UNIDAD DE FUENTE Y MEDIDA (SMU), BASADA EN EL ANALOG DISCOVERY 2, PARA LA ESTIMACIÓN SEMIAUTOMÁTICA DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE DIODOS Y TRANSISTORES

KEVIN MONCADA MORA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2025

UNIDAD DE FUENTE Y MEDIDA (SMU), BASADA EN EL ANALOG DISCOVERY 2, PARA LA ESTIMACIÓN SEMIAUTOMÁTICA DE CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE DIODOS Y TRANSISTORES

KEVIN MONCADA MORA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTORES:
ANDRÉS DAVID RESTREPO GIRÓN, PH.D.
SANDRA ESPERANZA NOPE RODRÍGUEZ, PH.D.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2025

AGRADECIMIENTOS

Con mucho cariño, quiero agradecer a la Universidad del Valle, mi alma mater, por abrirme las puertas a la ingeniería. Gracias a esta institución, crecí como profesional y formé habilidades que hoy definen mi forma de pensar y actuar: el enfoque hacia la ciencia, el impulso por innovar y la importancia de construir en equipo.

De manera especial, a los profesores Andrés David Restrepo Girón y Sandra Esperanza Nope Rodríguez, mis directores de tesis, gracias por acompañarme en este proceso. Su paciencia, orientación y confianza fueron clave para que este proyecto tomara forma, y su apoyo dejó una huella que me ayudó a crecer no solo como profesional, sino también como persona.

En lo personal, mi madre, Doralba Mora Duque: gracias por estar siempre. Por tu apoyo en los días difíciles, por tu escucha silenciosa y por ese amor incondicional que me sostuvo en todo momento; eres mi base. A mi padre, Carlos Arturo Moncada Arias, por tu apoyo y por ser una fuente de motivación en cada paso. A mis hermanos, Camilo Moncada Mora y Richard y Jhonatan Montoya Mora, gracias por estar ahí cuando más los necesité, escuchándome y estando a mi lado.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de carrera y futuros colegas. Con ustedes, los días más pesados fueron más llevaderos. Gracias por lo que aprendimos juntos y por los momentos que siempre voy a recordar.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS 3
RESUMEN 10
ABSTRACT 11
1. INTRODUCCIÓN 12
1.1. Planteamiento del problema 13
1.2. Justificación 16
1.3. Objetivos 17
1.4. Descripción del trabajo 18
2. ANTECEDENTES 19
2.1. Introducción 19
2.2. Selección y criterios para elegir una SMU 19
2.3. Uso del Analog Discovery en la enseñanza de dispositivos semiconductores 20
2.4. Estrategias de aprendizaje activo con el Analog Discovery 21
2.5. Caracterización básica con el dispositivo FNIRSI DSO-TC3 22
2.6. Diseños de SMU de bajo costo orientados a la caracterización avanzada 22
2.7. Algoritmos de aceleración para mediciones en SMU 23
3. MARCO TEÓRICO 25
3.1. Aprendizaje activo 25
3.2. Experimentación en el aula 26
3.3. Herramienta educativa 27
3.4. Unidades de Fuente y Medida (SMU) 28
3.5. Analog Discovery 2 29
3.6. Establecimiento de los fenómenos eléctricos y las características asociadas 30
3.7. Síntesis de dispositivos y parámetros medidos 35
4. CONCEPCIÓN DE LA HERRAMIENTA EDUCATIVA Y DISEÑO DE LA TARJETA ELECTRÓNICA SMU 37
4.1. Arquitectura de la herramienta 37
4.2. Consideraciones de diseño de la tarjeta electrónica 39
4.3. Diseño de la tarjeta SMU. 40
4.4. Modo de operación configurable de la tarjeta electrónica SMU 42
4.5. Proceso de medición y caracterización 42

5. ALGORITMOS Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DE LA SMU 47
5.1. Algoritmo Diodo Rectificador, Schottky y LED 48
5.2. Algoritmo Diodo Zener 50
5.3. Algoritmo Transistor BJT 52
5.4. Algoritmo Transistor J-FET 55
5.5. Algoritmo transistor MOSFET de enriquecimiento 58
6. RESULTADOS 61
6.1. Algoritmo para diodo rectificador, Schottky y LED 63
6.2. Algoritmo para diodo Zener 66
6.3. Algoritmo para transistor BJT 67
6.4. Algoritmo para transistor JFET 68
6.5 Algoritmo para transistor MOSFET de enriquecimiento 69
6.6. Comparación global entre la SMU y el laboratorio 71
7. CONCLUSIONES 74
BIBLIOGRAFÍA 76
ANEXOS 79

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de instrumentos y trabajos relacionados. 24
Tabla 2. Referencias y características. 36
Tabla 3. Tabla de resultados del algoritmo para diodo rectificador, Schottky y LED. 65
Tabla 4. Tabla de resultados del algoritmo para diodo Zener. 66
Tabla 5. Tabla de resultados del algoritmo para transistor BJT. 68
Tabla 6. Tabla de resultados del algoritmo para transistor JFET. 69
Tabla 7. Tabla de resultados del algoritmo para transistor MOSFET de enriquecimiento. 70
Tabla 8. Tabla de resultados. 71
Tabla 9. Error de pruebas en SMU vs. LAB. 72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dispositivo FNIRSI – Osciloscopio digital DSO-TC3. 14
Figura 2. Esquema del circuito conceptual para un SMU. 28
Figura 3. Diagrama de bloques de la herramienta SMU. 38
Figura 4. Conexión básica del chip de voltaje de salida dual. 40
Figura 5. Organización funcional interna del bloque tarjeta. 41
Figura 6. Esquemático general de la tarjeta electrónica. 43
Figura 7. Esquemático del DCP020515DU. 44
Figura 8. Plano de tierras de la parte superior de la tarjeta electrónica. 45
Figura 9. Plano de tierras de la parte inferior de la tarjeta electrónica. 45
Figura 10. Parte superior de la PCB desarrollada. 46
Figura 11. Parte inferior de la PCB desarrollada. 46
Figura 12. Diagrama de flujo general de algoritmos implementados de los diodos. 48
Figura 13. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor BJT. 52
Figura 14. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor JFET. 55
Figura 15. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor MOSFET de enriquecimiento. 58
Figura 16. SMU. 61
Figura 17. Diodo rectificador. 63
Figura 18. Diodo Schottky. 64
Figura 19. Diodo LED. 64
Figura 20. Diodo Zener. 66
Figura 21. Transistor BJT. 67
Figura 22. Transistor JFET. 68
Figura 23. Transistor MOSFET. 69
Figura A1. Comando “daqlist”. 81
Figura A2. Comando “daqvendorlist”. 82

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Guía para el enlace de hardware de Digilent con MATLAB 79
Anexo B. Manual de usuario de la Unidad de Fuente y Medida (SMU) basada en Analog Discovery 2 y MATLAB 83

RESUMEN

Este trabajo de grado presenta el desarrollo de una herramienta de experimentación para el aula, pensada para apoyar la enseñanza de dispositivos semiconductores en la asignatura de Electrónica II: Diodos y transistores de la Universidad del Valle. La plataforma se basa en una Unidad de Fuente y Medida (*Source Measurement Unit*, SMU) semiautomática, diseñada para la caracterización de diodos y transistores.

Para su funcionamiento, integra el equipo Analog Discovery 2 con una aplicación desarrollada en *MATLAB App Designer*, que permite configurar pruebas, realizar mediciones en tiempo real, y visualizar los resultados mediante gráficas. Dicha interfaz facilita el uso en el entorno académico y automatiza parcialmente el proceso de caracterización, facilitando el análisis de parámetros básicos en el aula.

El uso del Analog Discovery 2, como plataforma de generación y medición de señales, permite a los estudiantes explorar el comportamiento real de los dispositivos bajo distintas condiciones de operación. Así, la solución permite establecer sus características de funcionamiento bajo las condiciones deseadas de operación, en lugar de usar los valores de las hojas de datos comerciales, cuyos valores suelen estar determinados bajo condiciones estándar. Se incluye un manual de usuario detallado para orientar el uso de la SMU.

Este proyecto ofrece una base para futuros trabajos, con la posibilidad de evolucionar hacia una versión actualizada del dispositivo, que suele incorporar funcionalidades avanzadas del Analog Discovery 2.

Palabras clave: SMU, MATLAB App Designer, Analog Discovery 2, caracterización semiautomática, diodos, transistores, medición de parámetros, experimentación académica.

ABSTRACT

This thesis presents the development of an experimental tool for the classroom, designed to support the teaching of semiconductor devices in the subject Electronics II: diodes and transistors at Universidad del Valle. The platform is based on a semi-automatic Source Measurement Unit (SMU), designed for the characterization of diodes and transistors.

For operation, it integrates the Analog Discovery 2 device with an application developed in MATLAB App Designer, which allows users to configure tests, perform real-time measurements, and visualize results through graphs. This interface facilitates use in an academic environment and partially automates the characterization process, making the analysis of basic parameters easier in the classroom.

The use of the Analog Discovery 2 as a platform for signal generation and measurement enables students to explore the real behavior of devices under different operating conditions. In this way, the solution makes it possible to establish the operating characteristics under desired conditions, rather than relying on commercial datasheet values, which are typically determined under standard conditions. A detailed user manual is included to guide the use of the SMU.

This project lays the foundation for future work, with the possibility of evolving toward an updated version of the device that could incorporate advanced features of the Analog Discovery 2.

Keywords: SMU, MATLAB App Designer, Analog Discovery 2, semi-automatic characterization, diodes, transistors, parameter measurement, academic experimentation.

1. INTRODUCCIÓN

Los semiconductores, como diodos y transistores, son componentes con propiedades particulares capaces de comportarse como conductores o aislantes, cuyas respuestas varían con la temperatura, la concentración de portadores de carga y el dopado con impurezas. Estos dispositivos son la base de una gran variedad de sistemas electrónicos.

En el programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad del Valle, los conceptos, aplicaciones y el diseño de circuitos con estos elementos actualmente se adquieren en la asignatura Electrónica II. Ya que el trabajo práctico fortalece la comprensión de los fenómenos científicos desde un enfoque aplicado [1], la asignatura se concibió como teórico-práctica. Esta integración entre teoría, simulación y trabajo en laboratorio permite analizar señales analógicas, estudiar el comportamiento de los componentes bajo distintas condiciones y comprender cómo las características de los dispositivos influyen directamente en la respuesta y funcionamiento de los circuitos.

De esta manera, durante el desarrollo de esta materia, el estudiantado tiene la posibilidad de interactuar con circuitos reales mediante prácticas experimentales, cuyos resultados se espera tengan coherencia con los resultados esperados. Sin embargo, es cotidiano que se presente una disparidad entre los resultados, lo que puede dificultar el análisis e interpretación de las mediciones realizadas en el laboratorio.

Una de las razones más comunes que generan las disparidades está asociada con los valores de las características propias de los elementos, que suelen ser tomadas de las hojas de datos comerciales de los elementos; primero, porque dichos valores en las hojas de especificaciones se obtuvieron para unas condiciones de operación estándar, que por lo general no coinciden con los que se están usando en el circuito; y segundo, porque muchas veces indican un rango de

valores esperados en las características, y el uso de un valor u otro puede cambiar bastante la respuesta de los circuitos bajo estudio.

Por otro lado, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de sistemas multifuncionales que integran en una sola plataforma capacidades de generación, medición, visualización y procesamiento de señales. A diferencia del uso de instrumentos tradicionales por separado, esta integración reduce el espacio requerido, simplifica el montaje experimental, favorece la portabilidad y hace más accesible la implementación de prácticas en contextos académicos.

En este contexto, el presente trabajo de grado expone el desarrollo e implementación de un recurso didáctico que integra software y hardware, con el propósito de facilitar la caracterización y experimentación con diodos y transistores en las clases de Electrónica II.

1.1. Planteamiento del problema

Los dispositivos semiconductores, como los diodos y los transistores, tienen características particulares que los hacen esenciales en la electrónica moderna. No obstante, su comportamiento depende no solo de su fabricación, sino también de las condiciones ambientales y de operación en las que se utilizan.

En la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, específicamente en las clases de Electrónica II: diodos y transistores, se enseñan los fundamentos y aplicaciones de estos dispositivos. En este contexto, resulta necesario implementar estrategias pedagógicas que, faciliten en el aula, la integración de la teoría con la práctica. Para ello, es oportuno contar con un sistema que permita la experimentación y la medición de parámetros básicos de diodos y transistores (como el voltaje umbral o la ganancia de corriente), para poder analizar su impacto en la respuesta de los circuitos, y sin tener que esperar a la realización de prácticas de laboratorio.

Si bien las hojas de especificaciones son la fuente estándar de referencia para los ingenieros electrónicos, la información que presentan responde a condiciones ambientales y de operación particulares y, en muchas ocasiones, se

especifican rangos amplios para las características claves, o valores típicos asociados a referencias comerciales, que no siempre representan el dispositivo específico. Esta falta de precisión genera dudas sobre qué datos emplear durante los cálculos, y es una de las principales causas de discrepancia entre los resultados teóricos y los que se obtienen en la práctica.

Para enfrentar esta situación, se han desarrollado dispositivos como el FNIRSI-osciloscopio Digital DSO-TC3, que incorpora funciones de prueba para componentes electrónicos. Aunque estos equipos identifican diodos, transistores BJT o FET y entregan parámetros básicos (como hFE, corrientes de fuga o caídas de voltaje), lo hacen bajo condiciones de prueba internas fijas que no representan necesariamente el funcionamiento real del componente [2].



Figura 1. Dispositivo FNIRSI – Osciloscopio digital DSO-TC3.
Fuente: [2].

En general, no permiten observar su comportamiento de transistores en distintas regiones de operación (corte, activa y saturación), ya que no aplican una

polarización dinámica de base. Esto provoca que los parámetros medidos no reflejen las condiciones reales de polarización y operación, lo que limita su aplicabilidad en el estudio de estos dispositivos. Además, no es posible utilizar simultáneamente generador y osciloscopio, lo que impide realizar pruebas de seguimiento de señal en tiempo real [3].

En contraste, los laboratorios de electrónica de la Universidad del Valle cuentan con la plataforma portátil Analog Discovery 2, una herramienta de experimentación que ha sido utilizada en universidades de Estados Unidos como recurso didáctico para la enseñanza de dispositivos y circuitos semiconductores [4]. Esta plataforma permite medir, visualizar, generar, registrar y controlar circuitos de señales mixtas, brindando a los estudiantes la posibilidad de trabajar de forma experimental con diodos, transistores y otros circuitos analógicos en el aula, analizando sus respuestas en distintas condiciones, con el acompañamiento de un profesor.

Por ejemplo, es posible realizar mediciones de corriente y voltaje en distintas configuraciones de circuitos, analizar las curvas características de los dispositivos semiconductores y estudiar cómo varían en respuesta a cambios en la temperatura o el voltaje de alimentación. Además de fortalecer una comprensión integrada, la experimentación en el aula favorece el desarrollo de habilidades aplicadas en diseño y montaje de circuitos, la resolución de problemas y el análisis de datos.

A partir de lo anterior, se evidencia la necesidad de desarrollar un sistema innovador que permita la estimación semi-automatizada de parámetros fundamentales en diodos y transistores, acompañado de un manual de usuario orientado a su implementación en actividades experimentales dentro del aula.

En este contexto, surgen las Unidades de Fuente y Medida (*Source Measurement Unit* - SMU) [5], como herramientas que permiten caracterizar dispositivos semiconductores y, a su vez, ser utilizadas como soporte para la experimentación académica. Existen SMUs comerciales de alta precisión para investigación, así como desarrollos de bajo costo basados en microcontroladores,

etapas de acondicionamiento analógico y plataformas de software. Una SMU es un dispositivo versátil que puede aplicar voltaje o corriente mientras mide estas magnitudes, lo cual permite tanto la aplicación de señales eléctricas analógicas como la adquisición de datos en tiempo real. Diseñar una SMU que haga uso del Analog Discovery 2, aprovechando su capacidad de generación y medición, puede ofrecer a los estudiantes una plataforma completa para la caracterización y análisis experimental de diodos y transistores [6].

En este trabajo, el término estimación semiautomática se refiere a un procedimiento en el que el usuario realiza la selección del dispositivo, su conexión en la tarjeta y la definición de los parámetros de prueba, mientras que la aplicación desarrollada se encarga de ejecutar los barridos, adquirir los datos experimentales, procesarlos y estimar automáticamente las características eléctricas de interés.

Todo lo anterior puede sintetizarse en la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo desarrollar una unidad de fuente y medida (SMU) basada en el Analog Discovery 2 para la estimación semiautomática de características estáticas y dinámicas básicas de algunos diodos y transistores, y que, a su vez, pueda ser usada como recurso didáctico durante la enseñanza?

1.2. Justificación

Los estudiantes de cursos de electrónica a menudo enfrentan dificultades al aplicar los conocimientos adquiridos en clase a situaciones reales, especialmente cuando trabajan con dispositivos semiconductores como diodos y transistores. En estos casos, suelen apoyarse en las hojas de especificaciones para predecir el comportamiento del circuito; no obstante, al realizar las mediciones experimentales, aparecen diferencias entre los valores teóricos y los resultados observados en el laboratorio.

La SMU permite obtener mediciones bajo las condiciones reales requeridas, lo que ayuda a acercar los resultados teóricos a los obtenidos en la práctica. Esto mejora la comprensión de los conceptos involucrados y respalda el uso de criterios

y técnicas de diseño avanzadas, orientadas a minimizar el impacto de las variaciones en dichas características.

En este sentido, el uso de un sistema SMU para estimar las características básicas de dispositivos, mejora y fortalece la conexión entre teoría y práctica en el trabajo con circuitos electrónicos reales; y al mismo tiempo, contribuye al desarrollo de habilidades blandas como la capacidad analítica, la resolución de problemas, la atención al detalle y la adaptación al cambio, entre otras. En esta línea, las últimas políticas curriculares de la Universidad del Valle promueven el desarrollo y seguimiento de estas competencias a lo largo de la carrera.

Este trabajo de grado implementa un sistema SMU aplicable en laboratorios y proyectos, de manera que se optimizan las clases teóricas y prácticas, y se fortalece la comprensión aplicada de los dispositivos semiconductores. El sistema cuenta también con un manual de usuario de experimentación en el aula que facilita su apropiación.

1.3. Objetivos

Para el desarrollo de este trabajo, y con el propósito de dar respuesta a la problemática planteada, se establecieron los siguientes objetivos:

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar una unidad de fuente y medida (SMU) basada en el Analog Discovery 2 para la estimación semiautomática de características estáticas y dinámicas básicas de diodos y transistores, que facilite la integración de conocimientos teóricos y prácticos durante las clases.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Establecer los fenómenos eléctricos que se desean recrear y las características asociadas, así como los tipos de diodos y transistores más representativos.

2. Implementar los circuitos y procedimientos necesarios para medir las características fundamentales seleccionadas, considerando las protecciones correspondientes.
3. Diseñar una aplicación que permita configurar las pruebas y visualizar resultados.
4. Determinar los alcances y limitaciones de la SMU desarrollada.

1.4. Descripción del trabajo

El desarrollo de la herramienta de experimentación en el aula para la enseñanza de dispositivos semiconductores en la asignatura de Circuitos Electrónicos de la Universidad del Valle inició con una revisión de documentos académicos y técnicos. Este análisis permitió establecer las bases teóricas, metodológicas y tecnológicas relacionadas con la caracterización de dispositivos semiconductores, así como identificar los parámetros básicos que la herramienta debía ser capaz de medir.

La construcción del sistema se organizó en varias etapas: concepción, diseño, desarrollo e implementación. El proceso comenzó con la definición de una estructura orientada a facilitar la comprensión de los dispositivos semiconductores en un entorno experimental. Posteriormente, se diseñó la interfaz gráfica en *MATLAB App Designer* y se configuraron los circuitos de prueba necesarios para interactuar con el dispositivo Analog Discovery 2, lo que permitió incorporar funciones de medición semiautomática de parámetros fundamentales.

Durante la fase de desarrollo, se implementaron los algoritmos de captura y procesamiento de datos, y se integró la SMU con el hardware del Analog Discovery 2. Además, se elaboraron un manual de usuario y guías de conexión, con el objetivo de facilitar su uso en contextos educativos y permitir que los estudiantes experimenten y obtengan resultados coherentes con los conceptos teóricos presentados en clase.

Finalmente, la herramienta fue validada mediante pruebas que permitieron comprobar su correcto funcionamiento y evidenciar sus limitaciones.

2. ANTECEDENTES

2.1. Introducción

En esta sección se presentan algunos trabajos previos que muestran cómo el Analog Discovery puede aplicarse en la enseñanza de los cursos de electrónica y en la estimación de características básicas de dispositivos semiconductores. La mayoría de estos estudios se centran en metodologías y enfoques prácticos que permiten experimentar con dichos dispositivos.

En cuanto a los antecedentes relacionados con el trabajo de grado, se encontraron documentos desarrollados en diferentes periodos. Sin embargo, para efectos prácticos y considerando la rápida evolución tecnológica, se tomará en cuenta únicamente la información publicada a partir del año 2014.

2.2. Selección y criterios para elegir una SMU

El documento [5] ofrece una descripción detallada sobre las Unidades de Fuente y Medida (SMUs), dispositivos versátiles capaces de aplicar voltaje o corriente mientras miden, de forma simultánea ambos parámetros. Esta capacidad les hace útiles para diversas aplicaciones, como la caracterización de baterías y de dispositivos semiconductores.

En el caso de la caracterización de baterías, operan en dos de los cuatro cuadrantes del plano corriente - voltaje (IV), lo que les permite medir corriente y voltaje para comprobar el estado de agotamiento de la batería. En cambio, los dispositivos semiconductores requieren operar en los cuatro cuadrantes, ya que deben ser evaluados tanto en condiciones de polarización directa como inversa [5].

De igual forma, el artículo destaca la importancia del uso de conexiones triaxiales, ya que ofrecen menor interferencia y mayor precisión en las mediciones, especialmente cuando se trabajan corrientes extremadamente bajas, del orden de 10^{-15} amperios. Este aspecto técnico puede influir de forma significativa en el diseño de una SMU.

Este antecedente es relevante, ya que la propuesta de esta tesis comparte con las SMUs de Keysight la capacidad de operar en los cuatro cuadrantes del plano IV y de realizar mediciones simultáneas de voltaje y corriente. No obstante, se diferencia en su enfoque y alcance: mientras las SMUs comerciales están orientadas a la investigación avanzada, la unidad propuesta aquí está pensada para el contexto académico, priorizando portabilidad, bajo costo y facilidad de uso. Aunque su nivel de precisión es menor en comparación con los equipos de Keysight, sigue siendo adecuada para caracterizar parámetros fundamentales de diodos y transistores dentro del aula.

2.3. Uso del Analog Discovery en la enseñanza de dispositivos semiconductores

El trabajo presentado en [4] analiza el uso del Digilent Analog Discovery como herramienta para la enseñanza de dispositivos y circuitos semiconductores, destacando su utilidad en el estudio de diodos, transistores y circuitos analógicos y digitales. Además, detalla cómo este dispositivo permite el desarrollo de experimentos asistidos por computadora, que pueden ser realizados por los estudiantes fuera del laboratorio tradicional, con un enfoque flexible y autónomo.

