$ . Al variar la tensión de forma abrupta, la corriente de salida del generador también lo hace. Esta región de transición se ubica de  $1,7V < v_{GS} < 2,5V$ , acorde a las Figs. 6.1, 6.2 y 6.3. Esto también ocurre al utilizar la señal de tensión triangular de la Fig. 6.5, donde las Figs. 6.6 y 6.7, efectivamente tienen la misma región de operación de  $v_{GS}$  para realizar la transición para ubicar diferentes puntos de operación a lo largo de la curva  $i-v$ .

En el caso de utilizar un controlador proporcional, no se efectúa una acción correctiva para disminuir la señal de error como se muestra en las Figs. 6.9 y 6.13. Inclusive el control de la tensión  $v_{GS}$  hace que la respuesta de salida del generador fotovoltaico difiera de la señal de tensión de referencia. El control de la corriente mostrado en las Figs. 6.11 y 6.15, y el control de la tensión de salida del generador mostrado en las Figs. 6.10 y 6.14, no permiten ubicar los puntos de operación de la curva característica  $i-v$  de forma correcta.

Por otra parte, el controlador proporcional e integral, posee un seguimiento de la señal de tensión de referencia como se muestra en las Figs. 6.17, 6.22, 6.26 y 6.30, esta última medición se realizó inclusive con otro modelo de transistor.

En la Fig. 6.47 se muestra una simulación de la respuesta del controlador de la Fig. 5.12, ante una señal tipo escalón de 5V y en la misma se observa un tiempo de levantamiento de la señal de 5.3565ms. Las ganancias de la simulación son  $K_I = 3$ , con el polo ubicado en  $s = 33,33$  y  $K_P = 5$ .

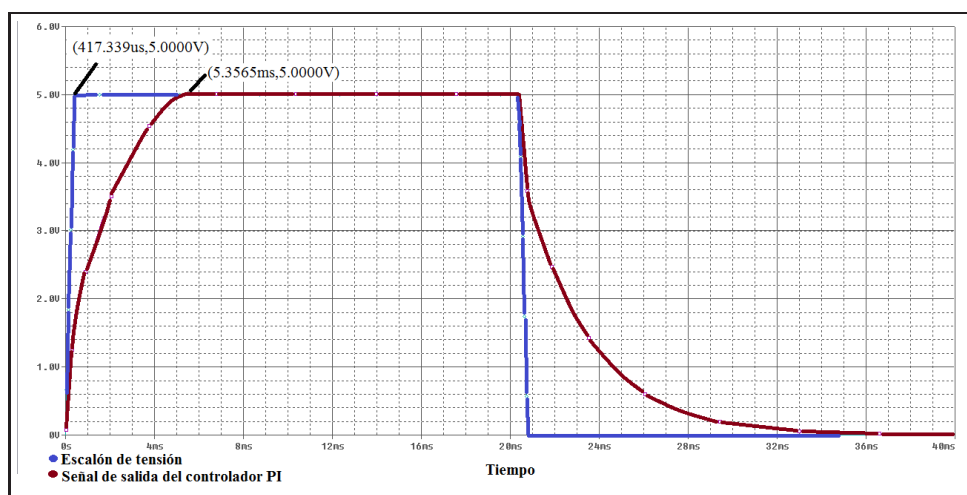


Figura 6.47: Respuesta ante un escalón de 5V del controlador proporcional e integral con la configuración mostrada en la Fig. 6.18

La Fig. 6.18 muestra el tiempo de respuesta experimental que tarda el controlador en hacer que exista una señal de error igual a cero. Ahora bien esta señal de error consiste en la diferencia entre la señal de tensión de salida del generador fotovoltaico y una señal de referencia. El tiempo que tardó experimentalmente el sistema de control en alcanzar la condición mencionada anteriormente es cercana a 3.35ms, y comparando

el tiempo de respuesta teórico, mostrado en la simulación de la Fig. 6.47, es un 33% más rápido debido a que las ganancias en el circuito implementado se ajustaron de forma que el tiempo de respuesta fuese menor.

