

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISPOSITIVO ELECTRÓNICO DE AISLAMIENTO GALVÁNICO EN EL BUS DE
DATOS IEEE-488 (GPIB) PARA GARANTIZAR EL RECHAZO DE RUIDO**

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

Daniel Rodrigo Pérez Calvo

I semestre, 2013

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

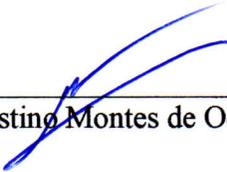
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO DE GRADUACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR

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

Miembros del Tribunal



Ing. Faustino Montes de Oca Murillo

Profesor lector



Ing. Julio Stradi Granados

Profesor lector



Ing. Miguel Hernández Rivera

Profesor asesor

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

Cartago, 24 de junio 2013

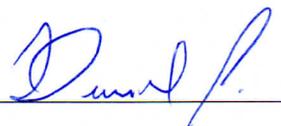
Declaratoria de Autenticidad

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

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

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

Cartago, 24 de junio 2013



Daniel Rodrigo Pérez Calvo

Céd: 1-1328-0771

Resumen

El proyecto fue elaborado en el Laboratorio Metrológico de Variables Eléctricas (LMVE) del Instituto Costarricense de Electricidad (I.C.E.), el cual tiene la responsabilidad en el país de mantener los patrones primarios de las magnitudes vinculadas con la energía, además brindar los servicios de calibración de dichas unidades. Cabe destacar que este es un laboratorio nacional, el cual posee los patrones de mayor validez en el país, por lo que para sus procesos de calibración requieren que el equipo de medición funcione de la manera más exacta y precisa.

En el laboratorio, para la automatización de las calibraciones se utilizan programas computacionales los cuales se comunican con los equipos de medición por el puerto estándar IEEE 488 (GPIB), los equipos conectados a este bus poseen distintas conexiones a alimentación y tierras, donde se pueden introducir corrientes parásitas que influya en el funcionamiento de los mismos y así invalidar las mediciones de alta calidad.

Como solución se plantea el diseño y construcción de un prototipo que aísla galvánicamente las líneas de comunicación del bus de datos GPIB, separando las conexiones y así garantizar el rechazo de ruido que pueda ocasionar fallas en los sistemas de medición del laboratorio.

Se realizó el estudio y comparación de los métodos de aislamiento de forma óptica y galvánica, construyendo dos prototipos con el aislamiento para su posterior análisis en los procesos de calibración del laboratorio, para así elegir el prototipo que posea las características adecuadas para la adaptación al laboratorio y que llegue a darle garantía a las mediciones que se realizan en este.

Palabras clave: Metrología, calibración, GPIB, Bus de datos, aislamiento galvánico, ruido, IEEE488

Abstract

The project was developed in the Metrology Laboratory of Electrical Variables (LMVE) of Costa Rican Electricity Institute (ICE), it has the responsibility to maintain primary standards of energy-related variables and provide calibration services such units on a national level. Note that this is a national laboratory, which has the greatest validity patterns in the country, so the calibration processes require measuring equipment operating in the most accurate and precise way.

In the laboratory, for automated calibrations they use computer programs which communicate with the measuring equipment port IEEE 488 (GPIB), the devices connected to the bus have different power and ground connections, which can provide parasite currents which affect the operation and override quality measurements.

As a solution is considered the design and construction of a prototype electrically separates the communication lines GPIB data bus, thus separating the connections and ensure noise rejection that can cause system failures laboratory measurement.

It was performed the study and comparison of isolation methods by optical and galvanic by building two prototypes with isolation for further analysis in the laboratory calibration process, so choose the prototype adequate characteristics for adaptation to the laboratory and you get to give assurance to the measurements made in this.

Keywords: Metrology, Calibration, GPIB, data bus, isolated, noise, IEEE488

Dedicatoria

A mis padres Rodrigo y Jenny, por su apoyo incondicional en todo momento durante todos estos años, sin ustedes no lo hubiera logrado.

A mi hermano Alejandro, por inspirarme a ser una excelente persona y ser un buen modelo a seguir.

A mi familia y amigos, por su apoyo y sus aportes a mi crecimiento espiritual e intelectual que me han ayudado tanto en la vida.

A mi novia Fabiola Valverde, por su apoyo incondicional y fuerza de empuje para lograr mis objetivos.

Los Amo.

“Todo lo puedo En Cristo que me fortalece”, Filipenses 4:13

Agradecimiento

Primero agradezco a Dios por brindarme la salud y fuerza para cumplir esta meta como profesional.

Quiero agradecer a todas las personas que de una u otra manera me ayudaron en este proceso, a los profesores que tuve en la carrera, a mis compañeros, y demás personal.

A mi profesor tutor Miguel Hernández por su tiempo y dedicación para ayudarme en la culminación del proyecto de manera extraordinaria.

Al Dr. Harold Sánchez coordinador y encargado técnico del laboratorio de variables eléctricas, por brindarme en primera instancia la oportunidad de realizar el proyecto ahí, y por su gran aporte para la elaboración del mismo.

Al resto de los miembros del laboratorio Oscar, Isabel, Roger y Saúl, les agradezco igualmente por su tiempo y aportes en el proyecto. Igualmente por hacerme esta experiencia laboral bastante satisfactoria.

Muchas Gracias.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1 GPIB Y SUS LIMITACIONES EN EL LABORATORIO 1

| | |
|--|----------|
| 1.1 LA METROLOGÍA Y SU IMPORTANCIA | 1 |
| 1.2 USO DE BUS GPIB EN EL LABORATORIO | 4 |
| 1.3 AUSENCIA DE AISLAMIENTO EN EL BUS GPIB..... | 5 |

CAPÍTULO 2 PROTOTIPO DE AISLAMIENTO, ALCANCES Y OBJETIVOS..... 7

| | |
|--|-----------|
| 2.1 ACOPLE DE AISLAMIENTO GPIB | 7 |
| 2.2 ALCANCES DEL PROTOTIPO DE AISLAMIENTO | 8 |
| 2.3 META | 9 |
| 2.4 OBJETIVO GENERAL | 10 |
| 2.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 10 |

CAPÍTULO 3 TEORÍA APLICADA PARA EL AISLAMIENTO DEL BUS GPIB.. 11

| | |
|--|-----------|
| 3.1 ESTÁNDAR DE COMUNICACIÓN IEEE 488..... | 11 |
| 3.1.1 INTERFAZ DE COMUNICACIÓN | 11 |
| 3.1.2 ESTRUCTURA DEL BUS..... | 12 |
| 3.1.2.1 Líneas de Datos | 13 |
| 3.1.2.2 Líneas de Control de Transferencia de datos | 13 |
| 3.1.2.3 Líneas de Control de Interfaz General..... | 16 |
| 3.1.3 CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS | 17 |
| 3.1.3.1 Características de compuertas de salida del bus | 17 |
| 3.1.3.2 Características de compuertas de entrada del bus | 18 |
| 3.1.3.3 Características de carga CD de los dispositivos | 18 |
| 3.1.4 CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS..... | 19 |
| 3.2 RUIDO Y LAZOS DE CORRIENTE | 20 |
| 3.2.1 LAZOS DE CORRIENTE | 21 |
| 3.2.2 CONFLICTO DE RUIDO EN SISTEMAS O INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN..... | 22 |
| 3.3 AISLAMIENTO GALVÁNICO..... | 23 |
| 3.3.1 AISLAMIENTO ÓPTICO | 23 |
| 3.3.2 AISLAMIENTO CAPACITIVO..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3.3 AISLAMIENTO INDUCTIVO | 25 |
| 3.3.4 DISPOSITIVOS AISLADORES GPIB | 25 |
| 3.4 CALIBRACIONES EN LMVE Y GPIB | 26 |

CAPÍTULO 4 PROYECCIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO DE AISLAMIENTO DEL BUS GPIB..... 28

| | |
|--|-----------|
| 4.1 RECONOCIMIENTO DEL PROBLEMA | 28 |
| 4.2 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN..... | 29 |
| 4.3 EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS Y SÍNTESIS DE UNA SOLUCIÓN | 29 |
| 4.4 IMPLEMENTACIÓN DE LA SOLUCIÓN | 30 |

CAPÍTULO 5 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS CIRCUITOS DE AISLAMIENTO PARA EL BUS GPIB 33

| | |
|---|-----------|
| 5.1 PROTOTIPO GENERAL DE AISLAMIENTO GALVÁNICO PARA EL BUS DE DATOS IEEE 488.1 | 33 |
| 5.2 CIRCUITO CON AISLAMIENTO ÓPTICO..... | 34 |
| 5.2.1 BLOQUE DE AISLACIÓN ÓPTICO | 35 |
| 5.2.2 TRANSCEIVERS | 36 |
| 5.2.3 CONTROL DE DIRECCIÓN..... | 39 |
| 5.2.3.1 Lógica de dirección | 39 |
| 5.2.3.2 Circuito de dirección | 41 |
| 5.3 CIRCUITO DE AISLAMIENTO CAPACITIVO..... | 45 |
| 5.4 ALIMENTACIÓN Y CONSUMO ENERGÉTICO | 47 |
| 5.4.1 CONSUMO ENERGÉTICO EN CIRCUITO DE AISLACIÓN ÓPTICA | 47 |
| 5.4.2 CONSUMO ENERGÉTICO EN CIRCUITO DE AISLACIÓN CAPACITIVA..... | 48 |
| 5.5 CONSTRUCCIÓN CIRCUITO | 49 |

CAPÍTULO 6 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LOS DE LOS CIRCUITOS DE AISLAMIENTO PARA EL BUS GPIB 51

| | |
|---|-----------|
| 6.1 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE CIRCUITO DE AISLAMIENTO ÓPTICO..... | 51 |
| 6.1.1 BLOQUE DE AISLACIÓN ÓPTICA..... | 52 |
| 6.1.2 BLOQUE DE TRANSCEIVERS..... | 53 |
| 6.1.3 CIRCUITO DE DETECCIÓN DE DIRECCIÓN | 55 |

| | |
|--|------------------|
| 6.1.4 CIRCUITO TOTAL | 57 |
| 6.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE CIRCUITO DE AISLAMIENTO CAPACITIVO..... | 58 |
| FIGURA 6.12 SEÑAL DE SALIDA DEL CIRCUITO DE AISLACIÓN CAPACITIVA AMPLIADA EN EL TIEMPO. | 59 |
| 6.3 PRUEBAS EN LABORATORIO | 60 |
| 6.3.1 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN PARA EL CIRCUITO DE AISLAMIENTO ÓPTICO..... | 60 |
| 6.3.2 PRUEBAS DE COMUNICACIÓN PARA EL CIRCUITO DE AISLAMIENTO CAPACITIVO..... | 61 |
| 6.3.2.1 Pruebas en calibración de capacitancia | 61 |
| 6.3.2.2 Pruebas en calibración en tensión alterna..... | 62 |
| 6.3.2.3 Pruebas en calibración en tensión directa..... | 63 |
| 6.3.2.3 Pruebas en calibración en corriente alterna | 64 |
| 6.3.2.4 Pruebas en calibración en corriente directa | 65 |
| 6.3.2.5 Pruebas en calibración en resistencia | 66 |
| 6.1.3 PRUEBAS DE CONSUMO ENERGÉTICO | 67 |
| 6.4 ANÁLISIS..... | 69 |
| 6.4.1 FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE AISLAMIENTO ÓPTICO PARA EL BUS GPIB | 69 |
| 6.4.2 FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO DE AISLAMIENTO CAPACITIVO PARA EL BUS GPIB ... | 71 |
| 6.4.3 CUMPLIMIENTO DE ESTÁNDAR IEEE 488.1 | 72 |
| 6.4.4 CONSUMO DE POTENCIA | 74 |
| 6.4.5 PRUEBAS DEL PROTOTIPO EN EL LABORATORIO | 74 |
| 6.4.6 COMPARACIÓN DE LOS CIRCUITOS DE AISLAMIENTO | 76 |
| <u>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</u> | <u>78</u> |
| 7.1 CONCLUSIONES | 78 |
| 7.2 RECOMENDACIONES..... | 79 |
| <u>BIBLIOGRAFÍA</u> | <u>80</u> |
| <u>APÉNDICES</u> | <u>82</u> |

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

- Figura 1.1** Diagrama de conexión de Computadora con equipos mediante GPIB.....4
Figura 1.2 Diagrama de conexión entre tierras mediante el bus GPIB.....5

CAPÍTULO 2

- Figura 2.1** Diagrama del circuito que aísla eléctricamente dentro del bus de datos GPIB.....7

CAPÍTULO 3

- Figura 3.1** Funciones de dispositivos en comunicación GPI.....12
Figura 3.2 Diagrama cronológico de señales de control en un envío de datos.....14
Figura 3.3 Diagrama de flujos de transferencia de byte en proceso de negociación.....15
Figura 3.4 Gráfico de especificaciones de carga para el bus GPIB.....18
Figura 3.5 Esquemático de circuito de carga recomendadas para el bus GPIB.....19
Figura 3.6 Esquema de conector para bus de datos IEEE 488.....19
Figura 3.7 Ejemplo de ruido ocasionado por indebida conexión a tierra entre circuitos.....21
Figura 3.8 Circuitos con aislamiento galvánico de tipo óptico.....22
Figura 3.9 Ejemplo de conexión a tierra entre equipos de laboratorio.....23
Figura 3.10 Diagrama de aislamiento óptico por medio de optocoplador.....24
Figura 3.11 Diagrama de aislamiento capacitivo.....24
Figura 3.12 Diagrama de aislamiento inductivo.....25
Figura 3.13 Conexión de computadora a equipos de calibración del laboratorio.....27