El estudio es relevante porque demuestra cómo el Analog Discovery puede ser utilizado eficazmente en entornos educativos, fortaleciendo la comprensión de conceptos mediante herramientas prácticas y accesibles. Asimismo, resalta la importancia de dotar a los estudiantes de herramientas prácticas que refuercen sus habilidades experimentales mediante la integración de hardware y software.

Comparado con este trabajo de grado, ambos comparten el uso del Analog Discovery como base para la enseñanza. Mientras los investigadores proponen prácticas de laboratorio enfocadas en la comprensión general de las curvas I-V y el análisis de circuitos básicos (incluso en escenarios de aprendizaje remoto), esta tesis va más allá, al plantear el desarrollo de una unidad de fuente y medida (SMU) semiautomática, pensada específicamente para el aula.

Esta unidad no solo aprovecha las capacidades de medición y generación del Analog Discovery 2, sino que también incorpora procedimientos definidos para estimar parámetros clave de diodos y transistores, como el voltaje umbral, la corriente de saturación o la ganancia de corriente. A diferencia del enfoque general del artículo [4], esta propuesta busca ofrecer una herramienta más estructurada, que permita caracterizar los dispositivos de forma sistemática y repetible, posicionándose como una herramienta pedagógica en el aula.

2.4. Estrategias de aprendizaje activo con el Analog Discovery

El documento citado en [6] describe la incorporación del Analog Discovery en diferentes asignaturas de ingeniería electrónica como herramienta para promover el aprendizaje activo desde los primeros semestres. Bajo este enfoque, cada estudiante utiliza su propia unidad para construir y medir circuitos básicos tanto en clase como fuera de ella, extendiendo la experiencia práctica más allá del laboratorio tradicional.

Además de fomentar el trabajo autónomo, esta metodología contribuye al desarrollo de competencias en el uso de herramientas reales de medición y generación de señales. Los estudiantes logran así interpretar, de forma más clara, la relación entre la teoría vista en el aula y su implementación en escenarios reales.

El aporte principal al presente trabajo radica en el uso extensivo del Analog Discovery en múltiples cursos (desde Fundamentos de Ingeniería Electrónica hasta Análisis de Circuitos I y II y sus respectivos laboratorios), evidenciando no solo su versatilidad, sino su impacto en el fortalecimiento del aprendizaje activo. Los resultados reportados en [6] muestran avances significativos en el desarrollo de habilidades prácticas y en la comprensión de los conceptos teóricos, lo que respalda su elección como base para el diseño de una SMU accesible, flexible y orientada a entornos educativos.

2.5. Caracterización básica con el dispositivo FNIRSI DSO-TC3

El FNIRSI DSO-TC3, descrito en [2], es un dispositivo comercial multifuncional que combina osciloscopio digital, generador de señales, probador de componentes, decodificación de infrarrojos, medidor de voltaje, temperatura y humedad, entre otras funciones. Para este trabajo, su relevancia radica en la capacidad de medir parámetros eléctricos de diodos y transistores.

En el caso de los diodos rectificadores, el equipo entrega tres parámetros: caída de tensión directa, capacitancia de unión y corriente de fuga inversa. Para los diodos Zener, también mide la caída de voltaje en directa y el voltaje de ruptura en inversa, completando un total de cinco parámetros característicos para este tipo.

Asimismo, el equipo es capaz de caracterizar transistores de la familia FET mediante al menos cinco parámetros clave: la capacitancia de compuerta (Cg), la corriente de drenaje (Id), la tensión de encendido (Vt), la resistencia entre drenaje y fuente (Rds) y la caída de tensión directa del diodo de protección (Uf). En particular, la corriente Id se mide aplicando un voltaje específico entre compuerta y fuente del transistor, condición que comúnmente se denomina “medición bajo Vgs”, ya que este voltaje controla la conducción del canal y, por tanto, condiciona la magnitud de la corriente medida.

De este modo, el FNIRSI DSO-TC3 ofrece un conjunto limitado pero útil de parámetros básicos (aproximadamente entre cinco y siete, según el tipo de dispositivo), lo que lo convierte en una referencia práctica para caracterización rápida en contextos no especializados. Sin embargo, carece de la flexibilidad y adaptabilidad de una unidad de fuente y medida desarrollada con fines académicos.

2.6. Diseños de SMU de bajo costo orientados a la caracterización avanzada

El artículo [7] expone el diseño de una Unidad de Fuente y Medida (SMU) de bajo costo destinada a la caracterización de sensores basados en transistores de efecto de campo con canal de grafeno (G-FET). La SMU permite obtener, con

precisión y mínima interferencia de ruido, mediciones de curvas características en los cuatro cuadrantes del plano IV, lo que facilita un análisis detallado del comportamiento de los G-FET.

Aunque el enfoque del texto se centra en la caracterización de sensores G-FET y en la detección de defectos en estos dispositivos, constituye un antecedente relevante para esta tesis. Su valor radica en que demuestra cómo una SMU puede adaptarse para caracterizar distintos tipos de dispositivos semiconductores, al incorporar una interfaz configurable para diversas pruebas.

Esta idea resulta especialmente pertinente, ya que el trabajo de grado también propone el desarrollo de una interfaz flexible, orientada a la estimación de parámetros eléctricos en diodos y transistores básicos. No obstante, la diferencia clave entre ambos trabajos está en su propósito: mientras el artículo apunta a aplicaciones en investigación avanzada, esta tesis se enfoca en la caracterización básica con fines académicos, priorizando el uso práctico dentro del aula.

2.7. Algoritmos de aceleración para mediciones en SMU

El estudio presentado en [8] plantea una estrategia orientada a mejorar el desempeño de las Unidades de Fuente y Medida (SMU) mediante un algoritmo de aceleración basado en BA-Informer, un modelo de aprendizaje profundo que combina técnicas de predicción y medición, a la par que se reduce el tiempo de adquisición de datos sin comprometer la precisión de las lecturas.

Tradicionalmente, las SMU enfrentan una disyuntiva entre velocidad y exactitud, porque para minimizar el error es común promediar múltiples mediciones, incrementando de forma considerable el tiempo total de prueba. El estudio propone superar esta limitación utilizando el modelo de aprendizaje profundo BA-Informer para predecir resultados confiables con menos lecturas, logrando reducir el tiempo de medición a la mitad y manteniendo un margen de error mínimo.

Este enfoque representa una tendencia creciente hacia la integración de algoritmos inteligentes en los sistemas de medición electrónica (SMU), con el fin

de optimizar la recolección de datos, lo que complementa la propuesta de una SMU semiautomática de bajo costo basada en el Analog Discovery 2. Mientras esta tesis propone una solución accesible y funcional para el aula, centrada en la caracterización básica de diodos y transistores, la investigación de Chen y colaboradores abre el camino hacia mejoras que podrían integrarse en versiones más avanzadas del sistema desarrollado.

Tabla 1. Comparación de instrumentos y trabajos relacionados.

Características/ Parámetro	**Keysight**	**Grout & Abu**	**FNIRSI DSO-TC3**	**Galanti & Haidekker**	**Chen et al.**	**Este trabajo de grado**
Tipo de equipo	SMU comercial	Kit AD2	Probador portátil 3-en-1	SMU low-cost G-FET	SMU comercial + algoritmo BA-Informer	SMU basada en AD2
Año / fecha de referencia	2024	2015	2024	2024	2025	2025
Curvas I–V	Alta precisión	Básicas	Solo parámetros puntuales	Completa	Rápidas	Directa e inversa (barridos semiautomáticos)
Dispositivos evaluados	Diodos, BJT, FET	Diodos y transistores	Diodos y FET (5–7 parámetros)	G-FET	No específico	Diodos, BJT, JFET, MOSFET
Rango típico	fA–A, V altos	mA, ±5 V	mA, bajos V	µA, bajos V	Depende de la SMU usada	mA–µA y 0–15 V
Enfoque principal	Industria / Investigación	Enseñanza básica	Diagnóstico rápido	Sensores G-FET	Optimización del tiempo de medición	Enseñanza + Caracterización
Interfaz	*EasyEXPERT*	*WaveForms*	Pantalla TFT	GUI propia	Software SMU + BA-Informer	MATLAB App Designer

Fuente: Elaboración propia.

3. MARCO TEÓRICO

Esta sección aborda los conceptos fundamentales que sustentan el desarrollo de este trabajo de grado. Se presentan las nociones de aprendizaje activo y experimentación en el aula, se definen las unidades de fuente y medida (SMU), los parámetros de los dispositivos a caracterizar, y se exponen las bases técnicas de los componentes hardware y software utilizados.

3.1. Aprendizaje activo

El aprendizaje activo parte de la idea de que los estudiantes comprenden y retienen mejor el conocimiento cuando participan directamente en su construcción, en lugar de limitarse a recibirlo pasivamente [9], [10]. Este enfoque se traduce en actividades que promueven la comprensión, la reflexión y la aplicación práctica de los conceptos.

Los diferentes estilos de aprendizaje también influyen en este proceso. Mientras algunos estudiantes se benefician del uso de recursos visuales, como diagramas o simulaciones, otros aprenden mejor a través de explicaciones verbales o discusiones. Un grupo considerable necesita además una experiencia más tangible, mediante la manipulación directa de equipos y componentes: un aprendizaje experiencial o kinestésico.

En la enseñanza de circuitos electrónicos, estos estilos se integran en un proceso que combina teoría, simulación y práctica. La teoría proporciona los modelos matemáticos y principios de funcionamiento de dispositivos como diodos y transistores; la simulación, en plataformas como SPICE o Multisim, permite anticipar comportamientos bajo condiciones ideales; y la práctica valida esos modelos mediante pruebas reales, donde entran en juego tolerancias, variaciones de fabricación y condiciones del entorno. Este recorrido entre lo abstracto y lo práctico constituye la esencia del aprendizaje activo, al permitir al estudiante no solo comprender los fenómenos, sino también observarlos, medirlos y contrastarlos [11].

En este marco, la SMU desarrollada en este trabajo se convierte en un recurso que materializa el aprendizaje activo en el aula. Al integrar la caracterización experimental de diodos y transistores con la verificación de modelos teóricos y simulados, permite al estudiante conectar directamente los conceptos con resultados empíricos. Así, se fortalece no solo la comprensión conceptual, sino también las competencias prácticas y analíticas necesarias en la formación de un ingeniero electrónico.

3.2. Experimentación en el aula

La experimentación en el aula es una metodología de enseñanza-aprendizaje reconocida por su efectividad, pues permite a los estudiantes conectar los conceptos teóricos con experiencias prácticas inmediatas, favoreciendo una comprensión más profunda de fenómenos científicos y tecnológicos [12], [13].

En el contexto de la enseñanza de circuitos electrónicos, esta estrategia cobra mayor sentido, pues facilita que los estudiantes comprendan el comportamiento de dispositivos semiconductores al observar directamente cómo varían parámetros como voltajes y corrientes según las condiciones de polarización. A diferencia de los laboratorios tradicionales, donde las prácticas suelen estar más estructuradas y acotadas, la experimentación en el aula ofrece un espacio más flexible, que promueve la curiosidad, el pensamiento crítico y la validación de lo aprendido en teoría y simulación.

La incorporación de una SMU educativa representa un valor añadido en este proceso, al facilitar la caracterización semiautomática de parámetros fundamentales de diodos y transistores como el voltaje umbral, la corriente de saturación o la ganancia de corriente, directamente durante el desarrollo de los contenidos teóricos.

De este modo, el estudiante no se limita a observar, sino que asume un rol activo en la recolección y análisis de datos, confrontando los resultados experimentales con los modelos estudiados. Esta integración efectiva entre conceptos, simulaciones y experiencias prácticas no solo enriquece el aprendizaje activo, sino que también fortalece habilidades técnicas y analíticas clave para su formación como ingeniero electrónico.

3.3. Herramienta educativa

Una herramienta educativa es un recurso pedagógico diseñado para apoyar la labor docente y facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje, promoviendo tanto la formación guiada como el estudio autónomo [14]. Este tipo de herramientas busca estimular el desarrollo de habilidades cognitivas y procedimentales, permitiendo a los estudiantes adquirir conocimientos de forma activa y significativa.

En general, una herramienta educativa está compuesta por cuatro elementos principales:

1. Interfaz de usuario, que facilita la interacción estudiante-sistema.
2. Elementos de entrada y salida, encargados de generar estímulos (señales) y capturar respuestas (mediciones).
3. Módulos temáticos, que estructuran los contenidos o experimentos a realizar, según los objetivos de aprendizaje.
4. Materiales de apoyo, que complementan la experiencia mediante guías, manuales o recursos adicionales.

En el marco de este trabajo, dichos componentes se implementan de la siguiente forma:

1. La interfaz de usuario corresponde a la aplicación desarrollada en *MATLAB App Designer,* que permite configurar las pruebas y visualizar los resultados de forma amigable.

2. Los elementos de entrada y salida son gestionados por el Analog Discovery 2, encargado de aplicar señales de voltaje o corriente a los dispositivos bajo prueba y medir sus respuestas.
3. Los módulos temáticos están definidos conforme a los contenidos del curso de Electrónica II (diodos y transistores), seleccionados en colaboración con docentes de la asignatura.
4. Los materiales de apoyo se concretan en un manual de usuario que acompaña a la SMU, e incluye procedimientos, parámetros y ejemplos prácticos de uso.

Así, la SMU desarrollada no se limita a funcionar como un instrumento de laboratorio, sino que se concibe como una herramienta educativa integral, que conecta teoría, simulación y práctica en la enseñanza de semiconductores.

3.4. Unidades de Fuente y Medida (SMU)

Las Unidades de Fuente y Medida (SMU, por sus siglas en inglés) son sistemas diseñados para aplicar voltaje o corriente mientras miden estas mismas magnitudes de forma simultánea. Su estructura general se ilustra en la Figura 1, donde se muestra un esquema conceptual del circuito y los componentes básicos que lo conforman [15].

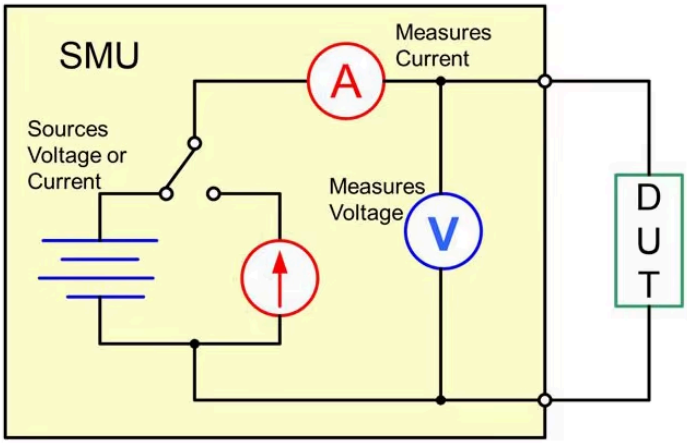


Figura 2. Esquema del circuito conceptual para un SMU.
Fuente: [15].

Aunque la configuración base de todas las SMUs se asemeja al circuito representado, las características específicas de cada una se adaptan según el tipo de aplicación para la cual se diseñan.

En la caracterización de dispositivos semiconductores, es necesario que la SMU opere en los cuatro cuadrantes del plano IV, pues estos dispositivos requieren mediciones tanto en condiciones de polarización directa como inversa. Por lo tanto, una SMU con este enfoque debe ser capaz de aplicar y medir voltajes y corrientes positivos y negativos.

3.5. Analog Discovery 2

El Analog Discovery 2 es un instrumento multifuncional que permite medir, visualizar, generar, registrar y controlar circuitos de señales mixtas. Su versatilidad lo convierte en una herramienta útil tanto dentro como fuera del laboratorio, ya que posibilita el trabajo con circuitos analógicos y digitales en entornos diversos.

Para este documento, la caracterización de diodos y transistores está limitada por el rango de operación del Analog Discovery 2, que alcanza ±25 V en sus canales de medición.

Esta herramienta dispone de diversos modos y funciones, entre los cuales destacan aquellos que resultan fundamentales para la implementación en el sistema SMU desarrollado [16]:

- Osciloscopio: permite la captura de señales de entrada analógica a través de sus canales de adquisición denominados Scope, utilizando cables BNC o MTE. Estos canales son de tipo diferencial, es decir, cada uno mide la diferencia entre dos señales, lo que reduce el ruido común y mejora la precisión en entornos con interferencia.

  En su configuración estándar, el dispositivo funciona como un osciloscopio de dos canales, con 14 bits de resolución y una velocidad de muestreo de hasta 100 MS/s.
- Waveform Generator: El dispositivo cuenta con un generador de señales que puede producir formas de onda estándar, como sinusoidales, cuadradas,

triangulares, en diente de sierra y ruido blanco, así como señales más avanzadas, como barridos en frecuencia y modulación AM/FM.

La amplitud de salida puede ajustarse hasta ±5 V (10 Vpp) con carga de 50 Ω, mientras que la frecuencia máxima alcanza 12 MHz para señales sinusoidales, reduciéndose a aproximadamente 1–2 MHz para señales triangulares y cuadradas.

- Fuentes de alimentación: El Analog Discovery 2 también dispone de dos rieles de suministro de energía configurables, útiles para alimentar los circuitos que se van a probar. Estas fuentes pueden ajustarse entre ±0,5 V y ±5 V, utilizando el instrumento *Power Supplies* del software *WaveForms*.

3.6. Establecimiento de los fenómenos eléctricos y las características asociadas

Este trabajo se orienta a apoyar los contenidos del curso de Electrónica II, particularmente en los temas relacionados con diodos y transistores [17]. A partir de este marco, los dispositivos seleccionados para el estudio se restringen a diodos rectificadores, schottky, Zener, transistores bipolares (BJT) y transistores de efecto de campo (FET), priorizando parámetros eléctricos fundamentales cuya medición permita una caracterización de los dispositivos académicamente útil.

3.6.1. Diodo rectificador

Un diodo rectificador es un componente semiconductor que permite la conducción de corriente en una sola dirección gracias a la unión *pn*. En este trabajo se caracteriza su comportamiento en directa, para obtener la caída de voltaje (VF) y la corriente (IF) en distintas condiciones de polarización, y la corriente de fuga (IR) en inversa. El tiempo de recuperación inversa (trr) se mide aplicando conmutaciones controladas y observando la transición de conducción a bloqueo.

Para el desarrollo de este trabajo se seleccionaron diodos rectificadores de la familia 1N400X, debido a que son dispositivos de propósito general utilizados en rectificación de 50/60 Hz, de bajo costo y fácil adquisición en el laboratorio.

3.6.2. Diodo Zener

Un diodo Zener es un semiconductor diseñado para operar en polarización inversa. Al alcanzar su tensión de ruptura (Vz), mantiene un voltaje prácticamente constante entre sus terminales, lo que lo resulta útil como regulador o referencia de voltaje [18], [19].

En este trabajo de grado, se consideran cuatro parámetros que se miden con la SMU para su caracterización: la tensión Zener (Vz), que oscila entre 3 V y 5 V, dadas las limitaciones del Analog Discovery 2; la corriente máxima (Iz), a la que se logra alimentar con el Analog; la corriente de fuga (Ir), que ocurre antes de llegar a Vz; y la impedancia Zener (Zz), que refleja la variación del voltaje frente a cambios en la corriente y determina su estabilidad como regulador.

3.6.3. Diodo Schottky

El diodo Schottky es un semiconductor cuya unión metal–semiconductor tipo n le otorga una baja caída de tensión directa (≈0,2–0,4 V), inferior a la de los diodos de silicio convencionales (≈0,7 V), así como una respuesta de conmutación rápida gracias a su reducido tiempo de recuperación inversa [18], [19]. En polarización directa, la conducción comienza apenas se superan los 0,2 V; mientras que, en polarización inversa, presenta una corriente de fuga mayor que la de un diodo de unión pn, lo que constituye su principal limitación frente a los diodos de silicio convencionales.

En este trabajo, se consideran los mismos parámetros empleados en la caracterización de diodos rectificadores: caída de tensión directa, corriente máxima en conducción, corriente de fuga inversa y tiempo de recuperación inversa. Las referencias comerciales seleccionadas fueron 1N5817 y 1N5819, por ser altamente comerciales.

3.6.4. Diodos LED

El diodo emisor de luz (LED) es un semiconductor que, al ser polarizado en directa, emite fotones como resultado de la recombinación de electrones y huecos en la unión pn. La energía liberada se manifiesta como radiación luminosa cuya longitud de onda depende del material semiconductor y, por tanto, del color del dispositivo. En general, el encapsulado plástico del LED cumple la función de guiar y concentrar el haz de luz, además de proteger el cristal semiconductor [18], [19].

Se seleccionaron dos parámetros principales: la caída de voltaje directo (Vf) y la corriente máxima en conducción (If), con las referencias comerciales comunes de colores.

3.6.5. Transistor BJT NPN

Es un dispositivo semiconductor de tres capas dispuesto en la forma N–P–N, con tres terminales: base (B), emisor (E) y colector (C). Se denomina bipolar porque en su funcionamiento intervienen tanto electrones como huecos. Dependiendo de su polarización, puede operar como interruptor electrónico (regiones de corte y saturación) o como amplificador de señal (región activa) [18], [19].

En la región activa, de interés para la amplificación, la unión base–emisor (BE) está polarizada en directa y la unión colector–base (CB) en inversa. En estas condiciones circulan corrientes por los tres terminales y se verifica aproximadamente que la corriente de colector está relacionada con la corriente de base mediante:

$$IC = \beta \cdot IB$$

donde β (o hFE) es la ganancia de corriente continua. Además, la tensión base–emisor se mantiene alrededor de VBE ≈ 0,7 V para transistores de silicio.

La relación entre las corrientes de los tres terminales se expresa como:

$$IE = IC + IB$$

lo que refleja la conservación de corriente en el dispositivo.

En este trabajo, a partir de las mediciones de IB e IC en región activa, se estima experimentalmente la ganancia de corriente $hFE = \frac{IC}{IB}$, se verifica que la corriente de colector sea mayor que la de base y se analiza la corriente de colector máxima admisible antes de alcanzar la saturación práctica del dispositivo. Asimismo, se consideran los límites de corriente de colector (IC máx.) y de tensión colector–emisor (VCE máx.).

Para las pruebas experimentales se emplearon transistores NPN disponibles en los laboratorios de la Universidad del Valle [17], tales como TIP31C, TIP32C, TIP41C y TIP42C, que tienen un rango de hfe entre 10 a 75.

3.6.6. Transistores JFET de canal N

Un transistor JFET de canal N (Junction Field-Effect Transistor) es un dispositivo semiconductor de tres terminales: compuerta (G), drenaje (D) y surtidor (S). La corriente que circula entre drenaje y surtidor (Id) lo hace a través de un canal de tipo n, cuyo grado de conducción se controla mediante el voltaje compuerta–fuente (VGS). La juntura compuerta–surtidor se polariza en inversa, lo que proporciona una impedancia de entrada muy alta y una corriente de compuerta prácticamente nula; por esta razón el JFET se clasifica como un transistor controlado por voltaje [18], [19].

