Evaluación de Parámetros Eléctricos en Semiconductores mediante un Sistema Autónomo de Medición

LAURA ALEJANDRA PEDRAZA ARANGUREN
JUAN PABLO ÁVILA AGUDELO

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:

FREDY GARCIA

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
NOVIEMBRE, 2024

UNIVERSIDAD EL BOSQUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

ÁREA DE ÉNFASIS: BÁSICA ELECTRÓNICA

Evaluación de Parámetros Eléctricos en Semiconductores mediante un Sistema Autónomo de Medición

LAURA ALEJANDRA PEDRAZA ARANGUREN
JUAN PABLO ÁVILA AGUDELO

REALIZADO CON LA ASESORÍA DE:

FREDY GARCIA

NOTA DE SALVEDAD

Según el artículo 37 del 14 de diciembre de 1989 del acuerdo 017, “La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia”.

RESUMEN

La incertidumbre sobre el estado funcional de diodos y transistores, así como la discrepancia entre los valores reportados por los fabricantes y el desempeño real de estos dispositivos, evidencia la necesidad de herramientas capaces de determinar con precisión sus parámetros reales. En respuesta a este desafío, se desarrolló un sistema autónomo diseñado para medir parámetros esenciales como el coeficiente Beta (β), el voltaje de conducción directa y el voltaje de ruptura en diodos, además del voltaje compuerta-fuente y la resistencia en estado de conducción en MOSFETs.

Este sistema incorpora funcionalidades avanzadas que aseguran mediciones precisas y confiables, dentro de rangos y resoluciones adecuadas para reflejar el comportamiento real de los componentes electrónicos. Durante su diseño, se implementaron módulos específicos que permiten identificar discrepancias frente a los valores nominales, mejorando así la caracterización de los dispositivos.

Una de las principales ventajas del sistema radica en su capacidad para evaluar semiconductores con alta precisión, facilitando su uso en aplicaciones electrónicas más confiables y eficientes. Aunque se identificaron algunas variaciones menores en ciertos parámetros, el proyecto representa un importante paso hacia la optimización de la medición de semiconductores. Este avance abre camino para futuras mejoras y la ampliación de su uso en contextos industriales y académicos.

Palabras Clave: Semiconductores, medición, parámetros reales, diodos, transistores, coeficiente Beta, voltaje de conducción directa, voltaje de ruptura, voltaje compuerta-fuente, resistencia drain-source, caracterización electrónica, precisión, confiabilidad.

ABSTRACT

The uncertainty surrounding the functional state of diodes and transistors, as well as the discrepancy between manufacturer-reported values and the actual performance of these devices, Highlights the need for tools capable of accurately determining their real parameters. In response to this challenge, an autonomous system was developed to measure key parameters such as the Beta coefficient (β), forward voltage, and breakdown voltage in diodes, along with the gate-source voltage and on-state resistance in MOSFETs.

This system incorporates advanced functionalities that ensure precise and reliable measurements, within appropriate ranges and resolutions to reflect the actual behavior of electronic components. Specific modules were implemented during its design to identify discrepancies with nominal values, thereby improving device characterization.

One of the system's main advantages lies in its ability to evaluate semiconductors with high precision, facilitating their use in more reliable and efficient electronic applications. Although minor variations in certain parameters were identified, the project represents a significant step toward optimizing semiconductor measurement. This advancement paves the way for future improvements and the expansion of its use in industrial and academic contexts.

Keywords: Semiconductors, measurement, real parameters, diodes, transistors, Beta coefficient, forward voltage, breakdown voltage, gate-source voltage, drain-source resistance, electronic characterization, precision, reliability.

TABLA DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN 10
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 11
2.1Antecedentes y Estado del Arte 11
2.2Descripción y Formulación del Problema 13
2.3Justificación. 14
2.4Objetivos 15
2.4.1 Objetivo General 15
2.4.2 Objetivos Específicos 15
2.5Alcance y Limitaciones del Proyecto 15
2.5.1 Alcance 15
2.5.2 Limitaciones 16
3. MARCO DE REFERENCIA 17
3.1Marco Teórico o Conceptual 17
3.1.1 Conceptos Generales 18
4. DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADO 20
4.1Requerimientos 20
4.2Metodología del Diseño 21
4.2.1 Parámetros 20
4.2.2 Diseño conceptual 24
4.2.3 Diseño Detallado 41
4.3Descripción Técnica del Producto 59
4.3.1 Simulación por subsistemas 59
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 68
6. CONCLUSIONES 69
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diodos regulador y Schocttky ____ *45*

Tabla 2. Diodo Zener ____ *46*

Tabla 3. Reguladores de voltaje variable ____ *47*

Tabla 3. Lista transistores funcionales para el diseño de cuente de corriente ____ *50*

Tabla 4. Especificaciones de Transistores BJT ____ *56*

Tabla 5. Listado de componentes ____ *56*

Tabla 6. Potencia y Tolerancia de las resistencia ____ *57*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Proceso metodología del diseño 22
Figura 2. Caja Negra Sistema Completo 24
Figura 3. Caja Negra Sistema Diodo Schottky/Regulador 26
Figura 4. Subsistema Vf 27
Figura 5. Caja Negra Sistema Diodo Zener 29
Figura 6. Subsistema medición Vz 30
Figura 7. Caja Negra Sistema Medición Beta 31
Figura 8. Subsistemas medición de Beta en transistores BJT 32
Figura 9. Caja Negra Sistema BJT ($Vce(sat)$) 33
Figura 10. Subsistema de medición Vce(sat) en transistores BJT 34
Figura 11. VGS(TH) a partir de una fuente de corriente entre Drain y Source. 35
Figura 12. RDS(on) a partir de ley de ohm entre V(DS) e ID 36
Figura 13. Caja negra Sistema de voltaje gate-source de umbral Resistencia drain-source de encendido en Mosfet N 38
Figura 14. Caja negra Sistema de voltaje gate-source de umbral Resistencia drain-source de encendido en Mosfet P 38
Figura 15. Subsistemas Vgs(th) MOSFET Tipo N. 39
Figura 16. Subsistema Vgs(th) MOSFET Tipo P. 40
Figura 18. Subsistema RDS (on) MOSFET Tipo P. 41
Figura 19. Circuito bomba de corriente de Howland 42
Figura 20. Relación de corriente en el circuito 42
Figura 21. Circuito fuente de corriente con BJT y zener 43
Figura 22. Relación de corriente del circuito 43
Figura 23. Circuito Lm317 como fuente de corriente 44
Figura 24. Circuitos seleccionados 45
Figura 25. Circuito fuente de corriente fija por regulador de voltaje variable 47
Figura 26. Circuito Regulador de Voltaje usando LM317 [1]https://uelectronics.com/producto/lm317-regulador-de-voltaje-to-220-1-5a/ 48
Figura 27. Fuente de corriente con BJT y zener [2] https://www.circuitlab.com/circuit/8u3quv/fuente-de-corriente-con-zener/ 51
Figura 28. Circuito de fuente de corriente de 250 y 100µA para MOSFET/BJT 51
Figura 29. Lógica de Control Sistema General 58
Figura 29. Lógica de Control Sistema Vf y Vz 58
Figura 30. Lógica de Control Sistema Vcesat y Hfe (Beta) 59

Figura 31. Lógica de Control Sistema Vgsth y RDSon. 59
Figura 32. Sistema Vf. 60
Figura 33. Sistema Vz 60
Figura 34. Sistema Vgs(th)MOSFET Canal N 61
Figura 35. Sistema Vgs(th)MOSFET Canal P 62
Figura 36. Sistema Rds(on) MOSFET Canal N 62
Figura 37. Sistema Rds(on) MOSFET Canal P 63
Figura 38. Sistema Vce(sat) 63
Figura 39. Sistema Beta 64
Figura 40. Simulación sistema completo 65
Figura 41. Esquemático Circuito completo 66

1. INTRODUCCIÓN

La creciente variabilidad en los parámetros de los dispositivos semiconductores y la proliferación de componentes falsificados en el mercado representan una amenaza significativa para la fiabilidad y el rendimiento de los circuitos electrónicos. Aunque las hojas de datos (datasheets) proporcionan especificaciones detalladas sobre las propiedades eléctricas y mecánicas de diodos y transistores, factores como las tolerancias de fabricación, las condiciones ambientales y la degradación con el tiempo pueden ocasionar que los componentes reales no cumplan con las especificaciones nominales.

Estas desviaciones pueden afectar críticamente el desempeño de un circuito, generando desde una disminución en la eficiencia hasta fallas catastróficas. Además, la detección de componentes falsificados que no cumplen con las especificaciones declaradas se ha convertido en un reto fundamental para ingenieros y fabricantes. Actualmente, no existe una herramienta sencilla y específica que permita verificar si un diodo o transistor está dañado, es falsificado, o si cumple con los parámetros necesarios para una aplicación específica.

En respuesta a esta problemática, este proyecto propone el diseño de un sistema de medición y verificación que caracterice con precisión los parámetros críticos de los dispositivos semiconductores, permitiendo a los usuarios evaluar su calidad y tomar decisiones informadas sobre su uso. El sistema permitirá medir voltajes de umbral, voltajes de colector-emisor (CE) y voltaje drain-source en MOSFETs, facilitando la identificación de componentes dañados o falsificados, y asegurando que los dispositivos seleccionados cumplan con las especificaciones requeridas.

Para lograr los objetivos del proyecto, se definirá un campo de investigación acotado, centrándose en tipos específicos de diodos y transistores. Esto permitirá diseñar un sistema eficiente y funcional que responda a las necesidades de los ingenieros y fabricantes, mejorando la confiabilidad y el rendimiento de los productos electrónicos.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 Antecedentes y Estado del Arte

Introducción

La situación actual de los sistemas de medición de parámetros en semiconductores es bastante difusa, sin mencionar que son necesarios en el momento de realizar pruebas de funcionamiento o de veracidad del componente, con un enfoque particular en la caracterización de diodos, transistores BJT y MOSFETs. El objetivo principal es resaltar la relevancia de la verificación de componentes electrónicos en un contexto tanto nacional como global, así como las técnicas y tecnologías empleadas en este campo.

Contexto Global

Métodos para la Medición de Semiconductores

A nivel internacional, los avances en tecnologías de medición han facilitado la creación de dispositivos que realizan pruebas automatizadas de semiconductores, enfocándose en la identificación de fallos y la verificación de componentes. Entre las soluciones destacadas se incluyen:

Medidores de Parámetros Electrónicos (EPM): Instrumentos diseñados para cuantificar con precisión parámetros críticos como Vce, V_f y Beta en transistores BJT y MOSFET. Un ejemplo notable es el modelo **Keysight E4980A**, lanzado en 2015, que ofrece alta precisión y versatilidad en la caracterización de dispositivos semiconductores.

Sistemas de Prueba Automatizados: Organizaciones como el **Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)** han establecido normas desde 2004 que garantizan la calidad de los componentes semiconductores, enfatizando la importancia de la caracterización precisa y el cumplimiento de estándares internacionales.

Comprobación de Componentes

Las normas internacionales se centran en la implementación de sistemas de trazabilidad y certificación para asegurar la autenticidad de los componentes. Instituciones como **IEC** y **ISO** han emitido estándares desde 1996 que regulan la producción y prueba de semiconductores, promoviendo la transparencia y la confianza en la cadena de suministro.

Contexto Nacional (Colombia)

Evolución de Técnicas de Medición

En Colombia, la evaluación de parámetros de semiconductores ha comenzado a tomar impulso desde 2018, impulsada por iniciativas académicas y de investigación. Universidades como la **Universidad Nacional de Colombia** y la **Universidad de los Andes** han sido pioneras en el desarrollo de equipos de medición.

- **Universidad Nacional de Colombia:** En 2018, se inició un proyecto de investigación en el que se diseñaron y construyeron prototipos de medidores de parámetros para transistores BJT y MOSFETs. Este proyecto buscó proporcionar a los estudiantes una experiencia práctica en la creación de dispositivos de medición y fomentar la investigación en el área de semiconductores. Sin embargo, la falta de recursos financieros y técnicos limitó la capacidad de escalar estas iniciativas a aplicaciones industriales.
- **Universidad de los Andes:** En 2019, esta universidad lanzó un programa de investigación enfocado en la caracterización de dispositivos semiconductores. El proyecto incluye la colaboración con empresas del sector electrónico para desarrollar técnicas de medición que se alineen con las normas internacionales. A través de este programa, se han llevado a cabo talleres y seminarios que han contribuido a la capacitación de estudiantes y profesionales en técnicas avanzadas de medición de semiconductores.

A pesar de estos esfuerzos, la capacidad tecnológica en Colombia aún es inferior en comparación con instituciones en países desarrollados, donde existen laboratorios equipados con tecnología de última generación para la medición y caracterización de semiconductores.

Desafíos y Oportunidades

Los principales desafíos que enfrenta la medición de parámetros de semiconductores en Colombia incluyen:

Carencia de Infraestructura: La falta de laboratorios especializados con equipos de medición avanzados limita no solo la capacidad de investigación, sino también la formación práctica de estudiantes y profesionales. Muchos laboratorios en instituciones académicas carecen de dispositivos de medición modernos, lo que reduce la posibilidad de realizar investigaciones significativas y aplicadas.

Ausencia Normativa: La falta de regulaciones locales que controlen la autenticidad de los semiconductores dificulta la confianza en los componentes producidos en el país. Sin un marco regulatorio que garantice la calidad de los semiconductores, las empresas y consumidores pueden ser reacios a confiar en la producción local, lo que afecta el crecimiento de la industria. No obstante, se ha observado un aumento en la inversión en innovación tecnológica desde 2020, lo que brinda oportunidades para el desarrollo de sistemas que midan parámetros de semiconductores de manera autónoma y precisa. Esta tendencia ha sido respaldada por el gobierno colombiano a través de iniciativas como:

Programas de Innovación en Electrónica y Telecomunicaciones: Estas iniciativas fomentan la creación de empresas emergentes en el sector tecnológico, así como el desarrollo de proyectos de investigación que buscan mejorar la infraestructura de medición en el país.
Colaboraciones Internacionales: Se han establecido vínculos con universidades y centros de investigación en el extranjero, lo que permite el intercambio de conocimientos y tecnologías que pueden mejorar las capacidades de medición en Colombia.

El presente estado del arte subraya la importancia de desarrollar sistemas autónomos y precisos para la medición de parámetros de semiconductores, tanto a nivel global como nacional. Se evidencia un déficit en la verificación de la autenticidad de componentes en Colombia, lo que representa una oportunidad para innovar y fortalecer la industria local.

2.2 Descripción y Formulación del Problema

La creciente variabilidad en los parámetros de los dispositivos semiconductores y la proliferación de componentes falsificados en el mercado representan una amenaza significativa para la fiabilidad y el rendimiento de los circuitos electrónicos. A pesar de que las hojas de datos (datasheets) proporcionan especificaciones detalladas sobre las propiedades eléctricas y mecánicas de los diodos y transistores, factores como las tolerancias de fabricación, las condiciones ambientales y la degradación con el tiempo pueden causar que los componentes reales no cumplan con las especificaciones nominales.

Estas desviaciones pueden afectar críticamente el desempeño de un circuito, desde una disminución en la eficiencia hasta fallas catastróficas. Además, la detección de componentes falsificados, que no cumplen con las especificaciones declaradas, se ha convertido en un desafío crucial para ingenieros y fabricantes. Actualmente, no existe una herramienta sencilla y específica que permita verificar si un diodo o transistor está dañado, es falsificado, o cumple con los parámetros necesarios para una aplicación específica.

2.3 Justificación.

En respuesta a esta problemática, se propone el diseño de un sistema de medición y verificación que caracterice con precisión los parámetros críticos de los dispositivos semiconductores, permitiendo a los usuarios evaluar su calidad y tomar decisiones informadas sobre su uso. Este sistema será especialmente útil para asegurar que los componentes seleccionados cumplan con las especificaciones requeridas, mejorando así la confiabilidad y el rendimiento de los productos electrónicos.

El sistema propuesto permitirá a los ingenieros y fabricantes evaluar la calidad de los componentes, detectar la presencia de falsificaciones y tomar decisiones informadas sobre la selección de dispositivos. En última instancia, este sistema contribuirá a mejorar la confiabilidad y el rendimiento de los productos electrónicos.
Para poder identificar, diferenciar y probar componentes electrónicos como diodos y transistores no hay una herramienta especifica que permita saber si uno de estos elementos esta dañado o es un elemento falsificado, sabemos que hay parámetros que nos ayudan a determinar la funcionalidad de estos pero no hay un medidor que nos ayude a simplificar esta tarea, con el fin de evitar esta problemática se realizara un diseño de Medidor para Diodos y Transistores que determine voltajes de umbral, voltajes de BE y Voltaje drain-source para MOSFET.

Para poder definir los parámetros o requerimientos del sistema a diseñar, se está en la obligación de reducir el campo de investigación y hacer una selección de diodos en específico para cumplir los objetivos propuestos por el proyecto, se ha simplificado el objetivo general del proyecto con el fin de que al final sea lograble un diseño eficiente a la problemática

2.4 Objetivos

Objetivo General

Diseñar un sistema de medición que permita medir los parámetros eléctricos clave de dispositivos semiconductores, tales como diodos, transistores bipolares (BJT) y transistores MOSFET

Objetivos Específicos

1. Diseñar un sistema que permita medir el **voltaje de conducción V_f** en diodos, detectando valores fuera de las especificaciones.
2. Diseñar un sistema para medir la **ganancia de corriente DC (β o h_{fe})** de transistores bipolares (BJT) en configuraciones NPN y PNP, con el fin de determinar desviaciones respecto a los valores nominales.
3. Diseñar un sistema para la medición del **voltaje de saturación colector-emisor ($V_{ce(sat)}$)** en BJT, con capacidad de adaptación a variaciones en el punto de operación.
4. Diseñar un sistema que permita la medición del **voltaje umbral gate-source ($V_{GS(th)}$)** en transistores MOSFET de canal N y canal P, identificando así diferencias significativas en su desempeño real.
5. Diseñar un circuito de prueba para la medición de la **resistencia drain-source de encendido ($R_{DS(on)}$)** en MOSFET, garantizando la precisión en diferentes condiciones de operación.
6. Diseñar un sistema de medición del **voltaje de ruptura (V_z)** en diodos Zener, validando así su funcionamiento en aplicaciones críticas.