Un tiempo de respuesta corto hace que la tensión de salida del generador fotovoltaico sea controlada de acuerdo a una tensión de salida de referencia. Aquí la importancia recae en la forma de la señal de referencia, debido a que esta es la que permite hacer un barrido de los diferentes puntos de operación de la curva característica del generador fotovoltaico.

La señal de error disminuye de forma rápida debido a la acción integradora del controlador proporcional e integral. La dinámica de error utilizada mostrada en (5.24), permite establecer las ganancias necesarias para llegar a un punto de la curva característica en determinado tiempo. La pendiente de la curva define el valor de estas ganancias, donde se posee un máximo de pendiente cerca de la tensión máxima de salida del generador y una pendiente mínima cercana a la máxima corriente del generador.

Cabe destacar que el ajuste de las ganancias  $K_P$  y  $K_I$  en el circuito implementado en la Fig. 5.12, se logró hacer por medio de la variación de ganancia de los amplificadores  $U1D$  y  $U1A$ , respectivamente. Conforme se aumenta la ganancia del controlador integral, y se mueve el polo más hacia la izquierda, se obtiene una respuesta más rápida, pero eventualmente hace el sistema inestable.

En general el control de la tensión de salida del generador permite una variación desde un máximo, hasta un mínimo cuando  $1,75 < v_{GS} < 2,5V$ , utilizando el transistor NTE492. En las Figs. 6.19, 6.20, 6.27 y 6.28, se puede observar la variación de la corriente y tensión de salida del generador fotovoltaico en función de  $v_{GS}$ .

En la Fig. 6.28 se observa que el transistor en su mayor parte se ubica operando en la región de saturación, cuando  $v_{DS} > v_{GS} - v_{TH}$ , y es por tanto que en esta región existe a nivel teórico, un control de la corriente de salida del generador en función de la tensión  $v_{GS}$  de forma lineal. Sin embargo, al observar la Fig. 5.8, para que el transistor se encuentre operando en la región lineal se debe cumplir que  $v_{GS} \geq v_{Sat,mín}$ . La Fig. 6.36 muestra que  $v_{Sat,mín} \approx 2,5V$  para el transistor NTE492. Por otra parte para el transistor NTE2957, la Fig. 6.40 muestra una tensión  $v_{Sat,mín} \approx 3,7V$ .

Resulta necesario para el análisis de los sistemas de caracterización tanto en lazo abierto, como para lazo cerrado, que el transistor se encuentre operando en la región de lineal donde la aproximación de (5.7) es válida. Ahora bien, debido a que la corriente de salida del generador fotovoltaico se encuentra en un rango de 0-20mA y de acuerdo a la curva característica  $i_D - v_{DS}$  de la Fig. 6.34, el transistor no se encuentra operando en la región lineal estipulada en la Fig. 5.8, y de esta forma, el control de la corriente no es lineal con respecto a la tensión  $v_{GS}$ .

De esta forma, no se puede contrastar el análisis teórico de los sistemas de caracterización con la experimentación. Esto debido a las limitaciones existentes del control de la corriente con la tensión  $v_{GS}$  por parte de los transistores utilizados. Para ambos transistores no se cumple con la condición donde  $v_{GS} \geq v_{Sat,mín}$  y los sistemas de caracterización se encuentran operando en la región donde el control de la corriente no es lineal como se muestra en (5.6) y en la Fig. 5.8.

Las Figs. 6.23 y 6.24 muestran una transición de máximos y mínimos en la región cercana a  $v_{TH}$  del transistor NTE492. Se utilizó una señal de tensión de referencia con escalones de mayor amplitud y como consecuencia de esto se observan pocos puntos de operación en las regiones de transición de corriente y de tensión de salida del generador, afectando así la forma de la curva característica  $i-v$  del generador.