CAPÍTULO 5

| | |
|--|-----------|
| Figura 5.1 Diagrama General de circuito de aislamiento para el bus IEEE 488..... | 33 |
| Figura 5.2 Diagrama General de circuito de aislamiento óptico para el bus IEEE 488..... | 34 |
| Figura 5.3 Diagrama General de circuito de aislamiento para el bus IEEE 488..... | 35 |
| Figura 5.4 Transceivers SN7561 para líneas de control y SN7560 para líneas de datos..... | 37 |
| Figura 5.5 Tabla de verdad de control de dirección de circuito integrado SN75161..... | 37 |
| Figura 5.6 Tabla de verdad de control de dirección de circuito integrado SN75160..... | 38 |
| Figura 5.7 Diagrama de conexión de transceivers en ambos lados del circuito..... | 39 |
| Figura 5.8 Diagrama de estados de direccionamiento de datos..... | 40 |
| Figura 5.9 Bloque de control de dirección..... | 41 |
| Figura 5.10 Circuito de detección de dirección de comunicación..... | 42 |
| Figura 5.11 Circuito controlador de dirección de comunicación..... | 43 |
| Figura 5.12 Circuito de lógica de direccionamiento de TC..... | 44 |
| Figura 5.13 Diagrama de bloques de circuito con aislamiento capacitivo..... | 45 |
| Figura 5.14 Diagrama de circuito capacitivo con componentes ISO1540..... | 46 |
| Figura 5.15 Circuito de alimentación de bajo ruido..... | 47 |
| Figura 5.16 Conector de tipo receptáculo para el bus de IEEE 488.1..... | 49 |
| Figura 5.17 Diseño de circuito impreso con aislación óptica..... | 50 |
| Figura 5.18 Diseño de circuito impreso con aislación capacitiva..... | 50 |

CAPÍTULO 6

| | |
|--|-----------|
| Figura 6.1 Diseño de circuito impreso con aislación capacitiva..... | 50 |
| Figura 6.2 Imagen de osciloscopio de retardo de una señal en el bloque de aislamiento..... | 52 |
| Figura 6.3 Salida ante entrada de señal triangular del circuito del bloque de aislación..... | 53 |
| Figura 6.4 Retardo de una línea en el bloque de los transceivers del lado B al A..... | 54 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 6.5 Retardo de una línea en el bloque de los transceivers del lado A al B..... | 54 |
| Figura 6.6 Imagen de señal aplicada a circuito de detección de dirección..... | 55 |
| Figura 6.7 Imagen ampliada de una señal aplicada a circuito de detección de dirección..... | 56 |
| Figura 6.8 Imagen de señal aplicada a circuito de control de dirección..... | 56 |
| Figura 6.9 Prueba de retardo de señal en el circuito de aislamiento óptico del lado A al B..... | 57 |
| Figura 6.10 Prueba de retardo de señal en el circuito de aislamiento óptico del lado B al A..... | 58 |
| Figura 6.11 Señal de salida del circuito de aislación capacitiva con entrada cuadrada..... | 58 |
| Figura 6.12 Señal de salida del circuito de aislación capacitiva ampliada en el tiempo..... | 59 |
| Figura 6.13 Prueba de medición de consumo de corriente por parte del circuito..... | 67 |
| Figura 6.14 Gráfica de la desviación estándar en las mediciones de bajo voltaje en AC..... | 75 |

Capítulo 1 GPIB y sus limitaciones en el laboratorio

1.1 La Metrología y su Importancia

La metrología es la ciencia de las mediciones, la cual tiene como objeto de estudio las propiedades, escalas, unidades y técnicas de medición, de manera teórica y práctica. Además se encarga de valorar los procesos de medición y contribuir a su mejora constante, los cuales faciliten el progreso científico, tecnológico y la calidad de vida. Se divide en tres categorías, cada una con distintos niveles de complejidad; la metrología científica, la metrología industrial y la metrología legal. [1]

La metrología a nivel internacional realiza una labor de suma importancia. Una de las razones por las cuales las mediciones en aspectos comerciales y aspectos legales son tan consistentes es debido a que están reguladas. Todos los gobiernos tienen regulaciones y leyes con respecto al uso de pesos y medidas en el comercio o industria. En la industria, la metrología es regulada por estándares establecidos en el INTEC-ISO/IEC 17025:2005. Estas distintas regulaciones y estándares internacionales son utilizados por los entes metrológicos de cada país para poder hacer comparaciones de las mismas magnitudes y mantener un equilibrio en los patrones a nivel internacional. El mantenimiento de dichos patrones propicia un control para que las actividades internacionales donde haya una magnitud de por medio como el comercio, sean reguladas.

La calibración es una comparación de la medida de un instrumento de medición o generación con otro igual o con mejor precisión conocido como patrón. El patrón es el instrumento que tiene la medición de mayor exactitud en la comparación. Las calibraciones son realizadas en laboratorios metrológicos, donde para las mediciones se toman en cuenta factores como temperatura, humedad, vibración y aislamiento, estas son monitoreadas y controladas para asegurar sus mediciones.[2]

Existen diferentes tipos de laboratorios metrológico, estos se clasifican jerárquicamente de acuerdo a la calidad de sus patrones. Las estructuras dependen de cada país, aunque siempre existen 3 niveles definidos:

- Laboratorio Nacional
- Laboratorio Secundario
- Laboratorio Industrial

El laboratorio nacional posee el patrón nacional primario y los patrones nacionales de transferencia. Un patrón primario es reconocido como poseedor de las más altas cualidades metrológicas y cuyo valor se acepta sin referirse a otros patrones de la misma magnitud a nivel nacional. Por orden jerárquico el patrón nacional está encargado de calibrar patrones de laboratorios secundarios, y los secundarios a laboratorios industriales. Un laboratorio primario le brinda sus servicios a los laboratorios secundarios, los cuales se encargan de las calibraciones a nivel industrial.

A nivel nacional las mediciones juegan un papel muy vital en una sociedad. Estas son el medio para describir los fenómenos naturales en forma cuantitativa, lo que lleva a su importancia en múltiples actividades para un estado. El progreso de la ciencia está muy ligado a los avances y la capacidad de medición. En el comercio toda transacción ya sea café, gasolina, electricidad se compra o vende después de un proceso de medición el cual afecta la economía pública y privada. El mercado, comercio y las leyes que los regulan dependen de la metrología. Las mediciones se encuentran en seguridad, tránsito, calidad, salud y un sinnúmero de actividades que se realizan a diario. Dada las circunstancias es debido establecer laboratorios metrológicos que mantengan a norma las mediciones y sus unidades.

El Laboratorio metrológico de variables eléctricas (LMVE) del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), es el laboratorio nacional de referencia en metrología en electricidad, magnetismo, tiempo y frecuencia, el cual ofrece sus servicios al sector público, privado y ciudadanía en general, a través de un servicio de calidad basado en la mejora continua.

El LMVE está encargado de mantener los patrones primarios de las magnitudes físicas fundamentales, vinculadas con la energía eléctrica y las telecomunicaciones al Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI), realizando calibraciones a equipos de medición y generación de variables eléctricas.

Este debe respaldar sus mediciones con capacidad técnica demostrada mediante participación en comparaciones internacionales y un sistema de gestión de calidad eficiente, para publicar sus capacidades de medición y calibración en la base de datos del Buró Internacional de Pesas y Medidas (BIPM), dándole con esto validez a los reportes de calibración del LMVE en cualquiera de los países firmantes del Acuerdo de Reconocimiento Mutuo (ARM). Por lo que el laboratorio sigue normas técnicas y procedimientos establecidos para brindar la garantía de dichas mediciones.[3]

La función principal del laboratorio es la calibración de instrumentos secundarios, que se utilizan para la medición o generación de funciones en variables eléctricas tales como mediciones de frecuencia, impedancia y potencia eléctrica, de la manera más exacta y precisa a nivel nacional. Esto con el objetivo de mantener y verificar el buen funcionamiento de los equipos, y que estos respondan a los requisitos establecidos en las normas de calidad y garantizar la fiabilidad de las medidas.[4]

Cabe destacar la importancia del laboratorio tanto a lo interno en el ICE, dando servicios para mantener los patrones para la parte de energía y las telecomunicaciones, como a lo externo para laboratorios metrológicos secundarios siguiendo la jerarquía para que estos transfieran los patrones finalmente a la industria.

1.2 Uso de Bus GPIB en el laboratorio

GPIB (General-Purpose Instrumentation Bus) es un estándar de bus de datos digital de corto rango desarrollado por Hewlett-Packard en los años 1970 para conectar dispositivos de prueba y medida (por ejemplo multímetros y osciloscopios), con dispositivos que los controlen como una computadora. En 1978 el bus fue estandarizado por el Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) como el IEEE-488.[5]

En el laboratorio, los objetos bajo prueba a valorar son conectados a un patrón metrológico para realizar la calibración. Para facilitar la toma numerosa de datos y realizar los análisis estadísticos del comportamiento de los equipos, son conectados a computadoras, y así utilizar programas de configuración y de recolección de datos de los mismos de manera automatizada. Esta conexión se realiza mediante el estándar de comunicación GPIB, desde un puerto GPIB que poseen los patrones de medición hacia otro puerto GPIB en la computadora o un puerto USB por medio de un adaptador GPIB/USB como se observa en la figura 1.1.

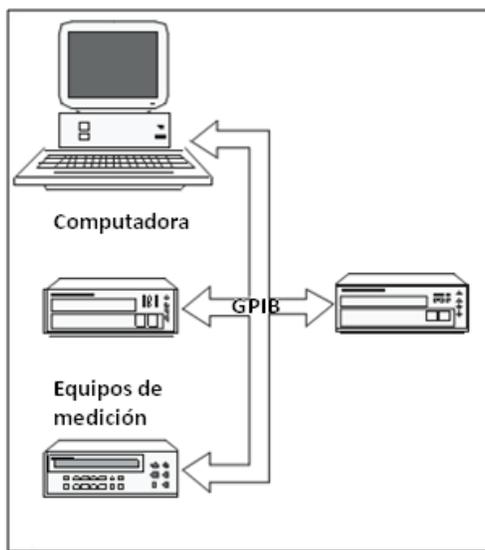


Figura 1.1 Diagrama de conexión de Computadora con equipos mediante GPIB.

1.3 Ausencia de aislamiento en el bus GPIB

El bus IEEE-488 es un buen método para interconectar instrumentos y computadoras, debido a su fácil uso y aplicabilidad en instrumentos de laboratorio. Sin embargo, el estándar de comunicación se ve obstaculizado por la falta de aislamiento eléctrico entre los distintos equipos conectados al bus de datos. Debido a la ausencia del aislamiento que hay entre el bus de datos y los equipos conectados a este, se crea una mutua conexión de las tierras entre el controlador y las unidades bajo prueba de medición, al ser así no se garantiza la introducción de corrientes no deseadas en el bus de datos. Dichas corrientes adicionales pueden crear tensiones de compensación que reducen la inmunidad al ruido de los distintos sistemas. También los dispositivos no aislados proporcionan una trayectoria para ruido ocasionado por interferencia electromagnética y picos de voltaje que se introducen en las líneas de señal del bus. Como consecuencia de la falta de aislamiento se da la posibilidad que ocurran errores de datos y fallos del sistema que pueden interferir con la medición por parte de los instrumentos.[6]

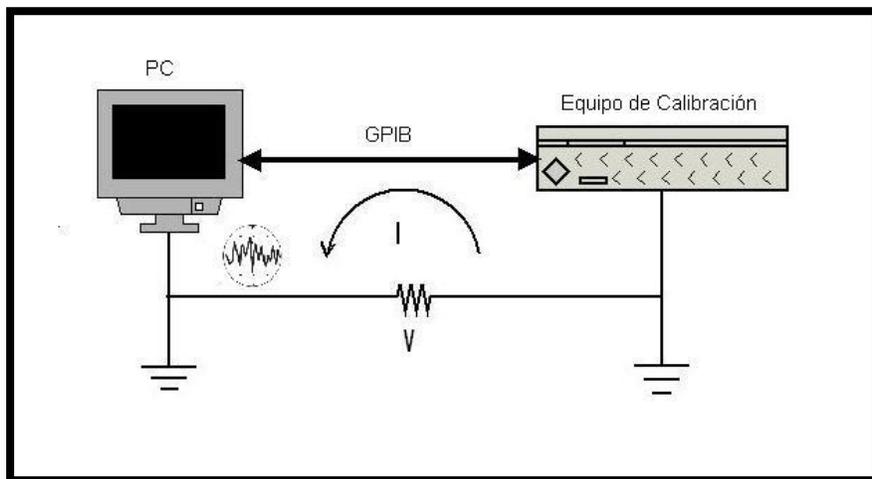


Figura 1.2 Diagrama de conexión entre tierras mediante el bus GPIB.