2.5 Alcance y Limitaciones del Proyecto

Alcance

- **Simulación y análisis de parámetros**: El proyecto se centrará en el diseño y análisis de los parámetros característicos de diodos, transistores BJT y MOSFET,

proporcionando valores más cercanos a las condiciones de operación reales que aquellos indicados en las hojas de datos.

- **Modelado para dispositivos NPN, PNP, MOSFET de canal N y P, y Zener**: Se considerarán los tipos de semiconductores comúnmente usados en la industria para que el sistema sea aplicable a una amplia gama de dispositivos.
- **Documentación técnica y guías de diseño**: Se desarrollará documentación que incluya el diseño del sistema, parámetros simulados y procedimientos de medición recomendados, ayudando a otros usuarios a replicar la simulación o adaptar el diseño para componentes específicos.

Limitaciones

- **Etapa de simulación únicamente**: Al estar limitado a la etapa de diseño y simulación, los valores y resultados obtenidos pueden diferir de las pruebas físicas reales debido a las simplificaciones inherentes al software de simulación y a las limitaciones de los modelos de dispositivos.
- **Dependencia de modelos de dispositivos en el simulador**: Los resultados dependerán de la precisión de los modelos de dispositivos en el software de simulación. Los modelos de componentes falsificados o defectuosos pueden no estar representados en el simulador.
- **Incapacidad para detectar defectos físicos**: La simulación no puede identificar defectos físicos específicos o características de componentes falsificados (como materiales de baja calidad), ya que estos problemas solo pueden detectarse mediante pruebas físicas o visuales.

3. MARCO DE REFERENCIA

3.1 Marco Teórico o Conceptual

Esta sección expone el marco teórico indispensable para entender los conceptos principales vinculados con la medición de parámetros en componentes semiconductores, como diodos y transistores.

Diodos

Los diodos son componentes esenciales en circuitos rectificadores, protectores y reguladores de voltaje. Entre los parámetros más relevantes se encuentran:

- **Voltage Forward:** es el voltaje mínimo necesario para superar la barrera de potencial de la unión PN y permitir el flujo de corriente a través del dispositivo en polarización directa. Cuando la tensión aplicada a un diodo es mayor que este umbral, los portadores de carga (electrones y huecos) adquieren suficiente energía para atravesar la barrera interna y generar una corriente significativa en el circuitos [2].

- **Voltage Zener o de ruptura inversa:** es el valor de tensión inversa que provoca la conducción de corriente en un diodo Zener o en un diodo convencional cuando se encuentra en polarización inversa. Este fenómeno ocurre cuando la tensión aplicada supera un umbral específico, causando que la unión PN del diodo permita el flujo de corriente en sentido inverso sin dañarse [6].

  Este efecto puede producirse por dos tipos de mecanismos. **Efecto Avalancha:** En diodos con voltajes de ruptura altos, los electrones adquieren tanta energía que, al chocar con los átomos del material, liberan más electrones, causando una reacción en cadena.

  Efecto Zener: En diodos con voltajes de ruptura bajos, un campo eléctrico muy fuerte rompe los enlaces entre los átomos del semiconductor, permitiendo que la corriente fluya en sentido inverso [2].

Transistor BJT

El transistor BJT es un dispositivo semiconductor que amplifica o conmuta señales eléctricas. Sus principales parámetros de interés son:

- **Voltaje de Saturación Colector-Emisor:** es la tensión mínima que se establece entre el colector y el emisor de un transistor bipolar de unión (BJT) cuando éste se encuentra en la región de saturación. En esta condición, tanto la unión base-emisor como la unión base-colector están polarizadas en directa, lo que permite que el transistor conduzca la máxima corriente posible desde el colector hacia el emisor [2].

  El valor típico del Vce(sat) para transistores de silicio oscila entre 0,2 V y 0,3 V, dependiendo del tipo de dispositivo y de las condiciones de operación. Este voltaje es relevante en aplicaciones donde el transistor se utiliza como un interruptor, ya que en la región de saturación la caída de tensión entre colector y emisor es mínima, permitiendo un mayor paso de corriente y reduciendo la disipación de potencia [4].

  El Vce(sat) está directamente relacionado con la ganancia de corriente del transistor, ya que un aumento en la corriente base puede llevar al dispositivo a la región de saturación profunda, disminuyendo aún más la tensión colector-emisor. Este parámetro es fundamental en el diseño de circuitos de conmutación, como fuentes de alimentación, controladores de motores y circuitos digitales, donde se busca minimizar las pérdidas por conducción [6].

- **Beta:** Es el parámetro que indica la ganancia de corriente en el transistor. Específicamente, β es la relación entre la corriente de colector (IC) y la corriente de base (IB) cuando el transistor está en su región activa (donde puede amplificar la señal):

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

•Región Activa: Aquí, el transistor amplifica y β mantiene una relación aproximadamente lineal entre IB y IC.

•Región de Saturación: En esta región, β no se cumple de la misma forma, y la corriente de colector está limitada por la resistencia de saturación interna.

•Región de Corte: El transistor está apagado, y no hay corriente significativa en colector ni en base, por lo que β no aplica.

Es un indicador crucial de la capacidad de amplificación de corriente de un transistor BJT, lo cual lo hace fundamental en circuitos de amplificación y conmutación.

Transistor MOSFET

Los MOSFETs son transistores de efecto de campo ampliamente utilizados en aplicaciones de alta frecuencia y baja potencia. Los parámetros son:

- **Voltaje gate-source de umbral:** es un parámetro clave en los transistores de efecto de campo (MOSFET), tanto de canal n como de canal p. Esta tensión representa el valor mínimo de la diferencia de voltaje entre la puerta (G) y la fuente (S) necesario para crear un canal conductor entre el drenaje (D) y la fuente, permitiendo el paso de corriente a través del transistor.

  Cuando la tensión Vgs es menor que la Vgs(th), el transistor permanece en su estado de corte, es decir, no conduce corriente. Cuando Vgs alcanza o supera la Vgs(th), el transistor entra en su región de conducción, y la corriente entre el drenaje y la fuente (Ids) aumenta dependiendo del valor de Vgs [2].
- **Resistencia Drain-Source:** se refiere a la resistencia interna entre el drenaje (D) y la fuente (S) cuando el transistor está en su estado de conducción (es decir, cuando está encendido). Esta resistencia es un parámetro clave en la eficiencia del MOSFET, especialmente en aplicaciones de conmutación y amplificación, donde una baja resistencia R_DS(on) es deseable para minimizar las pérdidas por disipación de potencia [6].

  Cuando el MOSFET está en la región de saturación, con una diferencia de tensión entre la puerta (G) y la fuente (S) superior al umbral Vgs(th), el canal conductor entre el drenaje y la fuente se forma, permitiendo que la corriente fluya. En esta situación, R_DS (on) representa la resistencia del canal conductor, que se ve influenciada por el voltaje de la puerta (Vgs), la

geometría del transistor y las características del material semiconductor utilizado [4].

4. DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADO

4.1 Requerimientos

Este apartado clasifica y enumera los requerimientos necesarios para el diseño y desarrollo del sistema de medición. Se divide en parámetros de funcionalidad o Funcionales, Calidad y Restrictivos, con el fin de que el sistema cumpla con los objetivos designados y planteados para el proyecto.

Funcionales:

1. El sistema medirá el Voltaje saturación Colector-Emisor con condiciones de 0,3V a 7.5V para transistores BJT.
2. El dispositivo medirá el Beta de un transistor BJT en un rango de 10 - 1000.
3. El sistema medirá el foward voltage de diodos rectificadores y Schotkky en el rango de 0.2 a 5 voltios.
4. El sistema medirá el voltaje de ruptura de diodos Zener en el rango de 0.2 a 12 voltios.
5. El sistema medirá de Vgsth de 0V a 10V para MOSFET's.
6. El dispositivo medirá resistencia drain-source de encendido de un transistor Mosfet en un rango de 1m hasta 1 Ohms.

Calidad (error precisión)

1. El dispositivo medirá un error máximo de 0.05V para el V_f (Forward Voltage).
2. El dispositivo medirá un error máximo de 0.1V para voltaje de saturación de colector-emisor
3. El dispositivo medirá un error máximo de 5 para el beta
4. El dispositivo medirá un error máximo de 0.05V para el Vgsth
5. El dispositivo medirá un error máximo de 1mOhm para la resistencia de drain-source de encendido de un transistor Mosfet

6. El dispositivo medirá un error máximo de 0.1V para el voltaje de ruptura de diodos Zener.

Restrictivos(resolución)

1. El dispositivo tendrá una resolución de medida para el Forward Voltage de 0.1V
2. El dispositivo tendrá una resolución de medida para el voltaje de saturación de colector-emisor de 0.1V
3. El dispositivo tendrá una resolución de medida para Beta de 5
4. El dispositivo tendrá una resolución de medida para el Vgsth de 0.1V
5. El dispositivo tendrá una resolución de medida para la resistencia de drain-source de encendido de un transistor Mosfet de 1mOhm
6. El dispositivo tendrá una resolución de medida para el voltaje de ruptura de diodos Zener de 0.1V
7. El sistema debe ser completamente autónomo, lo que significa que no puede depender de instrumentación externa, como osciloscopios, multímetros, o generadores de señal, para realizar las mediciones.
8. El sistema de visualización o despliegue de los resultados debe estar integrado en el dispositivo diseñado, en el que se muestre numéricamente el resultado buscado
9. El dispositivo no incluirá un sistema de verificación o corrección automática de las conexiones realizadas por el usuario. Será responsabilidad del usuario realizar las conexiones correctas de los componentes al sistema para obtener resultados precisos
10. El dispositivo no está diseñado para medir o analizar polaridades inversas en los componentes. Por lo tanto, mediciones como el voltaje negativo de compuerta en transistores MOSFET de canal P no serán posibles con este sistema.
11. El sistema no incluirá mecanismos internos para detectar o protegerse contra sobrecargas eléctricas. Es responsabilidad del usuario asegurar que el dispositivo esté conectado a un circuito de protección adecuado, como un fusible o algún otro elemento de protección.

4.2 Metodología del Diseño

Este apartado explica y muestra la metodología aplicada en el diseño del sistema de medición, estructurada en Investigación y Análisis, Generación de Ideas y Concepción, Desarrollo de

Concepto y Diseño, Resultado y conclusiones, como se estructura de manera lineal en la Figura 1.

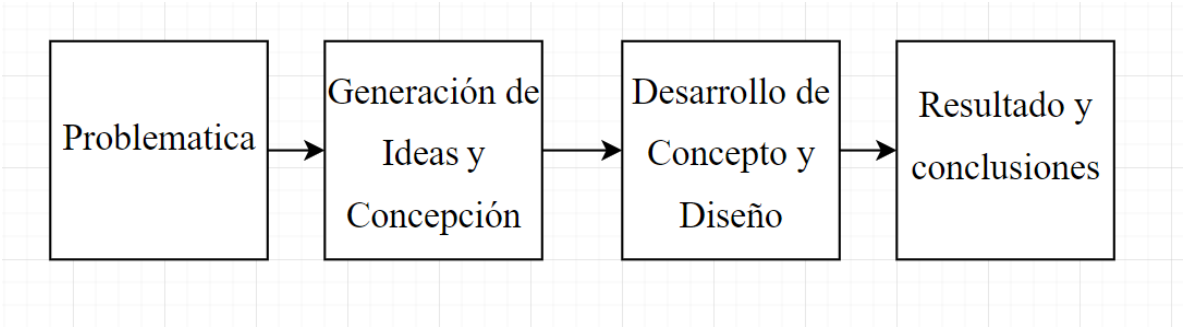


Figura 1. Proceso metodología del diseño

El proceso sistemático y lineal, contribuyo al desarrollo ordenado y preciso del sistema de medición.

1. Problemática

En esta etapa, se evalúan las falencias actuales en el proceso de medición de parámetros en elementos electrónicos, que son los diodos y transistores, en donde la tabla de parámetros del componente no puede definir su comportamiento y valores y no sabremos si el componente esta dañado o es una falsificación, con esta problemática ya identificada, se utiliza como base para poder desarrollar las ideas, el diseño y los resultados del dispositivo diseñado.

2. Generación de ideas y concepción

Esta etapa se divide en dos formulaciones, en idear la solución al problema determinado y a partir del problema, escoger los requerimientos técnicos y funcionales del sistema para poder cumplir con los objetivos designados.

Solución Propuesta

En este punto, se plantea desarrollar un sistema dedicado a medir los parámetros críticos de semiconductores, enfocándose en seis indicadores principales de diodos y transistores. El diseño propuesto está orientado a obtener resultados precisos y confiables, superando las limitaciones de basarse únicamente en datos teóricos. La solución aborda la necesidad de

contar con información práctica para la calibración y el ajuste de componentes electrónicos en situaciones reales de funcionamiento.

Requerimientos

En esta fase, se establecen las especificaciones técnicas y funcionales del sistema, considerando elementos como la precisión, los rangos de medición y las condiciones de trabajo. Además, se delimitan las restricciones del diseño, destacando su orientación teórica y la falta de implementación en esta etapa inicial. Estos lineamientos permiten garantizar que el sistema cumpla con los objetivos previstos y facilite la evaluación del desempeño real de los semiconductores seleccionados.

3. Desarrollo de concepto y diseño

Para esta etapa se tienen dos tipos de diseño, el diseño conceptual, que genera una idea de diseño básica en donde hay solo entradas y salidas y un sistema central de caja negra, en el diseño detallado están todas la variables y constantes que se usaran en el sistema.

Diseño Conceptual

Durante esta fase, se construye un esquema conceptual que establece la estructura y los elementos principales del sistema de medición. La propuesta incluye la definición de la arquitectura general del dispositivo y la forma en que cada parámetro será analizado. Este concepto integra diagramas de bloques y detalla las relaciones básicas entre los componentes, proporcionando una visión clara del funcionamiento del sistema y de su implementación futura en el diseño detallado.

Diseño Detallado

En esta fase de diseño detallado, se precisan los circuitos, configuraciones y componentes requeridos para medir los parámetros clave de diodos y transistores. Se realiza la selección de dispositivos óptimos y se calculan los valores necesarios para elementos como resistencias

y capacitores, asegurando que satisfagan los requisitos técnicos definidos. Este diseño exhaustivo sirve como guía para su implementación en una etapa posterior, cumpliendo con los estándares y condiciones previamente establecidos.

4. Resultado y conclusiones

Esta etapa final es crucial para determinar el éxito del proyecto. Al comparar los resultados teóricos con los objetivos iniciales, se evalúa la efectividad del diseño y se identifican áreas de oportunidad para futuras investigaciones. Las conclusiones no solo resumen los hallazgos, sino que también proyectan el potencial de aplicación del sistema en escenarios reales.

4.3 Diseño del sistema

En esta fase cada variable se divide en 3 subcategorías, la primera es el diagrama de caja negra, donde se muestra el subsistema de manera intuitiva

4.3.1 Diseño conceptual

Diagrama caja negra

El empleo de cajas funciona para identificar las entradas y salidas en un sistema; realizamos un diagrama de caja Negra del sistema y una para cada uno de los parámetros a medir

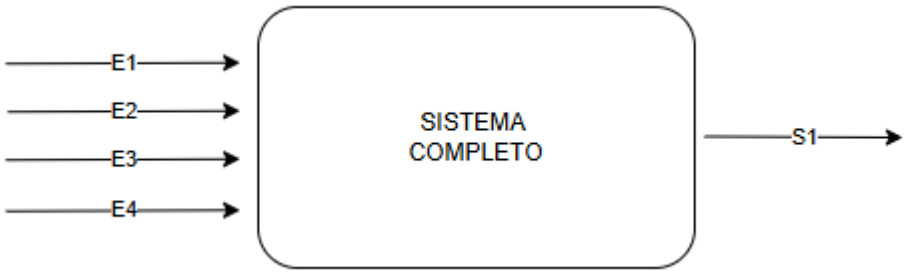


Figura 2. Caja Negra Sistema Completo

Siguiendo el diseño propuesto (Figura 2), se identifican las entradas y salidas del sistema integrado de la siguiente manera:

Entradas:

- E1: Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- E2: Voltaje de alimentación del sistema
- E3: Selector de parámetro a medir.
- E4: Componente semiconductor a medir.

Salidas:

- S1: Visualización del parámetro.

1. V_f: Voltaje de conducción directa de un diodo.

El voltaje de conducción directa ($\boldsymbol{Vf}$) es el voltaje necesario para que una corriente fluya a través de un diodo en la dirección directa. Varía según el tipo de diodo y la temperatura.

Formas de medición

Idea 1: Conectar un diodo en serie con una carga conocida, luego aplicar un voltaje creciente hasta que se observe una corriente estable. El voltaje en ese punto será el V_f.

Inconvenientes:

• El proceso puede ser impreciso si la corriente es demasiado baja o alta, ya que se puede pasar por alto el punto exacto de conducción.

• Es difícil obtener un valor preciso para diodos muy pequeños, como los Schottky.

Idea 2: Usar una fuente de corriente constante de 10 mA, debido a que es una corriente estándar para la excitación justa en la curva de conducción para cada diodo y midiendo el voltaje en la salida del diodo. Con la corriente en el valor especificado, el voltaje en ese punto será el V_f.

Inconvenientes:

• Puede ser complicado mantener la corriente constante, ya que las variaciones en la temperatura pueden afectarla.

• Necesita un equipo especializado para controlar la corriente de manera precisa, como

fuentes de corriente de precisión.

Idea seleccionada

Se selecciona la segunda idea, ya que hay facilidad de diseñar una fuente de ese amperaje de bajo costo, también con el fin de fijar voltaje y corriente para que no hay fluctuaciones y la medición no tenga corrimientos por la variación, y la corriente de 10 mA permite llevar a región de ruptura a la mayoría de los diodos, en caso de algunos Schottky puede llegar a sobrecalentarlos pero es la corriente ideal para excitar cualquier diodo, se debe asegurar una entrada de voltaje que permita una salida de foward voltage de diodos rectificadores y Schotkky en el rango de 0.2 a 5 voltios, y una fuente de corriente en un rango de 5 a 10 mA, que pueden que pueden ser Fuente de corriente de salida bidireccional controlada por voltaje, fuente de corriente con BJT o regulador de voltaje ajustable como fuente de corriente.