Las Figs. 6.8 y 6.29 muestra las curvas características  $i-v$  obtenidas al utilizar una señal de tensión de referencia triangular, para el sistema en lazo abierto y del sistema en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral. Se puede observar que la curva en lazo abierto posee una parte exponencial al aproximarse a la tensión de salida máxima del generador, esto es, la tensión  $v_{OC}$ . Sin embargo, el sistema con un controlador proporcional e integral no toma en cuenta esta sección exponencial, pero si toma en cuenta el valor máximo de salida de tensión que puede suplir el generador. Esto se debe principalmente a que el transistor se encuentra en una región de operación que no permite controlar correctamente la corriente de salida del generador fotovoltaico.

Las curvas características  $i-v$  del sistema en lazo cerrado con controlador proporcional, se muestran en las Figs. 6.12, 6.16 y las curvas obtenidas mediante el control proporcional e integral con una señal de tensión de referencia escalonada se muestra en las Figs. 6.21, 6.25 y 6.29. Existe similitud en el comportamiento de las curvas, sin embargo, el control de la corriente del drenador y de la tensión de salida es diferente para cada tipo de controlador. Ahora bien, la señal de tensión de referencia hace que la corriente pase de un máximo a un mínimo, al igual que la tensión. Este comportamiento ocurre en caso de los dos controladores, y es por tanto que la curva característica posee una forma similar para los dos controladores.

Al observar las curvas características  $i-v$  con señales triangulares de las Figs. 6.29 y 6.33, se percibe un alto grado de similitud, aún utilizando transistores de diferente modelo. Inclusive el comportamiento de la tensión  $v_{GS}$  con respecto a la tensión de salida del generador posee cierta similitud, la diferencia radica principalmente en la región donde hace la transición, donde para el transistor NTE492, el rango de tensión varía de 1.7V a 2.5V y para el transistor NTE2957 varía de 2.9V a 3.3V aproximadamente.

### 6.2.2. Sistema de control de la carga electrónica

El sistema de control de la carga electrónica en lazo abierto, estipula una variación de la tensión entre las compuertas compuerta y fuente de acuerdo a una señal de referencia de forma directa. La Fig. 6.34 muestra que para el control de la corriente de forma aproximadamente lineal, debe cumplirse que  $v_{DS} > 0,75$ , para que así, el transistor NTE492 se encuentre operando en la región de saturación, como se observa en la Fig. 5.8. La tensión  $v_{DS}$  resulta ser la suma de la tensión de salida del generador fotovoltaico junto con una caída de tensión en la resistencia de medición de la corriente de salida del generador.

Cuando la tensión del generador fotovoltaico es máxima, implica una corriente de salida mínima y viceversa. Cuando existe una corriente máxima, la mayor caída de tensión en la resistencia  $R_{IPV}$  en el circuito de medición de la Fig. 5.10, 5.11 y 5.12, es de aproximadamente 200mV, haciendo que el transistor se encuentre en la región de óhmica y no exista una relación lineal de control de la corriente del drenador. Es debido a esta caída de tensión, que en las Fig. 6.8 y 6.29, la curva característica  $i-v$  no alcanza cruzar el eje vertical.

Al observar la Fig. 6.4, la curva característica  $i-v$  posee un máximo de tensión de salida del generador fotovoltaico de cercana a 9.5V, y una corriente máxima de 20mA. Con valores de tensión de salida menores a este máximo, y especialmente en la parte exponencial de esta curva cercana al máximo punto de operación cuando la tensión del panel es 8.5V, la tensión  $v_{GS}$  cambia relativamente poco, aproximadamente de 1.7V a 2.4V, sin embargo hace variar la tensión del generador de un máximo a un mínimo. En esta transición de tensión de salida del generador, el cambio de corriente es desde un



mínimo hasta el máximo que entrega el generador.