En la figura 1.2 se observa un esquema de la conexión entre los dispositivos en el bus donde la conexión real entre tierras, presenta una resistencia y diferencia de potencial que provoca lazos de corriente, además contando con las emisiones de radio frecuencia emitidas por el computador inyectadas a la línea de tierra (producidas por señales de reloj sincrónicas provocadas en el microprocesador y otros circuitos síncronos), se proporciona un camino para corrientes parásitas dejando expuesto a un mal funcionamiento de equipos de precisión.[7]

Para sus actividades de calibración, el LVME requiere que el equipo de medición y generación de funciones de las variables eléctricas funcionen de manera exacta y precisa. Debido a este motivo es importante garantizar el aislamiento de los equipos al ser interconectados mediante GPIB, y así evitar problemas por introducción de ruido que como consecuencia afecte las mediciones de exactitud y precisión.

Capítulo 2 Prototipo de aislamiento, alcances y objetivos

2.1 Acople de aislamiento GPIB

En el laboratorio se necesita de un dispositivo electrónico que aisle eléctricamente el bus de datos, así se garantiza el rechazo del ruido por lazos de corriente que se introduce por parte de los dispositivos que integran el bus de datos, los cuales no afecten la fiabilidad de las medidas de los mismos.

Como solución, en el laboratorio se requiere la construcción de un acople aislante para poder integrarlo a los procesos de calibración del laboratorio, y asegurar un aislamiento que garantice que no se den alteraciones en las mediciones de los equipos tal que no modifique el funcionamiento y precisión del equipo.

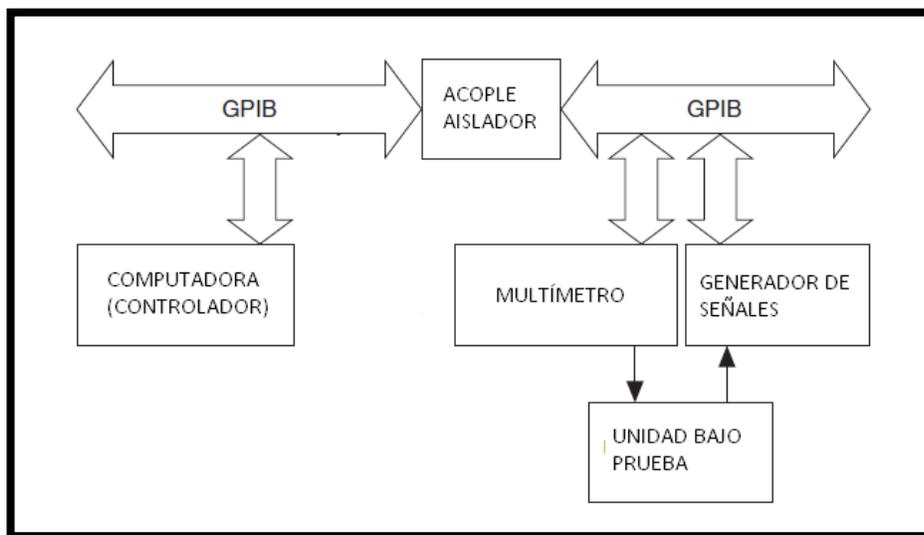


Figura 2.1 Diagrama del circuito que aísla eléctricamente dentro del bus de datos GPIB.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama de incorporación del prototipo al bus de datos. El bus de datos es separado en dos partes aisladas galvánicamente, asimismo la comunicación entre ellos no es afectada. El diagrama muestra como la computadora conectada al bus es aislada de los equipos de medición.

Existen diversas maneras de realizar el aislamiento galvánico en un bus de comunicación. Por lo que surge el interés en el proyecto de analizar las distintas opciones de aislamiento para llegar a la solución que mejor se pueda incorporar a los intereses del laboratorio.

Mediante un proceso de selección se trabajó en el diseño de dos prototipos utilizando alternativas de aislamiento distintas. La primera se basó en un prototipo con aislamiento de tipo óptico y la segunda en uno con aislamiento de tipo capacitivo.

Donde se plantea realizar las pruebas necesarias para llegar a analizar cual prototipo de aislamiento se apega más a las necesidades, tomando en cuentas los factores de criterio brindados por parte del laboratorio mediante una comparación entre estos dos métodos, para así elegir un prototipo que cumpla con las especificaciones técnicas, y de esta manera integrarlo a los procesos de calibración del laboratorio.

2.2 Alcances del prototipo de aislamiento

Se limita el estudio del proyecto a dos tipos de aislamiento para llegar a elaborar el estudio, prototipos y análisis adecuado de ambos en el periodo de tiempo establecido para el desarrollo del proyecto. Estos fueron estratégicamente seleccionados para realizar una comparación y cumplir con la finalidad de los encargados del laboratorio de tener un producto que pueda ser utilizado como parte del trabajo desarrollado.

El criterio para la elección del tipo de aislamiento de los prototipos tuvo dependencia del nivel de aislamiento, la facilidad de construcción, adaptación adecuada al prototipo y los costos del material.

Ambos prototipos debían cumplir con los estándares eléctricos y mecánicos de la IEEE 488.1 para el debido funcionamiento y compatibilidad de los prototipos con los equipos de comunicación GPIB, por lo que añadieron bloques adicionales para el cumplimiento de los mismos.

El laboratorio solicitó por su propio interés que el dispositivo contara con una alimentación propia por medio de batería, además que llegara a cumplir la demanda energética de los largos y continuos procesos de calibración. Para lo que se tuvo que tomar en cuenta el consumo energético del dispositivo.

Para desarrollar las pruebas de evaluación se dependió siempre de la presencia de un metrológico, por lo que no se podía realizar la manipulación del equipo del laboratorio en forma directa.

Aparte de los equipos de calibración metrológicos, cabe destacar que el laboratorio cuenta con una instrumentación limitada para el diseño y desarrollo de circuitos electrónicos, lo que limitó las pruebas y análisis de los circuitos realizados.

2.3 Meta

El Laboratorio por sus necesidades de calidad requiere de un dispositivo de aislamiento que logre asegurar las mediciones en todos los procesos de calibración.

Como meta se busca que el Laboratorio llegue a integrar al menos uno de los prototipos de aislamiento a los procesos automatizados de calibración a aquellos equipos que lo necesiten garantizando el debido funcionamiento y mediciones de alta precisión.

Además de su integración, se espera que el Laboratorio logre desarrollar los estudios posteriores para el análisis del uso de dicho dispositivo.

2.4 Objetivo General

Desarrollar el prototipo de un dispositivo que aisle eléctricamente los equipos conectados al bus de datos GPIB, que garantice el rechazo electrónico de ruido, tal que no modifique el funcionamiento en los procesos de calibración que se realizan en el LMVE.

2.5 Objetivos específicos

- Diseñar los circuitos de aislación óptica y aislación capacitiva para las líneas de comunicación, el cual garantice el rechazo de ruido relacionado con lazos de corriente y acople de impedancias.
- Diseñar y construir los prototipos para que cumplan con las características eléctricas y mecánicas establecidas en el estándar IEEE 488.1.
- Incorporar al diseño un circuito de alimentación que funcione por medio de baterías que cumpla con el aislamiento y sea proporcionada la energía suficiente durante los procesos de calibración.
- Analizar los prototipos realizados para la elección del que posea las mejores características para ser integrado a los procesos de calibración del laboratorio.

Capítulo 3 Teoría aplicada para el aislamiento del bus GPIB

El siguiente capítulo contiene la información necesaria sobre la teoría básica utilizada en el diseño y construcción de los prototipos elaborados en el proyecto. Con la importancia de brindar al lector las herramientas para un mejor entendimiento.

3.1 Estándar de comunicación IEEE 488

El estándar de comunicación IEEE 488 (GPIB) es inventado en 1974 por la compañía Hewlett-Packard para simplificar la interconexión entre los instrumentos de prueba y las computadoras bajo el nombre de HPIB (Hewlett-Packard Interface Bus). Otras empresas adoptaron la interfaz de comunicación bajo el nombre de GPIB (General Purpose Instrument Bus) por sus características positivas en la comunicación y diseñado específicamente para la conexión de instrumentos de medida. Finalmente la IEEE estandarizó la comunicación centrándose en las características eléctricas y mecánicas del bus con el IEEE 488.1 y luego su programación con el IEEE 488.2.[8]

3.1.1 Interfaz de comunicación

En la figura 3.1 se observa el esquema de la comunicación GPIB. Según el IEEE 488.1 existen distintitos tipos de dispositivos, cada uno tiene que ser capaz de desarrollar uno o más de los roles en la comunicación dentro del bus.

- Oyente (LISTENER): Dispositivo capaz de recibir datos sobre la interfaz cuando es direccionado. Pueden existir catorce oyentes simultáneos en la interfaz.
- Hablador (TALKER): Dispositivo capaz de transmisión de datos sobre la interfaz cuando es direccionado. Solo puede haber un hablador activo.
- Controlador: Dispositivo capaz de especificar/direccionar al oyente y al hablador para la transferencia de información incluyéndose a el mismo. Solo

puede existir un controlador activo en la interfaz, existen sistemas con múltiples controladores, pero solo existe un controlador del sistema.[9]

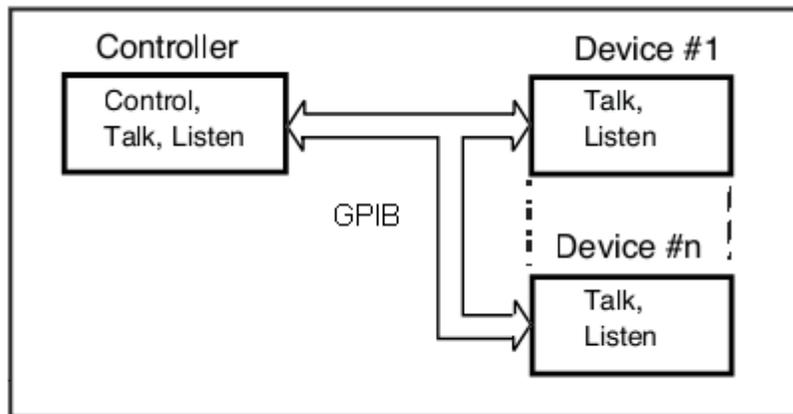


Figura 3.1 Funciones de dispositivos en comunicación GPIB.

Entre las especificaciones del estándar IEEE 488.1 se encuentran:

- El bus debe tener un máximo de 15 equipos conectados al bus de datos.
- Tiene que haber un máximo de 20 metros de línea de transmisión en el bus de datos.
- El bus cuenta con 16 líneas activas, de las cuales 8 son de datos y 8 son para el manejo de la interfaz y la comunicación.
- Un máximo de transferencia de datos de 1 megabyte por segundo en distancias limitadas y típicamente 500 kilobytes por segundo.
- Existen 31 direcciones primarias para los dispositivos.

3.1.2 Estructura del Bus

Está estructurado en tres distintos tipos de líneas:

- Líneas de datos, conformado por 8 líneas de señal.
- Líneas de control de transferencia de datos, conformado por 3 líneas de señal.
- Líneas de control de interfaz general, conformado por 5 líneas.

3.1.2.1 Líneas de Datos

Conocidas como DIO1-8, están conformadas por un bus de ocho bits bidireccional el cual es usado para la transferencia de la información de dispositivo a dispositivo en la interfaz. Los datos son transmitidos comúnmente utilizando códigos como BCD, alfanuméricos o binario. La información de transferencia incluye comandos de interface, direcciones y datos dependientes de los dispositivos.

3.1.2.2 Líneas de Control de Transferencia de datos

En el bus GPIB la transmisión de datos es asincrónica, las 3 líneas de control de transferencia de datos son 3 líneas usadas para coordinar dicha transmisión del dispositivo de origen (el controlador o hablador) a otro dispositivo (ya sea un oyente o a todos recibiendo un comando) asegurando la integridad de la transferencia de los datos.

- **Data Valid (DAV):** Se utiliza para indicar la condición (disponibilidad y validez) de la información sobre las líneas de señal DIO. Lo activa el controlador o hablador que dispone de datos para enviar.
- **Not Ready For Data (NRFD):** Se utiliza para indicar la condición de la disposición de dispositivo (s) para aceptar datos.
- **Not Data Accepted (NDAC):** Se utiliza para indicar la condición de aceptación de los datos por dispositivo(s).