La **Figura 3.** muestra la caja negra de medición del Voltaje de conducción directa de un diodo.

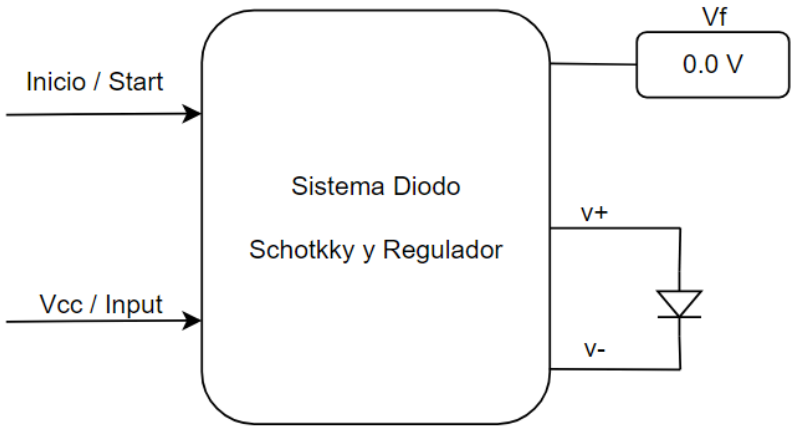


Figura 3. Caja Negra Sistema Diodo Schottky/Regulador

Entradas:

- Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- Vcc / Input: Tensión de alimentación de entrada al sistema. Su valor determina, en parte, la tensión de salida Vf

Salida:

- Vf: Salida donde se visualizará la Tensión del diodo en conducción
- Diodo (Schottky/Regulador): Dispositivo a medir
- V+: salida positiva por la cual sale corriente hacia el dispositivo
- V-: salida por la cual retorna la corriente del dispositivo

Voltaje Directo (Vf)

Sistema de inicio de tipo interruptor, conectado a la fuente de alimentación que interactúa directamente con el diodo, al generar un voltaje en el dispositivo, la inteligencia lo capta (Microcontrolador), y genera la visualización en un panel (LED o LCD)

La **Figura 4**. muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 3.**

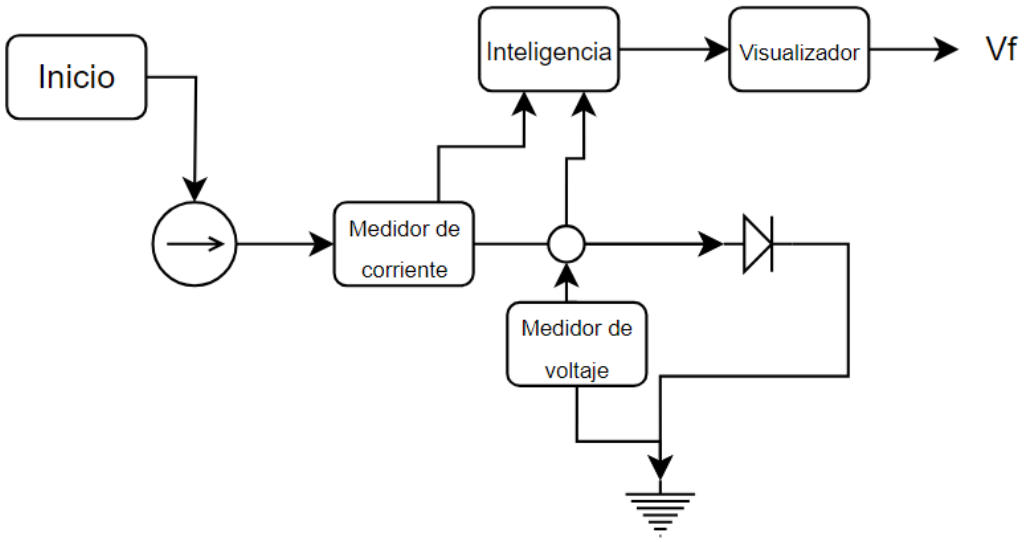


Figura 4. Subsistema Vf

2. V_z: voltaje de ruptura de diodos Zener.

Formas de medición

Idea 1: Conectar un diodo Zener en inversa en serie con una carga conocida, luego aplicar un voltaje creciente hasta que se observe una corriente estable. El voltaje en ese punto será el Vz.

Inconvenientes:

• El proceso puede ser impreciso si la corriente es demasiado baja o alta, ya que se puede pasar por alto el punto exacto de conducción.

• Aumenta el riesgo de sobrecalentamiento si no se controla bien la corriente.

Idea 2: Usar una fuente de corriente constante de 5 mA, debido a que es una corriente estándar para la excitación justa en la curva de conducción para cada diodo y midiendo el voltaje en la salida del diodo. Con la corriente en el valor especificado, el voltaje en ese punto será el.

Inconvenientes:

• Es muy restrictiva debido a que no puede ser usada en Zener de alta potencia.

• Necesita un equipo especializado para controlar la corriente de manera precisa, como fuentes de corriente de precisión.

Idea seleccionada

Como en la sección del diodo regulador y Schottky se selecciona la segunda idea, ya que hay facilidad de diseñar una fuente de ese amperaje de bajo costo, también con el fin de fijar voltaje y corriente para que no hay fluctuaciones y la medición no tenga corrimientos por la variación, y la corriente en un rango de 2 a 5mA permite llevar a región de ruptura a la mayoría de los diodos Zener, se debe asegurar una entrada de voltaje que permita una salida de voltaje de ruptura de diodos Zener en el rango de 0.2 a 12 voltios, y una fuente de corriente de 5 mA, que pueden ser La bomba de corriente de Howland, fuente de corriente con BJT o regulador de voltaje ajustable como fuente de corriente.

La **Figura 5**. muestra la caja negra del sistema de medición del voltaje de ruptura de un diodo Zener

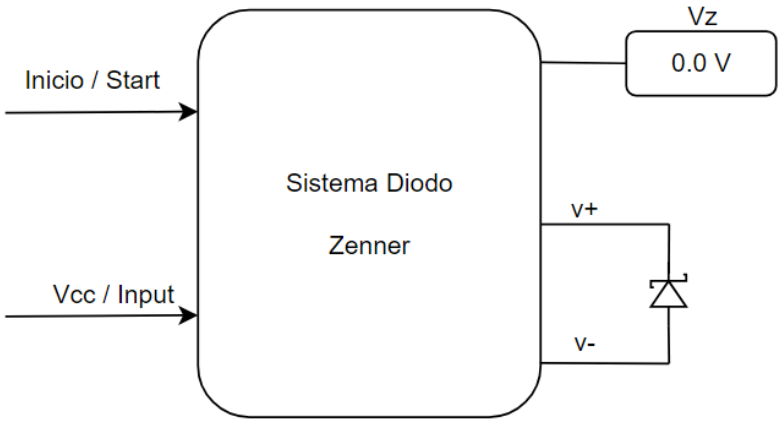


Figura 5. Caja Negra Sistema Diodo Zener

Entradas:

- Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- Vcc / Input: Tensión de alimentación de entrada al sistema. Su valor determina, en parte, la tensión de salida Vz

Salida:

- Vz: Salida donde se visualizará la Tensión del diodo en conducción inversa
- Diodo (Zener): Dispositivo a medir
- V+: salida por la cual retorna la corriente del dispositivo
- V-: salida positiva por la cual sale corriente hacia el dispositivo

Subsistema - Voltaje de Ruptura de un Diodo Zener

Sistema de inicio de tipo interruptor, conectado a la fuente de alimentación que interactúa directamente con el diodo zener en conexión inversa, al generar un voltaje en el dispositivo, la inteligencia lo capta (Microcontrolador), y genera la visualización en un panel (LED o LCD)

La **Figura 6.** muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 5.**

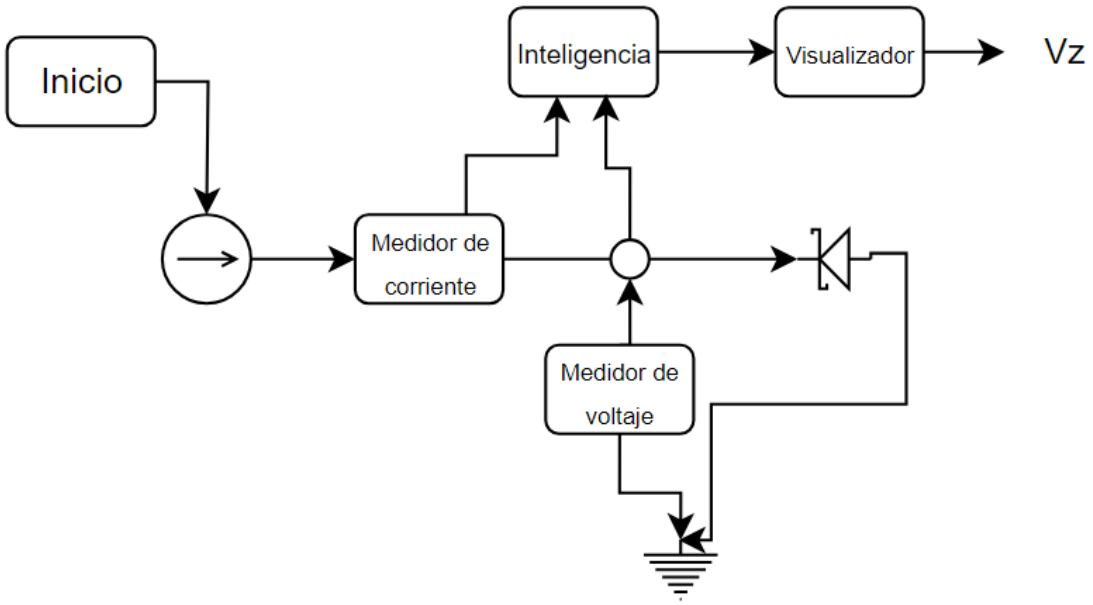


Figura 6. Subsistema medición Vz

3. h_{fe}o Beta: ganancia de corriente DC de un transistor bipolar.

La ganancia de corriente en modo común, Hfe, es una característica fundamental de los transistores bipolares que describe la capacidad del dispositivo para amplificar una pequeña señal de corriente en la base en una corriente mucho mayor en el colector.

Formas de medición:

Idea 1: Se puede obtener el valor de β midiendo las corrientes en las terminales del transistor en zona activa y es aplicable para mediciones más precisas.
Para este método, se mide β calculando la relación entre la corriente de colector (I_C) y la corriente de base (I_B), se deja una corriente de base fija y se realiza medición del voltaje Vc, este dato se lleva a un microcontrolador e internamente se realiza los cálculos de la IC, para calcular el beta con la ecuación:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

Inconvenientes:

Es necesario contar con una fuente de corriente y un multímetro de alta precisión, se pueden tener variaciones en la resistencia y corriente afectan la precisión de los resultados.

Idea 2: Se puede utilizar un Microcontrolador para inyectar una corriente conocida y medir las corrientes resultantes, aplicando la ecuación de beta.

Inconvenientes:

Las corrientes y voltajes son limitados por las especificaciones del Microcontrolador, restringiendo el método a transistores de señal.

Idea seleccionada

Seleccionamos la idea 1, ya que se tiene mayor rango en la corriente que se puede usar para alimentar la base del transistor, ya sea que se utilice una fuente comercial o se realice una de bajo costo.

La **Figura 7**. Muestra la caja negra para la medición de la variable Beta en los transistores BJT basada en la idea seleccionada.

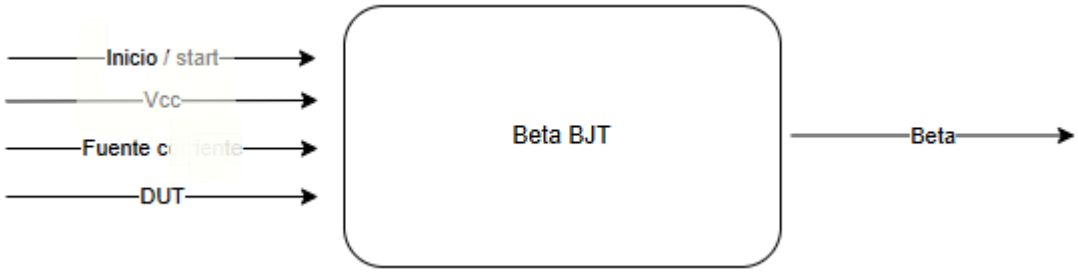


Figura 7. Caja Negra Sistema Medición Beta

Entradas:

- Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- Vcc / Input: Tensión de alimentación de entrada al sistema.
- Fuente de corriente: Corriente inyectada a la base de los transistores BJT a probar.
- DUT: Componente bajo prueba.

Salida:

- Beta: Salida donde se visualizará el valor de Beta cuando está en región activa.

Factor de ganancia de corriente en un transistor BJT Beta

La **Figura 8.** muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 7.**

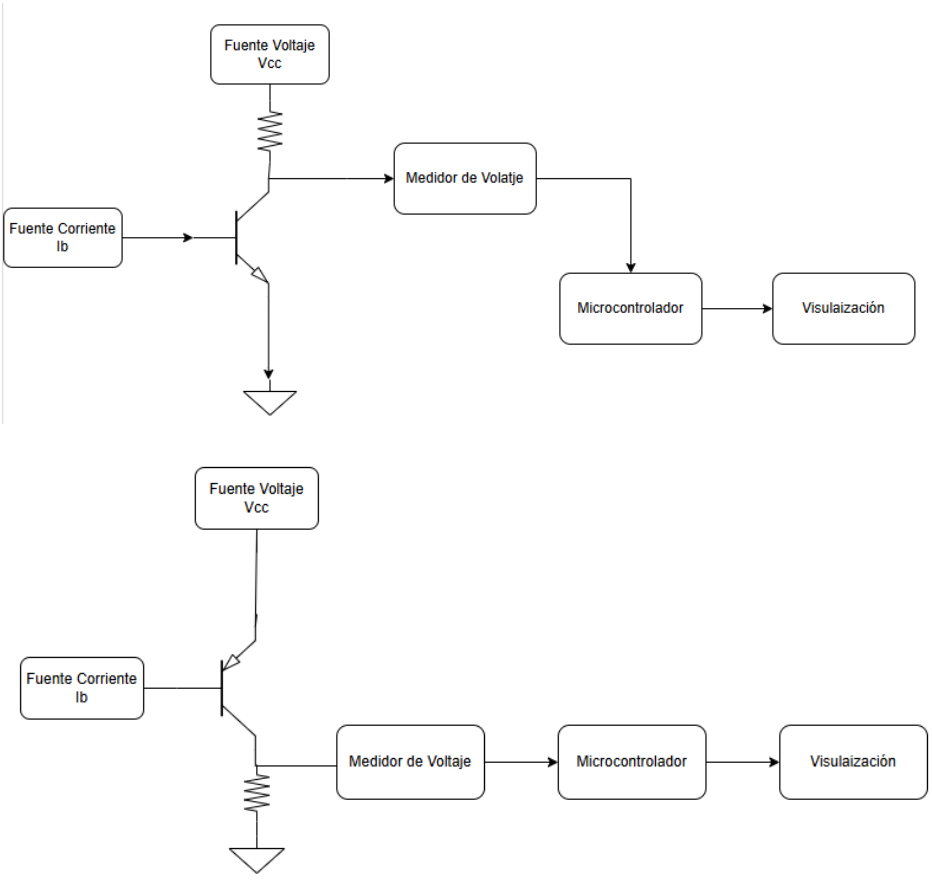


Figura 8. Subsistemas medición de Beta en transistores BJT

4. $V_{ce(sat)}$: voltaje colector-emisor de saturación en un BJT.

El voltaje de saturación colector-emisor ($Vce(sat)$) en un transistor BJT es el voltaje mínimo que se establece entre el colector y el emisor cuando el transistor está en saturación. Esta es la condición en la cual el transistor conduce la máxima corriente de colector posible para una corriente de base determinada, lo que permite que el dispositivo funcione como un interruptor cerrado (o encendido).

Formas de medición

Idea 1: Utilizar resistencias para establecer la corriente de base (I_B) y la corriente de colector (I_C) para forzar al transistor a entrar en saturación.

Inconvenientes:
No es altamente preciso, ya que las resistencias pueden variar con la temperatura.
La precisión depende de los valores exactos de I_B e I_C, que pueden ser difíciles de ajustar con resistencias.

Idea 2: Utilizar una fuente de corriente constante para inyectar una corriente de base precisa, lo que permite una saturación controlada del transistor.

Inconvenientes:
Requiere una fuente de corriente constante, que puede no estar siempre disponible.

Idea seleccionada
Seleccionamos la idea 2, ya que con esta se puede asegurar el valor de la corriente de base y solo controlar la corriente de Colector con una resistencia, la cual se puede ajustar a valores comerciales.

La **Figura 9.** muestra la caja negra del sistema de medición del Voltaje Colector- Emisor de saturación.

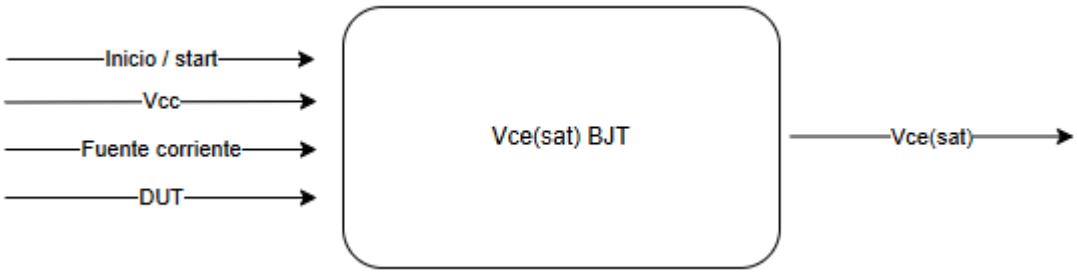


Figura 9. Caja Negra Sistema BJT ($V_{ce(sat)}$)

Entradas:

- Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- Vcc / Input: Tensión de alimentación de entrada al sistema.
- Fuente de corriente: Corriente inyectada a la base de los transistores BJT a probar.
- DUT: Componente bajo prueba.