Desde el punto de vista de sus características estáticas, el JFET de canal N presenta tres regiones de operación bien definidas: región de corte, región óhmica y región de corriente constante. En la región de corte ocurre cuando VGS es igual o más negativo que el voltaje de apagado VGS(off); en este caso, el canal se cierra y la corriente de drenaje es prácticamente nula (Id ≈ 0). Para valores pequeños de VDS, y siempre que VGS sea mayor que VGS(off), el dispositivo se encuentra en la región óhmica. Cuando VDS supera un cierto umbral, el transistor entra en la región de corriente constante; en esta zona Id depende principalmente de VGS y puede describirse de forma aproximada mediante una relación cuadrática del tipo:

$$Id \approx IDSS \cdot (1 - \frac{VGS}{VGS(off)})^2$$

donde IDSS es la corriente de drenaje con VGS = 0 [18], [19].

En este trabajo, el enfoque se centra en las características que van a ser medidas experimentalmente con la SMU: la corriente de drenaje IDSS, el voltaje drenaje–surtidor máximo VDS(MAX), el voltaje compuerta–surtidor de apagado VGS(off) y la transconductancia de pequeña señal gfs. Tomando la referencia comercial 2SK117, utilizado en aplicaciones de pequeña señal y baja potencia y parámetros adecuados para el rango de operación de la SMU.

3.6.7. MOSFET de enriquecimiento

Un MOSFET de enriquecimiento de canal N es un transistor de efecto de campo controlado por voltaje, con terminales de compuerta (G), drenaje (D) y fuente (S). En ausencia de voltaje de compuerta (VGS = 0) el dispositivo se encuentra en región de corte y la corriente de drenaje (ID) es prácticamente nula. Cuando VGS supera el voltaje umbral VGS(th) se induce un canal de tipo n entre drenaje y fuente y el MOSFET comienza a conducir.

En este trabajo, el análisis se centra en las características corriente de drenaje ID y el voltaje drenaje–fuente máximo VDS(MAX), el voltaje umbral VGS(th), que determina a partir de qué nivel de excitación el dispositivo entra en conducción; y la constante de transferencia K o transconductancia, que cuantifica cuánta corriente de drenaje puede controlarse con un cambio de voltaje en la compuerta [18], [19].

Estos parámetros se obtienen a partir de las curvas $ID–VDS$ e $ID–VGS$ medidas con la SMU y se contrastan con los valores nominales de las hojas de datos de los MOSFET de canal N [17] (IRFZ44N, IRF510N, e IRF3205).

Otros parámetros, como las capacitancias parásitas o los tiempos de conmutación, no se incluyen en este estudio, pues requieren montajes de alta frecuencia que exceden el alcance de la SMU desarrollada.

3.7. Síntesis de dispositivos y parámetros medidos

En este apartado se presenta una síntesis comparativa de los dispositivos electrónicos estudiados. Se agrupan los diodos y transistores analizados, junto con los fenómenos eléctricos asociados a cada uno y los tipos generales de parámetros que serán medidos con la SMU. Este resumen facilita una visión integrada de cómo se relacionan las distintas familias de dispositivos y el papel que desempeña cada una dentro del conjunto de experimentos planteados.

La selección de los componentes consideró su representatividad en los cursos de electrónica y su disponibilidad en los laboratorios de la Universidad del Valle, lo que permite replicar los ejemplos en entornos de aula y proyectos académicos.

Así, la síntesis comparativa funciona como un mapa general que conecta la teoría presentada previamente con las pruebas experimentales que se abordarán más adelante en el trabajo.

Tabla 2. Referencias y características.

Diodos	Fenómenos Eléctricos	Características Asociadas	Referencias Comerciales	Rango de voltaje a generar	Condiciones especiales
Diodo Rectificador	Conducción en directa/bloqueo, Recuperación inversa	Corriente máxima (If), Caída de voltaje directo (Vf), Tiempo de recuperación inversa (trr)	1N4001, 1N4004, 1N4007	0.5 V - 1.3 V	
Diodo Zener	Conducción en inversa, avalancha, Regulación de voltaje inverso	Tensión Zener (Vz): 3V-15V, Corriente máxima (Iz), Corriente de fuga (Ir), Impedancia Zener	3.6V, 3.9V, 4.3V, 4.7V	3V - 5V	**Impedancia Zener:** depende de la corriente Zener (Iz) en la zona de avalancha.
Diodo Schottky	Conducción en directa, Baja caída de voltaje directo, Conducción rápida	Caída de voltaje directo (Vf), Tiempo de recuperación inversa, Corriente directa (If), Corriente de fuga inversa (Ir)	1N5817, 1N5819	0.1 V - 1 V	
Diodo emisor de luz o LED	Conducción en directa, Emisión de fotones, Recombination de electrones y huecos	Caída de voltaje directo (Vf): 1.8V-3.3V, Corriente máxima (If)	Blanco, rojo, amarillo, verde, azul	1.8V - 3.3V	
Transistores					
BJT NPN	Corriente de base positiva, corriente de colector mayor que la corriente de base, amplificación de señal	Corriente de colector MAX (Ic), Voltaje colector-emisor MAX (Vce), Ganancia de corriente (hfe), Ro	TIP31C, TIP32C, TIP41C, TIP42C.	1 V - 5 V	**Ganancia de corriente (hfe)**: depende de la corriente de colector en región activa.
JFET Canal N	Corriente de drenaje a fuente controlada por voltaje de puerta, alta impedancia de entrada, saturación y corte	Corriente de drenaje MAX (Idss), Voltaje drenaje-fuente MAX (Vds), Voltaje compuerta-surtidor de apagado (Vgs(off) MAX, Transconductancia (gfs):, Yos	2SK117	1 V - 5 V	
MOSFET de enriquecimiento	Control de corriente por voltaje de puerta, alta impedancia de entrada, región de corte, saturación	Corriente de drenaje MAX (Id), Voltaje drenaje-fuente MAX (Vds), Voltaje de umbral de puerta (Vgs(th)) MAX. Constante de transferencia K (transconductancia), Yos	IRFZ44N, IRF530N, IRF540N, IRF3205	1 V - 5 V	

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCEPCIÓN DE LA HERRAMIENTA EDUCATIVA Y DISEÑO DE LA TARJETA ELECTRÓNICA SMU

Este capítulo presenta la concepción de la herramienta propuesta y su implementación como una Unidad de Fuente y Medida (SMU), conformada por el Analog Discovery 2, una tarjeta electrónica de adaptación y una aplicación desarrollada en *MATLAB App Designer*. En primer lugar, se expone la arquitectura general del sistema y cómo se integran sus principales bloques. Luego, se detallan los criterios de diseño de la tarjeta electrónica y su organización funcional según los distintos tipos de dispositivos semiconductores. Finalmente, se resume el modo de operación configurable de la herramienta y el flujo de trabajo para la medición y caracterización de dichos dispositivos.

En este trabajo, la SMU se concibe como el conjunto integrado por el Analog Discovery 2, la tarjeta electrónica y el computador que ejecuta la aplicación, funcionando de forma coordinada para generar señales de prueba, aplicar condiciones de polarización y medir las magnitudes eléctricas necesarias para trazar curvas características.

El sistema automatiza los barridos de tensión o corriente, así como la adquisición y el registro de datos, mientras que el usuario define el tipo de dispositivo a caracterizar, su referencia comercial, el tipo de prueba y los rangos de operación. La interfaz gráfica desarrollada en *MATLAB App Designer* permite introducir esta información, controlar la secuencia de mediciones y visualizar los resultados en tiempo real. De este modo, la herramienta es compacta, portátil y adecuada para apoyar actividades de laboratorio y experimentación en el aula, sin requerir equipos de medición especializados de alto costo.

4.1. Arquitectura de la herramienta

La arquitectura general de la herramienta se muestra en la Figura 3. El usuario configura la medición mediante la interfaz de usuario desarrollada en MATLAB, donde puede seleccionar el tipo de dispositivo a caracterizar, la referencia

comercial, el tipo de barrido y los rangos de tensión o corriente. Con esta información, la aplicación se comunica con el Analog Discovery 2 a través de un enlace USB, enviando los valores de excitación y recibiendo las mediciones correspondientes.

El Analog Discovery 2 actúa como el núcleo de la SMU: aplica los barridos de voltaje definidos, registra la respuesta de los dispositivos conectados a la tarjeta y transmite los datos a la aplicación. MATLAB procesa estas medidas con los algoritmos implementados y genera las curvas características I–V de los dispositivos semiconductores. Este flujo de información permite una estimación semiautomática de dichas curvas, lo que optimiza el tiempo de caracterización y enriquece la experiencia de aprendizaje al facilitar la visualización y el análisis en tiempo real.

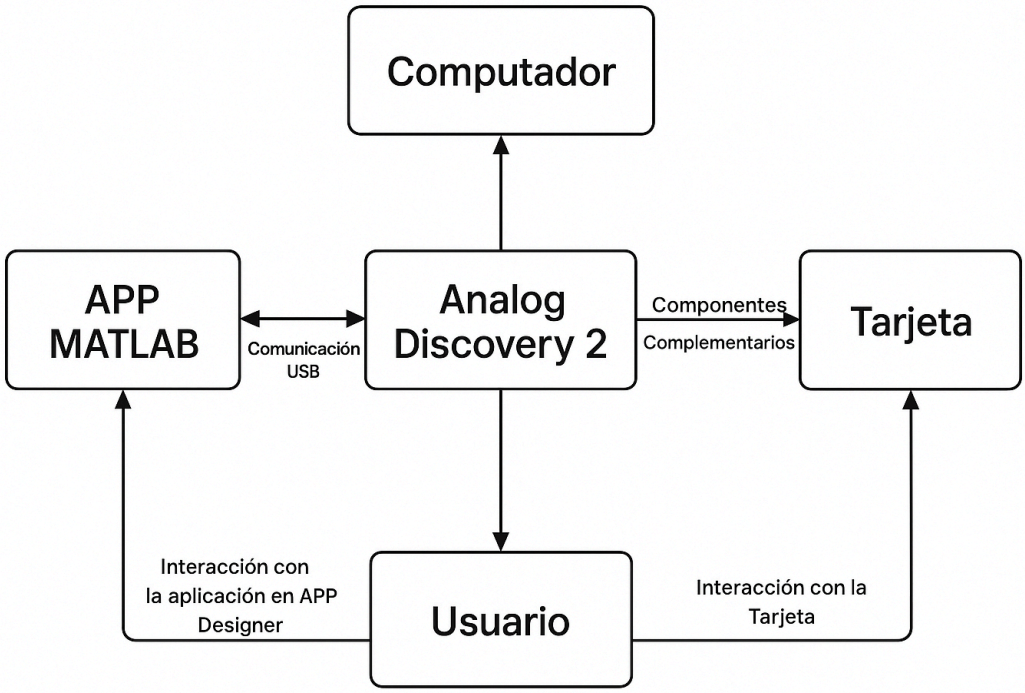


Figura 3. Diagrama de bloques de la herramienta SMU.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Consideraciones de diseño de la tarjeta electrónica

En coherencia con el diagrama de bloques presentado en la Figura 3, la tarjeta electrónica SMU corresponde al bloque de tarjeta en el diagrama de hardware, donde se conectan los dispositivos bajo prueba y por el cual se enrutan las señales generadas y medidas por el Analog Discovery 2. Su función primaria es ofrecer puntos de conexión para diodos y transistores, integrar las resistencias necesarias para las pruebas y canalizar las señales de excitación y medición.

Los circuitos específicos con los que se obtienen las curvas y parámetros de cada dispositivo se describen con detalle en la sección 3. Al tratarse de un ambiente controlado y con niveles moderados de tensión y corriente, no fue necesario contemplar requisitos especiales de robustez, sino más bien asegurar una disposición clara de zócalos y terminales que facilite al usuario el intercambio de resistencias, diodos y transistores según la configuración definida en la aplicación de MATLAB. En esencia, la tarjeta está formada por pistas y pines que permiten aplicar las señales del Analog Discovery 2, realizar las mediciones y modificar los elementos bajo prueba de manera práctica.

Además de estas funciones básicas, se incorporó para ampliar las posibilidades de operación de la herramienta: una etapa basada en un amplificador operacional. Esta etapa permite aumentar la amplitud de una de las señales generadas por el Analog Discovery 2 cuando se requiere un mayor margen de tensión, manteniendo la polaridad gracias a una configuración no inversora.

Para su alimentación, se optó por una solución práctica: el uso del módulo DCP020515DU, capaz de suministrar ±15 V a partir de una entrada de 5 V, con una corriente máxima de 133 mA, suficiente para el correcto funcionamiento del amplificador. La conexión del módulo se realizó siguiendo las recomendaciones del fabricante, utilizando una referencia de tierra aislada respecto a la de entrada de 5 V, como se ilustra en la Figura 5, con el fin de preservar la integridad de la señal y minimizar la inyección de ruido en el sistema.

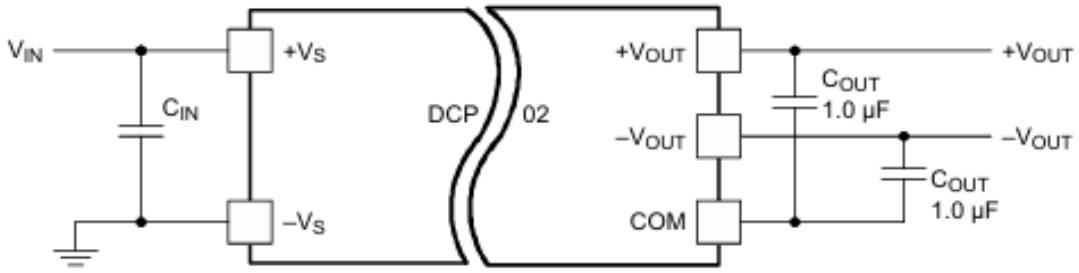


Figura 4. Conexión básica del chip de voltaje de salida dual.
Fuente: Datasheet DCP020515DU.

4.3. Diseño de la tarjeta SMU

La tarjeta SMU implementa en hardware los circuitos de medida, integrando en una sola placa las conexiones necesarias para la caracterización de diodos y transistores con el Analog Discovery 2.

El Analog Discovery 2 se conecta a la tarjeta mediante un conector de pines macho, desde el cual se distribuyen las líneas de generación de señal, las entradas de medición y la alimentación de 5V hacia las distintas zonas de la placa. Cada canal del equipo se asigna a una función específica: algunos actúan como generadores para aplicar barridos de tensión o corriente a los dispositivos bajo prueba, otros se reservan para la medición de los voltajes en los nodos de interés, y una línea adicional alimenta el módulo elevador DCP020515DU descrito en la sección 4.2.

El trazado de la tarjeta SMU se estructuró en tres secciones funcionales, cada una asociada a una familia de dispositivos, como se muestra en la figura

correspondiente a la organización interna de la tarjeta.

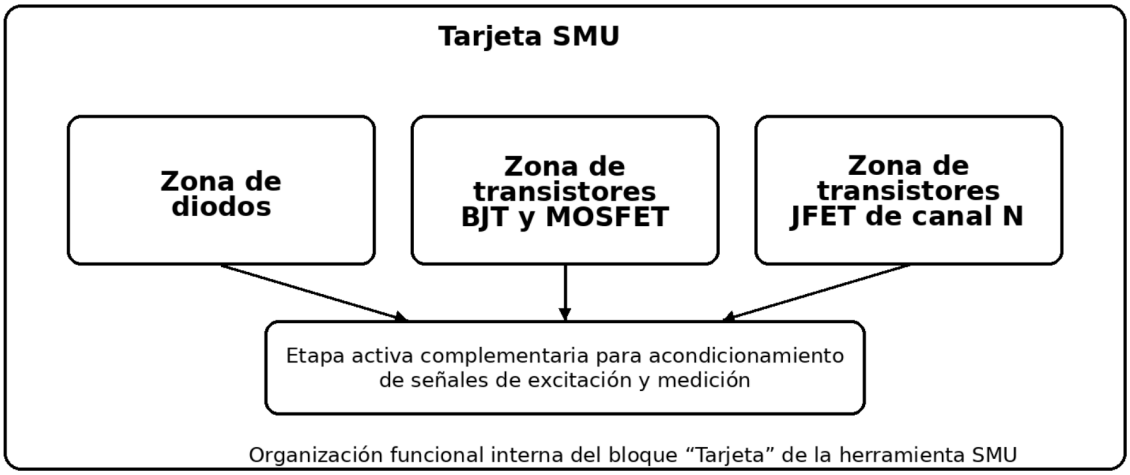


Figura 5. Organización funcional interna del bloque tarjeta.
Fuente: Elaboración propia.

1. Zona de diodos, destinada a la caracterización de diodos en polarización directa e inversa. En esta región se ubican los zócalos o pines para los diodos y las resistencias en serie, de modo que los barridos generados por el Analog Discovery 2 permitan reconstruir las curvas I–V correspondientes.
2. Zona de transistores BJT y MOSFET, agrupa los puntos de conexión y resistencias asociadas para transistores bipolares NPN y MOSFET de canal N. La disposición de las pistas facilita la implementación de las configuraciones de medida definidas previamente, tanto para curvas de salida como de transferencia.
3. Zona de transistores JFET de canal N, incluye los terminales y componentes necesarios para aplicar las configuraciones de medida de drenaje en función de VDS y VGS.

La tarjeta también integra una pequeña región dedicada a la etapa de amplificación basada en un amplificador operacional, alimentado a partir del módulo DCP020515DU. En el diseño de la PCB se reservaron las pistas y planos de alimentación correspondientes a ±15 V, manteniendo la referencia de tierra de este módulo aislada de la tierra de 5 V proveniente del Analog Discovery 2. Esta

separación tiene como objetivo reducir los acoplamientos indeseados y preservar la integridad de la señal. La disposición final de estas conexiones se muestra en la Figura 5.

4.4. Modo de operación configurable de la tarjeta electrónica SMU

La tarjeta electrónica SMU puede operar con dos esquemas de alimentación, seleccionables mediante un interruptor, lo que permite adaptar el rango de tensiones a las necesidades de cada prueba. En el modo estándar (5 V), la placa se alimenta directamente desde los generadores del Analog Discovery 2, lo cual es suficiente para la mayoría de las pruebas básicas de diodos y transistores.

Si se requiere un mayor margen de tensión se habilita el modo ampliado (±15 V), que pone en marcha el módulo DCP020515DU. Este convierte los 5 V de entrada a 15 V.

4.5. Proceso de medición y caracterización

El usuario conecta el Analog Discovery 2 a la PCB mediante los pines macho, inserta el dispositivo bajo prueba y coloca las resistencias necesarias. Desde la *app* de MATLAB se controlan los generadores de señal, se aplican voltajes de excitación y se miden las respuestas en tiempo real, para generar curvas características. Una vez realizadas las primeras mediciones, el usuario puede ajustar las condiciones de prueba y, si es necesario, activar la alimentación de 15 V.

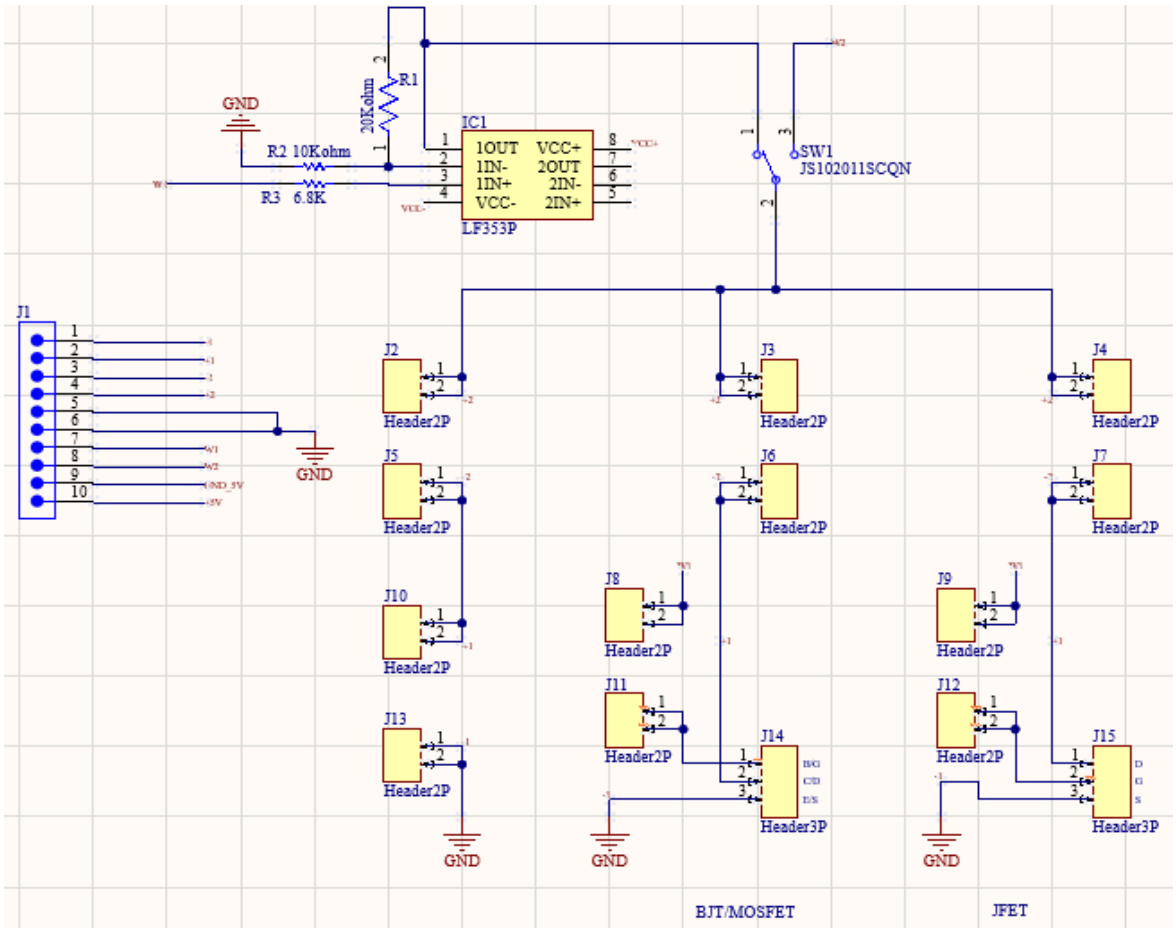


Figura 6. Esquemático general de la tarjeta electrónica.

Fuente: Elaboración propia.

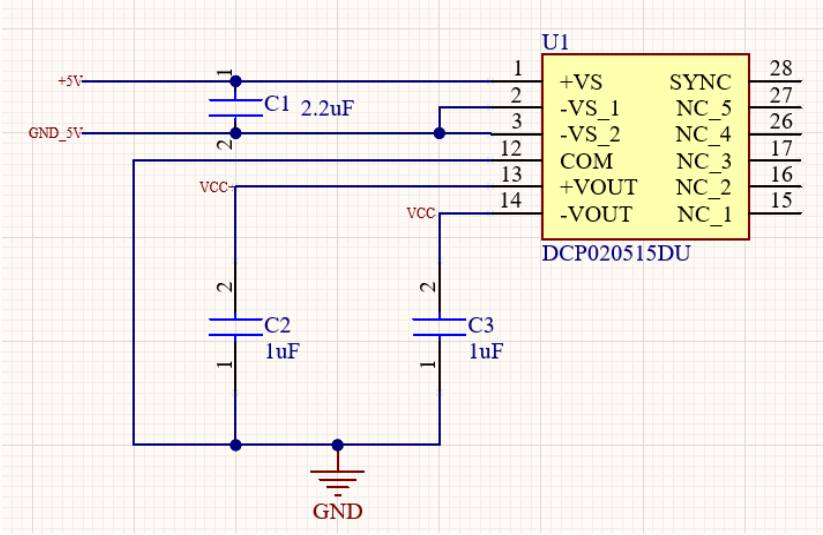


Figura 7. Esquemático del DCP020515DU.
Fuente: Elaboración propia.