Las señales DAV, NRFD, y NDAC operan en un proceso de negociación (Handshaking), de tres estados para transferir cada byte de datos a través de la interfaz. En la figura 3.2 se observa el diagrama de tiempos donde se ejemplifica cómo se realiza la comunicación por medio de las líneas de control. Primero los dispositivos activan NRFD indicando que todos los dispositivos están listos para recibir datos, cuando un dispositivo hablador o controlador esté preparado para enviar un byte activa la señal de DAV indicando el próximo envío, el byte es puesto en transmisión y los distintos equipos lo reciben desactivando el NDAC para finalizar la transmisión del byte.[8]

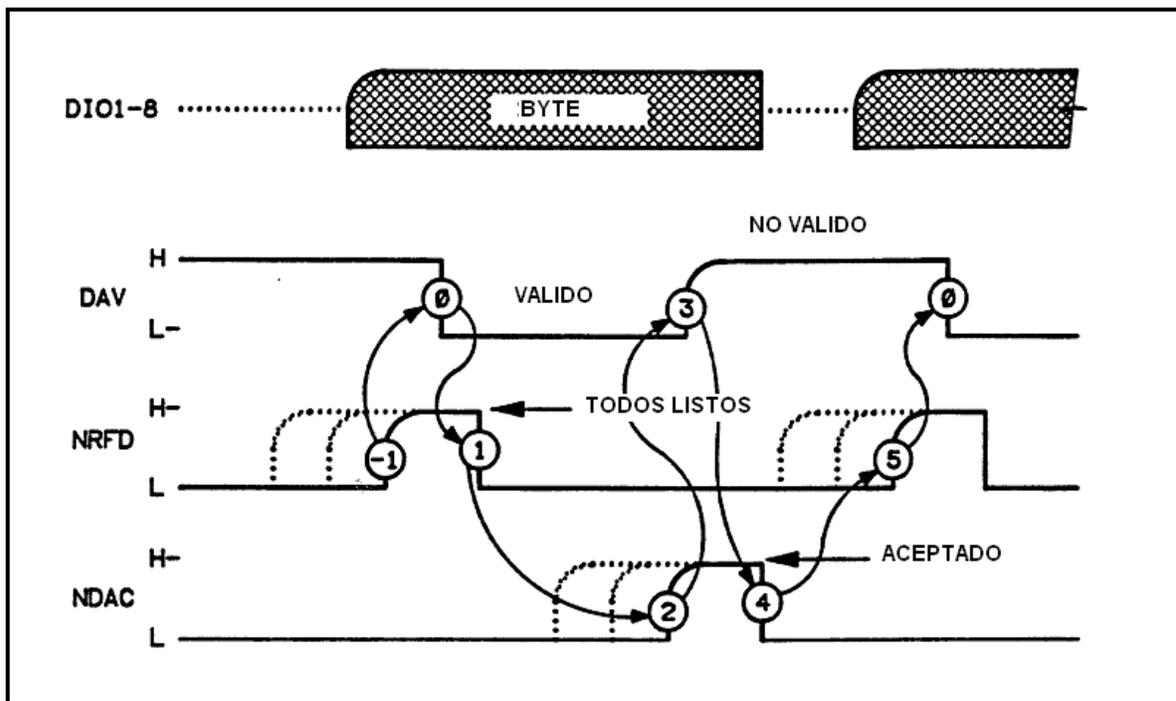


Figura 3.2. Diagrama cronológico de señales de control en un envío de datos.

En la figura 3.3 se observa un diagrama de flujo del proceso de negociación, para la operación de transmisión y de recepción del byte. En la parte izquierda se tiene el diagrama de operación para la transmisión y en la derecha para la recepción del byte. Los números son las diferentes etapas que también se encuentran en el diagrama de las señales en la figura 3.2.

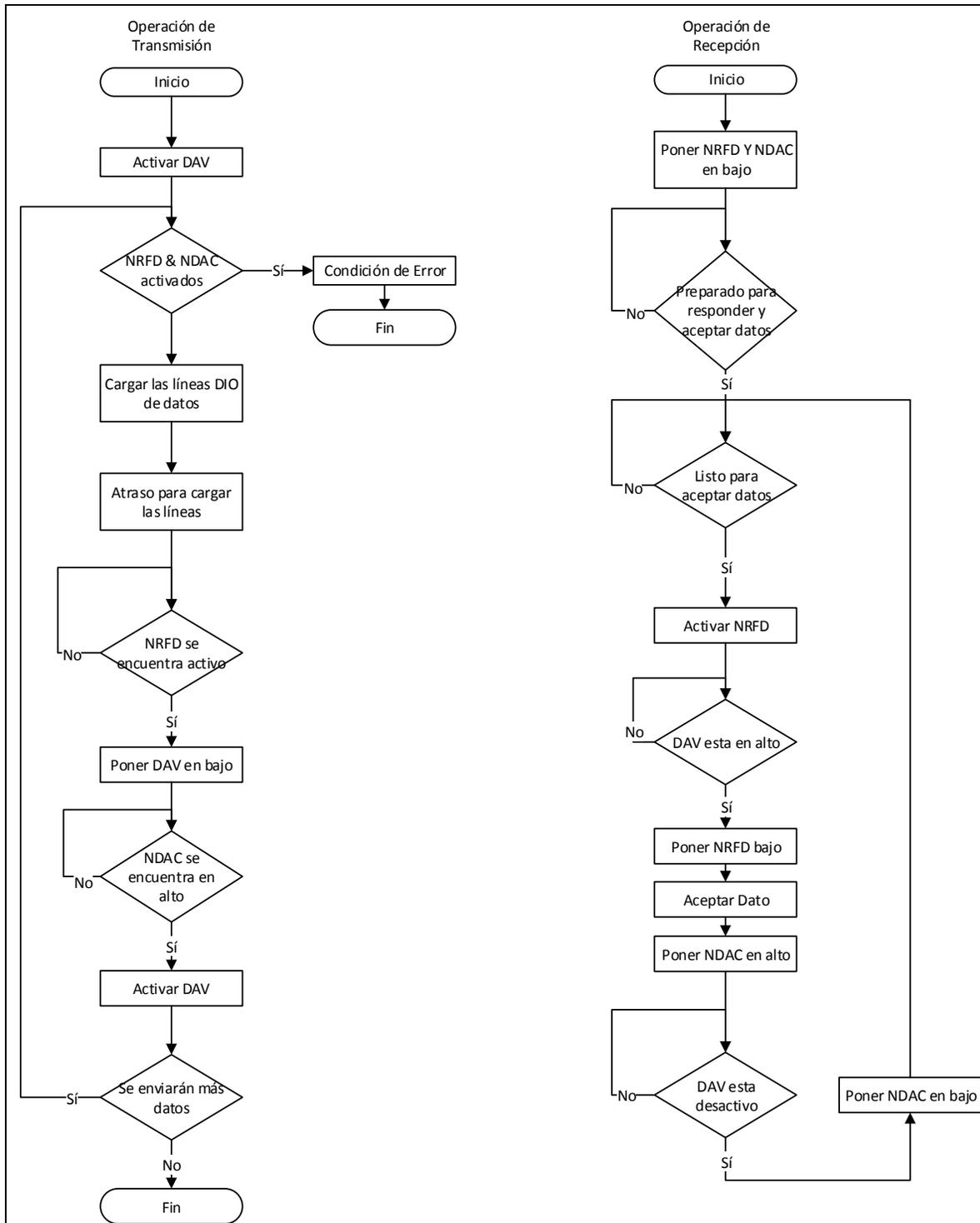


Figura 3.3 Diagrama de flujos de transferencia de byte en proceso de negociación.

3.1.2.3 Líneas de Control de Interfaz General

Las cinco señales de interfaz se utilizan para gestionar el flujo ordenado de información a través del bus, son utilizadas para que el controlador tenga manejo en la comunicación.

- Attention (ATN), utilizado por el controlador para especificar los datos sobre las líneas de señal DIO y como se han de interpretar y se deben responder a los datos. Es activada (0 lógico) por el controlador para indicar que está colocando un byte de dirección, de control o de datos en el bus. La ATN es liberada (1 lógico) para permitir que el transmisor seleccionado ponga sus datos en el bus. El controlador recupera el control reactivando la línea ATN; esto se suele hacer sincronizado con el handshake para evitar las confusiones entre los bytes de control y los de datos.
- Interface Clear (IFC), utilizado por el controlador para colocar el sistema de interfaz, colocar a todos los dispositivos interconectados, en un estado de reposo conocida.
- Service Request (SRQ), es utilizado por un dispositivo para indicar la necesidad de atención y de solicitar una interrupción de la corriente de secuencia de eventos, la señal es enviada al controlador para que realice la interrupción del bus.
- Remote Enable (REN), utilizado por el controlador en conjunción con otros mensajes, para activar o desactivar uno o más controles locales que tienen correspondientes mandos a distancia.
- End of Identify (EOI) se utiliza por el hablador para indicar el final de una secuencia de bytes de transferencia múltiple, o en conjunción con ATN (por el controlador) para ejecutar una secuencia de sondeo.

Existe una función dentro del bus de datos que se llama secuencia de sondeo (Parallel poll) la cual es una operación iniciada por el controlador para obtener información simultánea de los dispositivos. Cuando se inicia una secuencia de sondeo, cada dispositivo envía un Bit de status por una línea diferente de DIO previamente configurada. La secuencia de sondeo en el bus es iniciada por el controlador cuando activa las líneas de ATN Y EOI.

3.1.3 Características eléctricas

Las líneas del GPIB operan con niveles de tensión TTL y utilizan lógica negativa, es decir para un nivel de tensión inferior de 0.8 V corresponde a un estado lógico verdadero y un nivel de tensión superior a los 2.5 V corresponde a un estado falso, estos niveles de tensión no deben exceder los 5.25V DC.[9]

3.1.3.1 Características de compuertas de salida del bus

Las salidas al bus de datos por parte de los dispositivos tienen que ser mediante tecnología de colector abierto para todas las líneas de comunicación. Con condiciones eléctricas para los dos niveles lógicos encontrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características eléctricas para compuertas de salida al bus.

| Nivel Lógico | Tensión (V) | Corriente |
|-----------------|-------------|-----------------------------|
| V _{ol} | < 0,5 | 42mA drenando continuamente |
| V _{oh} | > 2,4 | 5,2mA de la fuente |

3.1.3.2 Características de compuertas de entrada del bus

Para proveer una inmunidad al ruido, se recomienda el uso de circuitos con entradas tipo Schmitt. Con condiciones eléctricas para los dos niveles lógicos encontrados en la tabla 3.2.

Tabla 3.2 Características eléctricas para compuertas de salida al bus.

| Nivel Lógico | Tensión (V) |
|--------------|-------------|
| Vil | < +0,8 |
| Vih | > +2,4 |

3.1.3.3 Características de carga CD de los dispositivos

En la figura 3.4 se observan los requisitos de carga CD especificados. En el estándar IEEE 488.1 se recomienda una configuración típica para el circuito con resistencias RL1 Y RL2 de 3kΩ y de 6.2KΩ respectivamente además de una protección, en la figura 3.5 se observa el esquema de dicho circuito.

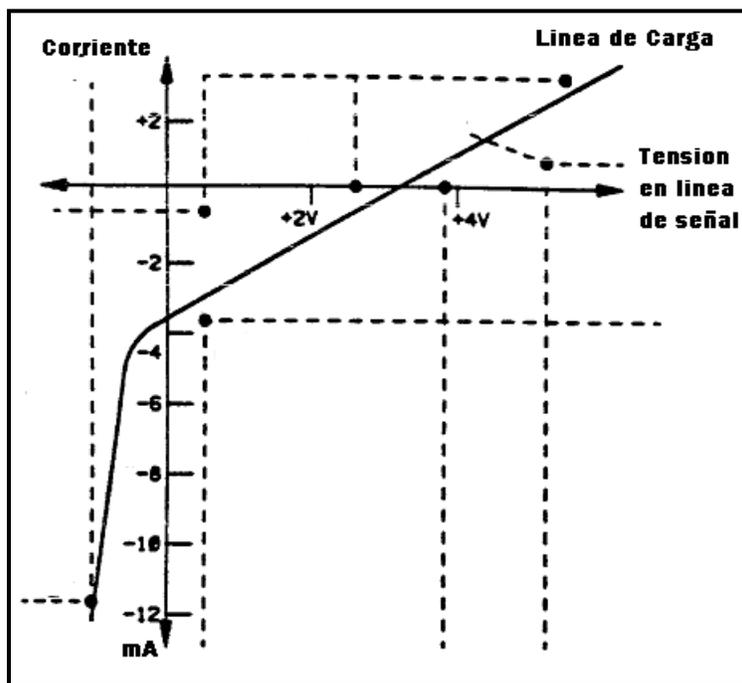


Figura 3.4 Gráfico de especificaciones de carga para el bus GPIB.

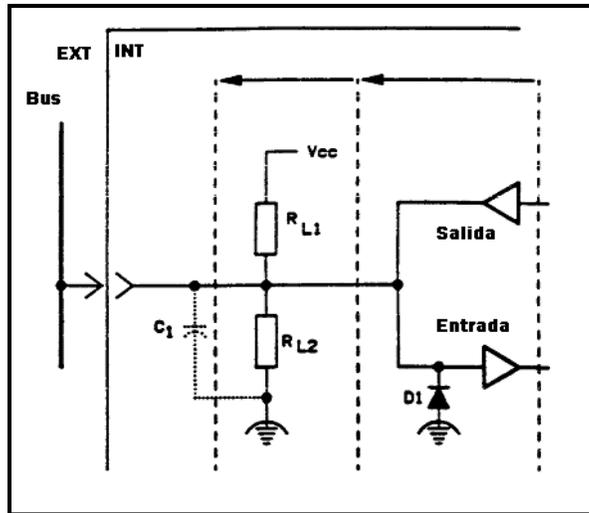


Figura 3.5 Esquemático de circuito de carga recomendadas para el bus GPIB.