Salida:

- $V_{ce(sat)}$: Salida donde se visualizará el valor de Voltaje Colector-emisor en saturación.

La **Figura 10.** muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 9.**

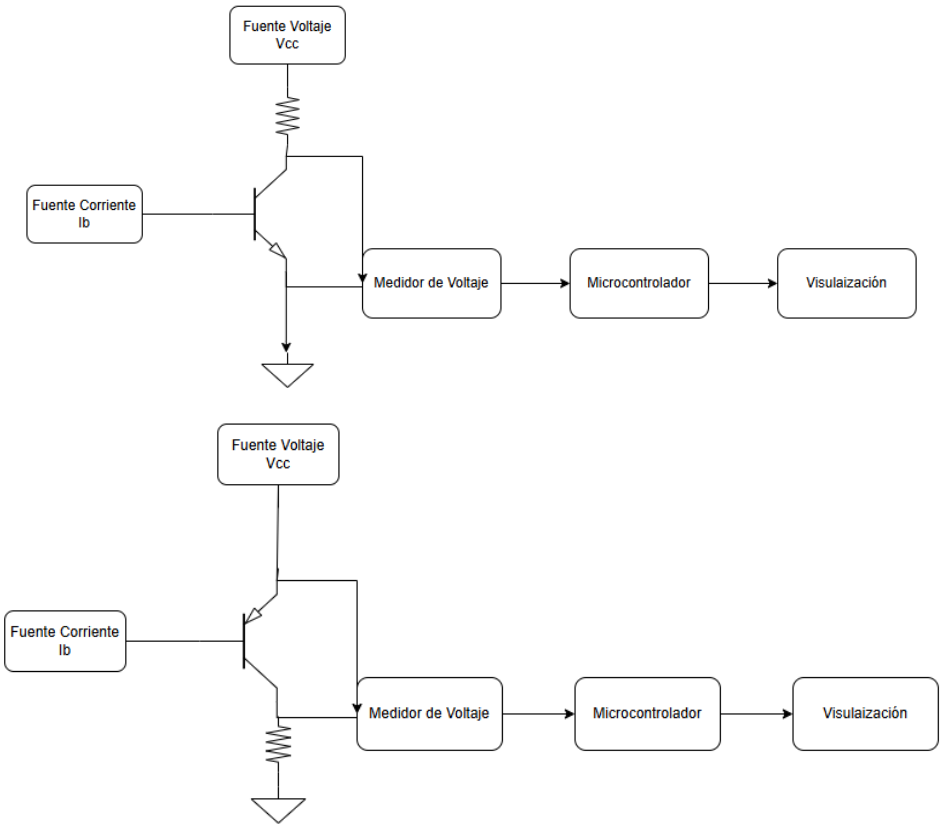


Figura 10. Subsistema de medición Vce(sat) en transistores BJT

5. $V_{GS(th)}$: voltaje gate-source de umbral en transistores MOSFET - $R_{DS(on)}$: Resistencia drain-source de encendido de un transistor MOSFET.

Con fines prácticos, la caja negra y el subsistema de los MOSFET tanto N como P, las variables VGS(th) y RDS(on) se encuentran en el mismo grafdico para evitar redundancia en los esquemáticos.

Formas de medición voltaje gate-source de umbral en transistores MOSFET

Idea 1: Establecer un Vgs que se aproxime al rango del umbral teórico, luego aumentar Vds de manera gradual mientras se mide Id. Este aumento de Vds conllevará un incremento en Id, lo cual confirma el umbral de gate si se sobrepasa la corriente de prueba inicial.

Inconvenientes

- Puede resultar en una corriente elevada que lleve al MOSFET a sobrecalentarse y dañarse, especialmente si se excede el valor de Vds máximo especificado.

Idea 2: Establecer una fuente de corriente entre Drain y Source, así poder medir el voltaje entre Gate y tierra, la corriente de la fuente es de 250µA, circuito probador diseñado por fabricante.

- AN-1001 Understanding Power MOSFET Parameters, Taiwan Semiconductor

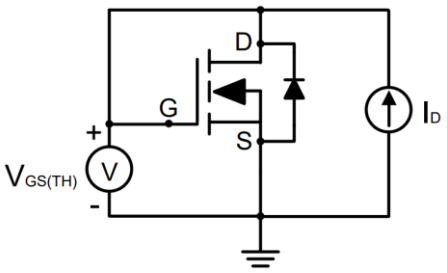


Figura 11. VGS(TH) a partir de una fuente de corriente entre Drain y Source.

Inconvenientes

- Es susceptible a interferencias eléctricas externas, que pueden causar fluctuaciones o imprecisiones en la medición.

- Puede exponerse a temperaturas superiores a las ideales, por lo que puede afectar en la medición exacta del parámetro.

Idea Seleccionada

Se selecciona la segunda opción, ya que el circuito es sugerido por el fabricante, es necesario asegurar 250 microamperios, cumpliendo con el requerimiento de diseño donde el sistema deberá medir un Vgsth de 0V a 10V para MOSFET's N y P, debido a que la corriente necesaria es pequeña en el rango de los microamperios, integrados como el LM317 no pueden ser utilizados debido a su corriente mínima de 3.5 miliamperios, en este caso los circuitos que pueden ser implementados que pueden generar esa corriente sin generar mucho ruido de salida son la bomba de corriente de Howland, fuente de corriente con BJT (En espejo, con resistencia, con diodo Zener).

Formas de medición Resistencia drain-source de encendido de un transistor MOSFET.

Idea 1: Se aplica una fuente de corriente constante, lo suficientemente alta para que no de valores del voltaje no den en escala de microvoltios, se alimenta Gate con una fuente de 10 voltios, y se realiza Ley de Ohm RDS (on) = VDS / ID.

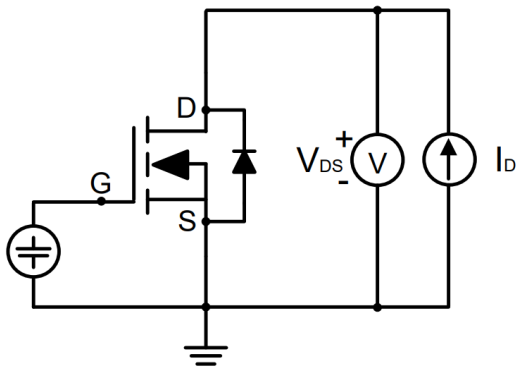


Figura 12. RDS(on) a partir de ley de ohm entre V(DS) e ID

Inconvenientes

- Requiere control preciso de la temperatura
- Los cables y conexiones pueden afectar la medición

Idea 2: Se aplica una corriente pulsada a través del MOSFET (Pulsed Test) y se mide la caída de voltaje durante el pulso. Se minimiza disipación de calor y el aumento de la temperatura, si no se maneja la temperatura, puede alterar la medición de RDS (on) .

Inconvenientes:

- Los resultados pueden ser más difíciles de interpretar debido a la naturaleza pulsante de la corriente.
- Se necesita un equipo especializado para generar y medir pulsos de corriente.

Idea Seleccionada

De igual manera que en el caso del Voltaje gate-source de umbral, se selecciona la primera opción, ya que el circuito es sugerido por el fabricante, es necesario asegurar 250 microamperios, cumpliendo con el requerimiento de diseño donde el sistema medirá resistencia drain-source de encendido de un transistor Mosfet en un rango de 1m hasta 1 Ohms, como la corriente necesaria entra en el rango de los 500 miliamperios, las fuentes de corriente con voltaje ajustable, o circuitos que no necesiten mucha precisión para brindar la corriente necesaria, pueden ser utilizados para obtener el resultado deseado.

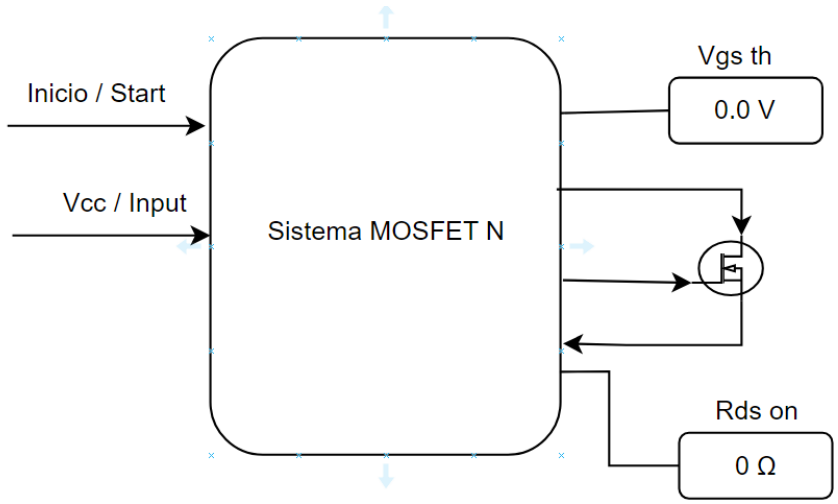


Figura 13. Caja negra Sistema de voltaje gate-source de umbral Resistencia drain-source de encendido en Mosfet N

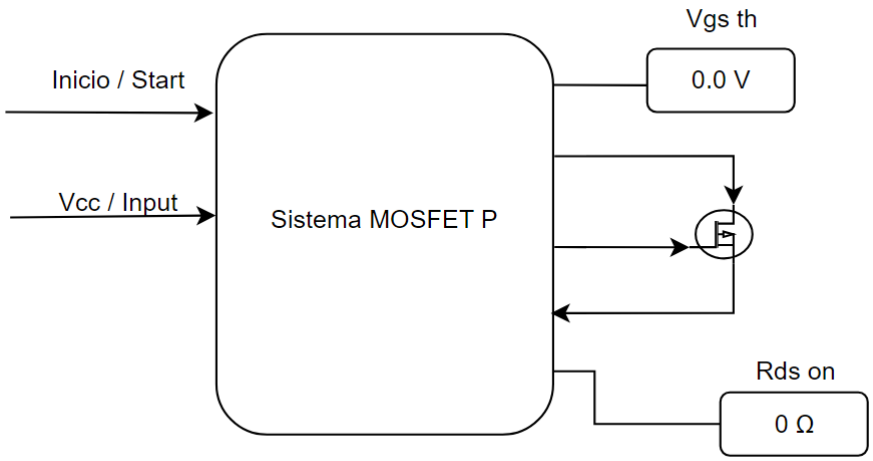


Figura 14. Caja negra Sistema de voltaje gate-source de umbral Resistencia drain-source de encendido en Mosfet P

Entradas:

- Inicio / Start: Señal de control digital que activa o desactiva el sistema.
- Vcc / Input: Tensión de alimentación de entrada al sistema. Su valor determina, en parte, la tensión de salida Vz

Salida:

- $V_{GS(th)}$: Salida donde se visualizará el voltaje gate-source de umbral en transistores MOSFET
- $R_{DS(on)}$: Salida donde se visualizará la Resistencia drain-source de encendido de un transistor MOSFET
- Dispositivo (MOSFET) conectado al sistema de medición
- GATE: salida positiva por la que entra la señal al dispositivo
- DRAIN: salida del sistema por la que se alimenta de Vcc
- GATE: salida del sistema donde la señal retorna a tierra

Voltaje de Umbral

Sistemas de inicio tipo interruptor, da inicio al proceso donde la fuente de alimentación brinda energía entre drain y source, generando una señal circundante por el dispositivo, para posteriormente medir voltaje en gate y que la inteligencia (Microcontrolador), genere visualización en un panel (LCD o LED)

La **Figura 15 y 16.** muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 13 y 14** respectivamente.

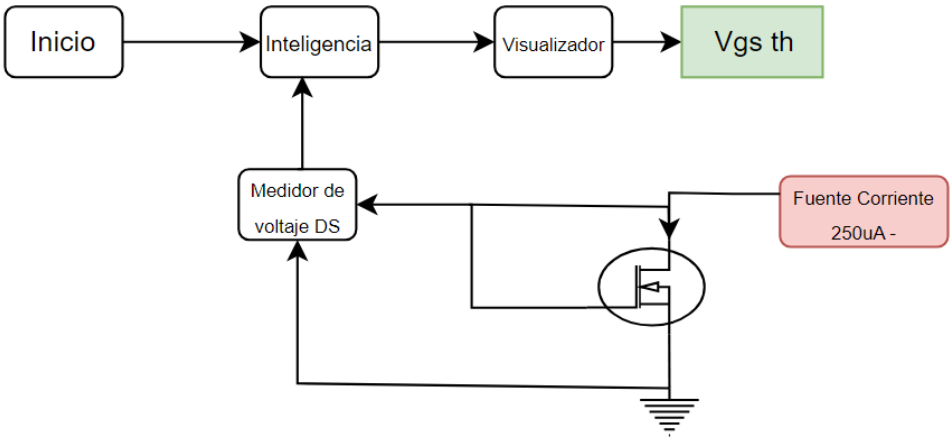


Figura 15. Subsistemas Vgs(th) MOSFET Tipo N.

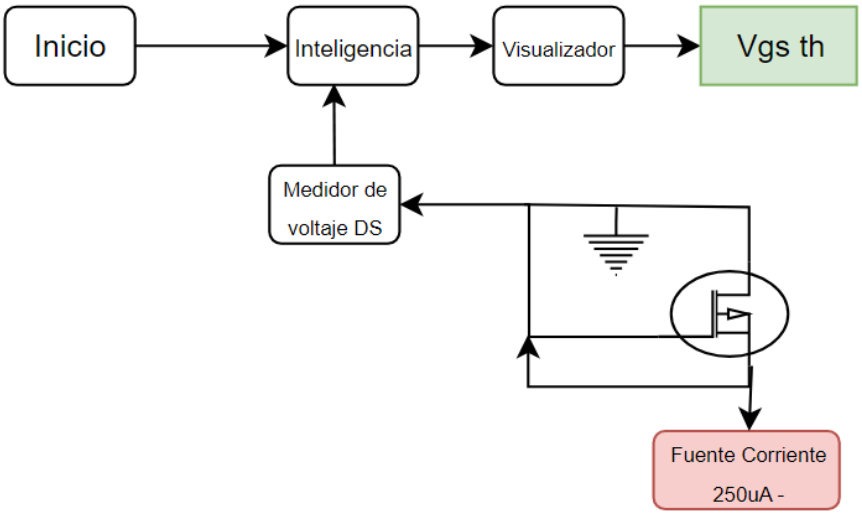


Figura 16. Subsistema Vgs(th) MOSFET Tipo P.

Resistencia Drain-Source

Sistemas de inicio tipo interruptor, da inicio al proceso donde la fuente de alimentación brinda energía entre Gain y tierra con un V +/- 10 voltios, generando una señal circundante por el dispositivo, para posteriormente medir voltaje en Drain y Source, se alimenta Drain o Source (Dependiendo si el MOSFET es N o P) con una corriente I de una fuente fija de corriente, donde la inteligencia (Microcontrolador) realiza una operación interna (Ley de Ohm) y posterior genere visualización en un panel (LCD o LED).

La **Figura 17 y 18.** muestra los subsistemas diseñados con base en la caja negra de la **Figura 13 y 14.** Respectivamente.

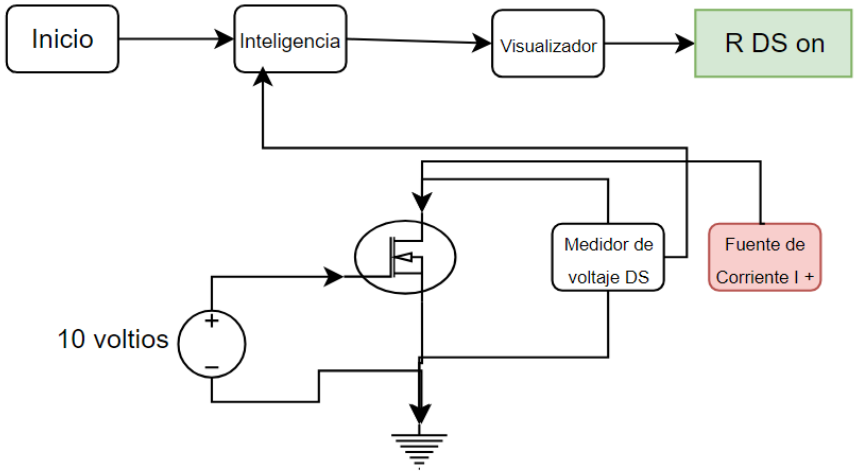


Figura 17. Subsistema RDS (on) MOSFET Tipo N.

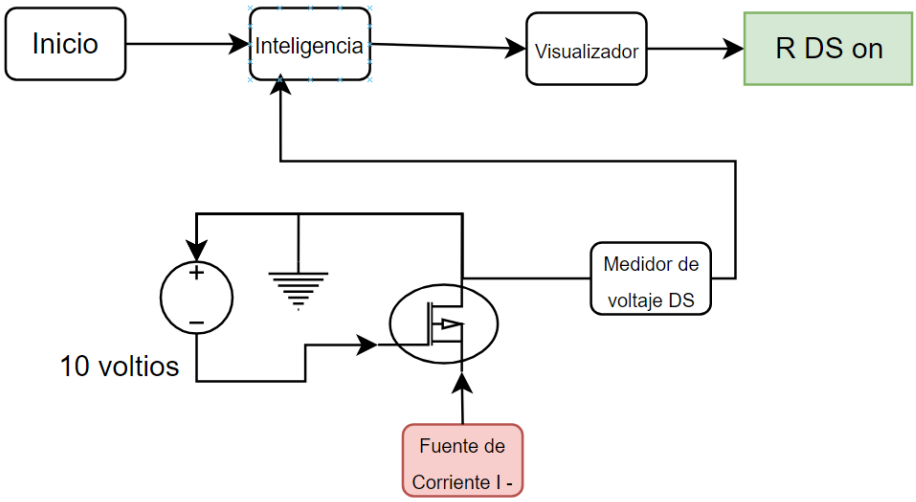


Figura 18. Subsistema RDS (on) MOSFET Tipo P.

4.3.2 Diseño Detallado

Se presenta la selección de método de medición de cada una de las cajas/subsistemas y se genera el sistema detallado.