En la Fig. 6.29 se muestra que la curva característica  $i-v$  no posee un comportamiento no lineal identificable. La tensión de salida del generador fotovoltaico ahora no cambia de forma abrupta debido a que el sistema de control fuerza la tensión de salida a seguir una señal de referencia. Cuando la tensión de salida del generador disminuye hasta llegar al punto de máxima potencia cerca de 8.5V, la tensión  $v_{GS}$  varía dentro de un rango debajo de la tensión umbral. Al seguir disminuyendo la tensión de salida del generador hasta su mínimo, la tensión  $v_{GS}$  varía dentro de un rango de 1.5V a 2.5V, y la corriente de salida del generador varía desde un mínimo hasta un máximo cercano a los 20mA.

Al observar la Fig. 6.45, el cambio de la corriente respecto a la tensión  $v_{GS}$  es prácticamente el mismo para el caso que el sistema esté en lazo abierto y lazo cerrado con controlador proporcional e integral. Sin embargo, la tensión de salida del generador varía de forma distinta. En lazo abierto, la tensión del generador varía de 8.5V a 0V de forma abrupta, una vez que se supera los 2V en  $v_{GS}$ . En lazo cerrado, el cambio de tensión se efectúa de forma aproximadamente lineal a partir que  $v_{GS}$  supera 1.7V y hasta llegar a 2.25V.

El comportamiento descrito anteriormente afecta la obtención de curvas características  $i-v$  del generador fotovoltaico, como se observa en las Figs. 6.21, 6.25, 6.29 y 6.33. Esto afecta también la obtención de curvas características  $p-v$  como se muestra en la Fig. 6.46, donde en lazo abierto hay un pico de potencia cerca de 120mW y en lazo cerrado, el pico alcanza la mitad de ese valor.

En la curva característica  $i_D - v_{DS}$  mostrada en la Fig. 6.35, se puede observar que al variar la tensión  $v_{GS}$  desde de 1.5V a 2.5V, la corriente del drenador no varía de forma lineal luego de que  $v_{GS}$  supera los 2V, inclusive, existen puntos de operación que están fuera del rango máximo de corriente que puede suplir el generador fotovoltaico.

Esto se ve reflejado en la curva característica  $i-v$  de la Fig. 6.29, donde la variación de la corriente de salida del generador, en la transición de  $v_{GS}$  al disminuir la tensión de salida desde un máximo hasta un mínimo, está fuera de un rango funcional del transistor como regulador de la corriente del drenador. De esta forma, se omiten los puntos de operación cercanos a la parte exponencial de la curva característica  $i-v$ .

Cabe destacar que el cambio de transistor no afectó la forma de la curva característica  $i-v$  obtenida con el sistema en lazo cerrado con controlador proporcional e integral debido a la limitación de la corriente de salida del generador fotovoltaico. La Fig. 6.33 muestra que la transición de tensión de salida del generador de un máximo a un mínimo ocurre cuando  $2,75V < v_{GS} < 3,7V$ . Al observar la Fig. 6.39, existe un control de la corriente del drenador de forma aproximadamente lineal en la región de saturación cuando  $v_{GS} < 3,2V$ , pero al superar esta tensión, y principalmente al llegar a 3.3V, el control de la corriente está fuera del rango de la corriente de salida del generador al tener valores de  $v_{DS}$  mayores a 5V.

Al observar la Fig. 6.37, se puede establecer una región donde el control de la corriente del drenador para el transistor NTE492 es lineal en el caso de estar operando en la región de saturación, y esto ocurre cuando  $1V < v_{GS} < 1,95V$ . La Fig. 6.38, muestra el caso contrario, donde el control de la corriente del drenador cuando  $v_{GS} > 1,95V$  no es lineal y es irregular. Es en esta última región que se hace la transición de máximos y mínimos de la tensión y corriente de salida del generador, y por ello la curva característica de la Fig. 6.29, no toma en cuenta distintos puntos de operación, y en especial aquellos cercanos al punto de máxima operación.