3.1.4 Características Mecánicas

El conector debe ser de tipo receptáculo con las dimensiones típicas que se modela en la figura 3.6. Cada fila de doce contactos se centra dentro de la concha trapezoidal. El conector de montaje adoptará medidas para que acepte los tornillos de bloqueo del conjunto de cables. La orientación preferida es con el conector de medio lado.

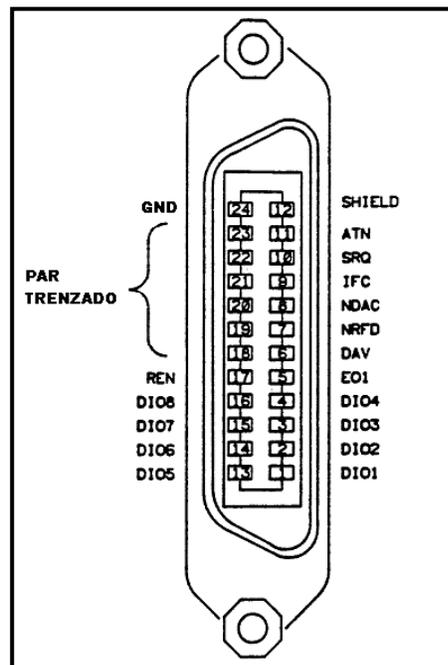


Figura 3.6 Esquema de conector para bus de datos IEEE 488.

3.2 Ruido y Lazos de corriente

El ruido es cualquier señal eléctrica indeseada presente en un circuito. Las fuentes de ruido se pueden agrupar en tres, pueden ser de manera intrínseca por fluctuaciones en los sistemas físicos, ocasionados por dispositivos construidos por el hombre como motores, interruptores, transmisores y por perturbaciones en la naturaleza como descargas atmosféricas o manchas solares.

Existen diferentes formas en las que se implantan estas señales indeseadas. Dentro de los tres tipos de acople de ruido en un sistema se encuentran:

- El acople por campo magnético o eléctrico que puede ser introducido en un circuito por múltiples factores bastante comunes debido a que todos los elementos de conducción irradian un campo electromagnético. También en este tipo de acople entra la interferencia electromagnética o por radio frecuencia.
- El acople de ruido de manera directa es debido a una fuente de ruido conectada directamente a un conductor del circuito que ocasiona interferencia.
- El acople por impedancia común, provocado de un circuito a otro por una conexión común en alguna de sus líneas normalmente en las tierras o la alimentación.[10]

3.2.1 Lazos de corriente

La implantación de ruido por impedancia común es ocasionada por el mal uso o conexión de distintos circuitos a fuentes de alimentación y tierras.

Uno de los mayores ejemplos del caso de acople de ruido debido a una impedancia común se observa en la figura 3.7. Las indebidas conexiones a tierras entre distintos circuitos pueden provocar corrientes indeseadas debido a la diferencia de potencial que pueda haber entre ellas. Estos lazos de corrientes pueden provocar mal funcionamiento o comportamientos no deseados en los circuitos.[7]

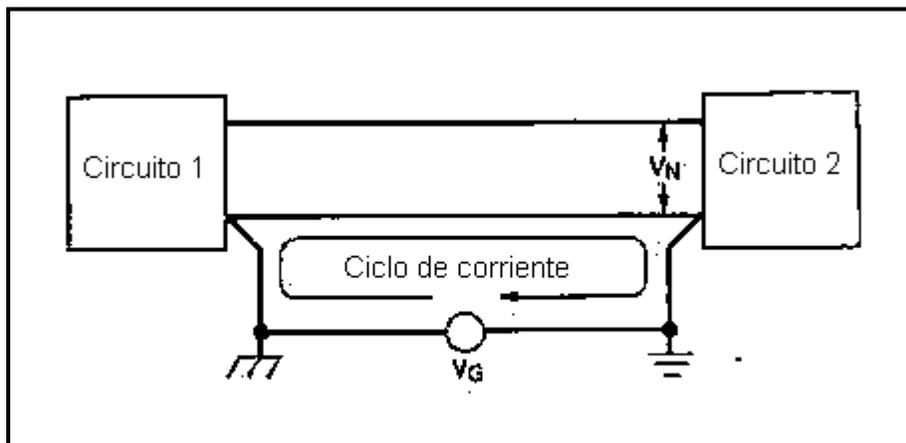


Figura 3.7 Ejemplo de ruido ocasionado por indebida conexión a tierra entre circuitos.

El ruido entre circuitos electrónicos no puede ser eliminado del todo, sino más bien reducido, existen diversas técnicas para la reducción de ruido en los sistemas como el blindaje, el apropiado manejo de tierras y la filtración.

En el caso de los lazos de corriente se utilizan técnicas como el manejo apropiado de tierras y el aislamiento, y así minimizar los efectos del acople de ruido por una impedancia común. En la figura 3.8 se muestra la solución al caso del circuito de la figura 3.7 mediante el aislamiento galvánico entre sus conexiones por medio de un optocoplador,

en el circuito se elimina el lazo de corriente realizando la separación de las tierras de ambos circuitos.

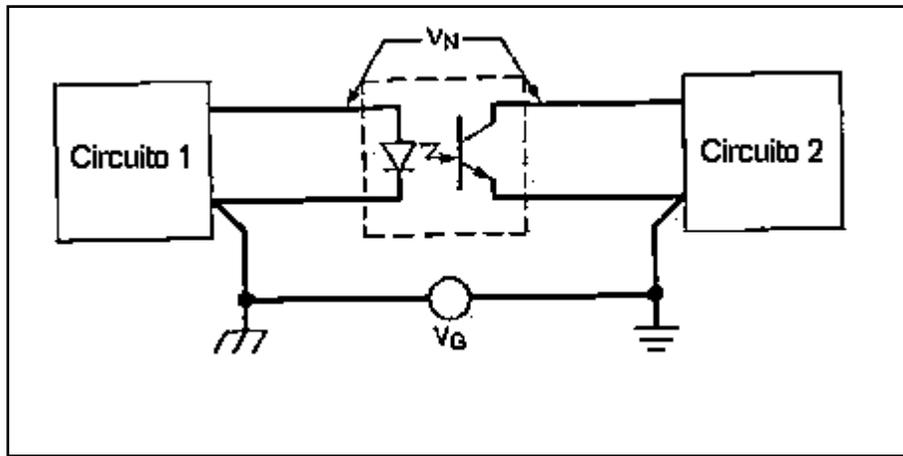


Figura 3.8 Circuitos con aislamiento galvánico de tipo óptico.

3.2.2 Conflicto de Ruido en sistemas o instrumentos de medición

El control de ruido en los sistemas de medición es de vital importancia, debido a que se puede convertir en un grave problema en inclusive los mejores instrumentos y equipos de medición de datos. En la mayoría de los laboratorios y entornos industriales existen abundantes fuentes de ruido eléctrico, incluidas las líneas de alimentación de CA, estaciones de maquinaria pesada, la radio y la televisión, y una variedad de equipos electrónicos. Las estaciones de radio generan ruido de alta frecuencia, mientras que los ordenadores y otros equipos electrónicos generan ruido en todos los rangos de frecuencia. La construcción de un ambiente completamente libre de ruido sólo para la ejecución de pruebas y mediciones rara vez es una solución práctica.

Con distintos dispositivos y técnicas sencillas como el uso de métodos adecuados de conexión de tierras, cables apantallados y trenzados, se puede controlar el ruido en la mayoría de las mediciones. En la figura 3.9 se muestra una configuración óptima que se utiliza en los equipos de medición del laboratorio utilizando tierras iguales para minimizar las modificaciones de las mediciones en equipos como un nanovoltímetro. [11]

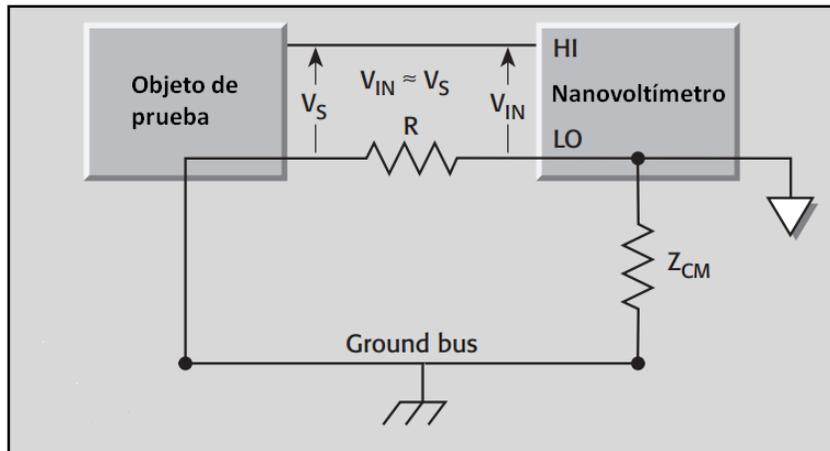


Figura 3.9 Ejemplo de conexión a tierra entre equipos de laboratorio.

3.3 Aislamiento Galvánico

El aislamiento galvánico consiste en la separación de partes de un circuito eléctrico para detener el traspaso de portadores de carga, con la función de que el circuito realice intercambio de señales y no de corriente eléctrica.[12]

El aislamiento galvánico es usado para proteger equipos contra transientes de voltaje, así mejorar la inmunidad al ruido y eliminar los lazos de corriente e incrementar el rechazo de voltaje de modo común.

Existen diversos métodos de aislamiento galvánico, entre estos están los aisladores capacitivos, aisladores inductivos y aisladores ópticos (optoaisladores).

3.3.1 Aislamiento Óptico

El funcionamiento del aislamiento óptico es por medio de un LED que emite luz cuando una corriente es aplicada en él, la luz es transmitida a un fototransistor el cual es activado con la señal de luz. El aislamiento óptico usa la luz como barrera eléctrica para transmisión de datos.

El uso de optocopladores es uno de los métodos más comunes de aislamiento. Uno de los beneficios de usar este método es la inmunidad a ruido eléctrico y magnético, y entre sus desventajas están la velocidad de transmisión y el consumo de energía.

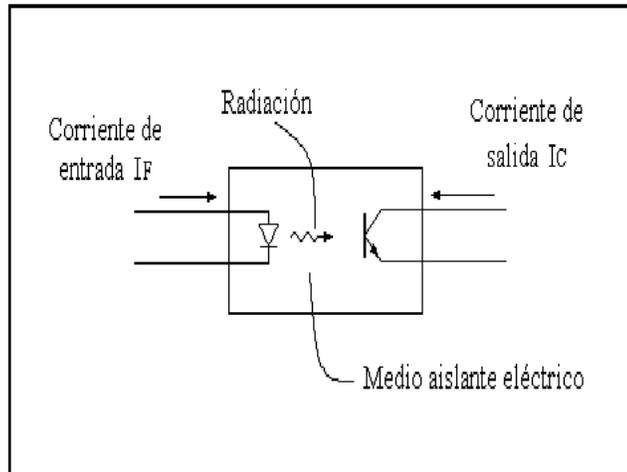


Imagen 3.10 Diagrama de aislamiento óptico por medio de optocoplador.

3.3.2 Aislamiento Capacitivo

El aislamiento capacitivo está basado en el cambio del campo eléctrico de superficie capacitiva, el dieléctrico entre las placas capacitivas es el material aislante. Este tipo de aislamiento es beneficioso por bajo consumo de energía y espacio, además es inmune a campos magnéticos, al contrario es susceptible a interferencia por campos eléctricos externos.

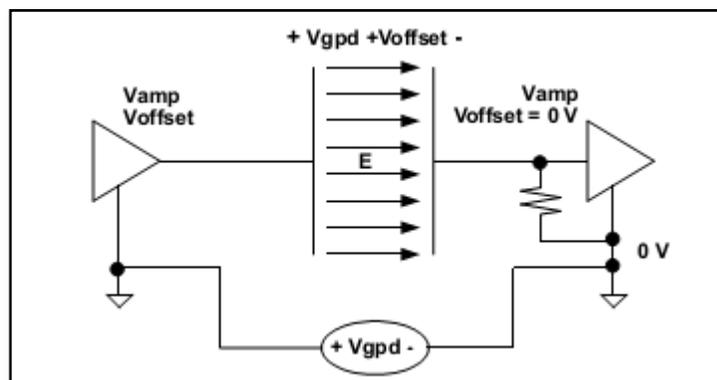


Imagen 3.11 Diagrama de Aislamiento capacitivo.

3.3.3 Aislamiento Inductivo

El aislamiento inductivo utiliza el cambio de campo magnético entre 2 bobinas para realizar la comunicación por medio de inducción. Este tipo de aislamiento permite una comunicación con bajo consumo de energía, además de ser veloz. El método es susceptible a campos magnéticos externos y es funcional para cierto rango de frecuencias con distorsión tolerable.

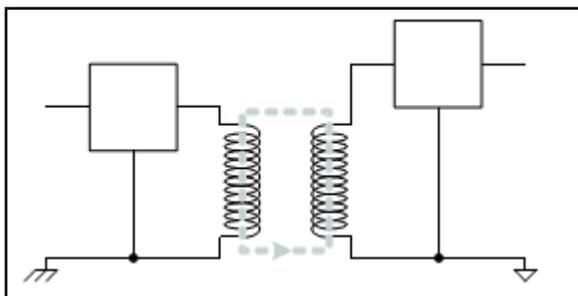


Imagen 3.12 Diagrama de Aislamiento inductivo.