A partir de las ideas seleccionadas en el diseño conceptual, se estructura y se compara más a detalle que tipo de fuentes de corrientes fijas se pueden emplear para el funcionamiento del

sistema y que tipo de integración se realizara para obtener cada variable con las especificaciones propuestas en los requerimientos

Fuente de Corriente fija

La bomba de corriente de Howland

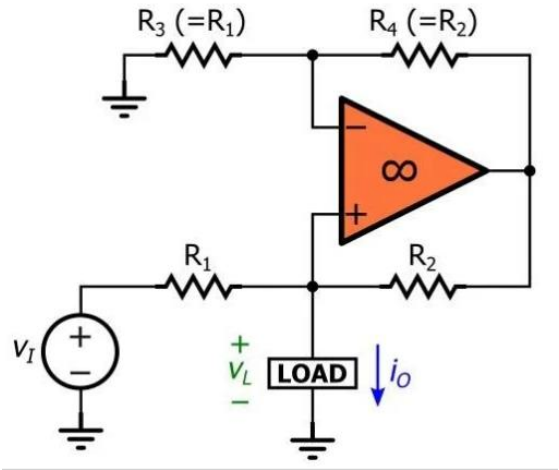


Figura 19. Circuito bomba de corriente de Howland

La bomba de corriente de Howland es un circuito que acepta un voltaje de entrada vI, lo convierte en una corriente de salida I0 = Av1, con A como ganancia de transconductancia, y bombea I0 a una carga LD, independientemente del voltaje Vl desarrollado por la propia carga, la corriente es determinada por la siguiente operación:

$$i_O = i_1 + i_2 = \frac{v_I - v_L}{R_1} + \frac{v_A - v_L}{R_2}$$

Figura 20. Relación de corriente en el circuito

Fuente de corriente con BJT (En espejo, con resistencia, con diodo Zener)

La corriente estimada es I=(Vz-Vbe) / Re, si se mantiene constante la corriente de base, se puede asumir que Vbe también lo es. Con una corriente de base constante se puede mantener el nivel bajo para de garantizar la estabilidad de la corriente en el diodo Zener y evitar posibles variaciones en el voltaje Vbe. Con una corriente tan baja como 250 µA, no interfiere que Hfe sea bajo ya que la corriente de base sera del rango de los microamperios, debido a eso se puede asumir que Ic u Hfe no son parámetros de diseño fundamentales, el parámetro fundamental es Vce donde se debe asegurar que debe ser mayor de 10 voltios según parámetros.

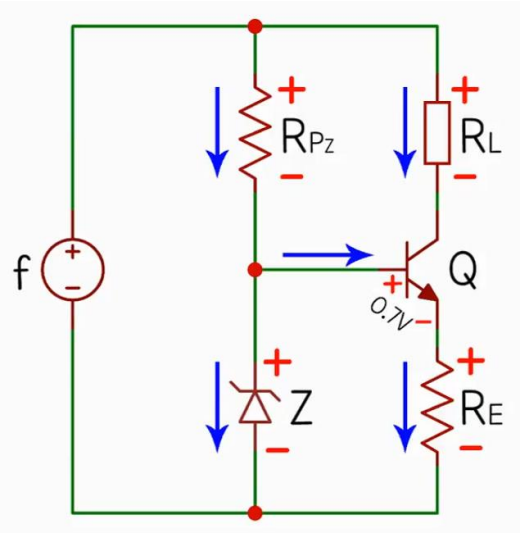


Figura 21. Circuito fuente de corriente con BJT y zener

$$V_Z = V_{BEQ} + V_{RE}$$

$$I_{RE} = \frac{V_{RE}}{R_E}$$

$$I_{EQ} \cong I_{CQ}$$

$$I_{RE} \cong I_{RL} \quad (I_{RE} = I_{RL} + I_{BQ})$$

Figura 22. Relación de corriente del circuito

Fuente de corriente con regulador de Voltaje ajustable

El regulador integrado garantiza una caída de tensión constante de 1.25 V entre los terminales de ajuste (Adj) y salida (Out). Al insertar una resistencia entre estos pines, la resistencia experimentará una diferencia de potencial fija de 1.25 V. Con este valor de tensión conocido y el valor de la resistencia, se puede determinar la corriente de polarización a través de la resistencia aplicando la Ley de Ohm

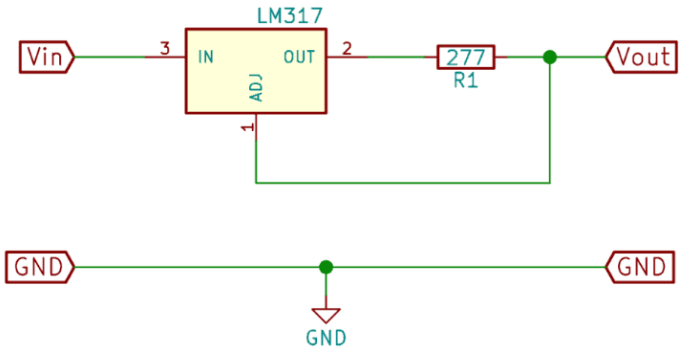


Figura 23. Circuito Lm317 como fuente de corriente

Fuente externa variable (Fuente de laboratorio o comercial)

Una fuente variable externa, como las utilizadas en laboratorios, se caracteriza por ofrecer múltiples beneficios y algunas limitaciones que deben considerarse en su implementación. Entre sus principales ventajas destacan la alta precisión y la capacidad de ajustar el voltaje con exactitud, lo que resulta esencial para obtener valores específicos en diversas aplicaciones. Además, estas fuentes suelen contar con un rango de operación amplio, que puede superar los 25V, adaptándose a diferentes necesidades.

Otro aspecto positivo es su estabilidad, ya que proporcionan una señal de salida limpia y con un nivel mínimo de ruido eléctrico. Asimismo, su facilidad de uso simplifica las pruebas y experimentos, ya que no es necesario diseñar o construir circuitos adicionales: basta con realizar las conexiones adecuadas y ajustar los parámetros requeridos. Sin embargo, también presentan limitaciones importantes. Su costo suele ser elevado, especialmente en modelos que ofrecen alta resolución y control avanzado. Además, su tamaño y peso los convierten en dispositivos poco prácticos para proyectos que exijan portabilidad o compactación. Al ser

dispositivos externos, no son ideales para integrarse directamente en un sistema o diseño específico.

Topologías:

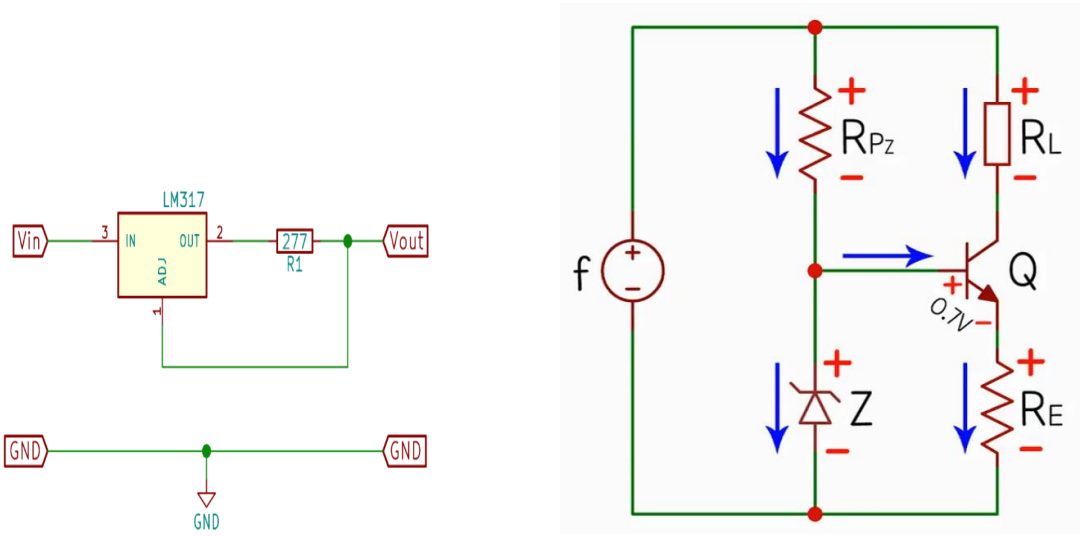


Figura 24. Circuitos seleccionados

- Se utiliza la Fuente de corriente con regulador de Voltaje ajustable por simplicidad para medir 3 parámetros (V_f, V_z, $R_{DS(on)}$), debido a la practicidad, simplicidad, fácil implementación, valor variable en configuración estándar, pueden entregar de 0 a 20 v y dependiendo del diseño pueden entregar aproximadamente 500 mA.

  A partir de las siguientes tablas se determina la corriente para generar la excitación necesaria en cada componente para poder realizar la medición de la variable respectivamente:

Tabla 1. Diodos regulador y Schocttky

Modelo	Voltaje Nominal (V)	Corriente Promedio (I)	Potencia Nominal (P)
1N5819	0.4V	10 mA	1A
BAT54	0.35V	5 mA	200 mW
SS14	0.45V	10 mA	1A
MB6S	0.55V	8 mA	1.5A

LM431	Ajustable (2.5V - 36V)	8 mA	500 mW
TL431	Ajustable (2.5V - 36V)	9 mA	1W
AZ431	Ajustable (2.5V - 36V)	7 mA	1W
SB560	0.6V	5 mA	5A
STPS20H100	0.7V	9 mA	20A

A partir de lo diodos de la **Tabla 1** podemos generalizar la corriente de activación que será con respecto a un promedio de 10 mA, para poder llevar a régimen activo a cualquier diodo regulador y Schocttky.

En la **Tabla 2.** Se enlistan los diodos Zener que están en el rango establecido en los requerimientos.

Tabla 2. Diodo Zener

Modelo	Voltaje de Ruptura (VZ)	Corriente Mínima de Excitación (IZ min)	Potencia Nominal (P)
BZX55C2V4	2.4V	1 mA	500 mW
BZX55C6V2	6.2V	3 mA	500 mW
1N5251	8.2V	1.5 mA	500 mW
1N4732A	4.7V	2 mA	1W
1N4738A	8.2V	3 mA	1W
1N4742A	12V	5 mA	1W
BZX84C12	12V	2 mA	300 mW
MMBZ5242B	12V	2.5 mA	500 mW
PLDZ6V8	6.8V	1.5 mA	1W
PLDZ8V2	8.2V	2 mA	1W
PLDZ12V	12V	3 mA	1W

De igual manera que en los diodos regulador y Schocttky, escogemos una corriente de 5 mA, para asegurar que cualquier diodo zener llegue a la región de ruptura.

- Debido a que la corriente mínima que puede suministrar depende de que regulador se utilice, como deseamos asegurar una corriente de 10 mA para diodos regulador y Schocttky, 5 mA para diodos zener y 500 mA para RDS (on), debemos calcular la resistencia que nos permita el flujo de la corriente deseada.

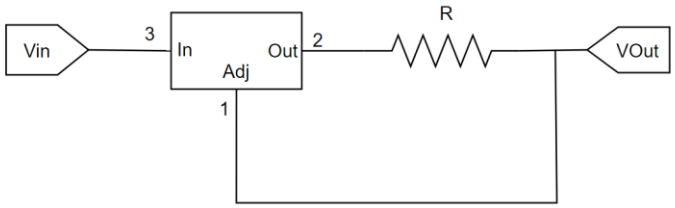


Figura 25. Circuito fuente de corriente fija por regulador de voltaje variable

Ya que se tiene el circuito a emplear, se escogerá que regulador de voltaje variable se utilizará en las respectivas configuraciones:

Tabla 3. Reguladores de voltaje variable

Regulador	Rango de Voltaje de Salida (V)	Corriente de Salida Máxima (A)	Corriente Mínima de Salida (mA)	Precisión (%)	Voltaje de Entrada Máximo (V)	Características Destacadas	Costo (COP)
LM317/LM377	±1.25 - 37	1.5	3-5	±1.5	40	Amplia disponibilidad, bajo costo, fácil de usar	$2,000 - $5,000
LT3080	0 - 36	1.1	0.001 (1 µA)	±1	36	Alta precisión, operación a baja caída de voltaje	$50,000 - $80,000
L200	2.85 - 36	2.0	0.5 - 1	±2	40	Protección interna contra sobrecarga y cortocircuito	$10,000 - $20,000
LM350	1.25 - 33	3.0	5	±1	35	Ideal para aplicaciones de mayor corriente	$5,000 - $10,000

LT1083	**1.25 - 37**	**7.5**	**10**	**±1**	**40**	**Soporta alta corriente, baja resistencia térmica**	**$80,000 - $120,000**

Por lo anterior, se decide usar el regulador de voltaje LM317 debido a que, con una configuración estándar, existe la forma de llegar a voltajes negativos y ajustarlos, además de ser un componente ampliamente conocido por su versatilidad y confiabilidad. Su precio es altamente conveniente, oscilando entre $2,000 y $5,000 COP, lo que lo hace ideal para proyectos con presupuestos ajustados. Su fácil acceso en el mercado local y en tiendas en línea garantiza su disponibilidad. Adicionalmente, el LM317 cuenta con un rango de voltaje de salida de 1.25V a 37V, una corriente máxima de salida de 1.5A, y una precisión de ±1.5%, características que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones. A pesar de requerir una corriente mínima de 3-5 mA para mantener la regulación, su balance entre costo, rendimiento y facilidad de uso lo convierte en la opción más práctica y eficiente para el diseño.

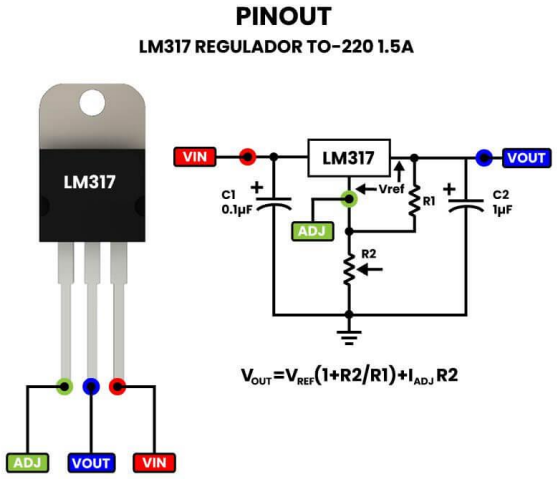
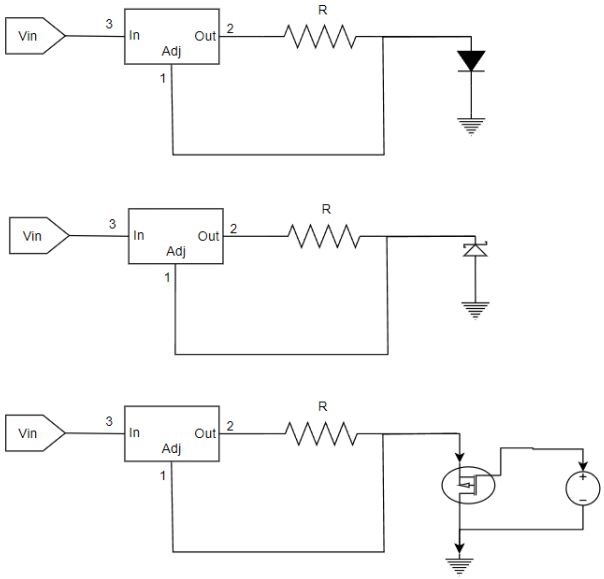


Figura 26. Circuito Regulador de Voltaje usando LM317
[1]https://uelectronics.com/producto/lm317-regulador-de-voltaje-to-220-1-5a/



A continuación, los cálculos para cada corriente necesaria en donde se utilizará el circuito

$$1.\ R = \frac{1.25V}{10mA} = 125\Omega$$

$$P = (10mA)^2 \times 125\Omega = 1.25\,W$$

$$2.\ R = \frac{1.25V}{5mA} = 250\Omega$$

$$P = (5mA)^2 \times 250\Omega = 1.25\,W$$

$$3.\ R = \frac{1.25V}{500mA} = 2.5\Omega$$

$$P = (500mA)^2 \times 2.5\Omega = 1.25\,W$$

Se utiliza para R resistencias de 2 W con valores de 125 Ω, 125 Ω y 2.5 Ω respectivamente

- Se hace uso de Fuente de corriente con BJT y zener para poder generar una corriente de 250 µA, con las siguientes condiciones:
  Vce > 10V, por margen (20%) debería ser superior a 12V
  Ic > 500uA
  Tipo NPN
  Potencia = 250uA*10V = 2.5mW, potencia deseada 5mW

En la Tabla 3. Se enlista los transistores que cumplen las condiciones de diseño Vce, Ic, Beta y Potencia

Tabla 3. Lista transistores funcionales para el diseño de cuente de corriente

Modelo	Tipo	Vce (V)	Ic (A)	Beta (Hfe) (aprox.)	Potencia (W)	Vbe (V)
2N2222	NPN	30	0.8	50 - 300	0.5	0.7
2N2907	PNP	40	0.6	100 - 300	0.6	0.7
2N3904	NPN	40	0.2	100 - 300	0.625	0.7
2N3906	PNP	40	0.2	100 - 300	0.625	0.7
2N3055	NPN	60	15	20 - 70	115	0.7
BC547	NPN	45	0.1	110 - 800	0.5	0.7
BC557	PNP	45	0.1	110 - 800	0.5	0.7
TIP31	NPN	40	3	18537	40	0.7
TIP32	PNP	40	3	18537	40	0.7
BD139	NPN	80	1.5	40 - 160	12.5	0.7
BD140	PNP	80	1.5	40 - 160	12.5	0.7

- Se selecciona el 2N2222, con un Vbe max de 0.7, se procede a seleccionar el diodo zener a partir de que se desea que Vz sea 10 veces mayor al Vbe del BJT $250\mu A = \frac{VZ-Vbe}{Re}$, asegurar un Vz de 7 voltios o más para evitar ruido por temperatura, a partir de la tabla [3], el diodo 1N755A tiene un Vz de 7.5 y una potencia max de 0.5 W minimizando el ruido, a partir de la relación de corriente se calcula Re y R1 con una corriente en el Zener para mantenerlo activo de 10 mA, donde:

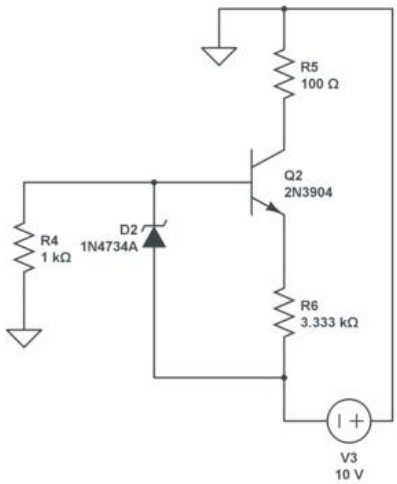


Figura 27. Fuente de corriente con BJT y zener
[2] https://www.circuitlab.com/circuit/8u3quv/fuente-de-corriente-con-zener/

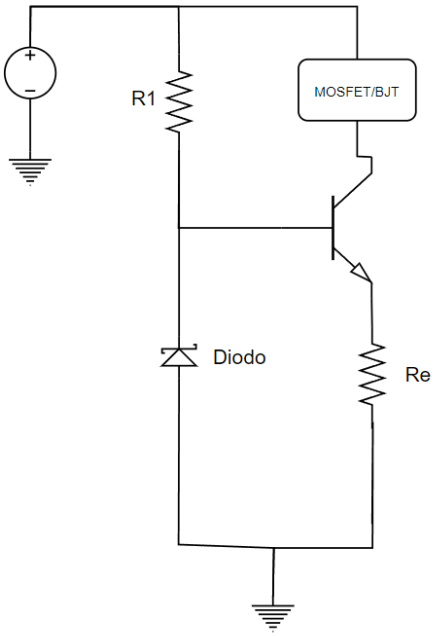


Figura 28. Circuito de fuente de corriente de 250 y 100µA para MOSFET/BJT

Re

$$Re = \frac{7.5V - 0.7}{250\mu A} = 2700\ \Omega = 27.2\ \text{K}\Omega$$

$$P = (250\mu A)^2 \cdot 2000 = 125\ \mu W$$

R1

$$R1 = \frac{10V - 7.5V}{10\ mA} = 250\ \Omega$$

$$I = \frac{10V - 7.5V}{240} = 10.416\ mA$$

$$P = (10.416\ mA)^2 \cdot 240 = 26.038\ mW$$

Se utiliza para Re dos resistencias de ¼ W en serie de un valor de 27 KΩ y 200 Ω y para R1, se utiliza una resistencia comercial de 240 Ω a ¼ de W

Para la fuente de 100µA, por practicidad utilizamos los mismos componentes los respectivos cálculos:

Para la fuente de 100µA, por practicidad utiliza

Re

$$Re = \frac{7.5V - 0.7}{100\mu A} = 68000\ \Omega = 68K\Omega$$

$$P = (100\mu A)^2 \cdot 68000 = 4.25mW$$

R1

$$R1 = \frac{10V - 7.5V}{10\ mA} = 250\ \Omega$$

$$I = \frac{10V - 7.5V}{240} = 10.416\ mA$$

$$P = (10.416\, mA)^2 \cdot 250 \;=\; 50.126\, mW$$

Se utiliza para Re una resistencia de ¼ de Vatio de 68K como valor comercial y para R1 se utiliza una resistencia comercial de 240Ohms de ¼ de Vatio.

Visualización

Se evaluó distintas soluciones para la visualización que cumplieran con las características de que se visualizará más de un dígito y se pudiera conectar a un microcontrolador.

1. Pantalla LCD (Cristal líquido)

Ventajas:

- Amplia disponibilidad en diferentes tamaños y resoluciones.
- Bajo consumo de energía.
- Fácil de controlar a través de interfaces seriales (I2C, SPI).
- Pueden mostrar texto, números y gráficos sencillos.

Desventajas:

- Respuesta más lenta que otras tecnologías.
- Ángulo de visión limitado.
- Requiere una fuente de alimentación externa.

Tipos:

- LCD de caracteres: Ideal para mostrar texto y números en líneas definidas.
- LCD gráficos: Permiten mostrar imágenes y gráficos más complejos.

2. Pantalla OLED (Orgánico electroluminiscente)

Ventajas:

- Alto contraste y colores vibrantes.
- Amplio ángulo de visión.
- Respuesta rápida.
- Bajo consumo de energía.

Desventajas:

- Costo más elevado que las LCD.
- Vida útil limitada (aunque ha mejorado significativamente).

Tipos:

- OLED monocromo: Ideal para mostrar texto y números.
- OLED a color: Para aplicaciones que requieren una interfaz más atractiva.

3. 7-Segmentos

Ventajas:

- Bajo costo.
- Fácil de controlar.
- Ideal para mostrar números de un solo dígito o pocos dígitos.

Desventajas:

- Limitada a mostrar números.
- Resolución baja.

Luego de evaluadas las ventajas y desventajas de cada una de las opciones se decide hacer uso de la pantalla LCD ya que es de fácil de usar, no tiene un costo elevado, funciona de manera correcta para la visualización de los parámetros de cada sistema.

Inteligencia (Microcontrolador)

Se evaluó las ventajas y desventajas de diferentes tipos de inteligencia o microcontrolador que pueda ser útil en el desarrollo y buen funcionamiento del sistema.

1. Arduino

Ventajas:

- Fácil de usar.
- Amplia variedad de modelos.
- Una gran cantidad de sensores, actuadores y shields compatibles.
- Bajo costo.

Desventajas:

- Rendimiento limitado para proyectos que requieren un alto rendimiento o procesamiento complejo, puede no ser la mejor opción.
- Flexibilidad limitada, puede restringir ciertas aplicaciones más avanzadas.

2. ESP32

Ventajas:

- Wi-Fi y Bluetooth.
- Alto rendimiento, buen equilibrio entre rendimiento y consumo de energía.
- Periféricos integrados como ADC, DAC, PWM, etc.

Desventajas:

- Mayor complejidad.
- Costo algo mayor en comparación con Arduino.

3. PIC

Ventajas:

- Bajo consumo de energía.
- Robustez están diseñados para entornos industriales y aplicaciones exigentes.
- Fácil de programar.

Desventajas:

- Menor popularidad.
- Limitaciones en algunos modelos, pueden tener menos periféricos integrados.

Luego de evaluar las opciones, se selecciona el Arduino ya que es fácil de usar, no se requiere hacer alto procesamiento de datos, se puede conectar fácilmente con la pantalla LCD.

Cálculos para el diseño de los subsistemas para el componente BJT

- **Beta**

Puesto que, al optar por una fuente de corriente fija en la base del transistor de 100 µA, se usará un Vcc de 16 V. Esto permite medir un rango en Vce de hasta 7.5 V, según lo propuesto en los requerimientos. Para las pruebas de ganancia (β), se calcula la resistencia del colector de manera que permita una corriente de colector de 50 mA.

$$R_c = \frac{V_{cc}}{50mA} = \frac{16V}{50mA} = 320\Omega$$

Con esta resistencia aseguramos que fluya una corriente que permita activar el transistor y realizar el cálculo del beta.

- **Voltaje Colector emisor de saturación.**

Ya que, al optar por una fuente de corriente fija en la base del transistor de 100uA, contamos con un Vcc de 16 V. Esto permite medir un rango en Vce de hasta 7.5 V, según lo propuesto en los requerimientos. βsat es un valor menor que el β típico del transistor, ya que en saturación el transistor necesita menos ganancia para una conducción adecuada. Un valor conservador de βsat suele estar entre 10 y 20.

Para entrar en saturación la corriente de base debe ser al menos entre 1/10 y 1/20 de la corriente de colector.

Entonces, se asumió una corriente colector de 16mA con la que el transistor va a estar saturado y su Beta debe estar en el rango de 10 a 20.

En la **Tabla 4.** Se mencionan algunos de los transistores que cumplen con las condiciones de los requerimientos para los transistores BJT tanto en el parámetro de Beta como de Vce(sat).

Tabl*a 4. Especificaciones de Transistores BJT*

Transistor	Tipo	β Típico	$V_{CE(sat)}$ (V)	V_{CE} Máx (V)	I_c Máx (A)	Potencia Máxima (W)	Aplicación
2N3904	NPN	100 - 300	0.2 – 0.3	40	0.2	0.625	Señal
2N3906	PNP	100 - 300	0.2 – 0.3	40	0.2	0.625	Señal
BC547	NPN	110 - 800	0.2 – 0.3	45	0.1	0.5	Señal
BC557	PNP	125 - 800	0.2 – 0.3	45	0.1	0.5	Señal
TIP31	NPN	10 - 50	1.5 - 2	40	3	40	Potencia
TIP32	PNP	10 - 50	1.5 - 2	40	3	40	Potencia
2N3055	NPN	20 - 70	2 - 3	60	15	115	Potencia
MJ2955	PNP	20 - 100	2 - 3	60	15	115	Potencia

Lista de componentes

En este apartado se enlista los componentes usados en el diseño, referencia, cantidad y costo, como se muestran en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Listado de componentes

Componente	Referencia	Cantidad	Costo unitario	Costo
Regulador de voltaje	LM317	2	$ 3,000.00	$ 6,000.00
Resistencia	68K	1	$ 50.00	$ 50.00
Resistencia	27K ohms	2	$ 50.00	$ 100.00
Resistencia	1K ohms	2	$ 50.00	$ 100.00
Resistencia	320 ohms	1	$ 50.00	$ 50.00
Resistencia	250 ohms	1	$ 50.00	$ 50.00
Resistencia	240 ohms	2	$ 50.00	$ 100.00
Resistencia	200 ohms	2	$ 50.00	$ 100.00
Resistencia	125 ohms	1	$ 50.00	$ 50.00
Resistencia	2.5 ohms	2	$ 50.00	$ 100.00
Diodo	1N4001	1	$ 2,000.00	$ 2,000.00
Diodo	1N4370A	1	$ 2,000.00	$ 2,000.00
Diodo	1N755A	2	$ 2,000.00	$ 4,000.00
Transistor BJT	2N2222	2	$ 17,000.00	$ 34,000.00
Transistor BJT	2N3904	1	$ 17,000.00	$ 17,000.00
Transistor MOSFET	IRFP250	1	$ 10,000.00	$ 10,000.00
Transistor MOSFET	TP0604	2	$ 10,000.00	$ 20,000.00
Transistor MOSFET	IRF540N	1	$ 10,000.00	$ 10,000.00
Transistor MOSFET	BC567	1	$ 10,000.00	$ 10,000.00
Pantalla LCD	16x2	1	$ 10,500.00	$ 10,500.00
Microcontrolador	Arduino	1	$ 26,400.00	$ 26,400.00
COSTO TOTAL				**$ 152,600.00**

Para garantizar la integridad de los componentes, es crucial determinar la potencia máxima a disipar en cada uno. Empleamos la ecuación:

$$P = I^2 * R$$

para calcular la potencia y seleccionar resistencias con una tolerancia adecuada, cuyos valores se detallan en la **Tabla 6.**

Tabla 6. Potencia y Tolerancia de las resistencia

Componente	Referencia	Potencia	Tolerancia
Resistencia	27K ohms	1.68mW	5%
Resistencia	68K	4.25mW	
Resistencia	1K ohms	256mW	5%
Resistencia	320 ohms	800mW	5%
Resistencia	250 ohms	50.126mW	5%
Resistencia	240 ohms	26.038mW	5%
Resistencia	2k ohms	125 µW	5%
Resistencia	125 ohms	12.5mW	5%
Resistencia	2.5 ohms	625mW	5%

A continuación, se explicará la lógica del sistema a partir de diagramas de flujo

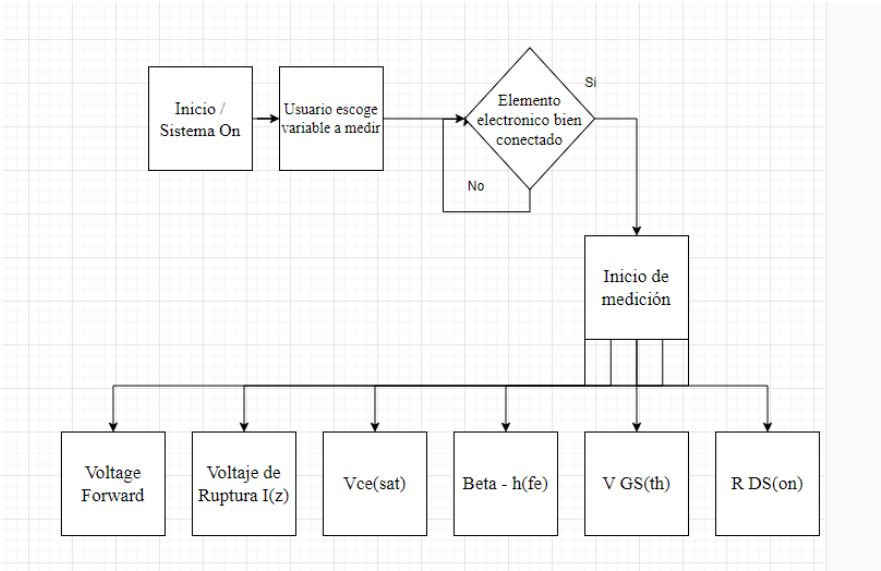


Figura 29. Lógica de Control Sistema General

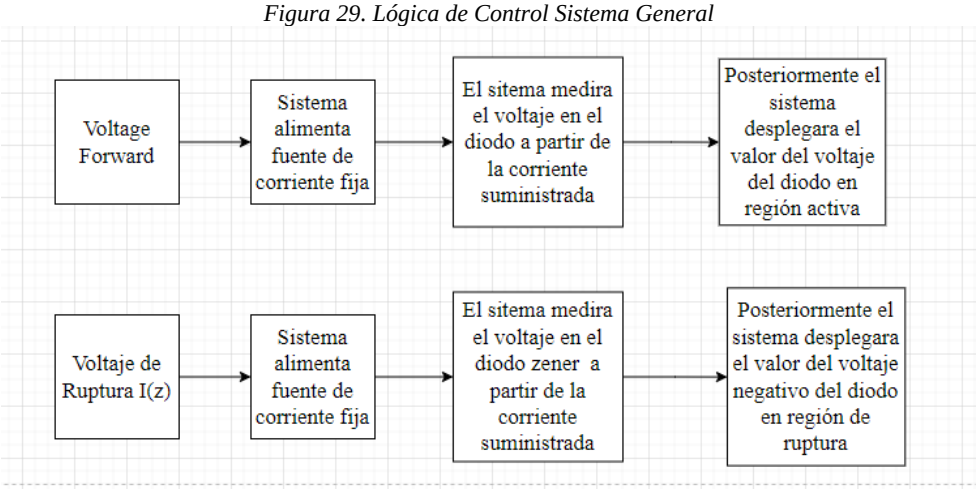


Figura 29. Lógica de Control Sistema Vf y Vz

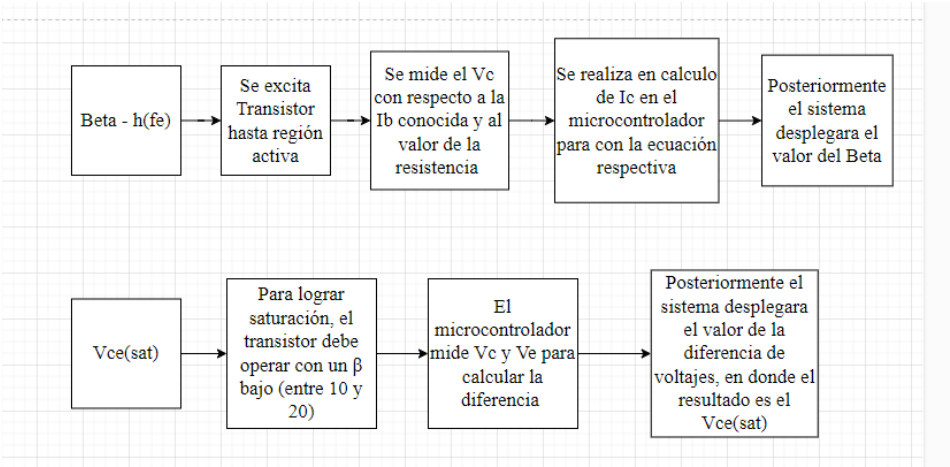


Figura 30. Lógica de Control Sistema Vcesat y Hfe (Beta)

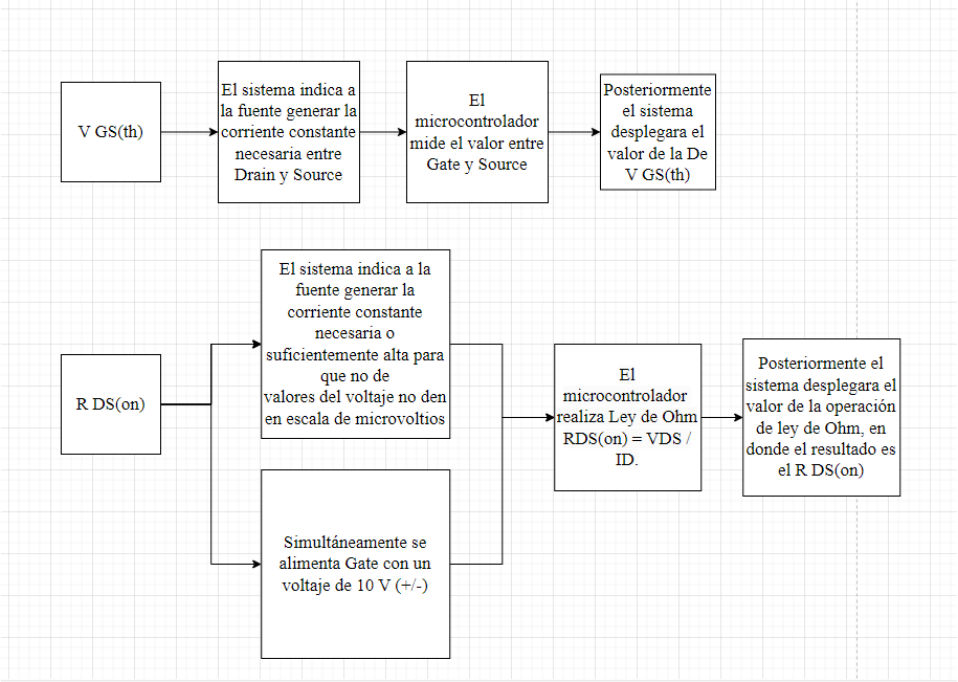


Figura 31. Lógica de Control Sistema Vgsth y RDSon.