El fenómeno mencionado anteriormente ocurre también para el transistor NTE2957, el cual posee un control lineal de la corriente en la región de saturación cuando  $1V < v_{GS} < 3,18V$ , y una región donde no existe el control de forma lineal cuando  $v_{GS} > 3,18V$ , mostrado así en las Figs. 6.41 y 6.42. Este transistor posee una tensión umbral cercana a los 3.1V como se observa en la Fig. 6.40. La curva característica  $i-v$  observada en la Fig. 6.33, posee un cambio de tensión de salida del generador de un máximo a un mínimo cuando  $2,57 < v_{GS} < 3,6$ , lo cual compete a la región donde no se posee un control lineal de la corriente del drenador, acorde a la Fig. 6.42.

### 6.2.3. Operación del MOSFET en la región de saturación

Las Figs. 6.39 y 6.43 muestran las curvas características  $i_D - v_{DS}$  del MOSFET NTE2957, a una temperatura ambiente de 29°C y a -30°C respectivamente. Las curvas cuando poseen una tensión  $v_{GS} = 3,3V$  y 3,4V son distintas a diferentes temperaturas. Cuando el dispositivo se encuentra a temperatura ambiente existe un comportamiento inestable de la corriente del drenador, sin embargo, al enfriarse el dispositivo, la corriente se estabiliza en un valor cercano a 0mA.

Sin embargo, para valores mayores existe inestabilidad en ambos dispositivos. Al llegar a una tensión  $v_{GS} = 3,7V$  el comportamiento tiende a ser más estable independientemente de la temperatura.

Las curvas mostradas en la Fig. 6.44, muestran el cambio de la tensión umbral de  $v_{TH} = 3,3V$  para una temperatura ambiente a  $v_{TH} = 3,0V$  para una temperatura de -30°C. Además, cuando la temperatura es de 29°C, la corriente de saturación se alcanza más rápidamente.

Al utilizar un MOSFET operando en la región de saturación o lineal, éste se somete a un estrés térmico alto debido a la continua corriente que pasa por el drenador y a la tensión drenador-fuente que debe soportar el dispositivo.

Cuando el estrés termo-eléctrico supera un límite crítico, ocurren "puntos calientes" en el silicio, que hacen que el dispositivo falle. Para prevenir esto, los MOSFET requieren una alta capacidad de disipación de potencia y una extensa Área de Operación Segura de Polarización (FBSOA, por sus siglas en inglés).

El término "segunda caída" para los MOSFET, se refiere a la reducción repentina de la capacidad de bloquear tensiones seguido de una falta de control de la corriente por parte del dispositivo. Esta condición destructiva, puede ocurrir como resultado de los puntos calientes en el silicio o la concentración de corriente en una pequeña región, lo cual es causado por la activación de los BJT (Transistor de Juntura Bipolar) parásitos del MOSFET.

Normalmente, cuando la corriente intenta concentrarse en un área, el incremento de la temperatura en un punto aumenta la resistencia debido al coeficiente de temperatura positivo, y esto hace que la corriente se redistribuya de forma tal, que la corriente se aleje del punto caliente.

Teóricamente la temperatura de la juntura es constante y esencialmente uniforme en todo el dado de silicio del MOSFET. Esta asunción no es siempre válida. En primer instancia, existen imperfecciones del material (problemas de conexiones con el dado de silicio, cavidades térmicas, etc.) que hacen que exista un decrecimiento de la capacidad de disipación térmica, y esto hace regiones más calientes que otras.

Luego, existen fluctuaciones en la concentración de material dopado, así como el grosor de la capa compuerta-óxido. Estos son los causantes de variaciones de la tensión umbral y de la ganancia de corriente, las cuales afectan la temperatura del dado de

silicio.

Las variaciones de temperatura normalmente no producen daño en el transistor cuando realiza operaciones de conmutación. Sin embargo, estas fluctuaciones pueden producir fallas catastróficas en la operación en el modo lineal, cuando la duración de los pulsos es mayor que el tiempo requerido para realizar la transferencia de calor de la juntura al encapsulado o disipador de potencia.