3.3.4 Dispositivos Aisladores GPIB

En el mercado existen diferentes dispositivos que ofrecen aislamiento en la comunicación GPIB, con diferentes características y funciones adicionales.

La empresa National Instruments ofrece un aislador con las características mencionadas en la tabla 3.3. El dispositivo GPIB-120B es un expansor y aislador del bus de datos, adicionalmente brinda la garantía de aislamiento en el mismo, también permite agregar más de catorce dispositivos al bus de datos. El dispositivo separa el bus en dos, eliminando lazos de corriente y ruido de modo común inducido. Se destaca que el tipo de aislamiento que posee es capacitivo y es alimentado por fuente externa.

Tabla 3.3 Características de GPIB-120By ICS 4860.

| Característica | GPIB-120B | ICS 4860A |
|------------------------|------------------|------------------|
| Tipo de aislamiento | Capacitivo | Óptico |
| Aislamiento máximo | 2500 V CD | 2000 V CD |
| Fuente de alimentación | externa | Externa |
| Velocidad | 450 Kbytes/s | 670 Kbytes/s |

La empresa ICS ofrece también un aislador llamado 4860A, las características se muestran igualmente en la tabla 3.3. El dispositivo es muy similar al GPIB-120B con la diferencia que ofrece una mayor velocidad en la comunicación y su aislamiento es óptico. El aislamiento también garantiza la eliminación de los lazos de corriente y ruido. Dentro de sus hojas de datos señala una propagación máxima de señal de 180ns y un retardo de 600ns en el proceso de negociación.

Ambos dispositivos ofrecen una garantía del cumplimiento de las especificaciones eléctricas del estándar 488.1 y en cuanto a su funcionamiento ambos tienen dos entradas que aíslan el bus, donde se puede conectar controlador y equipos por ambos lados.

3.4 Calibraciones en LMVE y GPIB

En el LMVE utilizan software para realizar los procesos de calibración de manera automatizada, este se comunica con los instrumentos de medición y generación de variables. La configuración básica es la conexión de una computadora a un instrumento que realiza calibraciones. Existen otros procesos de calibración en los cuales la computadora es conectada a diferentes equipos por GPIB como se observa en la figura 3.13.

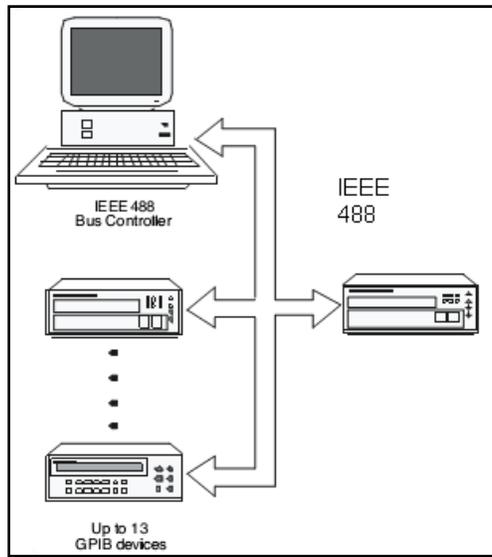


Imagen 3.13 Conexión de computadora a equipos de calibración del laboratorio.

En el laboratorio, para minimizar errores de conexiones entre sus equipos, los dispositivos de calibración son conectados todos correctamente a una misma fuente de alimentación y tierra, además utilizan técnicas de aislamiento, aterrizaje de chasis de los equipos, control de temperatura y humedad para asegurar el íntegro funcionamiento del mismo. Como fuente de alimentación se utilizan sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS siglas en ingles).

Los equipos de generación y de medición son conectados mediante cables especiales que dependen de la variable que se maneja. Mediante la conexión a la computadora por medio del bus GPIB son controladas las generaciones de variables y las mediciones por parte de ambos equipos, para así obtener las magnitudes medias y desviaciones mediante procesos estadísticos de las mediciones tomadas.

Capítulo 4 Proyección del procedimiento para el desarrollo del prototipo de aislamiento del bus GPIB

Para el desarrollo del proyecto se utilizó la metodología la cual se basa en el proceso de diseño en ingeniería. Dicho método, se caracteriza por el estudio del problema buscando alternativas para optar por una solución que cumpla los requerimientos y objetivos propuestos, para finalmente implementarla y analizarla.

4.1 Reconocimiento del problema

Los metrólogos del laboratorio mostraron sus inquietudes sobre las fallas, errores y variaciones en las mediciones que se dan en algunos procesos de calibración automatizados por la conexión GPIB. Dentro de las observaciones señaladas estuvieron las variaciones en algunas mediciones obtenidas en los instrumentos por medio del bus y manualmente. Posteriormente señalaron las consultas realizadas con otros laboratorios sobre los errores en la utilización de la comunicación y fueron advertidos sobre la falta de aislamiento galvánica del bus que facilita a errores en los instrumentos. La información presentada por otras entidades metrológicas ha sido muy escasa debido a la falta de información y estudios que se tiene del tema.

Las variaciones que se dan en las mediciones utilizando la comunicación GPIB son de porcentajes bajos con respecto a la magnitud de la medida. Para la mayoría de aplicaciones de medición dichas variaciones no representan un problema, pero al ser un laboratorio nacional primario se tiene la necesidad de garantizar en sus procesos la mejor exactitud posible.

Las metas y restricciones del proyecto se definieron estudiando la necesidad del laboratorio de solucionar dicho problema tomando en cuenta además ciertas consideraciones que fueron solicitadas por parte de ellos para dicha solución.

4.2 Obtención y análisis de información

Como primer paso, se investigó sobre la problemática en general y estudios desarrollados en el tema y la existencia de dispositivos similares que realicen un aislamiento galvánico para el bus GPIB. La búsqueda de información fue casi nula encontrando solamente problemáticas similares en otros tipos de comunicación análogos. La falta de información es debido a la antigüedad del sistema y su poca aplicación comercial que deja su uso para aplicaciones específicas como instrumentos de prueba y medida.

Las investigaciones sobre GPIB se obtuvieron principalmente del estándar de la IEEE 488.1 donde se especifica el funcionamiento del bus, sus líneas y especificaciones eléctricas y mecánicas. Se obtuvo información adicional proporcionada por fabricantes y publicaciones.

Además se realizaron investigaciones en temas relacionados con la problemática de ruido en general y técnicas de eliminación del mismo, donde se encontró material bibliográfico a través de internet y libros.

Uno de los puntos importantes en el proyecto fue la búsqueda, investigación y análisis de materiales adecuados para el desarrollo del mismo. Este llevo a una mejor evaluación de alternativas y selección para la elaboración del prototipo. El estudio de material se realizó mediante hojas de datos, catálogos de componentes electrónicos en tiendas y fabricantes de componentes.

4.3 Evaluación de las alternativas y síntesis de una solución

Con la definición del problema y la investigación realizada, surgieron distintas alternativas para brindar solución al problema. Las alternativas se analizaron tomando en cuenta criterios de funcionalidad, costo, tamaño, materiales y requerimientos propuestos por parte del estándar IEEE 488.1 y del laboratorio con respecto a la solución.

Para la solución del problema se plantea el diseño de un prototipo que garantice el rechazo de ruido y evite los lazos de corriente para la correcta función de los equipos conectados al bus de comunicación GPIB, aislando los equipos para que haya garantía de que ninguno influya en el funcionamiento del otro por dicha conexión al bus.

Los dispositivos del mercado son económicamente costosos, y no todos cuentan con su propia fuente de alimentación y aislación óptica que garantice óptima solución.

El laboratorio de manera funcional ocupa un aislador compacto con respecto al diseño, el prototipo debe ser mecánicamente fácil de incorporar al bus de datos para usarlo en procesos de calibración. De igual manera se solicitó que el dispositivo funcione con baterías para evitar el uso de fuentes de alimentación externas que vayan a afectar la comodidad de conexión y función del dispositivo.

Debido a la falta de investigación en el tema, y las distintas soluciones de aislamiento brindadas por los fabricantes, surge el interés de realizar una valoración de las alternativas de manera que se llegue a seleccionar la mejor de ellas para la incorporación final del prototipo al laboratorio.

En el mercado se encontraron alternativas de aislamiento de manera capacitiva, inductiva y ópticas. Tomando en cuenta las limitaciones como características de aislamiento, tamaño del circuito, potencia de consumo, facilidad de construcción, tiempo y presupuesto, se decide trabajar en el diseño de dos circuitos, con aislamiento óptico y capacitivo, para posteriormente realizar la evaluación de ambos y aplicar la más apta para el prototipo que finalmente se integre al laboratorio.

4.4 Implementación de la solución

Para llegar a la solución, se planificó la construcción de dos prototipos de aislamiento distintos, cada uno con diseño diferente pero conservando los puntos esenciales para el funcionamiento principal.

El diseño de ambos circuitos se trabajó de forma paralela, iniciando por la búsqueda de los materiales apropiados para ambos. Luego, establecidos los materiales se procedió al diseño, simulación y pruebas.

En cuanto al circuito con aislante óptico, inicialmente se diseñó un circuito de aislamiento general para las dieciséis líneas de datos del bus. El circuito está aislado por optocopladores y bidireccional en la transmisión de datos. Dicho circuito se simuló para obtener características de velocidad, comportamiento y análisis de funcionamiento. Debido a la falta de los componentes seleccionados en el país, se tuvieron que realizar pruebas iniciales con materiales análogos encontrados en el mercado nacional, para obtener características similares a las simuladas y que su estudio llevara a concluir si el circuito era apto para la comunicación.

Con el análisis que se realizó de las simulaciones y las pruebas se llegó a la conclusión que el circuito inicial no cumplía con los requisitos establecidos por la IEEE 488.1 para las características de compuerta de entrada del bus, lo que llevo a un rediseño del inicial.

En el rediseño se agregaron nuevos bloques que agregaban al prototipo transceivers para el bus 488. Dichos transceivers cumplen con las características de compuerta de entrada, salida y de carga recomendadas por el estándar de la IEEE. Adicional a los transceivers se tuvo que agregar el diseño de un circuito de control para manejar la dirección de los datos que pasan por los transceivers.

En cuanto al diseño del circuito capacitivo, la elección del material fue aún más reducida, encontrando material con la función de aislamiento a soluciones bastante específicas. Donde finalmente se encontró un circuito integrado que proporcionaba un diseño sencillo, donde a este únicamente se le agregó la carga en las líneas de comunicación establecidas por el estándar IEEE 488.1 para llegar a cumplir con todas las normas eléctricas.

Una vez definido el diseño, se realizó el pedido de los componentes específicos para la construcción del prototipo. Al mismo tiempo se trabajaba en la construcción y el diseño de los circuitos impresos del circuito final.

La compra de materiales fue una acción importante debido a la ausencia de la mayoría de componentes en el mercado nacional, por lo que se tuvo que cotizar y realizar un pedido para importar el total de los materiales.

Con la llegada del material se procedió a realizar pruebas de evaluación, en las cuáles se realizaron los ajustes necesarios al diseño para el debido funcionamiento.

Posteriormente se llevó el diseño de los circuitos impresos a una empresa para que fueran fabricados y soldados.

Finalmente con los circuitos impresos y componentes soldados, se hicieron las pruebas de funcionamiento en distintos procesos de calibración del laboratorio, analizando resultados obtenidos para distintas configuraciones de conexión del equipo.

Capítulo 5 Diseño y construcción de los circuitos de aislamiento para el bus GPIB

5.1 Prototipo general de aislamiento galvánico para el bus de datos IEEE 488.1

El prototipo general, se basa en un circuito electrónico que tiene como función principal realizar el aislamiento galvánico. Como es mencionado previamente en la introducción, este divide el bus en dos partes, teniendo únicamente dos conexiones externas. El circuito entonces cuenta con dos conexiones al puerto GPIB, señaladas como A y B en la figura 5.1. El dispositivo está diseñado para que el controlador sea conectado en la parte A. Los equipos de lectura y escritura en el bus de datos pueden ser conectados en cualquiera de los lados del bus.

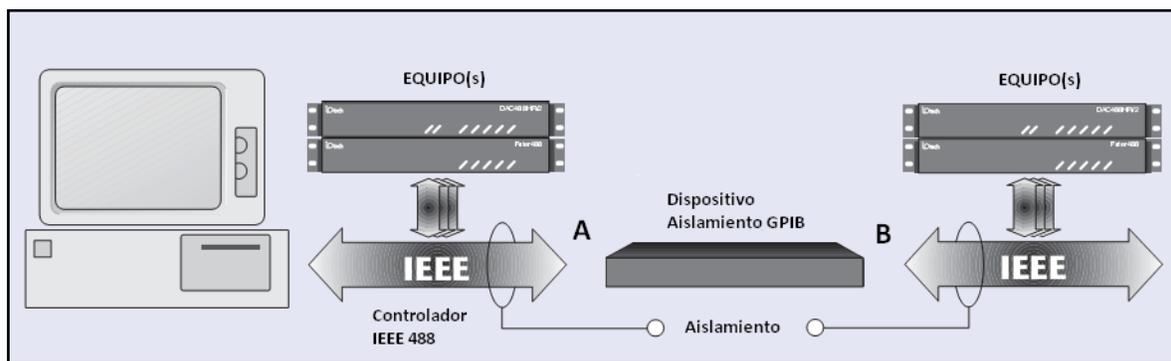


Figura 5.1 Diagrama General de circuito de aislamiento para el bus IEEE 488.