4.4 Descripción Técnica del Producto

Simulación por subsistemas

Sistema Vf

En la **Figura 32**. Evidenciamos el circuito con Voltaje de 16 V, Lm317, resistencia de 125 Ohms, diodo 1N4001.

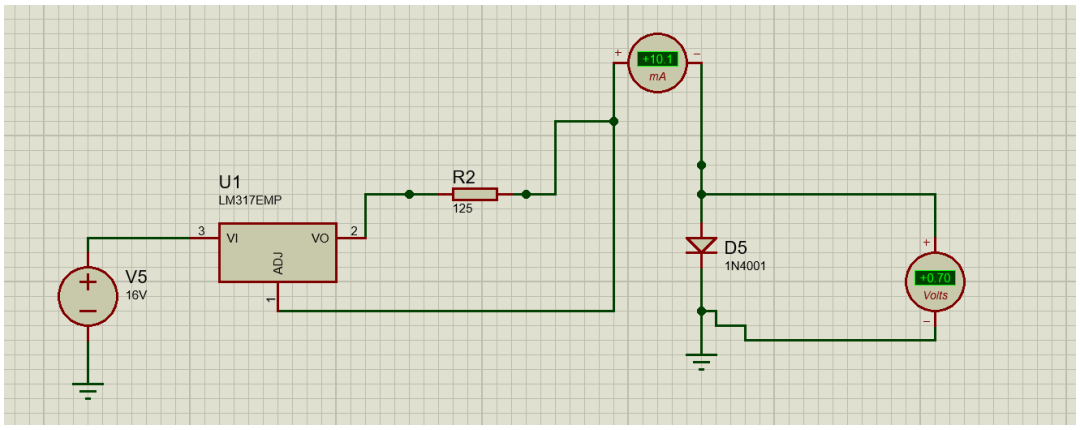


Figura 32. Sistema Vf.

Sistema Vz

En la **Figura 33**. Evidenciamos el circuito con una Fuente 16 V, Lm317, resistencia de 250 Ohms, diodo Zener 1N4370A

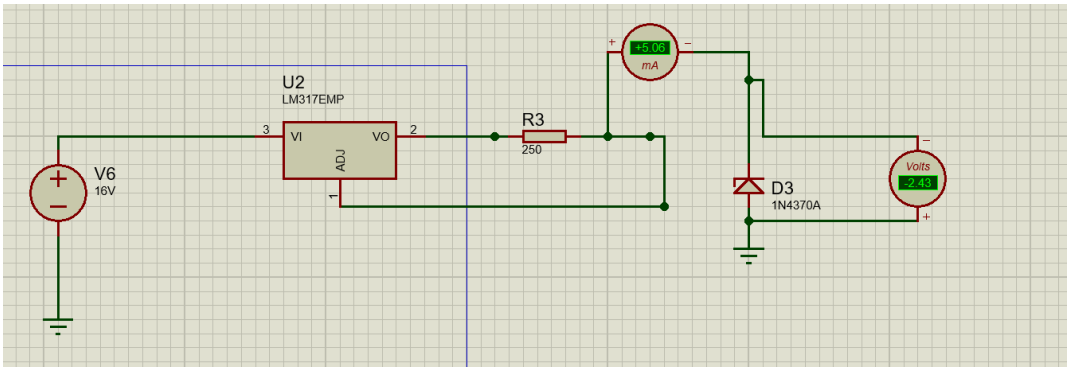


Figura 33. Sistema Vz

Sistema Vgs (TH)

En la **Figura 34**. Evidenciamos el circuito con una Alimentación 16V, Fuente de corriente controlada BJT 2N2222 con Zener 1N755A, R1 de 240 Ohms, Re de 27 KOhms y 200 Ohms, MOSFET IRFP250

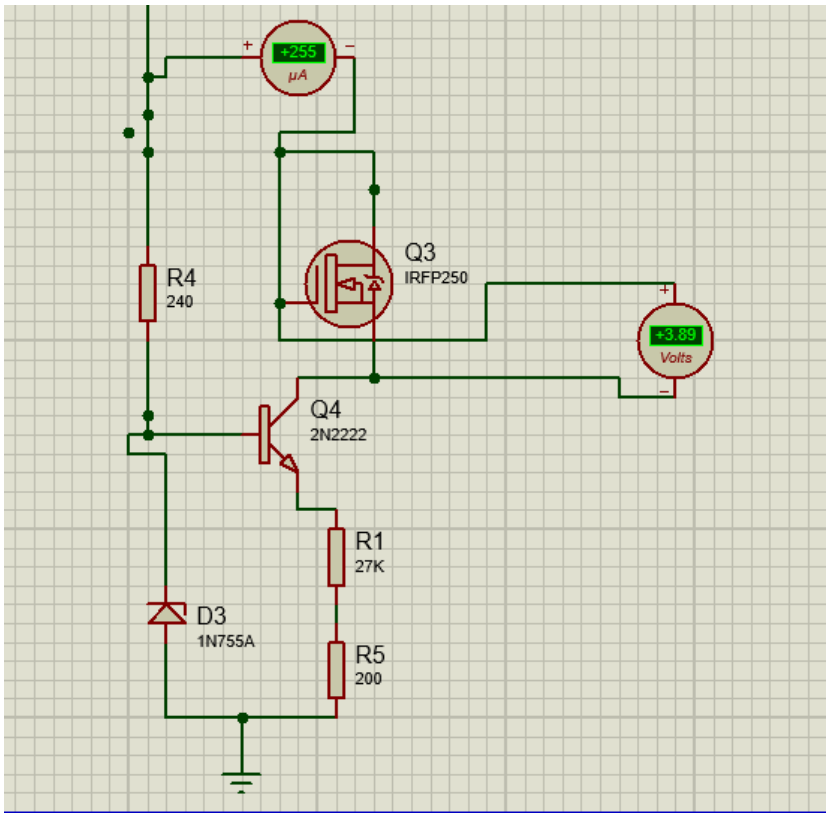


Figura 34. Sistema Vgs(th)MOSFET Canal N

En la **Figura 35**. Evidenciamos el circuito con una Alimentación -10V, Fuente de corriente controlada BJT 2N2222 con Zener 1N755A, R1 de 240 Ohms, Re de 27 KOhms y 200 Ohms, MOSFET TP0604

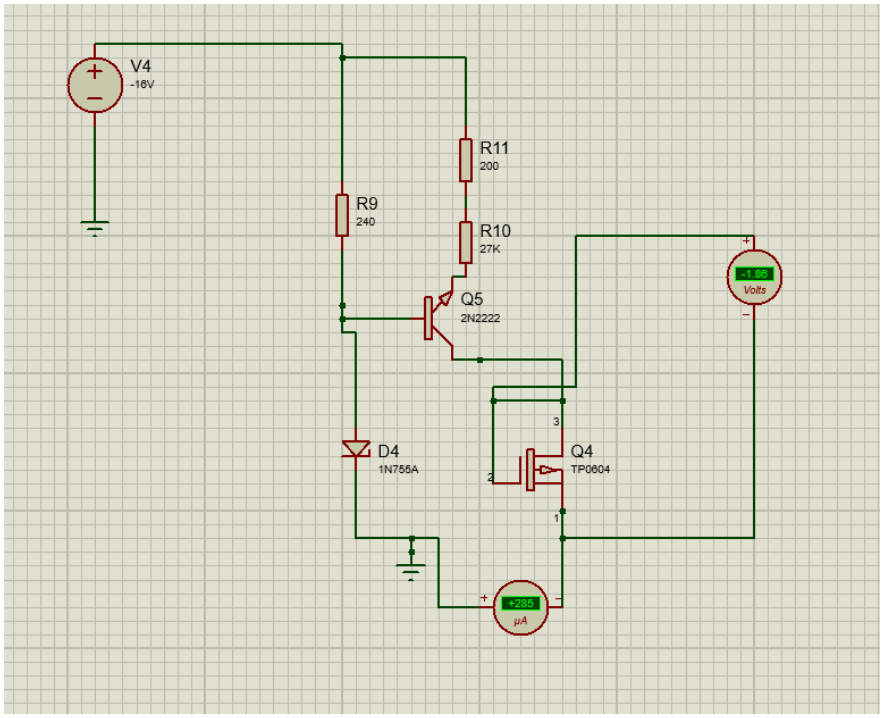


Figura 35. Sistema Vgs(th)MOSFET Canal P

Sistema Rds(on)

En la **Figura 36**. Evidenciamos el circuito con una Fuente –16V, Lm317, R de 2.5 Ohms, fuente fija de 10 v en Gate y tierra, Mosfet TP0604

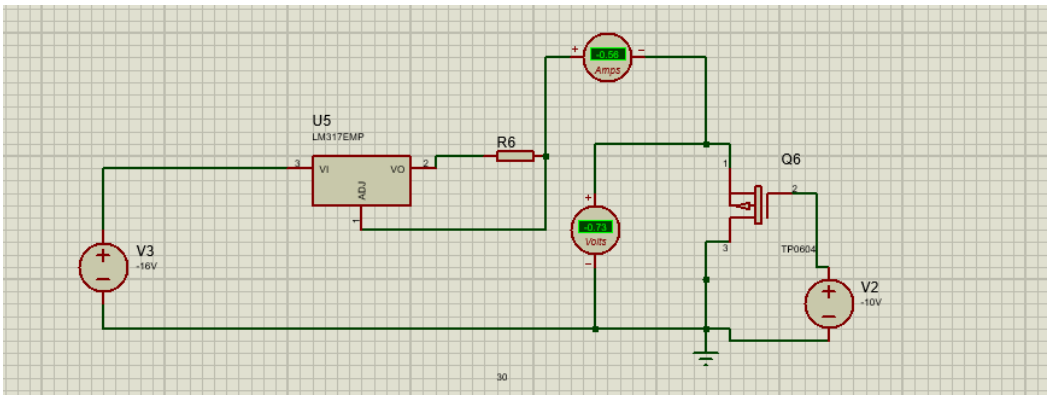


Figura 36. Sistema Rds(on) MOSFET Canal N

En la **Figura 37.** Se muestra el circuito con Fuente 16V, Lm317, R de 2.5 Ohms, fuente fija de 10 v en Gate y tierra, Mosfet IRF540N

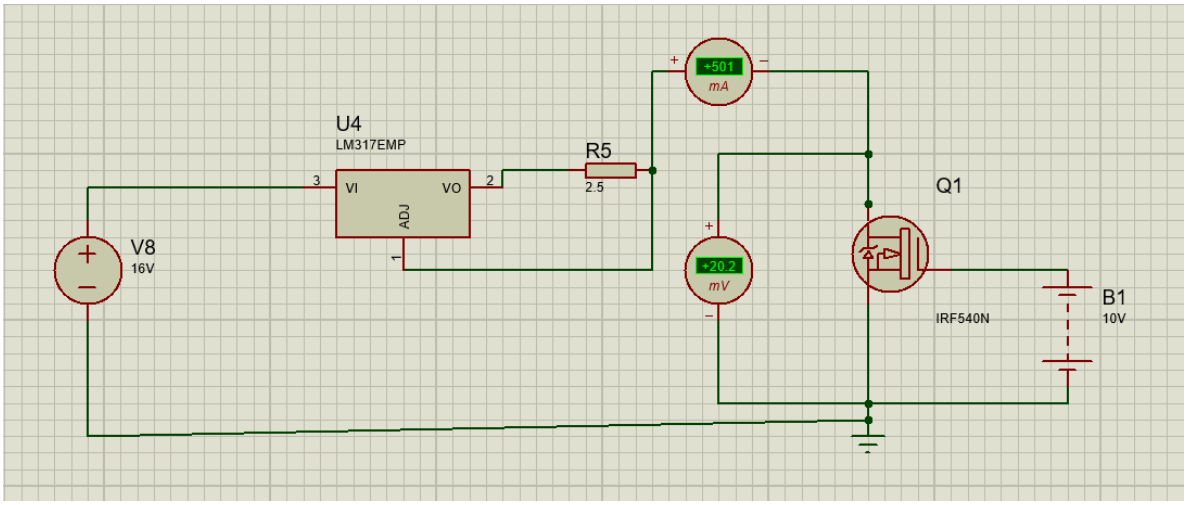


Figura 37. Sistema Rds(on) MOSFET Canal P

Sistema $V_{ce(sat)}$

Se utiliza un transistor BJT 2N3904, cuyo datasheet indica un valor de $V_{ce(sat)}$ entre 0.2 V y 0.3 V. Sin embargo, en la simulación del diseño implementado, obtenemos un valor de 0.5 V. Es importante aclarar que este valor no fue obtenido utilizando las corrientes especificadas en el datasheet, ya que el diseño fue concebido para evaluar no solo este componente, sino varios otros. Como se mencionó en el diseño cuando el transistor está saturado el Beta está en un rango de 10 – 20, lo cual se comprueba con la simulación realizada **Figura 38.**

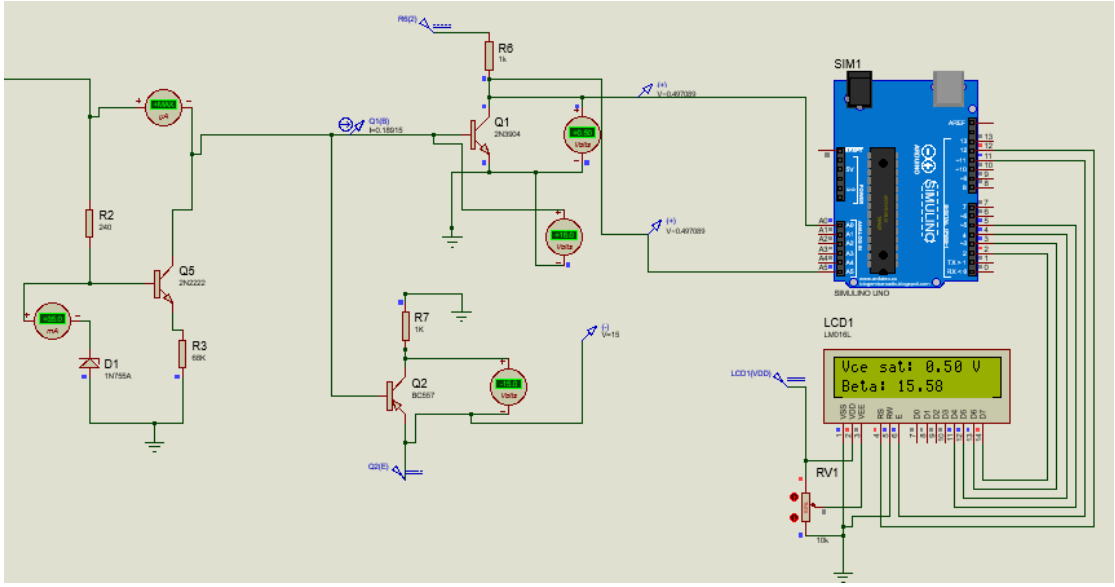


Figura 38. Sistema Vce(sat)

Sistema Beta

En el diseño se emplea un transistor BJT 2N3904, cuyo datasheet especifica un valor de β (ganancia de corriente) de 50. No obstante, en la simulación del circuito implementado, obtenemos un valor de 43.99. Cabe destacar que este resultado se obtuvo sin utilizar las corrientes exactas recomendadas en el datasheet, ya que el diseño está pensado para probar varios componentes y no exclusivamente este modelo **Figura 39.**

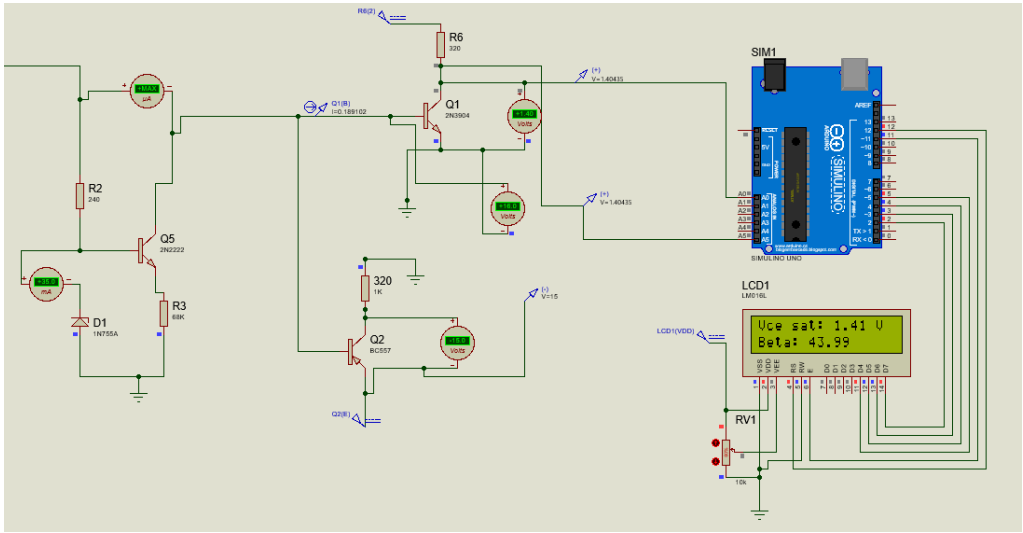


Figura 39. Sistema Beta

Simulación Sistema Completo

En la Figura 40. Se evidencia la simulación del sistema completo en donde se tiene un switch para seleccionar que parámetro desea leer y se visualizará en la pantalla LCD.