En el diseño de esta tarjeta se consideraron los puntos de sujeción necesarios para fijarla dentro de la caja que la contendrá, asegurando su estabilidad durante el uso. Aunque las tarjetas electrónicas deben tener cada componente debidamente identificado, en este caso —dado su propósito educativo— se optó por una nomenclatura clara y orientada al aprendizaje, que facilite a los estudiantes ubicar los elementos en función del componente a conectar (resistencias, diodos o transistores) en cada zona.

Además, se implementó un plano de tierra extenso que cubre toda la superficie de la tarjeta, tanto en la capa superior como en la inferior, con el objetivo de asegurar una correcta conexión del circuito completo y reducir el ruido electromagnético. Estos planos pueden apreciarse en las figuras 7 y 8.

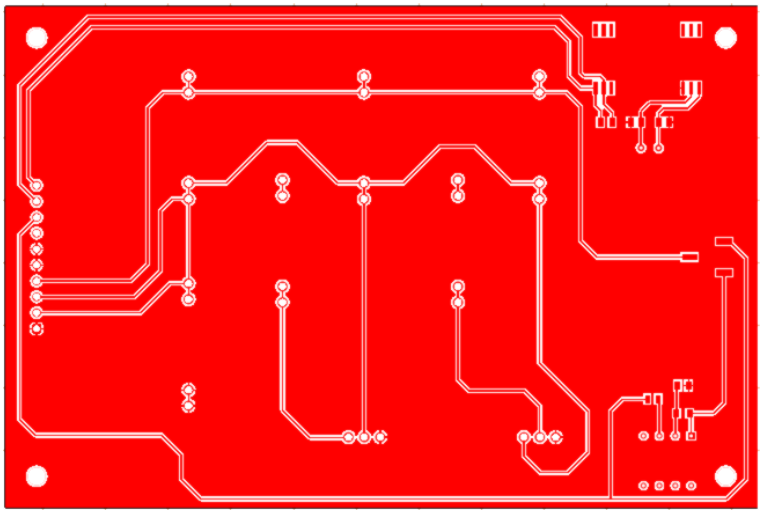


Figura 8. Plano de tierras de la parte superior de la tarjeta electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

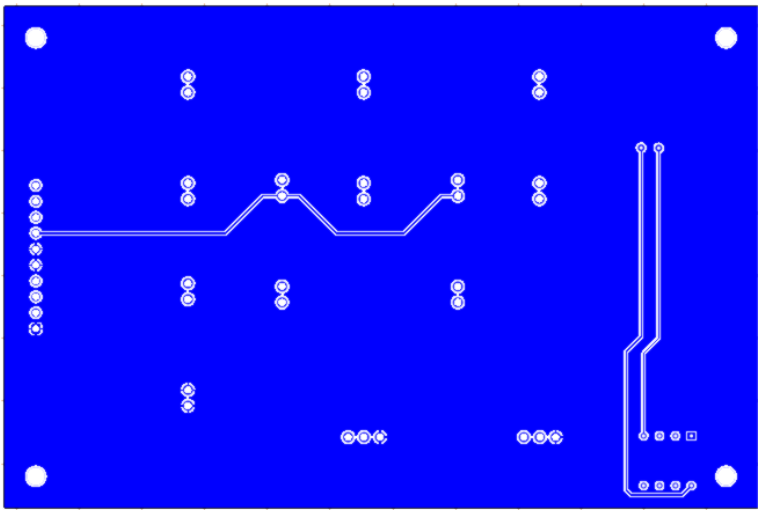


Figura 9. Plano de tierras de la parte inferior de la tarjeta electrónica.
Fuente: Elaboración propia.

La tierra correspondiente a los 5 V que alimentan el chip de voltaje de salida dual se mantuvo aislada del resto. Unirla al plano común podría introducir ruido en el sistema o limitar la posibilidad de conectar una fuente externa al Analog Discovery si el usuario lo requiere.

La PCB desarrollada se muestra en las figuras 9 y 10, donde se aprecia tanto su vista superior como la inferior. Sus dimensiones son de 8 cm por 12 cm.

Los orificios visibles corresponden a los espacios reservados para los pines hembra.

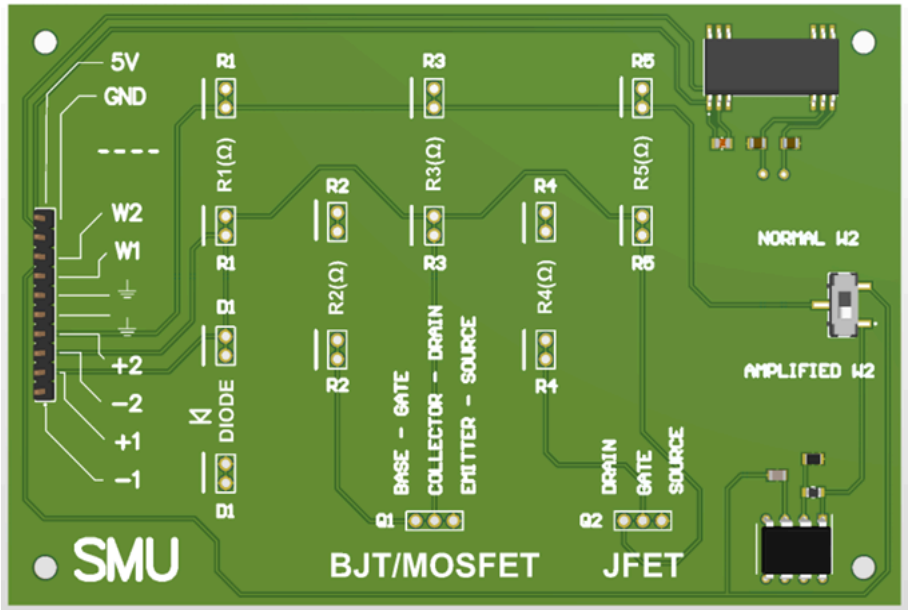


Figura 10. Parte superior de la PCB desarrollada.

Fuente: Elaboración propia.

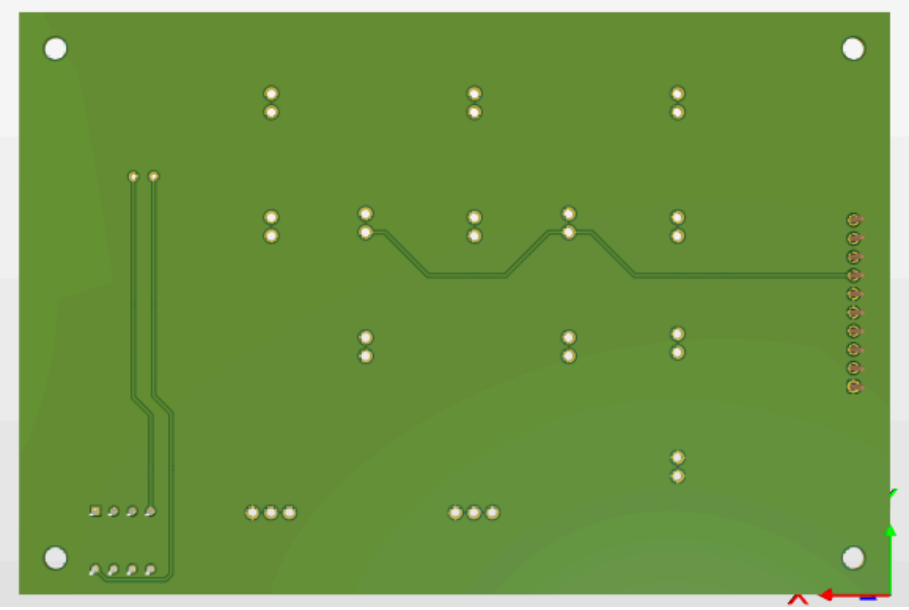


Figura 11. Parte inferior de la PCB desarrollada.

Fuente: Elaboración propia.

5. ALGORITMOS Y DESARROLLO DE LA APLICACIÓN DE LA SMU

Este capítulo presenta el desarrollo de la aplicación encargada de controlar la Unidad de Fuente y Medida (SMU) basada en el Analog Discovery 2, permitiendo la estimación semiautomática de las características eléctricas básicas de diodos y transistores. Se describen los algoritmos utilizados y las estrategias implementadas.

La aplicación fue desarrollada en *MATLAB App Designer*, e integra módulos para la configuración de pruebas, adquisición de datos, procesamiento de señales y visualización en tiempo real de curvas características. A través de la interfaz y sin necesidad de equipos de laboratorio especializados, el usuario puede definir parámetros de medición, visualizar los resultados y realizar análisis.

Antes de ejecutar cualquiera de los algoritmos principales, el sistema aplica tres procesos iniciales. El primero consiste en verificar la conexión entre el Analog Discovery 2 y la *app* de MATLAB. El segundo establece valores por defecto de forma automática, basados en configuraciones estándar que fueron definidas durante el desarrollo del trabajo.

El tercero incluye un algoritmo de activación de la fuente del Analog Discovery 2, que es independiente de los dos generadores integrados en el mismo. Esta separación alimenta el chip elevador que permite incrementar el voltaje de prueba de 5 V a 15 V para diodos rectificadores, schottky y leds.

Todos los algoritmos implementados siguen un esquema general de adquisición, procesamiento y análisis de datos.

5.1. Algoritmo Diodo Rectificador, Schottky y LED

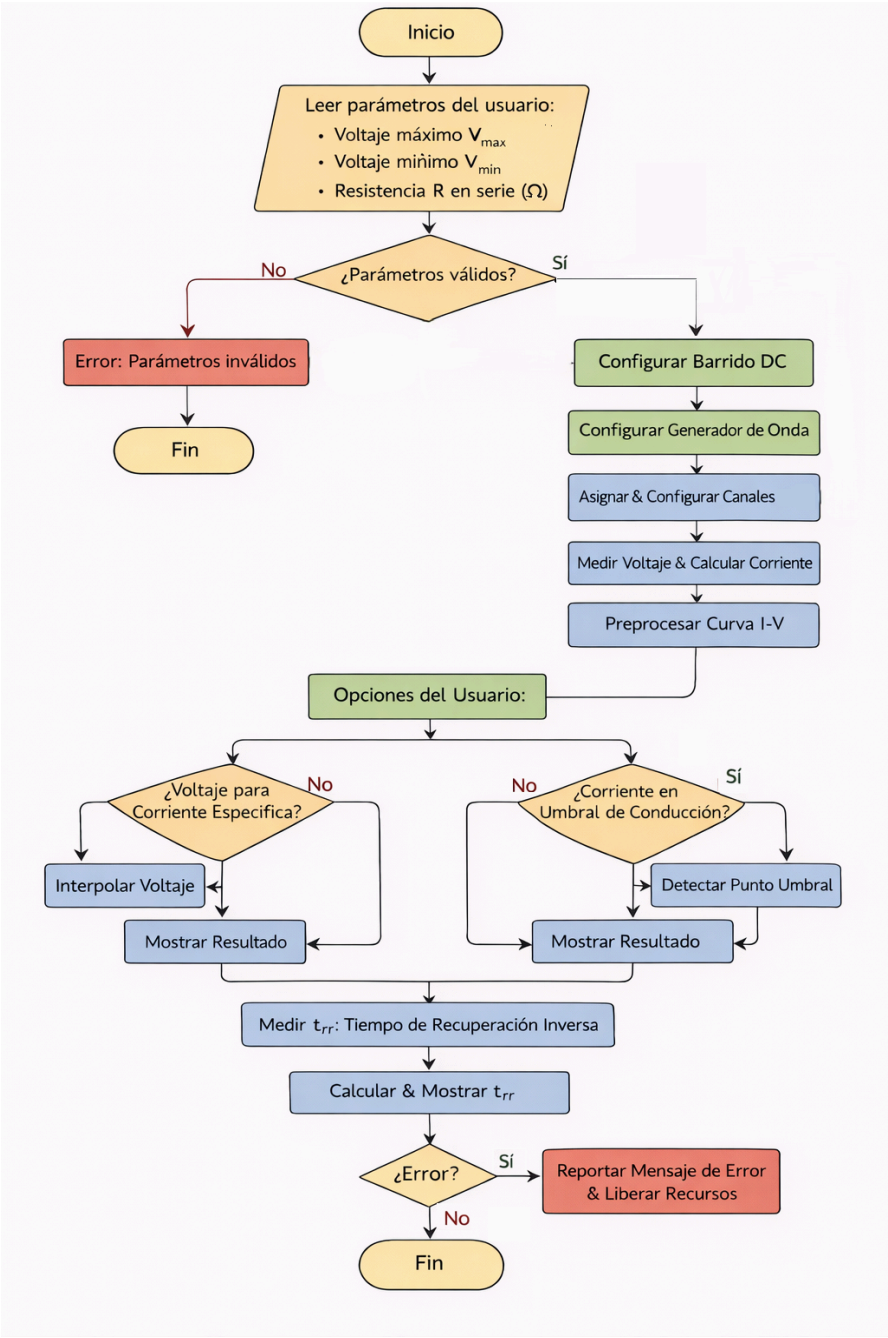


Figura 12. Diagrama de flujo general de algoritmos implementados de los diodos. Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo implementado en MATLAB tiene como objetivo obtener la curva característica corriente–voltaje (I–V) y estimar parámetros básicos de un diodo rectificador, diodo Schottky y LED, mediante un barrido DC generado con el Analog Discovery 2. El usuario ingresa como parámetros iniciales: (a) el voltaje máximo Vmax y el voltaje mínimo Vmin del barrido, y (b) la resistencia en serie R (en Ω) conectada con el diodo.

En la etapa inicial, el algoritmo valida los parámetros para garantizar un barrido correctamente definido y que no se excedan los límites de operación del Analog Discovery 2. En particular, se exige $R > 0\, y\, Vmax > Vmin$; si ambos valores son iguales (o si $Vmin \geq Vmax$), no existe un intervalo de barrido y, por tanto, la ejecución se detiene con un mensaje de error. Adicionalmente, se restringe el barrido a [−5,5] V debido a que el generador de forma de onda del AD2 opera en el rango de ±5 V.

Una vez validados los parámetros, el algoritmo configura el sistema de adquisición y asigna los canales: el canal de salida analógica AO1 genera el voltaje de barrido y dos canales de entrada analógica registran las magnitudes medidas. En la implementación, AI0 mide el voltaje sobre el diodo y AI1 mide el voltaje en la resistencia en serie. Con el voltaje en la resistencia, la corriente del diodo se calcula mediante la ley de Ohm, $ID = \frac{VR}{R}$, y se expresa en mA para su visualización.

El algoritmo contempla dos modalidades de prueba. En la primera se utiliza el generador de formas de onda y, en la segunda, se utiliza la fuente DC del Analog Discovery 2. Posteriormente, se aplica un procesamiento orientado a depurar la curva: se implementa un suavizado mediante media móvil usando *movmean* [20]. La media móvil es una técnica estándar para atenuar ruido aleatorio, aunque introduce el compromiso clásico entre reducción de ruido y pérdida de nitidez en cambios rápidos; además, la reducción de ruido aumenta con el número de puntos promediados [21].

Con datos consistentes, el algoritmo grafica la curva I–V y obtiene los parámetros básicos definidos en capítulos anteriores. El análisis se complementa con dos opciones disponibles en la interfaz: (i) interpolar el voltaje correspondiente a una corriente específica ingresada por el usuario, lo que permite estimar el punto de operación; y (ii) estimar el umbral de conducción a partir de la pendiente discreta de la curva, identificando el punto donde $\frac{dI}{dV}$ se aproxima a 1 y marcándolo sobre la gráfica.

Finalmente, el algoritmo estima el tiempo de recuperación inversa trr excitando el diodo con una señal cuadrada y registrando la respuesta temporal. La justificación física de esta estrategia se basa en que, al invertir la polaridad desde conducción directa hacia inversa, la corriente no se anula instantáneamente debido a la presencia de portadores minoritarios almacenados. Como consecuencia, aparece una corriente inversa transitoria durante un intervalo de almacenamiento ts y un intervalo de transición tt, definiéndose el tiempo de recuperación inversa como $trr = ts + tt$.

En esta implementación, se genera una señal cuadrada con amplitud de 5 V. El algoritmo identifica el instante de inversión a partir de un cambio brusco en la señal medida y define el final de la recuperación en el momento en que la corriente de recuperación inversa decae al 10% de su valor pico ($irr = 0.1\,IRRM$), conforme a la definición de trr usada en especificaciones de diodos [22].

En caso de producirse una excepción durante la ejecución, el sistema detiene el procedimiento, reporta el mensaje de error en la interfaz y libera los recursos para evitar bloqueos en adquisiciones posteriores.

5.2. Algoritmo Diodo Zener

Este algoritmo permite estimar, a partir de la curva característica I-V en polarización inversa, parámetros representativos del diodo Zener: la tensión de ruptura VZ, la corriente de la ruptura IZ, la corriente de fuga IR y una estimación de la impedancia dinámica en la región Zener RZ. El proceso inicia con la

definición, por parte del usuario, de los parámetros de prueba Vmax, Vmin y la resistencia serie R.

La elección de Vmax y Vmin debe considerar el rango de generación del instrumento y la necesidad de cubrir la región de interés del diodo. En esta implementación, la excitación se aplica mediante el canal de salida analógica (AO1) del Analog Discovery 2; por ello, el algoritmo restringe Vmax a valores menores o iguales a 5 V, de modo que el barrido permanezca dentro del rango de salida del generador de formas de onda (±5 V) [16]. Además, se verifica que Vmin sea estrictamente menor que Vmax, ya que el barrido requiere un intervalo no nulo ($Vmin \neq Vmax$) y una dirección definida de inicio a fin.

El parámetro Vmin se selecciona en valores negativos para asegurar que el barrido incluya una porción de la curva en inversa. En particular, el algoritmo requiere $Vmin <= -1\,V$. Esta condición permite observar la corriente inversa antes de la ruptura (zona de fuga) [18], [19].

La resistencia serie R limita la corriente durante la ruptura con un valor positivo ($R > 0$).

Una vez validados los parámetros, el sistema configura los canales del Analog Discovery 2, asignando AO1 como salida para el barrido y $\frac{AI0}{AI1}$como entradas para medir el voltaje en el diodo y el voltaje en la resistencia en serie, respectivamente. A partir del voltaje medido en la resistencia, se calcula la corriente mediante la ley de Ohm ($I = \frac{VR}{R}$). El sistema realiza una verificación automática antes de graficar y calcular parámetros.

El algoritmo identifica la región Zener evaluando únicamente los puntos con voltaje inverso ($V < 0$). En dicha región se calcula la pendiente discreta $\frac{\Delta I}{\Delta V}$ y se define el inicio de la ruptura como el primer punto en el que la pendiente supera un umbral relativo: el 10% de la pendiente máxima calculada en la porción inversa. En consecuencia, en este procedimiento, el aumento corresponde exactamente a la condición $\frac{\Delta I}{\Delta V} > 0.1 \cdot max(\frac{\Delta I}{\Delta V})$.

Con el índice de ruptura estimado, el algoritmo reporta los valores de VZ e IZ en el punto detectado y calcula la impedancia dinámica como la inversa de la pendiente local, es decir, $RZ \approx 1/(\frac{\Delta I}{\Delta V})$, equivalente a $\frac{dV}{dI}$en el entorno del punto [18], [19].

Finalmente, se grafica la curva I-V y, cuando se detecta la ruptura, se añaden referencias visuales, como una línea vertical en VZ y un marcador del punto utilizado para el cálculo RZ. En la interfaz se presentan los valores calculados (VZ, IZ, IR y RZ), lo que permite relacionar directamente el cambio de pendiente observado en inversa con los parámetros obtenidos.

5.3. Algoritmo Transistor BJT

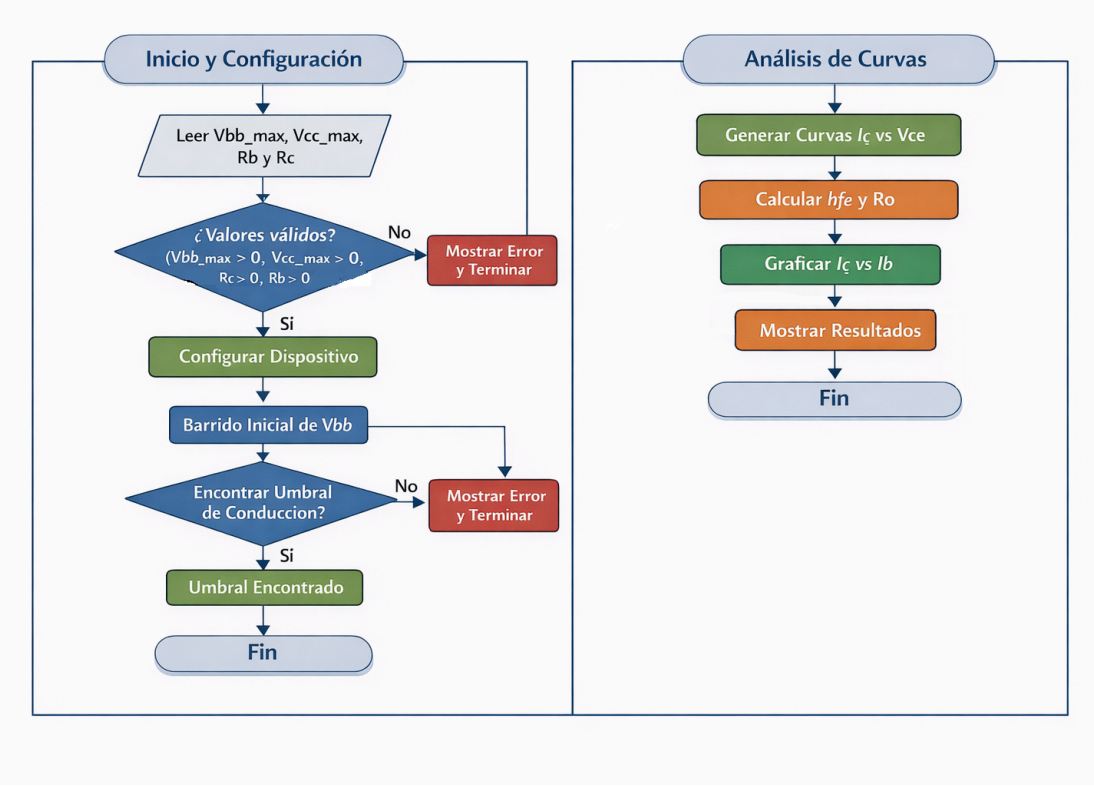


Figura 13. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor BJT.
Fuente: Elaboración propia.