Para la elección del tipo de aislamiento galvánico del prototipo se analizaron las opciones discutidas previamente en el capítulo cinco, tomando en cuenta los criterios de nivel de aislamiento, adaptación adecuada al prototipo, la facilidad de construcción y costos del material.

Se selecciona el uso de aislamiento óptico y capacitivo para su posterior análisis debido a estos poseen características de aislamiento similares, a su vez presentan diferencias en cuanto a adaptación y facilidad de construcción. Se deja de lado el tipo de

aislamiento inductivo debido a su falta de inmunidad a los campos electromagnéticos que limita la garantía del rechazo de ruido.

Se desarrollaron dos prototipos de aislamiento para ambos tipos de aislación, uno y otro cumpliendo con las características del diagrama general del circuito presentado en la figura 5.1.

5.2 Prototipo con aislamiento óptico

En la figura 5.2 se observa un diagrama de bloques general del circuito de aislamiento óptico. El circuito está dividido en cuatro bloques, cada uno está aislado del otro cumpliendo la función principal del dispositivo. Las líneas con guiones en la imagen representan el aislamiento, separando el circuito en tres partes, cada una con aterrizaje y alimentación eléctrica diferente. El objetivo de cada uno de los bloques del circuito es el cumplimiento de los distintos requisitos y estándares eléctricos y mecánicos encontrados en el IEEE 488.1.

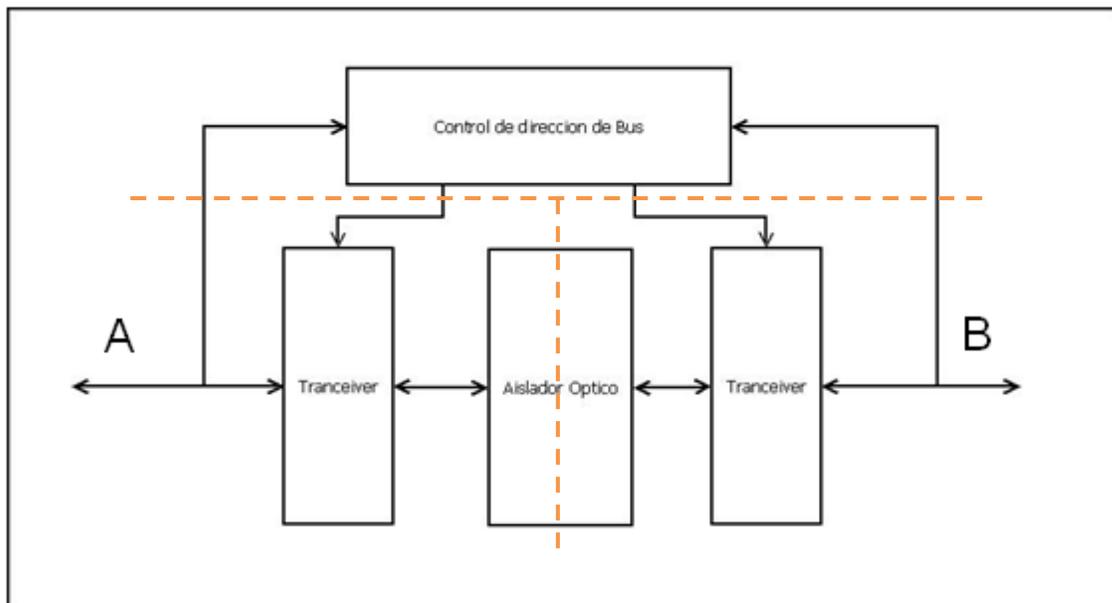


Figura 5.2 Diagrama General de circuito de aislamiento óptico para el bus IEEE 488.

5.2.1 Bloque de aislación óptico

Este bloque cumple con la función principal del circuito la cual es aislar galvánicamente el bus. El circuito es mostrado en la figura 5.3, es un circuito de aislamiento con comunicación bidireccional para las dieciséis líneas de comunicación, separando las líneas en lado A y lado B.

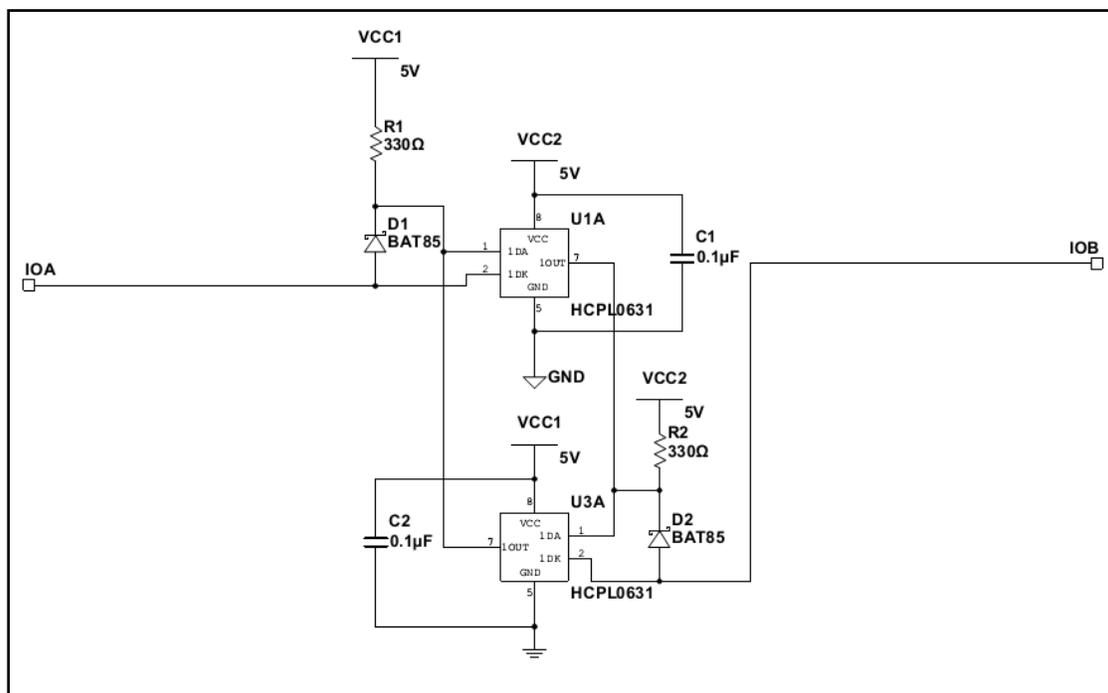


Figura 5.3 Diagrama General de circuito de aislamiento para el bus IEEE 488.

El aislamiento es realizado por dos optocopladores de alta velocidad HCPL0631 por línea (el bus es de dieciséis líneas), los optocopladores se encargan de realizar el aislamiento galvánico cada uno con fuentes de alimentación y aterrizaje diferente. Para el lado A se utiliza la fuente VCC1 y para el lado B la fuente VCC2.

El funcionamiento del circuito está diseñado para comunicación en un bus de datos con lógica TTL de colector abierto, la cual permite la conexión de varios dispositivos en una misma línea de comunicación. Cuando en ambos lados de la línea existe una señal eléctrica de 5 V, el LED del optocoplador no conduce y no afecta en su salida. Cuando alguno de sus lados recibe una señal de 0 V, se activa el LED poniendo en bajo el otro lado

del bus. El diodo schokty de alta velocidad BAT85 permite que se dé el flujo de corriente que ponga en bajo la línea del lado contrario a la señal, la tensión en bajo de la señal del lado contrario sería 0.4V debido a la tensión del diodo. La resistencia de 330Ω es utilizada para limitar la corriente del LED del optocoplador para que sea más baja de 20mA, corriente máxima para el LED establecida en la hoja de datos.

Tabla 5.1 Características del optocoplador HCPL-0631 brindada por el fabricante.

| Características | Valor |
|--|--------------|
| Inmunidad de transientes de modo común | 15000V/μs |
| Velocidad de comunicación | 10MBd Típico |
| Rechazo de modo común | 15kV/μs |
| Aislamiento | 5000 Vrms |

La elección del optocoplador HCPL-0631 se da por su característica de velocidad de comunicacion, siendo el optocoplador de mayor velocidad del mercado, además de las características altas de aislamiento y rechazo de modo común visibles en la tabla 5.1. Además diseñado para su fácil aplicación en circuitos impresos para un prototipo.

5.2.2 Transceivers

Debido a que el circuito de aislamiento no cumple con todos los estándares eléctricos establecidos en la IEEE 488, se añadieron los bloques de transceivers al bus, así satisfacer cumplimientos de las especificaciones eléctricas de carga, de recepción y transmisión en las líneas.

Se utilizaron los circuitos integrados fabricados por Texas Instruments SN7560 y SN7560, que son transceivers de ocho líneas diseñados específicamente para GPIB, para las líneas de datos y las líneas de control respectivamente. Los circuitos cumplen con el estándar IEEE 488.1 y posee tiempos de propagación bajos de aproximadamente 22ns.

En la figura 5.4 se presenta el diagrama de los circuitos, donde se contemplan las líneas del bus en ambos lados y adicionalmente los circuitos tienen las entradas de TE, DC y PE para direccionamiento de los datos y las líneas de control.

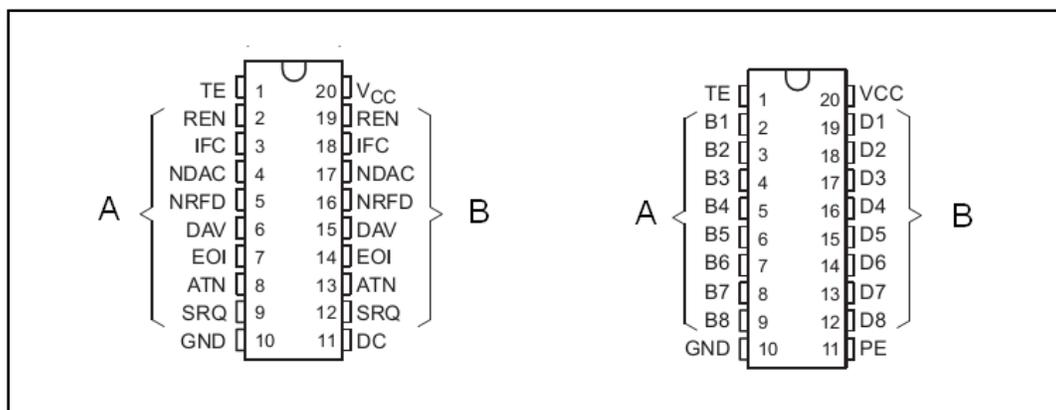


Figura 5.4 Transceivers SN7561 para líneas de control y SN7560 para líneas de datos.

La lógica de direccionamiento de las líneas de datos de los transceivers se encuentra en las hojas de datos. En la figura 5.5 se tiene la tabla de la verdad del direccionamiento del transceiver para las líneas de control. Las funciones de transmisión o recepción (representados con T y R respectivamente) se dan dependiendo de las entradas de control TE y DC. La dirección de transmisión de datos es del lado B del bus al lado A y viceversa la recepción. En la figura 5.6 está la tabla para la lógica de dirección de las líneas de datos del bus.

| CONTROL | | | BUS-MANAGEMENT CHANNELS | | | | | DATA-TRANSFER CHANNELS | | |
|---------|----|------------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|------------------------|--------------------|------|
| DC | TE | ATN [†] | ATN [†] | SRQ | REN | IFC | EOI | DAV | NDAC | NRFD |
| | | | (Controlled by DC) | | | | | | (Controlled by TE) | |
| H | H | H | R | T | R | R | T | T | R | R |
| H | H | L | | | | | R | | | |
| L | L | H | T | R | T | T | R | R | T | T |
| L | L | L | | | | | T | | | |
| H | L | X | R | T | R | R | R | R | T | T |
| L | H | X | T | R | T | T | T | T | R | R |

Figura 5.5 Tabla de verdad de control de dirección de circuito integrado SN75161.

| EACH DRIVER | | | |
|-------------|----|----|--------|
| INPUTS | | | OUTPUT |
| D | TE | PE | B |
| H | H | H | H |
| L | H | X | L |
| H | X | L | Z† |
| X | L | X | Z† |

| EACH RECEIVER | | | |
|---------------|----|----|--------|
| INPUTS | | | OUTPUT |
| B | TE | PE | D |
| L | L | X | L |
| H | L | X | H |
| X | H | X | Z |

Figura 5.6 Tabla de verdad de control de dirección de circuito integrado SN75160.