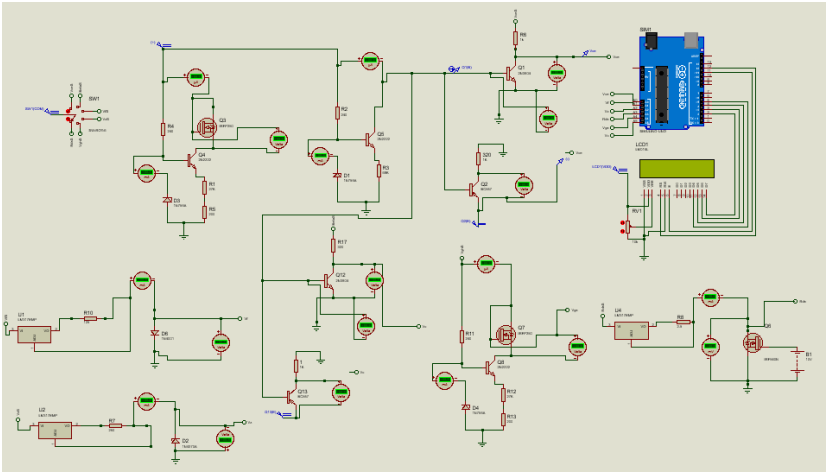


Figura 40. Simulación sistema completo

En la Figura 41. A partir de la simulación se expresa el circuito de una manera intuitiva para el usuario donde cada bornera (Espacios de 2 y de 3 pines), es para la conexión del respectivo componente, y cada sistema tiene su botón de inicio de medición, siempre y cuando el componente este en la de los espacios destinados a cada componente (Diodo dos pines, BJT/MOSFET 3 pines), el usuario se encargara de realizar la conexión correcta debido a que el sistema no tiene protección hacia el microcontrolador cumpliendo con el requerimiento restrictivo #11.

Funcionamiento Básico

El usuario encenderá el sistema, observará 6 botones cada uno demarcado con la variable a medir, colocará el componente en las borneras/espacios designados, presionará el botón de la respectiva medición y visualizará el resultado de la medición en la pantalla LCD, así respectivamente con cada componente (Diodo, BJT, MOSFET).

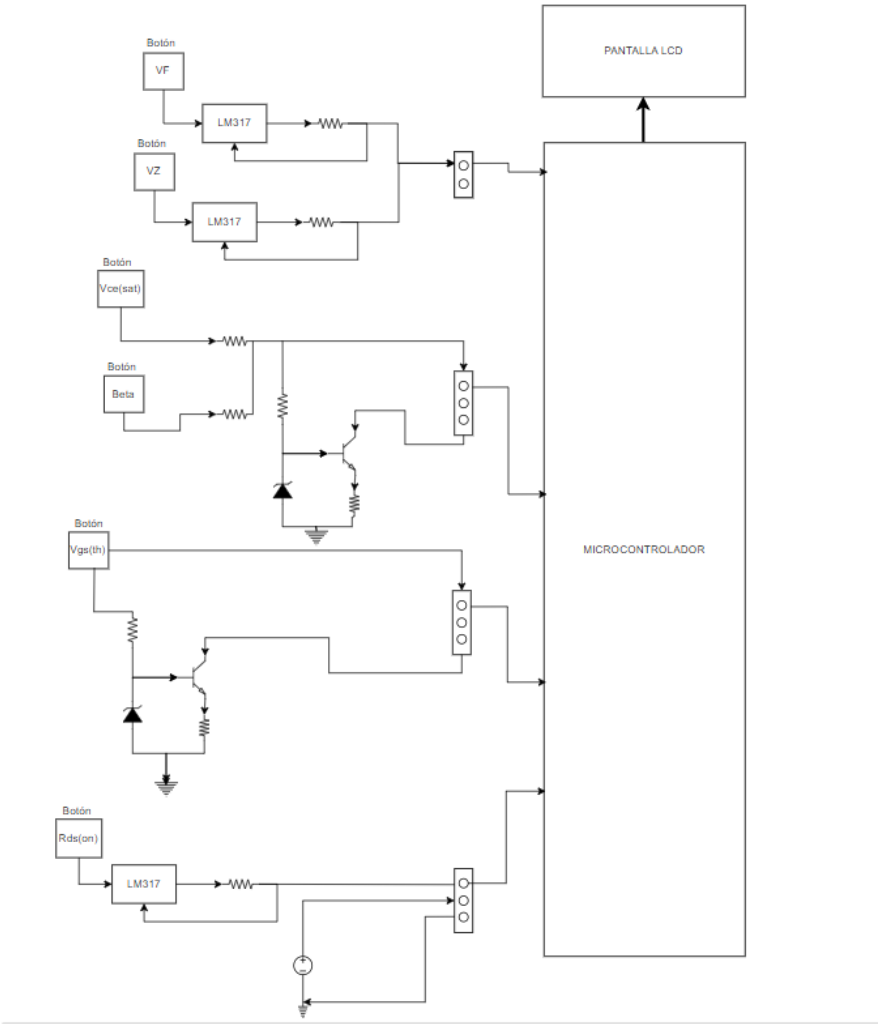


Figura 41. Esquemático Circuito completo

Resolución y Error de medición

Ya en la etapa final de medición, se calculan la resolución de medición y los errores relativos que tendrá cada una de estas mediciones, la resolución se calculará a partir de la relación entre el voltaje de referencia (Voltaje máximo de medición) y los niveles de ADC que tiene el microcontrolador, en este caso el Arduino tiene un ADC de 10 bits lo que es igual a 2^{10} = 1024.

Para requerimiento como Vgs(th), Vz y Vce(sat) donde sus voltajes son mayores a 5 voltios, que es el voltaje de referencia que tiene el Arduino, a mayor voltaje a medir, menor sera la resolución de medición.

Los rangos por medir son:

12V

$$Resolución = \frac{Voltaje\ de\ referencia}{NivelesADC} = \frac{12V}{1024} = 11.718mV$$

10V

$$Resolución = \frac{Voltaje\ de\ referencia}{NivelesADC} = \frac{10V}{1024} = 9.765mV$$

7.5V

$$Resolución = \frac{Voltaje\ de\ referencia}{NivelesADC} = \frac{7.5V}{1024} = 7.324mV$$

Error relativo

Con respecto a la resolución obtenida para cada voltaje, se calcula su respectivo error relativo de medición, asumiendo que se está midiendo un voltaje de 5 voltios:

12V

$$Error\ Relativo\ MAX = \frac{Resolución}{Voltaje\ medido}\ x\ 100\% = \frac{11.718mV}{5V} x\ 100\% = 0.234\%$$

10V

$$Error\ Relativo\ MAX = \frac{Resolución}{Voltaje\ medido}\ x\ 100\% = \frac{9.765mV}{5V} x\ 100\% = 0.195\%$$

7.5V

$$Error\ Relativo\ MAX = \frac{Resolución}{Voltaje\ medido}\ x\ 100\% = \frac{7.324mV}{5V} x\ 100\% = 0.146\%$$

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

- El voltaje colector emisor de saturación simulado (0.5 V) se encuentra fuera del rango indicado en el datasheet (0.2 V - 0.3 V) para el componente probado. Esto indica una desviación en la simulación, posiblemente debido a que no se emplearon las corrientes recomendadas en el datasheet para realizar la prueba, sin embargo el beta calculada para esta prueba muestra que si está en saturación.
- La resolución del dispositivo (0.1 V) en la medición de Voltaje colector emisor de saturación es adecuada para capturar el valor simulado, pero no satisface el requisito de precisión en comparación con el valor teórico esperado.
- El valor simulado para Beta de 43.99 está cerca del valor especificado de 50 en el datasheet, lo cual representa un error de aproximadamente 6.01, levemente superior al error máximo permitido de 5.
- La resolución del dispositivo de medición de Beta (5) es adecuada para medir y representar valores cercanos a 50, lo cual cumple con los requerimientos.
- Al realizar la simulación en condiciones de saturación, el valor de β se encuentra dentro del rango esperado (10 - 20), lo que sugiere que el diseño es adecuado para detectar la reducción de β en condiciones de saturación.
- Para Vf, el diodo 1N4001 es excitado por una corriente de 10mA lo que lo lleva al punto de conducción generando un Vf de 0.7 v.

- Para Vz, el diodo zener 1N4370A, entra ewn región de corte con una corriente de 5 mA generando un Vz de 2.43 V, igual que las especificaciones del Datasheet

JEDEC TYPE NUMBER (NOTE 1)	NOMINAL ZENER VOLTAGE V_Z @ I_{ZT} (NOTE 2)	ZENER TEST CURRENT I_{ZT}	MAXIMUM ZENER IMPEDANCE (NOTE 3) Z_{ZT} @ I_{ZT}	MAXIMUM REVERSE CURRENT I_R @ V_R		MAXIMUM ZENER CURRENT I_{ZM}
	VOLTS	mA	OHMS	∝A	VOLTS	mA
1N4370A	2.4	20	30	100	1.0	155

- Para Vds(Th), excitado con una corriente de 250 microamperios, generando un voltaje de 3.89 v, dentro del rango de voltajes del Datasheet IRF540N
- Para Rds(on) excitado con una fuente de 16V, generando un Vgs de 20mV con una corriente de 500mA, generando una R de 0.04Ohms, como en el datasheet IRF540N

ON STATE SPECIFICATIONS						
Gate to Source Threshold Voltage	$V_{GS(TH)}$	$V_{GS} = V_{DS}$, I_D = 250∝A (Figure 10)	2	-	4	V
Drain to Source On Resistance	$r_{DS(ON)}$	I_D = 33A, V_{GS} = 10V (Figure 9)	-	0.033	0.040	Ω

- Para Vds(Th), excitado con una corriente de 250 microamperios, generando un voltaje de –1.85 v, fuera del rango de voltajes del Datasheet TP0604

Gate Threshold Voltage	$V_{GS(th)}$	–1	—	–2.4	V	$V_{GS} = V_{DS}$, I_D= –1 mA

- Para Rds(on) excitado con una fuente de 16V, generando un Vgs de 20mV con una corriente de 500mA, generando una R de 1.4Ohms, fuera del rango del datasheet TP0604

Static Drain-to-Source On-State Resistance	$R_{DS(ON)}$	—	2	3.5	Ω	V_{GS} = –5V, I_D = –250 mA
		—	1.5	2	Ω	V_{GS} = –10V, I_D = –1A

6. CONCLUSIONES

- Se llega al resultado donde se puede afirmar que el diseño planteado para medir la tensión directa de un diodo es efectivo y satisface los requisitos técnicos establecidos. El sistema maximiza la medición precisa del voltaje en región activa, lo que asegura una medición confiable de los diodos en distintas condiciones de funcionamiento.

- La implementación del sistema de medición para determinar el voltaje de ruptura del diodo Zener se desarrolló exitosamente, cumpliendo con todos los requerimientos y parámetros establecidos en el protocolo experimental. La configuración propuesta permite obtener mediciones precisas del punto crítico donde el dispositivo inicia su conducción en polarización inversa.
- El diseño requiere ajustes para medir con mayor precisión los valores de saturación esperados, ya que los resultados actuales presentan una desviación considerable. Enfocar los ajustes en el control de corriente podría mejorar la coincidencia con el valor del datasheet.
- El dispositivo logra capturar el valor de β dentro del rango permitido y muestra una reducción esperada en condiciones de saturación. Sin embargo, la precisión debe afinarse para mantener el error por debajo de los 5 puntos establecidos en los requerimientos.
- Los resultados obtenidos indican que el sistema de medición cumple con los requisitos de precisión y resolución especificados para la mayoría de las mediciones.
- Los resultados pueden verse afectados por factores como la temperatura ambiente, la frecuencia de la señal de prueba y las características de la fuente de alimentación.
- Los resultados obtenidos deben compararse con los datos de las hojas de datos de los componentes, realizando esto se puede verificar la confiabilidad del componente.
- El sistema implementado facilita que el usuario configure y seleccione la variable deseada para medir, brindando un manejo adaptable y eficiente. Es fundamental destacar la necesidad de seguir procedimientos adecuados al conectar los componentes, ya que cualquier error podría comprometer la integridad de los semiconductores durante las mediciones o generar un efecto adverso y dañar el sistema de medición.
- Se ha diseñado y optimizado un circuito que permite medir de manera precisa la resistencia entre Drain-Source en estado de conducción de un transistor MOSFET. Este desarrollo incluye dos configuraciones independientes que evitan cualquier posible cruce de circuitos, garantizando la seguridad y confiabilidad del sistema. Además, el diseño es esencial para evaluar el rendimiento y la eficiencia de los MOSFETs durante su operación de conmutación, asegurando mediciones dentro de los rangos definidos y cumpliendo con los requisitos técnicos establecidos.

- El diseño e implementación de los sistemas de medición para determinar en voltaje Gate-Source (VGS) se desarrolló de manera efectiva, incorporando dos circuitos especializados: uno optimizado para MOSFETs de canal N y otro para MOSFETs de canal P. Ambas configuraciones cumplen rigurosamente con los requerimientos de precisión establecidos, permitiendo una caracterización confiable de este parámetro crítico que define el punto de activación de los dispositivos.
- Los cálculos presentados muestran que el error relativo aumenta a medida que se incrementa el voltaje a medir. Esto se debe a la disminución de la resolución y a la suposición de que se está midiendo un voltaje de referencia de 5V.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Horowitz y W. Hill, *The Art of Electronics*, 3rd ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2015.

[2] A. S. Sedra y K. C. Smith, *Microelectronic Circuits*, 7th ed. New York, NY, USA: Oxford University Press, 2014.

[3] J. Millman y C. Halkias, *Electronic Devices and Circuits*. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1991.

[4] R. Boylestad y L. Nashelsky, *Electronic Devices and Circuit Theory*, 11th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education, 2012.

[5] A. P. Malvino y D. Bates, *Electronic Principles*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.

[6] Floyd, T. L. (2017). Electronic Devices (10th ed.). Pearson.

[7] D. A. Neamen, "Electronic Circuit Analysis and Design", 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2021, pp. 145-167.

[8] A. S. Sedra and K. C. Smith, "Microelectronic Circuits", 8th ed. Oxford: Oxford University Press, 2020, pp. 200-230.

[9] R. L. Boylestad and L. Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory", 11th ed. New Jersey: Pearson, 2022, pp. 153-178.

[10] B. Razavi, "Design of Analog CMOS Integrated Circuits", 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 2021, pp. 300-340.

[11] P. E. Allen and D. R. Holberg, "CMOS Analog Circuit Design", 4th ed. Oxford: Oxford University Press, 2020, pp. 45-89.

[12] R. C. Jaeger and T. N. Blalock, "Microelectronic Circuit Design", 5th ed. New York: McGraw-Hill, 2021, pp. 456-498.

[13] Y. Zhang and P. Chen, "Measurement and Characterization of Power MOSFET Parameters", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 8, pp. 8076-8089, 2020.

[14] “AN-1001 Understanding Power MOSFET Parameters”. Google. Accedido el 13 de enero de 2025.

https://www.google.com/urlsa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjZsr-ryvOKAxU2SDABHV8eIvIQFnoECBYQAQ&url=https://www.mouser.com/pdfDocs/an-1001_a1611.pdf?srsltid=AfmBOorFPey9PgjDK9nfPADACcphFHYFT629Gb5eddWa8kaEn1mm7m8f&usg=AOvVaw23bs0MmcWEgUUeevREcQwt&opi=89978449

ANEXOS

ANEXO A: CÓDIGO FUENTE DE PROGRAMACIÓN

ANEXO A: CÓDIGO FUENTE DE PROGRAMACIÓN

```
#include <LiquidCrystal.h>

// Configuración de la pantalla LCD
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 2); // RS, EN, D4, D5, D6, D7

// Pines analógicos para los parámetros
const int pin_Vce_sat = A0;
const int pin_Vf = A1;
const int pin_Vz = A2;
const int pin_R_DS_on = A3;
const int pin_V_GS_th = A4;
const int pin_Vc = A5;

// Variables para almacenar los valores leídos
float Vce_sat = 0.0;
float Vf = 0.0;
float Vz = 0.0;
float R_DS_on = 0.0;
float V_GS_th = 0.0;
float Vc = 0.0;
float R_load = 320.0;    // Resistencia de carga en ohmios
float Ib = 0.0001;       // Corriente de base en amperios (100uA)
float Ic = 0;            // Corriente de colector en amperios
float Beta = 0;

void setup() {
  // Inicializar la pantalla LCD
  lcd.begin(16, 2);   // LCD de 16 columnas y 2 filas
  lcd.print("Iniciando...");
  delay(2000);  // Espera 2 segundos antes de comenzar
}
```

```
void loop() {
  // Leer los valores analógicos de los parámetros
  leerParametros();

  // Calcular el valor de Beta
  calcularBeta();

  // Alternar visualización de los parámetros en pantalla
  mostrarParametros();

  delay(2000); // Cambiar los parámetros cada 2 segundos
}

void leerParametros() {
  // Escala de 0-1023 a 0-5V (o el rango que necesites)
  Vce_sat = analogRead(pin_Vce_sat) * (5.0 / 1023.0);
  Vf = analogRead(pin_Vf) * (5.0 / 1023.0);
  Vz = analogRead(pin_Vz) * (5.0 / 1023.0);
  R_DS_on = analogRead(pin_R_DS_on) * (5.0 / 1023.0);
  V_GS_th = analogRead(pin_V_GS_th) * (5.0 / 1023.0);
  Vc = analogRead(pin_Vc) * (5.0 / 1023.0);
}

void calcularBeta() {
  // Calcular Ic usando la fórmula Ic = Vc / R_load
  Ic = Vc / R_load;
  // Calcular Beta usando la fórmula Beta = Ic / Ib
  Beta = Ic / Ib;
}

void mostrarParametros() {
```

```
  lcd.clear();

  // Alternar entre pares de parámetros cada ciclo
  static int pantalla = 0;
  switch (pantalla) {
    case 0:
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Vce sat: ");
      lcd.print(Vce_sat, 2); // Mostrar con 2 decimales
      lcd.print(" V");

      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("Beta: ");
      lcd.print(Beta, 2);
      break;

    case 1:
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("Vz: ");
      lcd.print(Vz, 2);
      lcd.print(" V");

      lcd.setCursor(0, 1);
      lcd.print("Vf: ");
      lcd.print(Vf, 2);
      lcd.print(" V");
      break;

    case 2:
      lcd.setCursor(0, 0);
      lcd.print("V_GS(th): ");
      lcd.print(V_GS_th, 2);
```

```
    lcd.print(" V");

    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("R_DS(on): ");
    lcd.print(R_DS_on, 2);
    lcd.print(" ohm");
    break;
  }

  pantalla = (pantalla + 1) % 3; // Cambiar entre 0, 1, 2 en cada ciclo
}
```