El algoritmo implementado en MATLAB caracteriza algunos parámetros básicos de un transistor BJT en configuración de emisor común, obteniendo la familia de curvas de salida $Ic - Vce$ para distintos niveles de corriente de base Ib y la relación de transferencia $Ic - Ib$ en la región activa. La adquisición de datos se realiza mediante el Analog Discovery 2, el cual permite generar barridos de voltaje y registrar tensiones para calcular corrientes por ley de Ohm.

El proceso inicia con la lectura de los parámetros ingresados por el usuario: el voltaje máximo de base (Vbb_max), el voltaje máximo de alimentación del colector (Vcc_max) y las resistencias Rb y Rc. La elección de Vcc_max está condicionada por la capacidad del Analog Discovery 2 para generar señales analógicas, cuyo rango nominal de salida es de ±5 V. Por esta razón, el algoritmo restringe Vcc_max a un valor máximo de 5 V y rechaza valores superiores, evitando que el usuario defina condiciones no reproducibles con el instrumento [16].

En cuanto a Rb y Rc, su selección se orienta a limitar corriente. En primera instancia, se busca que la corriente de base máxima cumpla aproximadamente

$$Ib_max \approx \frac{(Vbb_max - Vbe)}{Rb}$$

utilizando la aproximación $Vbe \approx 0,7\ V$ para transistores de silicio en conducción. De forma análoga, la resistencia de colector se elige de manera que la corriente de colector esperada permanezca dentro de un rango de $Ic \approx \frac{Vrc}{Rc}$, donde Vrc es la caída de voltaje sobre Rc [18], [19].

Una vez capturados los parámetros, el sistema realiza una validación automática antes de configurar el dispositivo; se verifica que todos los valores sean positivos y que $Vcc_max \leq 5\ V$. Si la validación falla, el algoritmo presenta un mensaje de error en la interfaz y detiene la ejecución, evitando configuraciones fuera de rango o inconsistentes con las limitaciones del instrumento y del montaje.

Tras la validación, se inicializa el dispositivo y se asignan dos salidas analógicas: una para generar Vbb y otra para generar Vcc. En paralelo, se habilitan dos entradas analógicas: una para medir directamente Vce y otra para

medir el voltaje sobre Rc (Vrc), a partir del cual se calcula la corriente de colector mediante $Ic \approx \frac{Vrc}{Rc}$.

En el primer bloque, el algoritmo ejecuta un barrido preliminar de Vbb desde 0 hasta Vbb_max con Vcc = 0, con el fin de estimar un umbral operativo de conducción. En cada paso se calcula la corriente de base aproximada como

$$Ib = max\{0, (Vbb - 0,7)/Rb\}$$

El primer valor de Vbb que supera dicho umbral se registra como Vbb_thr y se utiliza para definir niveles de polarización de base para la familia de curvas. Si el barrido no alcanza el umbral, se considera que no se estableció conducción medible en el montaje y el sistema interrumpe la rutina, mostrando un mensaje de error.

En el segundo bloque, el algoritmo genera cinco curvas $Ic - Vce$ variando Vcc desde 0 hasta Vcc_max para cinco niveles de Vbb: (1) 0 V (corte), (2) Vbb_thr y (3) tres valores equiespaciados entre Vbb_thr y Vbb_max. La elección de cinco niveles responde a un compromiso entre representatividad y tiempo de adquisición, ya que permite observar el comportamiento desde el corte hasta el máximo nivel de excitación definido por el usuario, sin incrementar de manera excesiva la duración de la prueba; adicionalmente, mantiene la presentación en un número de curvas comparable con la representación estándar de familias $Ic - Vce$ por niveles discretos de Ib [23], [24].

A partir de estas mediciones, el algoritmo identifica valores máximos de Ic y Vce dentro del conjunto de mediciones y calcula dos parámetros adicionales. En primer lugar, estima la ganancia de corriente en DC (hFE o β) como la razón entre la corriente de colector y la corriente de base para la curva de mayor excitación (último nivel de Vbb), lo cual es consistente con la definición de ganancia en emisor común [18]. En segundo lugar, estima una resistencia de salida efectiva Ro a partir de la pendiente de la característica de salida ($\frac{\Delta Vce}{\Delta Ic}$) en la región de operación evaluada [23].

En un tercer bloque, el algoritmo obtiene la relación $Ic - Ib$ fijando Vcc en 5 V, valor máximo permitido por la salida analógica, y realizando un nuevo barrido de Vbb. En cada paso se calcula Ib por el modelo resistivo descrito y se estima Ic a partir del voltaje medido en Rc. Los pares (Ib, Ic) se almacenan y se grafican para visualizar la dependencia de Ic respecto a Ib en la región activa, complementando la interpretación de las curvas de salida [24].

Finalmente, el sistema presenta en la interfaz los resultados calculados, que incluyen el umbral operativo, los máximos de Ic y Vce, la ganancia hFE y la resistencia Ro, y libera los recursos del Analog Discovery 2 para evitar bloqueos del dispositivo en ejecuciones posteriores. Cualquier excepción durante el proceso es capturada por la estructura *try–catch* y reportada al usuario a través de un mensaje de error.

5.4. Algoritmo Transistor J-FET

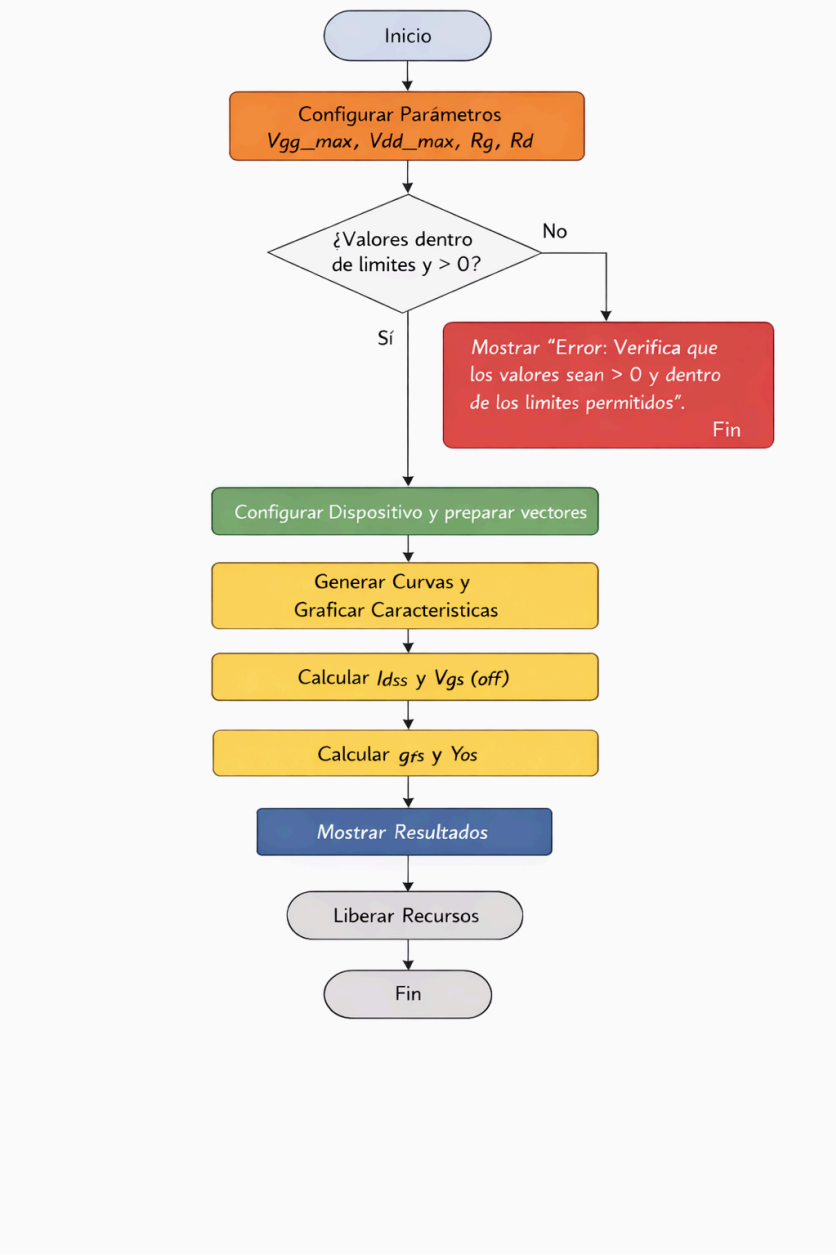


Figura 14. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor JFET.
Fuente: Elaboración propia.

Para iniciar la prueba, el usuario define cuatro parámetros del montaje: el voltaje máximo de compuerta Vgg, el voltaje máximo de drenaje Vdd, la resistencia de compuerta Rg y la resistencia de drenaje Rd. La elección de Vgg y Vdd debe

respetar simultáneamente las capacidades de generación del Analog Discovery 2 (±5 V). En un JFET de canal-n, la operación habitual se realiza con la unión compuerta-fuente polarizada en inversa; por ello, el barrido de VGS se programa en el rango [0, VGS(off)] con $VGS(off) < 0$, para que la corriente de compuerta sea despreciable.

Respecto a las resistencias, Rg se selecciona como un valor alto con el propósito de limitar cualquier corriente transitoria hacia la compuerta. Por su parte, Rd se dimensiona para limitar la corriente máxima esperada de drenaje. Con los parámetros ingresados, el sistema valida automáticamente la configuración antes de iniciar el barrido. Esta validación incluye la verificación de positividad de Rg y Rd, así como la verificación de que |Vgg| y |Vdd| no superen el máximo programable del equipo. Si alguna condición se incumple, el proceso se detiene y la interfaz informa el motivo para que el usuario ajuste el montaje o los parámetros.

Tras la validación, el algoritmo configura el Analog Discovery 2 y asigna explícitamente los canales, asignación que se mantiene fija durante toda la adquisición: una salida analógica (por ejemplo, AO0) genera Vgg, una segunda salida (AO1) genera Vdd, una entrada analógica (AI0) mide VDS directamente sobre el dispositivo y otra entrada (AI1) mide la caída en Rd (Vrd) para calcular la corriente de drenaje como $ID = \frac{Vrd}{Rd}$.

La adquisición se estructura en dos barridos acoplados. En primer lugar, se construye un conjunto discreto de valores de Vgg (cinco niveles equiespaciados) para generar una familia de curvas $ID - VDS$ representativa. El uso de cinco curvas responde a la necesidad de capturar la tendencia completa de la modulación por VGS (desde VGS = 0 hasta cercanías de VGS(off)), al mismo tiempo que se mantienen tiempos de prueba razonables [18].

Durante este proceso, cada cambio de consigna se acompaña de un tiempo breve de estabilización. A partir de las curvas depuradas, se estiman los parámetros del JFET. La IDSS se obtiene como el valor de ID en la curva

correspondiente a VGS = 0 bajo condiciones de saturación. El voltaje de corte VGS(off) se determina desde la curva de transferencia, identificando el primer nivel de VGS para el cual ID tiende a cero. La transconductancia gm ($\frac{gfs}{yfs}$) se calcula como la pendiente local $\frac{dID}{dVGS}$ en la curva $ID - VGS$ alrededor del punto de operación seleccionado. La admitancia de salida yos se estima a partir de la pendiente $\frac{dID}{dVGS}$ de la familia $ID - VDS$ en una región cercana a la saturación para VGS constante, y a partir de esta se deriva $rd = \frac{1}{yos}$ [19].

Finalmente, el sistema grafica la familia de curvas $ID - VDS$ para los cinco niveles de VGS, así como la curva de transferencia $ID - VGS$. En la interfaz se muestran tanto los parámetros calculados como las gráficas de las curvas. Una vez concluida la visualización, el algoritmo libera los recursos del dispositivo de adquisición y finaliza la ejecución.

5.5. Algoritmo transistor MOSFET de enriquecimiento

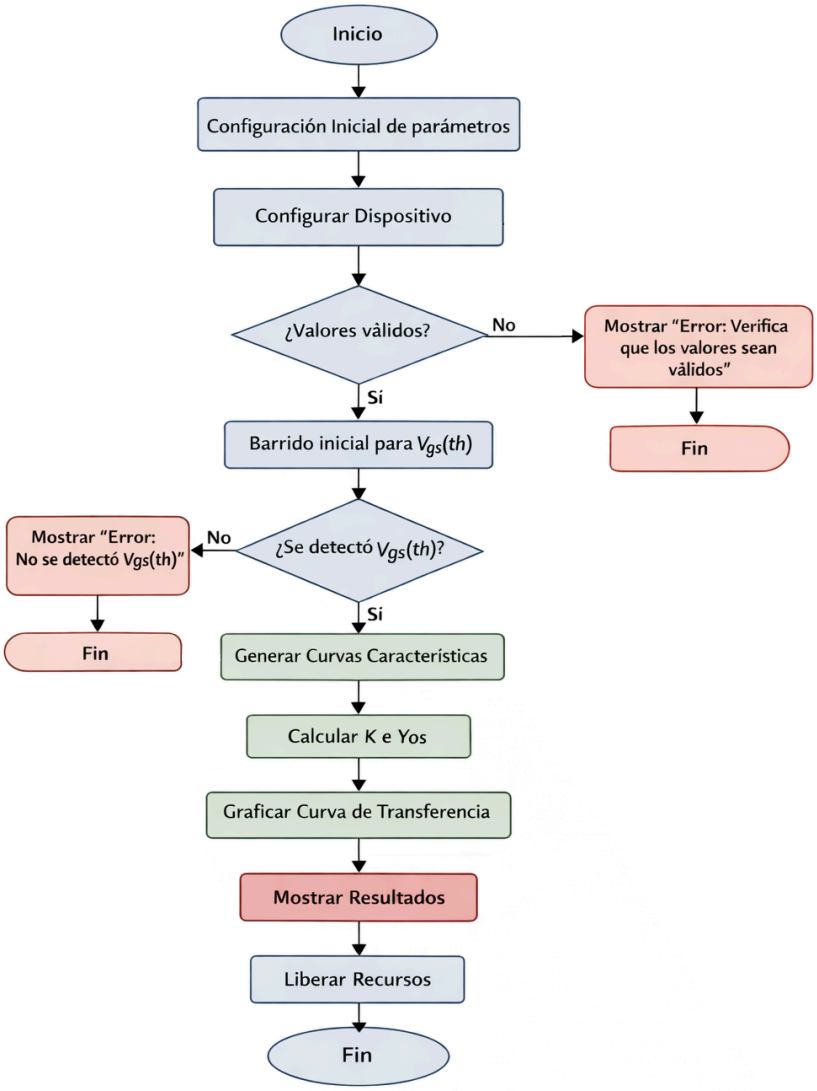


Figura 15. Diagrama de flujo de algoritmo del transistor MOSFET de enriquecimiento.

Fuente: Elaboración propia.

El usuario define cuatro parámetros de entrada: el voltaje máximo de compuerta Vggmax, el voltaje máximo de drenaje Vddmax, la resistencia en serie de compuerta Rg y la resistencia de drenaje Rd. La elección de Vggmax y Vddmax debe respetar las capacidades de generación del Analog Discovery 2 (±5 V) [16], [27]. En un MOSFET de canal-n de enriquecimiento, la operación típica se realiza

con $VGS \geq 0$; por tanto, el barrido de compuerta se programa en el intervalo [0, Vggmax] con $Vggmax > 0$, procurando que el rango incluya la región de transición hacia conducción.

En términos del circuito de medición, la corriente de drenaje se calcula a partir de la caída de tensión en Rd medida en Vrd, conforme a $ID = \frac{Vrd}{Rd}$. Con los parámetros ingresados, el sistema realiza una validación automática previa a la adquisición. Esta validación verifica: positividad de Rg y Rd; que Vggmax y Vddmax no superen el máximo programable del Analog. Tras la validación, el algoritmo configura y asigna los canales de generación y adquisición: una salida analógica aplica Vgg, una segunda salida aplica Vdd; una entrada analógica mide VDS sobre el MOSFET, y otra entrada mide Vrd sobre Rd para calcular ID. Esta asignación se mantiene fija durante toda la prueba.

Antes de generar la familia completa de curvas, se ejecuta un barrido preliminar de compuerta con Vdd fijado a un valor constante dentro del rango permitido. El objetivo de este paso es estimar un valor operativo de VGS(th) y evitar adquisiciones extensas en regiones donde el MOSFET permanece apagado. En hojas de datos, VGS(th) se define como la tensión compuerta-fuente para la cual la corriente de drenaje alcanza un valor especificado [28]. En concordancia con esta práctica, el algoritmo identifica VGS(th) como el primer valor de VGS para el cual ID supera un umbral IDth y se mantiene en incremento en muestras consecutivas. Si el barrido no alcanza ese umbral, el sistema interrumpe la ejecución y solicita incrementar Vggmax.

Una vez estimado el umbral, el algoritmo define los niveles de compuerta para construir la familia de curvas $ID - VDS$. En particular, se seleccionan cinco valores de VGS equiespaciados en el intervalo [VGS(th), Vgg,max]. Para cada nivel de VGS, se realiza un barrido de Vdd desde 0 hasta Vddmax, lo que permite describir la transición desde la región óhmica hacia la región de saturación.

Durante la adquisición, cada cambio de consigna incorpora un tiempo breve de estabilización para evitar registrar transitorios. [29], [30]. Luego se calculan

parámetros del MOSFET. La corriente máxima de drenaje IDmax y el voltaje máximo VDSmax se obtienen como máximos observados dentro del barrido. La constante de transferencia K se estima a partir del modelo cuadrático de conducción en saturación del MOSFET ideal, donde

$$ID \approx K\,(V_GS\ -\ V_T)2\ \ para\, VGS\ >\ VT$$

siendo VT el voltaje umbral del dispositivo [19]. En la práctica, la estimación se realiza seleccionando puntos en región de saturación (VDS suficientemente alto para el nivel de VGS) y ajustando el modelo por regresión a los datos experimentales.

Asimismo, se evalúa la admitancia de salida yos en saturación, definida operativamente como la pendiente incremental $yos\ = \frac{\partial ID}{\partial VDS}$ para VGS constante en la región de saturación, y se deriva la resistencia de salida $ro \approx \frac{1}{yos}$, asociada a la modulación de longitud de canal. Esta métrica se estima seleccionando un tramo de VDS en saturación donde la variación de ID con VDS es aproximadamente lineal y calculando la pendiente mediante ajuste lineal [31].

Finalmente, el sistema grafica la familia de curvas $ID - VDS$ para los cinco niveles de VGS y la curva de transferencia $ID - VGS$. Por último, el algoritmo libera los recursos y finaliza la ejecución, quedando listo para una nueva medición.

6. RESULTADOS

Todas las pruebas y resultados presentados a continuación se obtuvieron mediante dos esquemas de medición: la SMU desarrollada, integrada con el Analog Discovery 2 y controlada desde una aplicación en MATLAB App Designer, y mediciones de referencia realizadas en el laboratorio de electrónica de la Universidad del Valle, que cuenta con fuentes de alimentación de banco, osciloscopio y multímetro digital. Los resultados se interpretan como mediciones experimentales en entorno académico y su exactitud queda limitada por las especificaciones nominales de los equipos y componentes utilizados.

En particular, esta limitación se relaciona con la tolerancia de los resistores utilizados y la resolución y exactitud de los instrumentos de medida. Por ejemplo, el uso de una resistencia nominal de 1 kΩ con tolerancia del 5 % implica un valor real comprendido entre 950 Ω y 1050 Ω, lo que altera la corriente de polarización y, en consecuencia, la estimación de la curva característica. De forma análoga, la resolución finita en la medición de voltaje y corriente introduce incertidumbre en la reconstrucción de curvas I–V y en la obtención de parámetros derivados. En este sentido, los resultados reportados corresponden a mediciones experimentales orientadas a la caracterización en un contexto académico y no a una evaluación metrológica de alta precisión.

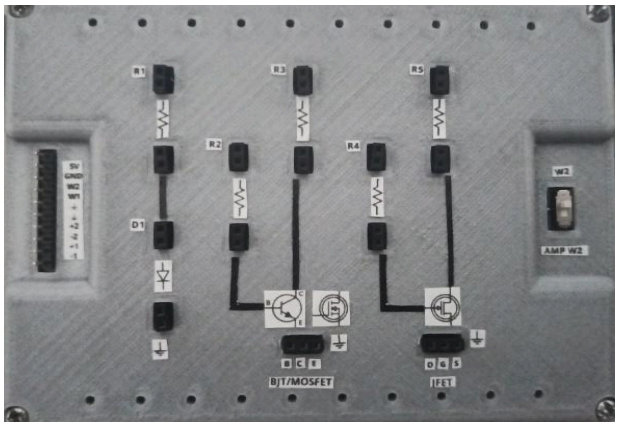


Figura 16. SMU.
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15 muestra la tarjeta SMU montada en su respectiva carcasa de protección, empleada durante el proceso experimental. Esta tarjeta actúa como plataforma de conexión y enrutamiento de señales entre el dispositivo bajo prueba y el Analog Discovery 2, lo que permite aplicar de manera repetible las configuraciones de prueba definidas en la aplicación.

En cuanto a las condiciones de polarización, en el esquema SMU–AD2 la excitación se aplicó mediante los generadores/salidas del Analog Discovery 2, con barridos de tensión dentro de sus capacidades de operación (salida de hasta ±5 V con una corriente de 10 mA). Bajo estas condiciones, las corrientes alcanzadas se mantuvieron típicamente en el orden de los miliamperios, dadas las limitaciones de excitación y las resistencias serie empleadas.

Por su parte, en el esquema de laboratorio tradicional, la polarización se realizó con fuentes DC de banco, mientras que el registro de magnitudes eléctricas se apoyó en el multímetro. Este montaje permite contrastar la coherencia de las curvas y parámetros obtenidos por la SMU bajo un entorno experimental estándar de laboratorio académico.

Respecto a la comparación con hojas de datos, es importante aclarar que parámetros como la corriente máxima suelen presentarse en los datasheets como ratings máximos absolutos (por ejemplo, 1 A para diodos 1N400x a 25 °C) o bajo condiciones de prueba específicas que no coinciden con las limitaciones del sistema SMU–AD2 ni con los puntos de operación empleados en este trabajo. En este documento, cuando se reporte ese valor en la tabla, debe interpretarse únicamente como límite nominal del componente, mientras que el valor experimental debe denominarse como corriente máxima alcanzada bajo las condiciones de prueba, siendo comparable entre SMU y laboratorio.

Finalmente, con el objetivo de fortalecer el análisis cuantitativo, el desempeño de la SMU se evalúa calculando el error respecto a la medición de laboratorio. Cabe resaltar que, para cada referencia comercial evaluada, los valores consolidados reportados en este apartado corresponden al promedio de las mediciones realizadas sobre tres (3) dispositivos de la misma referencia, con el

propósito de reducir la dispersión inherente entre componentes y obtener resultados más representativos. Adicionalmente, en las subsecciones siguientes se presentan los resultados individuales obtenidos mediante la aplicación desarrollada en MATLAB, donde se evidencian las curvas características asociadas y los parámetros medidos o estimados por el sistema, como soporte visual y cuantitativo del proceso de validación experimental.