La inestabilidad electro-térmica puede entenderse como un resultado de un mecanismo de retroalimentación positiva que fuerza al MOSFET a operar en la región lineal. Esto fenómeno hace que la tensión umbral sea menor, y esto causa un aumento en la densidad de corriente, aumentando así la temperatura en la juntura.

Dependiendo de la duración del pulso al que se someta al transistor, de las capacidades de transferencia de calor y del diseño de las celdas del MOSFET, la inestabilidad electro-térmica hace que exista la formación de puntos calientes. Estos puntos causan que existan áreas de las celdas del MOSFET que pierdan el control de la compuerta, y activan los BJT parásitos con la consecuente destrucción del dispositivo.



## Capítulo 7

# Conclusiones y recomendaciones

### 7.0.4. Conclusiones

- La dinámica de error utilizada en el sistema de control en lazo cerrado con un controlador proporcional e integral permite hacer la diferencia entre la tensión de salida del generador fotovoltaico y una señal de tensión de referencia, aproximadamente cero en menos de 10ms.
- El controlador proporcional e integral permite tener un seguimiento de la tensión de salida del generador fotovoltaico con respecto a una señal de tensión variable en el tiempo, esto se cumple mientras la amplitud de la señal de referencia no supere la tensión  $V_{OC}$ .
- Utilizando un transistor MOSFET como carga electrónica, permite hacer la transición de un máximo a un mínimo de tensión y de corriente de salida de un generador fotovoltaico, evaluando así distintos puntos de operación a lo largo de la curva característica  $i-v$ .
- Resulta necesario que el MOSFET se encuentre operando en la región de saturación donde el control de la corriente es lineal con respecto a una variación de tensión, permitiendo así el funcionamiento correcto de los sistemas de caracterización.
- Los transistores NTE492 y NTE2957, utilizados para realizar la caracterización en lazo cerrado, no pueden cumplir su función como controlador de corriente a partir de la tensión compuerta-fuente al operar en la región de saturación, cuando la corriente de salida del generador es menor a 20mA.
- Los transistores NTE492 y NTE2957 presentan un comportamiento irregular en la región de saturación, al operar en la cercanía de la tensión umbral, lo cual imposibilita el control lineal de la corriente del drenador por medio de la tensión compuerta-fuente.
- La corriente y tensión de salida del generador fotovoltaico determinan los valores máximos que debe soportar el transistor utilizado como carga electrónica. Sin embargo, es de suma importancia que el transistor permita un control de la corriente del drenador de forma lineal para corrientes de salida del generador menores al valor máximo.

- Con el sistema de caracterización en lazo cerrado no se puede establecer una relación unívoca característica entre la corriente y la tensión del generador fotovoltaico debido principalmente al comportamiento del MOSFET en la región de saturación cuando existen corrientes en el drenador menores a 20mA.
- La curva característica  $i-v$  del generador fotovoltaico obtuvo mejores resultados con el sistema de caracterización en lazo abierto, ya que contempla los puntos de máxima potencia del generador, así como la parte exponencial en las cercanías del punto de máxima potencia y los valores de corriente,  $I_{SC}$  y de tensión,  $V_{OC}$ .

#### 7.0.5. Recomendaciones

- Los MOSFET modelo 2SK669 y 2SK544 de Sanyo, presentan mejores características eléctricas para la caracterización del generador fotovoltaico utilizado en este proyecto. Esto debido principalmente a el control de la corriente del drenador a partir de la tensión compuerta-fuente al operar en la región de saturación.
- La señal que provee el control de la tensión de salida del generador fotovoltaico en el sistema en lazo cerrado, se puede implementar por medio un circuito integrado de bajo costo, como el MAX038, el cual es un oscilador de señales senoidales y triangulares de frecuencia ajustable.
- Se deben contemplar las pérdidas que existan en el circuito de medición, ya que esto afecta las curvas características del generador fotovoltaico, principalmente en los puntos de máxima tensión y corriente.
- Se deben estipular las condiciones de prueba a la hora de caracterizar un generador fotovoltaico, donde la temperatura y la radiación lumínica son quienes principalmente afectan la forma de la curva característica  $i-v$ .