6.1. Algoritmo para diodo rectificador, Schottky y LED

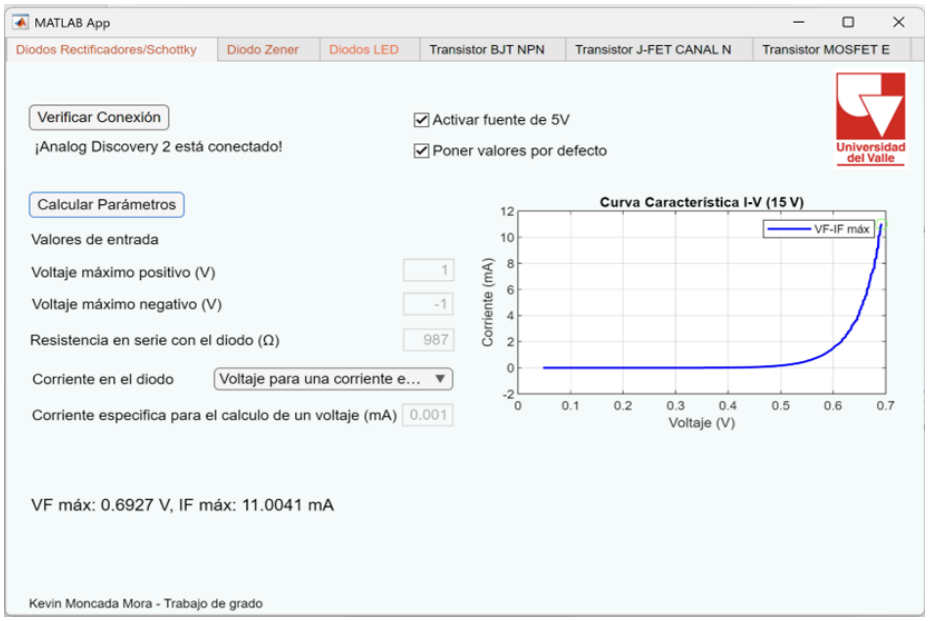


Figura 17. Diodo rectificador.
Fuente: Elaboración propia.

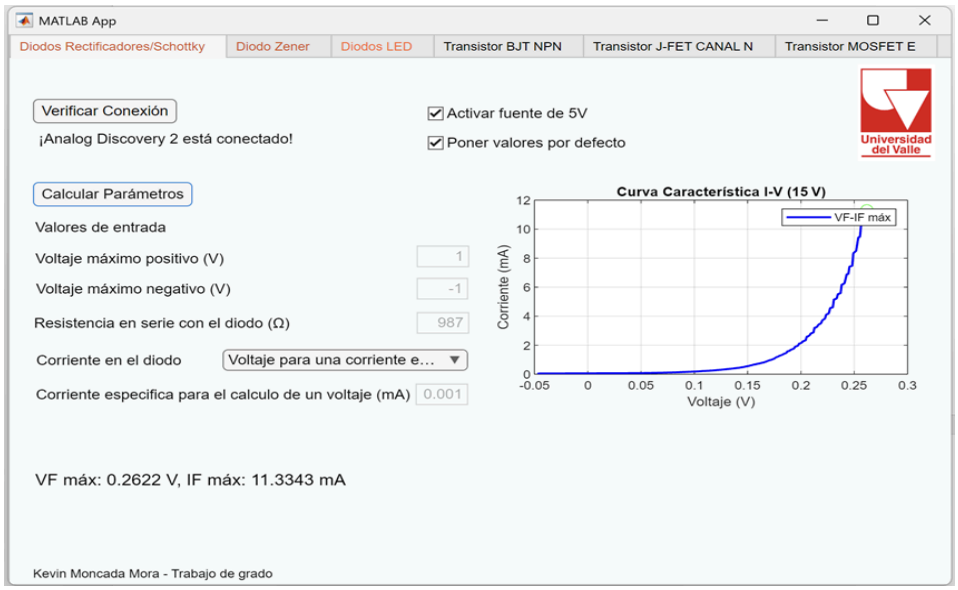


Figura 18. Diodo Schottky.

Fuente: Elaboración propia.

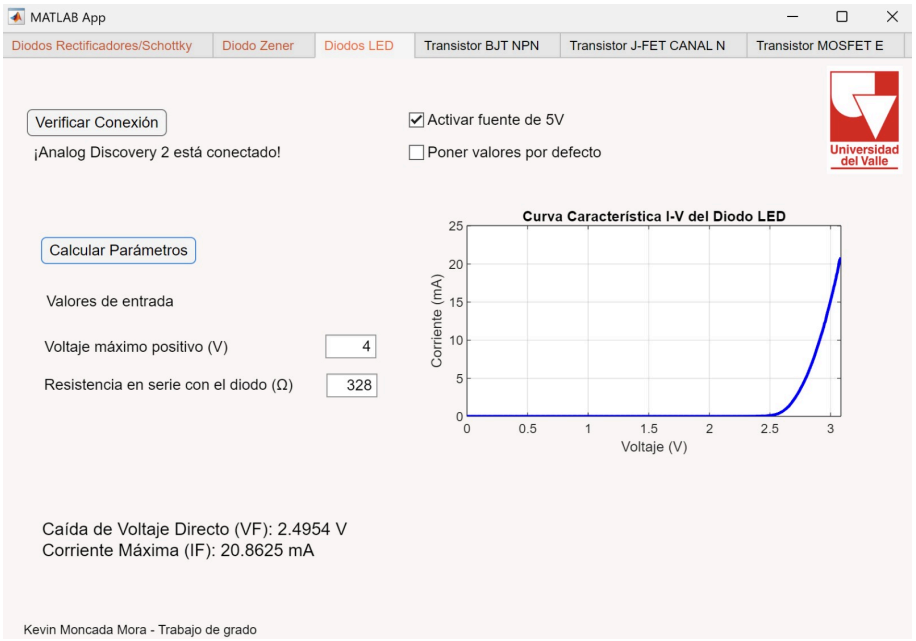


Figura 19. Diodo LED.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de los diodos rectificadores (1N4004 y 1N4007), las caídas de tensión directa medidas se ubican alrededor de 0,69–0,71 V, con diferencias

pequeñas entre SMU y laboratorio, lo que evidencia buena repetibilidad en región de conducción directa. La corriente de prueba estuvo en el orden de los miliamperios, por debajo del régimen nominal de operación (1 A promedio), por lo que es esperable observar valores de VF que dependen fuertemente del punto de operación y de la resistencia serie total del montaje.

Para los diodos Schottky (1N5817 y 1N5819), las mediciones reflejan la principal ventaja de esta tecnología: menores tensiones directas respecto a diodos PN en el mismo rango de corriente. Los valores de VF obtenidos se mantuvieron por debajo de los máximos típicamente especificados en hoja de datos, y la comparación entre SMU y laboratorio arrojó diferencias relativamente pequeñas, atribuibles principalmente a la variación del punto de operación (IF), al efecto de la resistencia serie.

En los LED (rojo y azul) se observó el comportamiento esperado de conducción directa. El LED rojo presentó $VF \approx 1,78–1,91\,V$, mientras que el LED azul mostró valores mayores, $VF \approx 2,50–2,92\,V$. Las corrientes medidas se mantuvieron en el orden de 20–23 mA, cercano a la condición nominal típica de operación. Las diferencias entre SMU y laboratorio fueron moderadas, especialmente en el LED azul, dependiente de las variaciones del punto de operación (corriente real y resistencia serie del montaje). En general, los resultados son consistentes y representativos del funcionamiento normal de estos dispositivos.

Tabla 3. Tabla de resultados del algoritmo para diodo rectificador, Schottky y LED.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
Diodo rectificador	1N4004	Voltaje directo, VF (V)	0,69 V	0,70 V	VF (máx) = 1,0 V @ IF = 1 A
Diodo rectificador	1N4004	Corriente máxima, If (mA)	11,84 mA	12,38 mA	IO(AV) = 1 A (corriente promedio rectificada)
Diodo rectificador	1N4004	Tiempo de recuperación, trr (µs)	30 µs	—	trr (típ.) = 20 µs (según condiciones de prueba del fabricante)
Diodo rectificador	1N4007	Voltaje directo, VF (V)	0,70 V	0,71 V	VF (máx) = 1,0 V @ IF = 1 A
Diodo rectificador	1N4007	Corriente máxima, If (mA)	11,29 mA	12,18 mA	IO(AV) = 1 A (corriente promedio rectificada)
Diodo rectificador	1N4007	Tiempo de recuperación, trr (µs)	30 µs	—	trr = 20 µs
Diodo Schottky	1N5817	Voltaje directo, VF (V)	0,31 V	0,33 V	VF (máx) = 0,45 V @ IF = 1 A
Diodo Schottky	1N5817	Corriente máxima, If (mA)	25,10 mA	28,20 mA	IF(AV) = 1 A (rating)
Diodo Schottky	1N5819	Voltaje directo, VF (V)	0,26 V	0,30 V	VF (máx) = 0,60 V @ IF = 1 A
Diodo Schottky	1N5819	Corriente máxima, If (mA)	11,33 mA	12,98 mA	IF(AV) = 1 A (rating)
LED	Rojo	Voltaje directo, VF (V)	1,79 V	1,91 V	Típico: VF ≈ 1,7–2,2 V @ IF = 20 mA (depende del LED)
LED	Rojo	Corriente máxima, If (mA)	20,17 mA	21,29 mA	Típico: IF(cont.) ≈ 20 mA (depende del LED)
LED	Azul	Voltaje directo, VF (V)	2,50 V	2,92 V	Típico: VF ≈ 2,4–3,6 V @ IF = 20 mA (depende del LED)
LED	Azul	Corriente máxima, If (mA)	20,86 mA	23,41 mA	Típico: IF(cont.) ≈ 20 mA (depende del LED)

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Algoritmo para diodo Zener

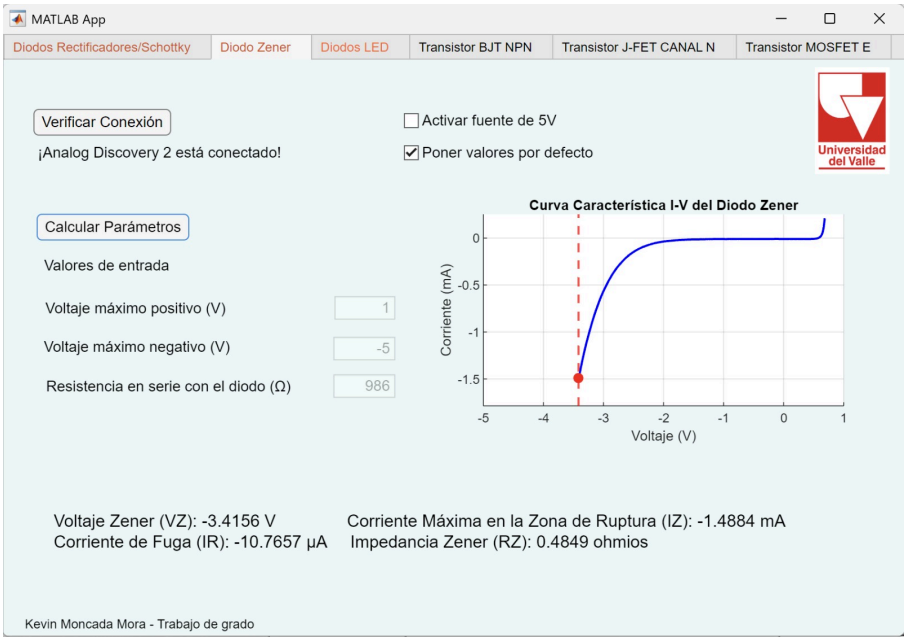


Figura 20. Diodo Zener.

Fuente: Elaboración propia.

En los diodos Zener, los resultados con la SMU son consistentes con el comportamiento esperado. Para el Zener nominal 3,9 V se obtuvo VZ = 4,0962 V y para el de 4,7 V VZ = 4,6161 V, ambos valores dentro de los rangos típicos reportados en hoja de datos, lo que confirma que la SMU identifica adecuadamente la región de ruptura/regulación. Además, las corrientes de fuga IR medidas (del orden de µA) son razonables en polarización inversa y los valores bajos de RZ reflejan la baja pendiente ΔV/ΔI característica en la zona Zener.

Tabla 4. Tabla de resultados del algoritmo para diodo Zener.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
Diodo Zener	3,9 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,10 V	4,01 V	VZ = 3,7–4,1 V @ IZT = 5 mA
Diodo Zener	3,9 V	Corriente de ruptura, IZ (mA)	8,16 mA	_	IZT = 5 mA (corriente de prueba para VZ) IZ(max) ≈ 500 mW / 3,9 V ≈ 128 mA
Diodo Zener	3,9 V	Corriente de fuga, IR (µA)	11,11 µA	_	IR (máx) = 20 µA @ VR = 1 V, 25°C (≤ 40 µA @ 150°C)
Diodo Zener	3,9 V	Impedancia Zener, RZ (Ω)	0,48 Ω	_	ZZ (máx) = 85 Ω @ IZT = 5 mA ZZK (máx) = 600 Ω @ 1 mA
Diodo Zener	4,7 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,62 V	4,75 V	VZ = 4,4–5,0 V @ IZT = 5 mA
Diodo Zener	4,7 V	Corriente de ruptura, IZ (mA)	3,33 mA	_	IZT = 5 mA (corriente de prueba para VZ) IZ(max) ≈ 500 mW / 4,7 V ≈ 106 mA
Diodo Zener	4,7 V	Corriente de fuga, IR (µA)	9,13 µA	_	IR (máx) = 20 µA @ VR = 1 V, 25°C (≤ 10 µA @ 150°C)
Diodo Zener	4,7 V	Impedancia Zener, RZ (Ω)	0,91 Ω	_	ZZ (máx) = 60 Ω @ IZT = 5 mA ZZK (máx) = 600 Ω @ 1 mA

Fuente: Elaboración propia.

6.3. Algoritmo para transistor BJT

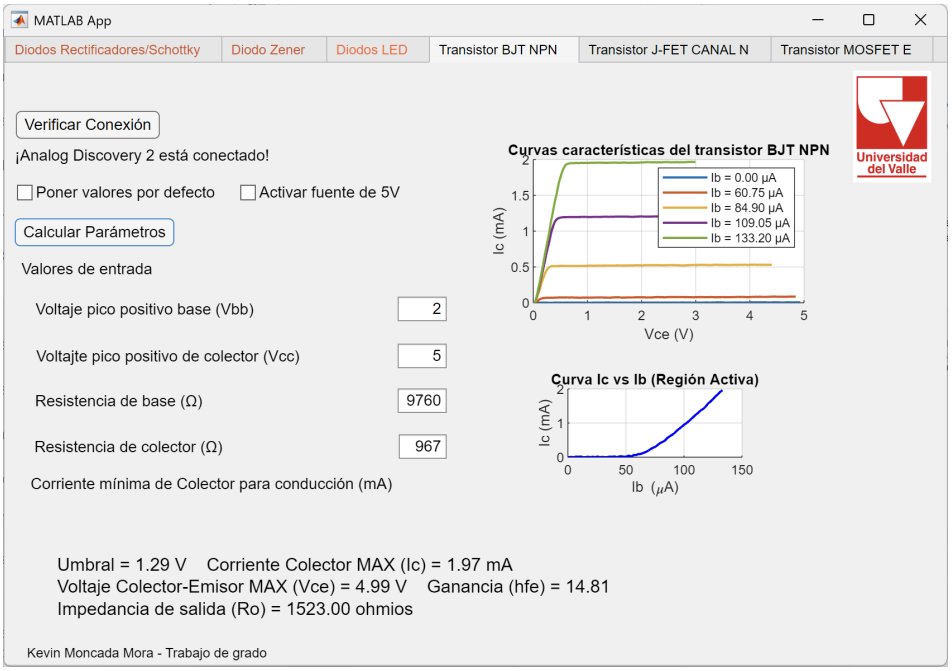


Figura 21. Transistor BJT.
Fuente: Elaboración propia.

En los transistores BJT (TIP31C y TIP42C), las mediciones muestran un comportamiento acorde con la operación en conducción y saturación: las tensiones asociadas a VCE(sat) se encuentran en el orden de 1–1,4 V en los puntos evaluados y la comparación SMU–laboratorio evidencia diferencias atribuibles al control de la corriente de base/condición de excitación. Para el TIP31C, la ganancia hFE medida se mantuvo en el rango mínimo esperado, lo que respalda la consistencia del procedimiento en región activa bajo la condición de prueba implementada. En general, los resultados confirman la sensibilidad del BJT al sesgo de base y a la selección del punto de operación, aspectos que deben reflejarse explícitamente cuando se usan parámetros experimentales para modelado.

Tabla 5. Tabla de resultados del algoritmo para transistor BJT.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
Transistor BJT	TIP31C	Vce (umbral) (V)	0,99 V	_	VCE(sat) (máx) = 1,2 V @ IC = 3 A, IB = 375 mA
Transistor BJT	TIP31C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,97 mA	5,14 mA	IC (máx) = 3 A
Transistor BJT	TIP31C	hFE (ganancia)	25,81	_	hFE (mín) = 25 @ VCE = 4 V, IC = 1 A hFE = 10–50 @ VCE = 4 V, IC = 3 A
Transistor BJT	TIP31C	Ro (impedancia de salida) (Ω)	1523 Ω	_	No especificado en hoja de datos
Transistor BJT	TIP42C	Vce (umbral) (V)	1,31 V	_	VCE(sat) (máx) = 1,5 V @ IC = 6 A, IB = 600 mA
Transistor BJT	TIP42C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,85 mA	4,95 mA	IC (máx) = 6 A
Transistor BJT	TIP42C	Ro (impedancia de salida) (Ω)	1480 Ω	_	No especificado en hoja de datos

Fuente: Elaboración propia.

6.4. Algoritmo para transistor JFET

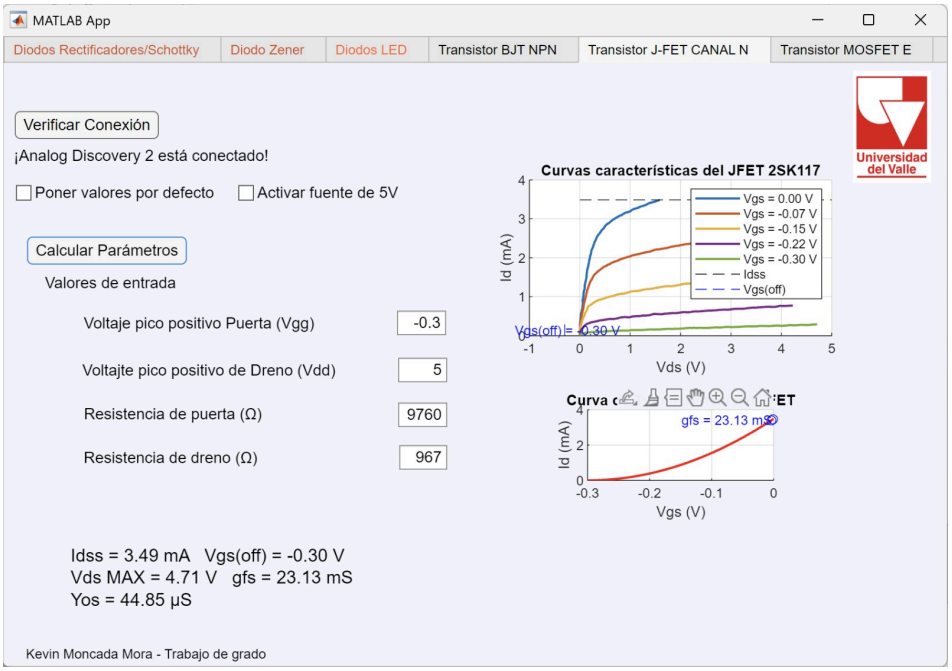


Figura 22. Transistor JFET.
Fuente: Elaboración propia.

En la caracterización del JFET 2SK117 se observó el comportamiento esperado de un dispositivo controlado por tensión de compuerta, donde la corriente de drenaje disminuye al incrementar la polarización inversa VGS. El parámetro de corte VGS(off) se midió alrededor de −0,30 V con la SMU y −0,35 V en el montaje de laboratorio, confirmando la transición a la región de corte para valores negativos de VGS. Asimismo, la corriente IDSS a VGS = 0 se obtuvo del orden de 3,49–3,55 mA, lo que evidencia una conducción consistente en ausencia

de polarización de compuerta y una dispersión reducida entre métodos de medida para el punto de operación evaluado.

Las diferencias SMU–laboratorio en VGS(off) e IDSS fueron pequeñas y se atribuyen principalmente a la sensibilidad del JFET y las condiciones de polarización. En términos de modelado, los valores obtenidos permiten representar el comportamiento de primer orden mediante la ecuación de Shockley, empleando IDSS y VGS(off) como parámetros base para estimar la corriente ID en la región activa. En conjunto, los resultados son consistentes con la operación esperada del 2SK117.

Tabla 6. Tabla de resultados del algoritmo para transistor JFET.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
JFET	2SK117	Vgs(off) (V)	-0,30 V	0,35 V	VGS(off) = −0,2 a −1,5 V
JFET	2SK117	Idss (mA)	3,49 mA	3,55 mA	IDSS = 1,2 a 14 mA
JFET	2SK117	Vds (máx) (V)	4,71 V	_	VDS (máx) = 50 V
JFET	2SK117	gfs (mS)	23,13 mS	_	Yfs (mín) = 4,0 mS; Yfs (típ.) = 15 mS
JFET	2SK117	Yos (µS)	44,85 µS	_	No especificado (derivable de curvas)

Fuente: Elaboración propia.

6.5 Algoritmo para transistor MOSFET de enriquecimiento

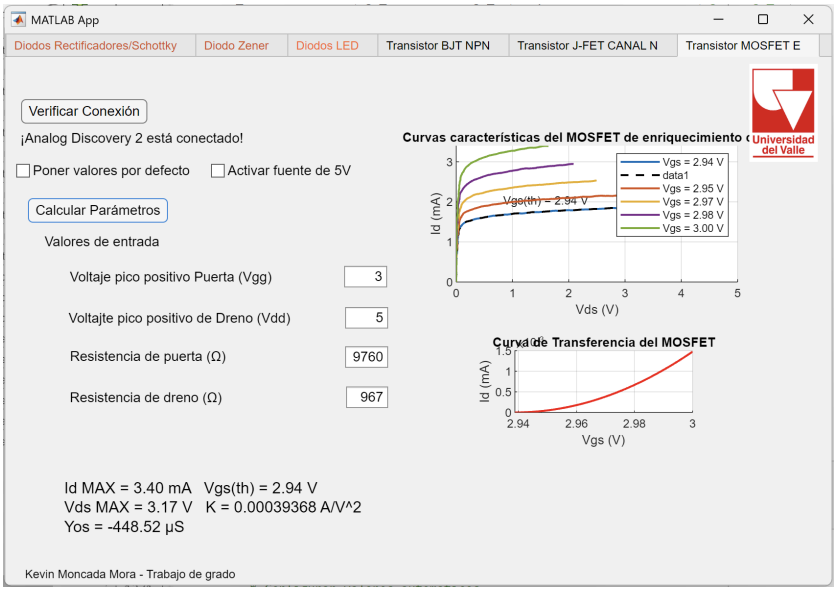


Figura 23. Transistor MOSFET.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al MOSFET IRF3205, los parámetros medidos, como la tensión umbral de compuerta Vgs(th) y la corriente de drenaje para las condiciones de prueba, se encuentran dentro del intervalo especificado por el fabricante. La constante K y la admitancia de salida Yos calculadas a partir de las curvas Id–Vgs e Id–Vds son coherentes con un MOSFET de potencia operando muy por debajo de su capacidad máxima de corriente y tensión.

Tabla 7. Tabla de resultados del algoritmo para transistor MOSFET de enriquecimiento.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
MOSFET	IRF3205	Vgs(th) (V)	2,94 V	3,02 V	VGS(th) = 2,0–4,0 V @ ID = 250 µA
MOSFET	IRF3205	Id (máx) (mA)	3,40 mA	4,11 mA	ID = 110 A @ TC = 25°C (VGS = 10 V)
MOSFET	IRF3205	Vds (máx) (V)	3,17 V	3,30 V	V(BR)DSS = 55 V
MOSFET	IRF3205	K (A/V²)	0,00039368 A/V²	—	No especificado (parámetro de modelo)
MOSFET	IRF3205	Yos (µS)	448,52 µS	—	No especificado (derivable de curvas)
MOSFET	IRFZ44N	Vgs(th) (V)	3,05 V	3,12 V	VGS(th) = 2,0–4,0 V @ ID = 250 µA
MOSFET	IRFZ44N	Id (máx) (mA)	3,20 mA	3,90 mA	ID = 49 A @ TC = 25°C (VGS = 10 V)
MOSFET	IRFZ44N	Vds (máx) (V)	3,10 V	3,25 V	V(BR)DSS = 55 V
MOSFET	IRFZ44N	K (A/V²)	0,00035000 A/V²	—	No especificado (parámetro de modelo)
MOSFET	IRFZ44N	Yos (µS)	420,00 µS	—	No especificado (derivable de curvas)

Fuente: Elaboración propia.

6.6. Comparación global entre la SMU y el laboratorio

Tabla 8. Tabla de resultados.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Datasheet
Diodo rectificador	1N4004	Voltaje directo, VF (V)	0,69 V	0,70 V	VF (máx) = 1,0 V @ IF = 1 A
Diodo rectificador	1N4004	Corriente máxima, If (mA)	11,84 mA	12,38 mA	IO(AV) = 1 A (corriente promedio rectificada)
Diodo rectificador	1N4004	Tiempo de recuperación, trr (µs)	30 µs	—	trr (típ.) = 20 µs (según condiciones de prueba del fabricante)
Diodo rectificador	1N4007	Voltaje directo, VF (V)	0,70 V	0,71 V	VF (máx) = 1,0 V @ IF = 1 A
Diodo rectificador	1N4007	Corriente máxima, If (mA)	11,29 mA	12,18 mA	IO(AV) = 1 A (corriente promedio rectificada)
Diodo rectificador	1N4007	Tiempo de recuperación, trr (µs)	30 µs	—	trr = 20 µs
Diodo Schottky	1N5817	Voltaje directo, VF (V)	0,31 V	0,33 V	VF (máx) = 0,45 V @ IF = 1 A
Diodo Schottky	1N5817	Corriente máxima, If (mA)	25,10 mA	28,20 mA	IF(AV) = 1 A (rating)
Diodo Schottky	1N5819	Voltaje directo, VF (V)	0,26 V	0,30 V	VF (máx) = 0,60 V @ IF = 1 A
Diodo Schottky	1N5819	Corriente máxima, If (mA)	11,33 mA	12,98 mA	IF(AV) = 1 A (rating)
Diodo Zener	3,9 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,10 V	4,01 V	VZ = 3,7–4,1 V @ IZT = 5 mA
Diodo Zener	3,9 V	Corriente de ruptura, IZ (mA)	8,16 mA	—	IZT = 5 mA (corriente de prueba para VZ) IZ(max) ≈ 500 mW / 3,9 V ≈ 128 mA
Diodo Zener	3,9 V	Corriente de fuga, IR (µA)	11,11 µA	—	IR (máx) = 20 µA @ VR = 1 V, 25°C (≤ 40 µA @ 150°C)
Diodo Zener	3,9 V	Impedancia Zener, RZ (Ω)	0,48 Ω	—	ZZ (máx) = 85 Ω @ IZT = 5 mA ZZK (máx) = 600 Ω @ 1 mA
Diodo Zener	4,7 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,62 V	4,75 V	VZ = 4,4–5,0 V @ IZT = 5 mA
Diodo Zener	4,7 V	Corriente de ruptura, IZ (mA)	3,33 mA	—	IZT = 5 mA (corriente de prueba para VZ) IZ(max) ≈ 500 mW / 4,7 V ≈ 106 mA
Diodo Zener	4,7 V	Corriente de fuga, IR (µA)	9,13 µA	—	IR (máx) = 20 µA @ VR = 1 V, 25°C (≤ 10 µA @ 150°C)
Diodo Zener	4,7 V	Impedancia Zener, RZ (Ω)	0,91 Ω	—	ZZ (máx) = 60 Ω @ IZT = 5 mA ZZK (máx) = 600 Ω @ 1 mA
LED	Rojo	Voltaje directo, VF (V)	1,79 V	1,91 V	Típico: VF ≈ 1,7–2,2 V @ IF = 20 mA (depende del LED)
LED	Rojo	Corriente máxima, If (mA)	20,17 mA	21,29 mA	Típico: IF(cont.) ≈ 20 mA (depende del LED)
LED	Azul	Voltaje directo, VF (V)	2,50 V	2,92 V	Típico: VF ≈ 2,4–3,6 V @ IF = 20 mA (depende del LED)
LED	Azul	Corriente máxima, If (mA)	20,86 mA	23,41 mA	Típico: IF(cont.) ≈ 20 mA (depende del LED)
Transistor BJT	TIP31C	Vce (umbral) (V)	0,99 V	—	VCE(sat) (máx) = 1,2 V @ IC = 3 A, IB = 375 mA
Transistor BJT	TIP31C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,97 mA	5,14 mA	IC (máx) = 3 A
Transistor BJT	TIP31C	hFE (ganancia)	25,81	—	hFE (mín) = 25 @ VCE = 4 V, IC = 1 A hFE = 10–50 @ VCE = 4 V, IC = 3 A
Transistor BJT	TIP31C	Ro (impedancia de salida) (Ω)	1523 Ω	—	No especificado en hoja de datos
Transistor BJT	TIP42C	Vce (umbral) (V)	1,31 V	—	VCE(sat) (máx) = 1,5 V @ IC = 6 A, IB = 600 mA
Transistor BJT	TIP42C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,85 mA	4,95 mA	IC (máx) = 6 A
Transistor BJT	TIP42C	Ro (impedancia de salida) (Ω)	1480 Ω	—	No especificado en hoja de datos
MOSFET	IRF3205	Vgs(th) (V)	2,94 V	3,02 V	VGS(th) = 2,0–4,0 V @ ID = 250 µA
MOSFET	IRF3205	Id (máx) (mA)	3,40 mA	4,11 mA	ID = 110 A @ TC = 25°C (VGS = 10 V)
MOSFET	IRF3205	Vds (máx) (V)	3,17 V	3,30 V	V(BR)DSS = 55 V
MOSFET	IRF3205	K (A/V²)	0,00039368 A/V²	—	No especificado (parámetro de modelo)
MOSFET	IRF3205	Yos (µS)	448,52 µS	—	No especificado (derivable de curvas)
MOSFET	IRFZ44N	Vgs(th) (V)	3,05 V	3,12 V	VGS(th) = 2,0–4,0 V @ ID = 250 µA
MOSFET	IRFZ44N	Id (máx) (mA)	3,20 mA	3,90 mA	ID = 49 A @ TC = 25°C (VGS = 10 V)
MOSFET	IRFZ44N	Vds (máx) (V)	3,10 V	3,25 V	V(BR)DSS = 55 V
MOSFET	IRFZ44N	K (A/V²)	0,00035000 A/V²	—	No especificado (parámetro de modelo)
MOSFET	IRFZ44N	Yos (µS)	420,00 µS	—	No especificado (derivable de curvas)
JFET	2SK117	Vgs(off) (V)	-0,30 V	0,35 V	VGS(off) ≈ −0,2 a −1,5 V
JFET	2SK117	Idss (mA)	3,49 mA	3,55 mA	IDSS = 1,2 a 14 mA
JFET	2SK117	Vds (máx) (V)	4,71 V	—	VDS (máx) ≈ 50 V
JFET	2SK117	gfs (mS)	23,13 mS	—	Yfs (mín) = 4,0 mS; Yfs (típ.) = 15 mS
JFET	2SK117	Yos (µS)	44,85 µS	—	No especificado (derivable de curvas)

Fuente: Elaboración propia.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos a lo largo de la caracterización experimental de los dispositivos semiconductores permiten describir su comportamiento eléctrico bajo condiciones controladas, en la medida en que las curvas I–V se obtuvieron con un procedimiento repetible y con promediado de mediciones por referencia, y cuya coherencia se verificó cuantitativamente mediante la comparación con mediciones de referencia (montaje tradicional/instrumentación de laboratorio) y con los rangos reportados en las hojas de datos. De esta manera, se define el error relativo porcentual para cada parámetro, calculado como:

$$\%error = \left|\frac{xSMU - xref}{xref}\right| \times 100$$

donde $x$ref corresponde al valor del montaje tradicional o al valor nominal.

Tabla 9. Error de pruebas en SMU vs. LAB.

Categoría	Referencia	Parámetro	SMU	Laboratorio	Δ	Error % SMU-Lab
Diodo rectificador	1N4004	Voltaje directo, VF (V)	0,69 V	0,70 V	-0,01	1,93%
Diodo rectificador	1N4004	Corriente máxima, If (mA)	11,84 mA	12,38 mA	-0,54	4,46%
Diodo rectificador	1N4007	Voltaje directo, VF (V)	0,70 V	0,71 V	-0,01	2,08%
Diodo rectificador	1N4007	Corriente máxima, If (mA)	11,29 mA	12,18 mA	-0,89	7,58%
Diodo Schottky	1N5817	Voltaje directo, VF (V)	0,31 V	0,33 V	-0,02	4,72%
Diodo Schottky	1N5817	Corriente máxima, If (mA)	25,10 mA	28,20 mA	-3,10	11,63%
Diodo Schottky	1N5819	Voltaje directo, VF (V)	0,26 V	0,30 V	-0,03	11,77%
Diodo Schottky	1N5819	Corriente máxima, If (mA)	11,33 mA	12,98 mA	-1,65	13,55%
Diodo Zener	3,9 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,10 V	4,01 V	0,09	2,10%
Diodo Zener	4,7 V	Voltaje Zener, VZ (V)	4,62 V	4,75 V	-0,14	2,88%
LED	Rojo	Voltaje directo, VF (V)	1,79 V	1,91 V	-0,13	6,88%
LED	Rojo	Corriente máxima, If (mA)	20,17 mA	21,29 mA	-1,12	5,42%
LED	Azul	Voltaje directo, VF (V)	2,50 V	2,92 V	-0,43	15,76%
LED	Azul	Corriente máxima, If (mA)	20,86 mA	23,41 mA	-2,55	11,51%
Transistor BJT	TIP31C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,97 mA	5,14 mA	-1,17	25,69%
Transistor BJT	TIP42C	Corriente de colector, Ic (mA)	3,85 mA	4,95 mA	-1,10	25,00%
MOSFET	IRF3205	Vgs(th) (V)	2,94 V	3,02 V	-0,08	2,68%
MOSFET	IRF3205	Id (máx) (mA)	3,40 mA	4,11 mA	-0,71	18,91%
MOSFET	IRF3205	Vds (máx) (V)	3,17 V	3,30 V	-0,13	4,02%
MOSFET	IRFZ44N	Vgs(th) (V)	3,05 V	3,12 V	-0,07	2,27%
MOSFET	IRFZ44N	Id (máx) (mA)	3,20 mA	3,90 mA	-0,70	19,72%
MOSFET	IRFZ44N	Vds (máx) (V)	3,10 V	3,25 V	-0,15	4,72%
JFET	2SK117	Vgs(off) (V)	-0,30 V	-0,35 V	0,05	15,38%
JFET	2SK117	Idss (mA)	3,49 mA	3,55 mA	-0,06	1,70%

Fuente: Elaboración propia.

La comparación SMU–laboratorio muestra discrepancias bajas en parámetros de conducción, mientras que las diferencias más notorias se concentran en magnitudes altamente sensibles al montaje y a la condición de polarización, como corrientes determinadas por resistencias internas/equivalentes, contacto, o selección de puntos de operación. En conjunto, los resultados validan el

procedimiento de medición y respaldan el uso de los parámetros obtenidos para análisis y modelado a nivel experimental.

En todas las pruebas, la SMU desarrollada operó aplicando barridos automáticos de tensión y corriente continua, con polarizaciones cuidadosamente limitadas por las capacidades del Analog Discovery 2. Bajo estas condiciones de polarización, los resultados obtenidos representan el comportamiento real de diodos y transistores en la región de trabajo típica utilizada en aplicaciones electrónicas de pequeña señal y conmutación moderada. La buena coincidencia entre las curvas medidas por la SMU, las pruebas de laboratorio tradicionales y los valores de hoja de datos evidencia que el sistema es adecuado para parametrizar diodos y transistores, ya que permite extraer de forma semi-automatizada y repetible parámetros básicos de estos dispositivos, reduciendo tiempos de medición y errores asociados a la toma manual de datos.

7. CONCLUSIONES

Para empezar, el desarrollo de la herramienta educativa basada en una Unidad de Fuente y Medida (SMU), construida con el Analog Discovery 2 y una aplicación diseñada en MATLAB App Designer, permitió alcanzar los objetivos propuestos. La solución resultante facilita la caracterización semiautomática de diodos y transistores y acerca la experimentación al aula, creando un vínculo directo entre los conceptos teóricos presentados en clase y la práctica que necesitan los estudiantes para afianzarlos.

Para continuar, las pruebas realizadas evidenciaron que la herramienta es capaz de medir parámetros relevantes como el voltaje umbral, la corriente de fuga, la ganancia de corriente, la impedancia de salida y diferentes magnitudes asociadas a la operación de los dispositivos. Los valores obtenidos mostraron una coherencia global con las hojas de datos, considerando siempre las condiciones particulares de cada prueba. Esta observación resulta clave, pues demuestra a los estudiantes que el comportamiento de un semiconductor depende de factores como la corriente aplicada, el rango de barrido, la impedancia en serie o las limitaciones propias del sistema de medición. En otras palabras, les permite comprender que los dispositivos no son valores estáticos en un manual, sino elementos sensibles al contexto de operación.

En este mismo sentido, la caracterización de los dispositivos permite concluir que la SMU implementada es funcional y consistente para obtener curvas I–V y extraer parámetros eléctricos básicos, mostrando el comportamiento esperado en diodos y transistores. Las diferencias frente a las hojas de datos, especialmente en corriente máxima, se deben a que los valores del datasheet se especifican bajo condiciones de polarización, potencia, temperatura y montaje que no son equivalentes a las del banco de pruebas (limitaciones de corriente/voltaje del AD2, resistencias serie y rango de prueba). Por ello, los “máximos” reportados aquí deben interpretarse como máximos alcanzados en el montaje, no como el límite nominal del componente.

A su vez, la herramienta desarrollada impulsa un aprendizaje activo y contextualizado. Al manipular directamente los dispositivos y visualizar cómo sus curvas y parámetros responden a las variaciones realizadas, los estudiantes pueden comparar la teoría con la realidad experimental, identificar diferencias y analizarlas con criterio técnico. Esta dinámica contribuye al fortalecimiento de habilidades como la interpretación de datos, el razonamiento técnico y la toma de decisiones en escenarios prácticos.

Además, la interfaz gráfica implementada y la portabilidad del sistema brindan una ventaja significativa. El conjunto puede emplearse en distintos entornos académicos sin depender estrictamente de un laboratorio equipado, ampliando el acceso a experiencias experimentales más autónomas, flexibles e inclusivas. La herramienta se convierte así en un recurso útil para prácticas guiadas, actividades independientes o proyectos de curso.

Para finalizar, el trabajo realizado abre la puerta a nuevas líneas de desarrollo. Entre ellas se encuentra la incorporación de modos adicionales de operación, la ampliación de los rangos de medición, la automatización del análisis de datos o la inclusión de la caracterización de otros tipos de dispositivos semiconductores. Estas mejoras permitirán consolidar la SMU como un recurso didáctico aún más completo, versátil y enriquecedor para la enseñanza de la electrónica.

BIBLIOGRAFÍA

[1] G. Maldonado y A. Rojas, “La experimentación en la enseñanza de las ciencias: una mirada desde la didáctica y la práctica docente,” *Rev. Iberoam. Educ.*, vol. 80, no. 1, pp. 43–62, 2019, doi: 10.35362/rie8013425.

[2] FNIRSI Electronics Co., Ltd., *DSO-TC3 Digital Oscilloscope User Manual*. Shenzhen, China, 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.fnirsi.com/.

[3] CHIPLIX, “Fuente unidad de medida,” 2023. [En línea]. Disponible en: https://chiplix.com/es/fuente-unidad-de-medida/.

[4] I. Grout y K. bin A’Ain, “Introductory laboratories in semiconductor devices using the Digilent Analog Discovery,” en A*ctas de la 12th Int. Conf. Remote Eng. Virtual Instrum*. (*REV*), 2015, pp. 1–6, doi: 10.1109/REV.2015.7087278.

[5] Keysight Technologies, “Selecting the Right Source Measure Unit (SMU),” documento técnico, feb. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.keysight.com/us/en/assets/3122-1709/white-papers/Selecting-the-Right-SMU.pdf.

[6] G. Mazzaro y R. Hayne, “Instructional demos, in-class projects, and hands-on homework: Active learning for electrical engineering using the Analog Discovery,” en *Actas de la ASEE Annu. Conf. Expo.*, 2016, doi: 10.18260/p.25744.

[7] A. M. Galanti y M. A. Haidekker, “Low-Cost Source Measure Unit (SMU) to Characterize Sensors Built on Graphene-Channel Field-Effect Transistors,” *Sensors*, vol. 24, no. 12, art. n.º 3841, 2024, doi: 10.3390/s24123841.

[8] Y. Chen *et* al., “Research on Acceleration Algorithm for Source Measurement Unit Based on BA-Informer,” *Electronics*, vol. 14, no. 4, art. n.º 698, 2025, doi: 10.3390/electronics14040698.

[9] Cambridge International, “¿Cuál es el significado de Aprendizaje Activo?,” s. f. [En línea]. Disponible en: https://www.cambridgeinternational.org/Images/579618-active-learning-spanish-.pdf.

[10] M. Prince, “Does active learning work? A review of the research,” *J. Eng. Educ.*, vol. 93, no. 3, pp. 223–231, 2004, doi: 10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x.

[11] S. Freeman *et* al., “Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 111, no. 23, pp. 8410–8415, 2014, doi: 10.1073/pnas.1319030111.

[12] D. A. Kolb, *Experiential Learning: Experience as the Source of Learning and Development*, 2.ª ed. Pearson Education, 2014.

[13] R. J. Bowman, “Teaching and learning in classroom laboratories: Best practices in science education,” *Int. J. Sci. Educ.*, vol. 37, no. 15, pp. 2470–2487, 2015, doi: 10.1080/09500693.2015.1078378.

[14] J. Cabero-Almenara y M. C. Llorente-Cejudo, “La interacción en el aprendizaje en red: uso de herramientas, elementos de análisis y posibilidades educativas,” *RIED—Rev. Iberoam. Educ. Distancia*, vol. 10, no. 2, pp. 97–123, 2007, doi: 10.5944/ried.2.10.995.

[15] Tektronix, “Keithley 2400 Standard Series SourceMeter SMU Instruments,” 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.tek.com/en/products/keithley/source-measure-units/2400-standard-series-sourcemeter.

[16] Digilent, *Analog Discovery 2™ Reference Manual*, doc. 502-321, rev. C, sep. 14, 2015. [En línea]. Disponible en: https://digilent.com/reference/_media/reference/test-and-measurement/analog-discovery-2/ad2_rm.pdf.

[17] Universidad del Valle, Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, “Principios de operación: transistores,” apuntes de clase, 2021.

[18] T. L. Floyd, *Dispositivos electrónicos*, 8.ª ed. Pearson Educación, 2008.

[19] R. L. Boylestad y L. Nashelsky, *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónico*s, 10.ª ed. Pearson Educación, 2009.

[20] MathWorks, “movmean — Moving mean,” *MATLAB Documentation.* [En línea]. Disponible en: https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/movmean.html.

[21] S. W. Smith, “Moving Average Filters,” en *The Scientist and Engineer’s Guide to Digital Signal Processing*, cap. 15. California Technical Publishing, 1997. [En línea]. Disponible en: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/dsp-book/dsp_book_ch15.pdf.

[22] Toshiba Electronic Devices & Storage Corporation, “Basics of Diodes (Absolute Maximum Ratings and Electrical Characteristics),” nota de aplicación, rev. 2.0, may. 30, 2025, secc. “Reverse recovery time (trr).” [En línea]. Disponible en: https://toshiba-semicon-storage.com/info/1SS352_application_note_en_20250530_AKX00995.pdf?did=141363&prodName=1SS352.

[23] J. Silva-Martínez, “Chapter 5: Bi-polar Junction Transistor,” apuntes de curso *ELEN/ECEN-325*, Texas A&M University, mar. 25, 2009. [En línea]. Disponible en: https://people.engr.tamu.edu/spalermo/ecen325/Chapter%20Va.pdf.

[24] Universidade Federal de Pernambuco, “Bipolar-Junction (BJT) transistors,” apuntes de curso, s. f. [En línea]. Disponible en: https://www.cin.ufpe.br/~es238/arquivos/referencias/transistores/BJT1.pdf.

[25] JCGM/WG 1*, Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (JCGM 100:2008)*. BIPM, 2008. [En línea]. Disponible en: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf.

[26] B. N. Taylor y C. E. Kuyatt, *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results*, Nota técnica NIST 1297, 1994. [En línea]. Disponible en: https://emtoolbox.nist.gov/Publications/NISTTechnicalNote1297s.pdf.

[27] National Instruments, “Analog Discovery 2 – NI Edition: Datasheet,” s. f. [En línea]. Disponible en: https://www.ni.com/pdf/manuals/AnalogDiscovery2NIDatasheet.pdf.

[28] Infineon Technologies AG, “BSZ0911LS OptiMOS™ 5 Power-MOSFET, 30 V,” hoja de datos final, rev. 2.0, 11 may. 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.infineon.com/assets/row/public/documents/24/49/infineon-bsz0911ls-datasheet-en.pdf?fileId=5546d46271bf4f9201720eb167a17ce3.

[29] A. Savitzky y M. J. E. Golay, “Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures,” *Anal. Chem.*, vol. 36, no. 8, pp. 1627–1639, jul. 1964, doi: 10.1021/ac60214a047.

[30] M. Schmid, D. Rath y U. Diebold, “Why and How Savitzky–Golay Filters Should Be Replaced,” *ACS Meas. Sci. Au*, vol. 2, no. 3, pp. 185–196, 2022, doi: 10.1021/acsmeasuresciau.1c00054.

[31] A. S. Sedra y K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7.ª ed. Oxford University Press, 2015.