# Bibliografía

- [1] Ioannou, P.A. and J.Sun, *Theory and Design of Robust Direct and Indirect Adaptive Control Scheme*, Int. Journal of Control (1988), Vol.47, No.3, pp.775–813.
- [2] Kuo Benjamin C., *Sistemas de Control Automático – Séptima Edición*, Prentice–Hall Hispanoamericana, (1996), pp. 671–695.
- [3] Yingying Kuai, S. Yuvarajan. *An electronic load for testing photovoltaic panels*, Electrical and Computer Engineering Department, Journal of Power Sources 154 (2006) 308–313, North Dakota State University, USA, 2005.
- [4] Dimosthenis Peftitsis, Georgios Adamidis and Anastasios Balouktsis. *An investigation of new control method for MPPT in PV array using DC–DC buck–boost converter*, Electrical and Computer Engineering Department, Informatics and Communications Department, USA, 2008.
- [5] Corless RM, Gonnet G.H., Hare D.E.G., Jerey D.J. and Knuth D.E. *On the Lambert W Function*, Department of Applied Mathematics, University of Western Ontario, London Canada, Institut fur Wissenschaftliches Rechnen, ETH Zurich, Switzerland, Symbolic Computation Group, University of Waterloo, Waterloo Canada, Department of Computer Science, Stanford California, USA, 1993.
- [6] Flores T. Antonio, *Antonio Linealización de Funciones No Lineales*, Agosto 5 2006, disponible en <http://kaos.dci.uia.mx/aflores>
- [7] Leite Vicente and Chenlo Faustino, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), An Improved Electronic Circuit for Tracing the I V Characteristics of Photovoltaic Modules and Strings*, Granada, España, 23th to 25th March, 2010.
- [8] Eikelboom, J.A. and Reinders A.H.M.E., *Determination of the irradiation dependent efficiency of multicrystalline Si PV modules on basis of IV curve fitting and its influence on the annual performance*, Netherlands Energy Research Foundation, ECN y University of Utrecht, Dept. of Science, Technology and Society, Holanda, respectivamente.
- [9] Skočill Tomáš, Pérez Donsión Manuel, *Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Array*, Department of Electric Power Engineering and Ecology Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia, Pilsen, Department of Electrical Engineering, Faculty of Industrial Engineering, University of Vigo, Vigo, Campus of Lagoas Marcosende, respectivamente
- [10] Sattar Abdus, Tsukanov Vladimir, *MOSFETs Withstand Stress of Linear–Mode Operation*, Santa Clara, Calif. April 2007.

- [11] Luecke Jerry, *Analog and Digital Circuits for Electronic Control System Applications*, Elsevier Inc, Burlington, MA, EEUU, 2005.
- [12] Árpád Rácz\*, István A. Szabó\*, Lajos Harasztosi\*, Sándor Kökényesi\*\*, *Developing a solar panel testing system*,\*Department of Solid State Physics Institute of Physics, University of Debrecen, Faculty of Science and Technology.\*\*Department of Experimental Physics Institute of Physics, University of Debrecen, Faculty of Science and Technology.
- [13] García Sánchez, Francisco J. Ortiz-Conde, Adelmo Malobabic, Slavica, *Aplicaciones de la función de Lambert en Electrónica*, Universidad, ciencia y tecnología, Volumen 10, Número 40, Septiembre 2006.
- [14] NTE Electronics Inc. *NTE492 MOSFET, N-Ch, Enhancement Mode High Speed Switch Datasheet*.
- [15] NTE Electronics Inc. *NTE2957 MOSFET, N-Ch, Enhancement Mode High Speed Switch Datasheet*.
- [16] Chapman Ken, *D/A Converter Control for Spartan-3E Starter Kit*, Xilinx Ltd. Febrero 2006.
- [17] Xilinx Ltd, *Spartan-3E FPGA Starter Kit Board User Guide*, Junio 2008.