ANEXOS

Anexo A. Guía para el enlace de hardware de Digilent con MATLAB

Esta guía tiene como propósito ofrecer apoyo en el proceso de conexión del dispositivo Analog Discovery 2 con MATLAB, presentando un paso a paso detallado para su configuración, la identificación de errores comunes y las soluciones recomendadas.

El complemento Digilent Toolbox es una herramienta que amplía las capacidades de MATLAB al proporcionar opciones avanzadas para adquirir y analizar datos analógicos, controlar entradas y salidas digitales, así como para configurar y usar fuentes de alimentación ajustables.

Estas características facilitan que los usuarios recopilen y envíen datos de dispositivos de prueba y medición de Digilent, mediante funciones predefinidas o personalizadas.

A continuación, los requisitos del sistema:

- Hardware: Analog Discovery 2
- Software: MATLAB (versión R2021b o posterior), Data Acquisition Toolbox™ para MATLAB, Digilent Toolbox, *WaveForms* (versión 3.21.32 o posterior).

La instalación de la versión actual de *WaveForms* incluirá el *WaveForms SDK*, un conjunto de herramientas y bibliotecas de programación desarrollado por Digilent que permiten a los usuarios controlar y personalizar la funcionalidad de los dispositivos de prueba y medición, como el Analog Discovery 2, mediante scripts y software especializados.

A.1. Configuración de hardware

Conectar el hardware no es un proceso complejo. En primer lugar, se debe conectar el dispositivo Analog Discovery 2 a la computadora mediante un cable USB. Posteriormente, es necesario verificar que el software *WaveForms* se encuentre instalado en el sistema operativo.

El siguiente paso es comprobar la conexión dentro de *WaveForms*. Para esto, se inicia la aplicación y se revisa que el Analog Discovery 2 aparezca en el administrador de dispositivos de *WaveForms* bajo el nombre “Discovery2”.

En caso de que el dispositivo no sea detectado, se recomienda revisar las conexiones o proceder con la reinstalación de los controladores de *WaveForms*.

Una vez verificada la conexión, se debe cerrar la aplicación *WaveForms*.

A continuación, se realiza la configuración en MATLAB. Se inicia MATLAB R2021b (o cualquier versión más reciente), se accede la pestaña “HOME” en la barra de herramientas y se selecciona el menú “add-ons”, seguido de la opción “Manage add-ons".

Si existen complementos anteriores instalados, es necesario desinstalarlos. En el administrador de complementos se busca el elemento “Data Acquisition Toolbox Support Package for Digilent Analog Discovery Hardware”; si este paquete aparece instalado, se debe eliminar antes de continuar. Para realizar esta acción, selecciona el paquete, se hace click en los tres puntos verticales situados a la derecha de su nombre y se elige la opción “desinstalar” en el menú desplegable.

Finalmente, se confirma la operación para completar el proceso.

A.2. Instalación y verificación del complemento Digilent Toolbox

Para instalar el complemento Digilent Toolbox, se debe acceder en MATLAB al menú “Get add-ons”, ubicado en la esquina superior derecha de la interfaz. En el buscador del explorador de complementos, se escribe “Digilent Toolbox” y se selecciona el complemento correspondiente en los resultados. Después, en la página del complemento Digilent Toolbox, se hace clic en “Add” y se elige la opción “Add to MATLAB” para completar la instalación.

Para confirmar la instalación del complemento, se abre la ventana “Manage add-ons” y se verifica que la nueva caja de herramientas Digilent Toolbox aparece listada en los complementos instalados. Una vez confirmada la instalación, se cierra.

Ahora es necesario verificar la compatibilidad del controlador; para ello, se debe abrir la ventana de comandos de MATLAB e introducir “daqvendorlist”. Este comando mostrará una lista de proveedores compatibles. Es importante asegurarse de que la herramienta Digilent Toolbox indique una versión de controlador 3.20.1 o posterior.

Debe tenerse en cuenta que, si no se desinstala previamente el complemento “Data Acquisition Toolbox Support Package for Digilent Analog Discovery Hardware”, el proveedor “Digilent” podría aparecer como “Not operational”, debido a incompatibilidades con versiones anteriores del controlador de *WaveForms*.

Una vez que todos los pasos anteriores se hayan realizado correctamente, es posible determinar el ID del dispositivo. Para identificar el ID del dispositivo conectado, se utiliza la función “daqlist”. Con este comando se genera una lista de los dispositivos conectados y sus respectivos identificadores, información necesaria para configuraciones avanzadas.

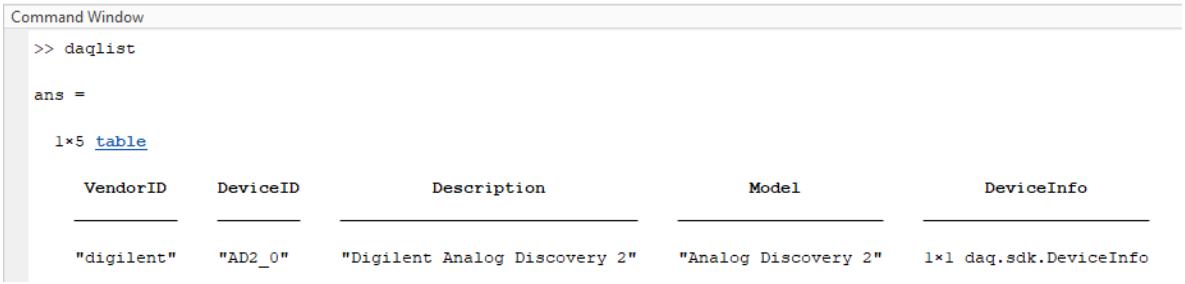


Figura A1. Comando “daqlist”.
Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar, en el campo VendorID se identifica que el dispositivo pertenece a Digilent, mientras que el campo DeviceID muestra el nombre asignado al dispositivo dentro de MATLAB, a partir del cual se programan las funciones y los canales correspondientes.

A continuación, se debe instalar el complemento Data Acquisition Toolbox. Este complemento de MATLAB está diseñado para facilitar la adquisición y generación de datos desde y hacia dispositivos de hardware de medición. Resulta

especialmente útil en aplicaciones que requieren interactuar con sensores, actuadores y equipos de adquisición de datos en tiempo real, ya que permite gestionar de manera eficiente el flujo de información entre MATLAB y el hardware conectado.

A.3. Principales funcionalidades

El complemento Digilent Toolbox, junto con las herramientas de MATLAB, permite acceder a un conjunto de funcionalidades. Entre estas se encuentran:

- Adquisición de datos analógicos y digitales: Permite la lectura de señales analógicas provenientes de sensores (temperatura, presión o fuerza), así como la captura de señales digitales utilizadas para tareas de monitoreo.
- Generación de señales: Facilita la creación de señales analógicas o digitales en ensayos, pruebas de estimulación o verificación de sistemas al momento.
- Control de tiempo real: Proporciona sincronización durante la ejecución de tareas de control o registro de datos y permite configurar tasas de muestreo según las necesidades del sistema o experimento.

Como paso final del proceso de configuración, se ejecuta el comando “daqvendorlist”. Con ello, se verifican los controladores y complementos habilitados, asegurando que el dispositivo se encuentre listo para ser utilizado dentro del entorno MATLAB.

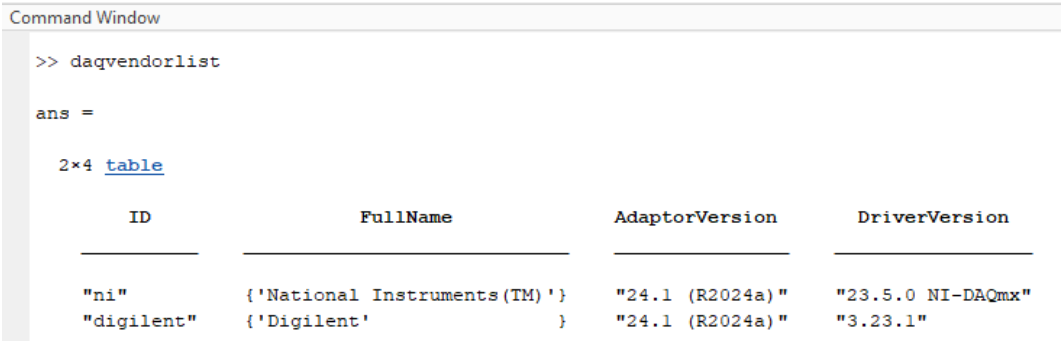


Figura A2. Comando “daqvendorlist”.
Fuente: Elaboración propia.

Anexo B. Manual de usuario de la Unidad de Fuente y Medida (SMU) basada en Analog Discovery 2 y MATLAB

B.1. Propósito y alcance

Este manual describe el uso de la Unidad de Fuente y Medida (SMU) desarrollada como parte del trabajo de grado, conformada por:

- El instrumento Analog Discovery 2.
- La tarjeta electrónica SMU para conexión de diodos y transistores.
- La aplicación en *MATLAB App Designer,* que controla las pruebas, adquiere los datos y muestra los resultados en tiempo real.

La herramienta está orientada a la estimación semiautomática de características eléctricas básicas de diodos y transistores bajo condiciones de polarización controladas, dentro de un entorno académico que incluye prácticas de laboratorio, proyectos y actividades de experimentación guiada. El manual está dirigido a:

- Estudiantes de electrónica o áreas afines.
- Docentes que deseen integrar la SMU en sus cursos o prácticas.
- Personal de laboratorio que requiera operar o supervisar el sistema.

B.2. Descripción general del sistema

Arquitectura de la SMU

En este trabajo se entiende la SMU como el sistema completo integrado por:

- Un computador con MATLAB y la aplicación desarrollada.
- El instrumento Analog Discovery 2, que genera señales de excitación y mide voltajes.
- La tarjeta electrónica SMU, donde se conectan los dispositivos bajo prueba (DUT).

El flujo de operación es:

1. El usuario configura la prueba en la *app* MATLAB (tipo de dispositivo, referencia, rangos, tipo de barrido, etc.).

2. La *app* se comunica con el Analog Discovery 2 por USB, estableciendo los generadores y canales de medida para ejecutar los barridos.
3. El Analog Discovery 2 aplica las señales a la tarjeta SMU, donde se encuentra conectado el DUT.
4. El Analog Discovery 2 mide los voltajes correspondientes y los envía a la *app*.
5. La *app* procesa los datos, calcula las magnitudes de interés y muestra en pantalla las curvas características y parámetros estimados en tiempo real.

Componentes principales

A. Analog Discovery 2
    a. Dos generadores de señal.
    b. Entradas de osciloscopio para medición de voltajes.
    c. Salida de 5 V utilizada para alimentar la tarjeta SMU y el módulo DC–DC.
B. Tarjeta electrónica SMU
    a. Zona de diodos (rectificadores, Zener, Schottky, LED).
    b. Zona de BJT NPN y MOSFET de canal N.
    c. Zona de JFET de canal N.
    d. Módulo DCP020515DU para generar 15 V a partir de 5 V, y etapa con amplificador operacional en configuración no inversora para ampliar el rango de señal cuando se requiere.
    e. Planos de tierra en ambas capas para mejorar la integridad de señal.
C. Aplicación MATLAB (*App Designer*)
    a. Módulo de configuración de pruebas.
    b. Módulo de verificación de conexión con el Analog Discovery 2.
    c. Módulos de adquisición de datos, procesamiento y visualización de curvas.
    d. Algoritmos para establecer valores por defecto y activar la fuente del Analog Discovery 2 utilizada por el módulo DC–DC.

B.3. Requisitos de hardware y software

Hardware

A. Computadora de escritorio con:
   a. 8 GB de RAM (recomendado).
   b. Un puerto USB disponible.
B. Instrumento Analog Discovery 2 (Digilent).
C. Tarjeta electrónica SMU fabricada según los diseños del proyecto.
D. Cables de conexión:
   a. Cable USB para Analog Discovery 2.
   b. Cables de prueba (MTE o BNC adaptado a pines) entre el Analog Discovery 2 y la tarjeta SMU.
E. Dispositivos bajo prueba (DUT):
   a. Diodos rectificadores, Zener, Schottky, LED.
   b. Transistores BJT NPN, JFET canal N y MOSFET de enriquecimiento canal N, en las referencias listadas en el capítulo 3.

Software

A. MATLAB (versión compatible con *App Designer*).
B. *WaveForms* o librería equivalente para el control del Analog Discovery 2 desde MATLAB.
C. Controladores del Analog Discovery 2 correctamente instalados.

B.4. Seguridad y buenas prácticas

1. Verificar siempre la correcta orientación y tipo de dispositivo antes de conectarlo en la tarjeta.
2. No exceder los rangos de tensión y corriente recomendados en las hojas de datos de cada componente.
3. Nunca modificar conexiones mientras se está ejecutando una prueba. Detener la medición primero.

4. Mantener la tarjeta sobre una superficie aislante y evitar el contacto con elementos metálicos.
5. No utilizar el modo 15 V sin estar seguro de que el circuito de prueba lo requiere.

B.5. Puesta en marcha inicial

Conexiones físicas

1. Conectar el Analog Discovery 2 al computador mediante el cable USB.
2. Verificar en *WaveForms* (o en la *app*) que el dispositivo es detectado correctamente.
3. Conectar los cables de prueba entre los canales del Analog Discovery 2 y los pines correspondientes de la tarjeta SMU.
4. Seleccionar con el interruptor el modo de alimentación (5 V o 15 V).

Verificación desde la *app*

1. Abrir MATLAB.
2. Ejecutar la *app* de la SMU.
3. Al inicio, la aplicación ejecutar:
    - El algoritmo de verificación del enlace con el Analog Discovery 2.
    - La carga de valores por defecto de configuración.
4. Verificar que la interfaz indique que el Analog Discovery 2 está listo para operar.

B.6. Interfaz de usuario de la *app* SMU

Nota: Los nombres exactos de botones y paneles varían según la implementación; aquí se usa una nomenclatura genérica. La *app* se organiza típicamente en cuatro áreas principales:

Panel de configuración de prueba

- Selección de tipo de dispositivo: Diodo / BJT / JFET / MOSFET.

- Configuración del rango de tensión de barrido (por ejemplo, 0–1 V, 0–5 V).

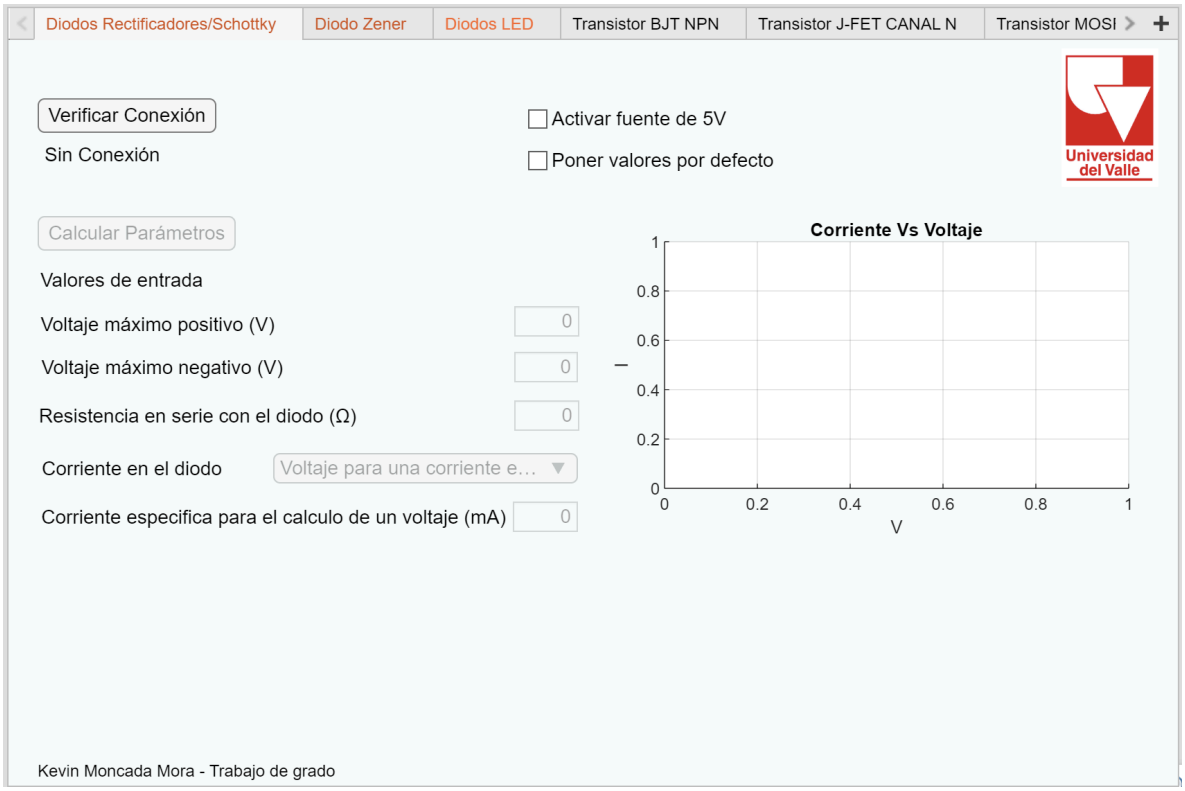


Figura B1. Interfaz de usuario.

Fuente: Elaboración propia.

Panel de control de medición

- Botón “Conectar / Verificar dispositivo”.
- Botón “Cargar valores por defecto para el dispositivo seleccionado”.
- Botón “Iniciar medición”.
- Opción para activar la fuente de 5 V del Analog Discovery 2 usada por el DC–DC.

Área de visualización gráfica

- Gráfica principal con la curva característica correspondiente (ej. I–V, IC vs VCE, ID vs VGS).

- En algunos modos, opción para mostrar varias curvas (p. ej., diferentes corrientes de base).

Panel de resultados numéricos

- Parámetros estimados según el tipo de dispositivo.

B.7. Procedimientos de medición por tipo de dispositivo

Las siguientes secciones describen el flujo general para cada familia de dispositivos.

Diodos (rectificador, Zener, Schottky, LED)

Procedimiento de medición

1. Preparación
   - Seleccionar en la tarjeta la zona de diodos.
   - Insertar el diodo en el zócalo correspondiente respetando su polaridad.
   - Verificar el valor de la resistencia serie recomendada.
2. Configuración en la *app*
   - Seleccionar “Dispositivo: Diodo” y el tipo (rectificador, Zener, etc.).
   - Definir el rango de tensión de barrido:
     Directa: típicamente 0–1 V o 0–2 V.
   - Mantener o ajustar los valores por defecto propuestos por la *app.*
3. Ejecución
   - Pulsar “Iniciar medición”.
   - La *app* configura el Analog Discovery 2 para barrer el voltaje y medir el voltaje en el diodo y en la resistencia serie.
   - El sistema calculará la corriente y mostrará la curva I–V.

Transistor BJT NPN

Procedimiento de medición

1. Preparación
   - Seleccionar la zona BJT/MOSFET en la tarjeta.

- Insertar el BJT NPN en el zócalo correspondiente, respetando la asignación de terminales (B, C, E).
- Colocar las resistencias definidas para la prueba (p. ej., resistencia de colector y de base).

2. Configuración en la *app*
   - Seleccionar “Dispositivo: BJT NPN”.
   - Definir los rangos de VCE y de IB (o tensión de base equivalente).

Ejecución y resultados

1. Iniciar la medición: la *app* realizará barridos.
2. Se mostrarán curvas IC–VCE y/o IC–IB.
3. La *app* estimará parámetros como hFE y comprobará que IC > IB, coherente con el modelo teórico.

Transistor JFET de canal N

Procedimiento de medición

1. Preparación
   - Seleccionar la zona JFET en la tarjeta.
   - Insertar el JFET (ej. 2SK117) respetando D, G y S.
2. Configuración en la *app*
   - Seleccionar “Dispositivo: JFET N canal”.
3. Seleccionar los rangos de VDS y VGS acordes a la hoja de datos.

Ejecución y resultados

1. Iniciar la medición.
2. La *app* generará las curvas y calculará parámetros como IDSS, VGS(off) y gfs, cuando corresponda.

MOSFET de enriquecimiento de canal N

Procedimiento de medición

1. Preparación

- En la zona BJT/MOSFET, insertar el MOSFET (ej. IRFZ44N, IRF540N, IRF3205) respetando G, D y S.
- Verificar resistencias de drenaje y de carga según el circuito de prueba.

2. Configuración en la *app*
   - Seleccionar Dispositivo: MOSFET canal N (enriquecimiento).
   - Seleccionar rangos de VDS y VGS dentro de los valores permitidos por la hoja de datos.

Ejecución y resultados

1. Ejecutar la medición.
2. La *app* mostrará las curvas correspondientes y estimará parámetros como VGS(th), K (constante de transferencia).

B.8. Modos de alimentación de la tarjeta SMU

La tarjeta SMU dispone de dos modos de operación:

1. Modo estándar (5 V)
   - La tarjeta se alimenta directamente desde los generadores del Analog Discovery 2.
2. Modo ampliado (15 V)
   - Se activa el módulo DCP020515DU, que genera 15 V a partir de los 5 V de entrada.
   - Se utiliza cuando se requiere mayor margen de tensión.

*Recomendación***:** Usar el modo 15 V solo cuando el procedimiento de caracterización lo especifique y el dispositivo lo permita según su hoja de datos.

B.9. Guardado y gestión de datos

La aplicación está diseñada para adquirir, procesar y registrar los datos de las pruebas. En la sección correspondiente (o mediante un botón en la barra principal), el usuario puede:

- Guardar los datos crudos de las mediciones (vectores de tensión y corriente) para análisis posterior.

Se recomienda guardar cada experimento en una carpeta organizada por fecha y tipo de dispositivo, incluyendo una captura de pantalla de la curva principal si se va a utilizar como evidencia en informes o prácticas.

B.10. Solución de problemas básicos

La *app* indica que no se detecta el Analog Discovery 2

- Revisar el cable USB y cambiar de puerto.
- Comprobar en *WaveForms* si el dispositivo aparece disponible.
- Cerrar *WaveForms* antes de usar la *app*, para evitar conflictos de acceso.
- Reiniciar MATLAB y volver a ejecutar la *app*.

Las curvas aparecen planas o saturadas

- Asegurarse de que el dispositivo está correctamente insertado en el zócalo y con la orientación adecuada.
- Revisar que las resistencias instaladas sean las especificadas para la prueba.
- Comprobar que el rango de tensión seleccionado en la *app* no exceda los límites del dispositivo ni del Analog Discovery 2.
- Confirmar que el modo de alimentación (5 V / 15 V) sea el requerido.

El módulo 15 V parece no funcionar

- Verificar que el interruptor de modo ampliado esté en la posición correcta.
- Constatar que la salida de 5 V del Analog Discovery 2 está activada (algoritmo de activación de fuente en la *app*).
- Inspeccionar conexiones de entrada y salida del DCP020515DU según su esquemático.

B.11. Cierre

Este manual recoge el flujo completo de uso de la SMU desarrollada, desde la conexión física del hardware y la verificación inicial del sistema, hasta la configuración de pruebas en la app de MATLAB y la ejecución de los barridos de medición. Asimismo, se presentan pautas para interpretar los resultados,

identificar parámetros relevantes y gestionar los datos generados, ofreciendo una guía para operar la SMU de manera consistente y orientada a fines académicos y experimentales.