En el diagrama general se muestra que el circuito cuenta con dos bloques de transceivers, uno para cada lado separado del bus. Para cada bloque se necesita la señal de control de direccionamiento del bus “TE”, proveniente del bloque de control de direccionamiento. Ambos bloques tendrán como entradas/salidas las líneas de datos ya sea del lado A o B del bus y adicionalmente las señales de control de dirección. En la figura 5.7 se tiene el diagrama de conexiones utilizada en el dispositivo para lograr la comunicación. La señal DC es puesta en alto para indicar que la comunicación por parte del controlador del bus es de lado A al lado B y la señal de entrada TE para el direccionamiento de los datos será controlada por el bloque de control de dirección.

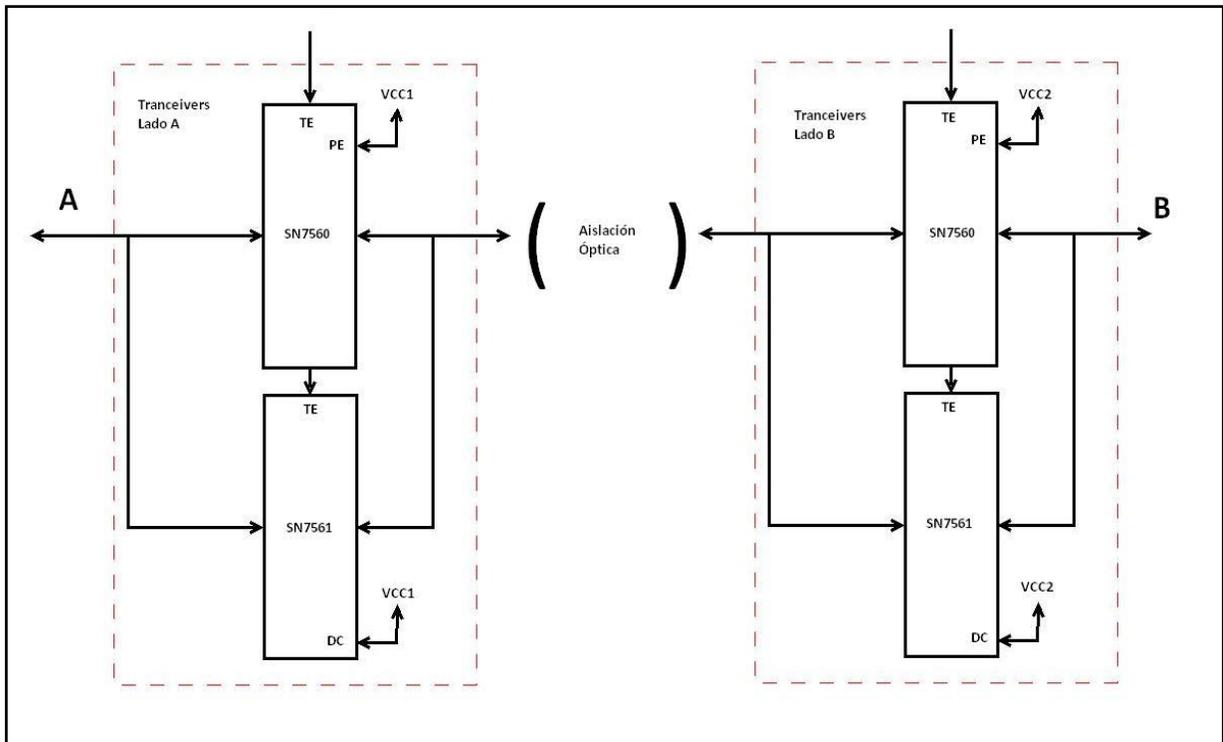


Figura 5.7 Diagrama de conexión de transceivers en ambos lados del circuito.

5.2.3 Control de dirección

Debido a la necesidad de los transceivers de tener señales de control para el direccionamiento de los datos a través de ellos, es agregado el circuito de control de dirección. Como se observa en la figura 5.2 mencionada anteriormente, el bloque de control de dirección se encuentra igualmente aislado galvánicamente del resto de los bloques. Sus entradas de señales provienen de ambos lados del bus de datos y sus salidas van dirigidas a los transceivers del circuito.

5.2.3.1 Lógica de dirección

Para la construcción del circuito se analizó la lógica de control de dirección en la comunicación del bus. La dirección depende de las señales de control de transferencia de datos del bus DAV, NRFD, NDAC y el proceso de negociación (Handshaking) de tres estados para transferir los bytes; visto previamente en el capítulo cinco. Se tomó en cuenta

que el circuito no solamente tiene que direccionar la transmisión de datos, sino igualmente tiene la función de direccionar de las mismas señales de control para el conocimiento de los dispositivos en ambos lados del circuito.

La dirección de datos depende del origen de la señal de DAV durante la comunicación de datos, además depende de la detección de cambio de NRFD para sincronía de los equipos conectados. El direccionamiento de la señal NRFD entre la parte A y B del bus es vital, debido a que la desactivación de dicha señal por parte de los dispositivos de lectura en el bus representa el aval por parte de los mismos para el inicio de alguna transmisión.

Para la lógica de dirección de datos se toman en cuenta cuatro señales, la señal de DAV y NRFD de la parte A y de la parte B. Cuando en la parte A del bus se acierta la señal de DAV se tiene el conocimiento que un dispositivo iniciara la comunicación de datos y de la misma manera cuando la señal se origina de la parte B del bus. En la figura 5.8 se presenta el diagrama de estados de la lógica de direccionamiento de datos, cuando hay una detección de la señal DAV en el lado A el flujo de datos es de A hacia B y cuando la detección es en B la dirección es contraria.

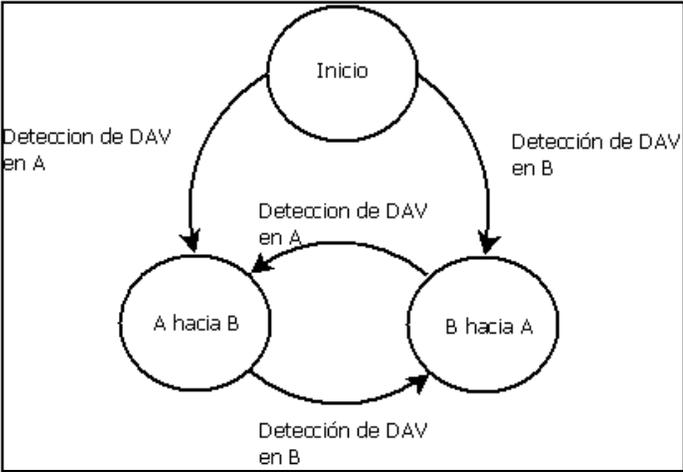


Figura 5.8 Diagrama de estados de direccionamiento de datos.

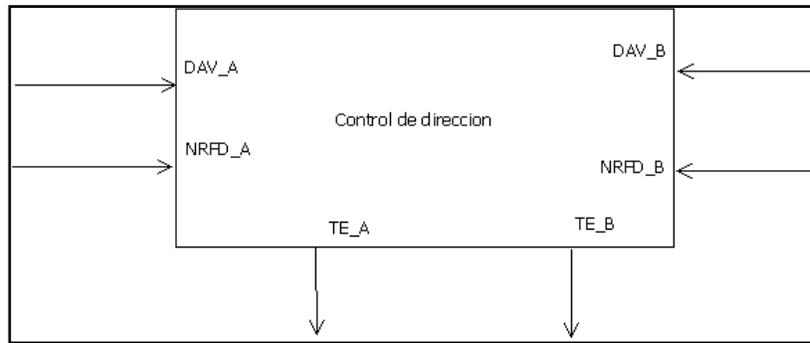


Figura 5.9 Bloque de control de dirección.

El bloque general del circuito de control de direccionamiento se presenta en la figura 5.9, las entradas mencionadas anteriormente son las señales de control del bus GPIB DAV y NRFD, las salidas del bloque son las dos señales de dirección de datos dirigidas a los transceivers de ambas direcciones del acople.

5.2.3.2 Circuito de dirección

Para la lógica de direccionamiento de datos se utiliza un circuito que detecta la dirección de comunicación y envía la señal de detección de comunicación. El diseño del circuito encargado de la detección de la dirección se muestra en la figura 5.10. El circuito está conformado por dos compuertas NOR para la detección de cambio de señal en ambos lados del bus. Cuando una señal es activada por un lado del bus, se desactiva la detección por parte de la otra compuerta en el otro lado del bus. El circuito tiene dos salidas, una para indicar la activación de la señal en el bus A y otra en el bus B. Debido a la lógica, las señales de salida nunca están activas al mismo tiempo.

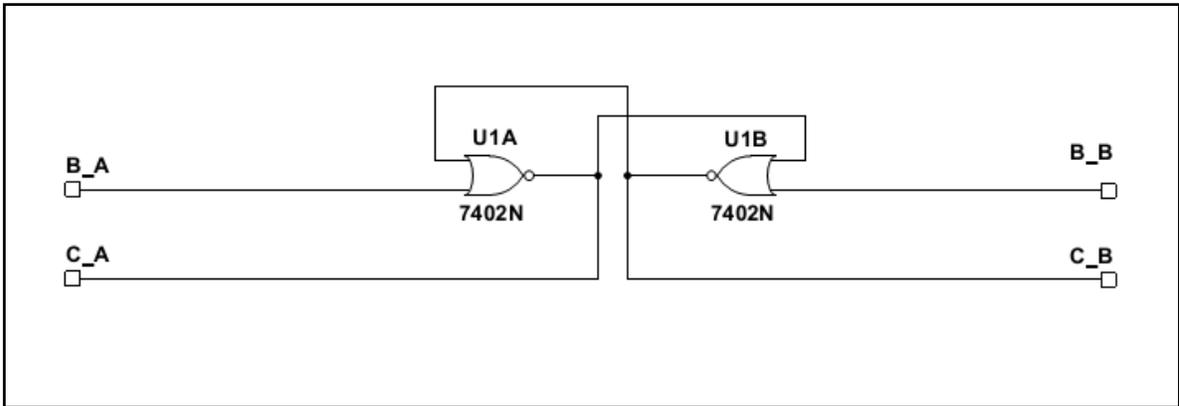


Figura 5.10 Circuito de detección de dirección de comunicación.

El bloque de control de dirección tiene cuatro entradas y dos salidas. Las entradas del circuito son las señales de control de dirección de datos DAV y NRFD de la parte A y B del bus. Las salidas del bus dirigidas a los transceivers con la señal de direccionamiento de los datos TE. Cada señal de entrada y de salida al circuito se encuentra aislada mediante un optocoplador para mantener el debido aislamiento entre las distintas partes del circuito total. Los distintos bloques del circuito se observan en la figura 5.11, donde “Opto” es el circuito optocoplador que aísla las señales en sus distintos circuitos. “DC” es el circuito de detección de dirección, que son dirigidas a un bloque de lógica de direccionamiento.

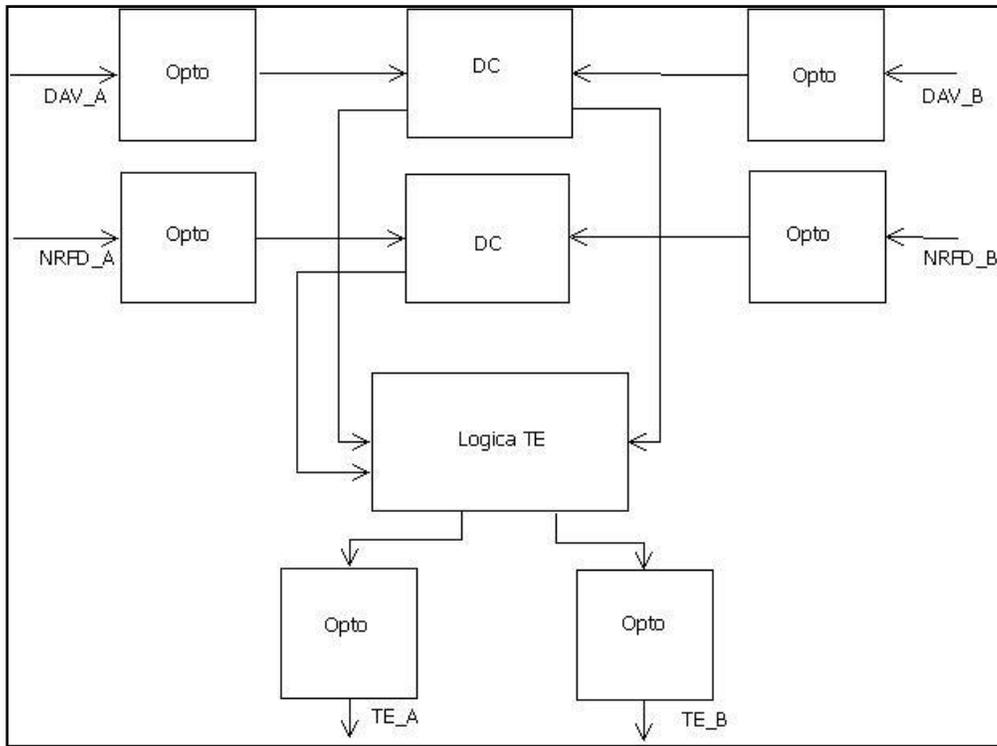


Figura 5.11 Circuito controlador de dirección de comunicación.

Las señales de “TE_A” y “TE_B” son las salidas del circuito, dirigidas a la entrada TE de los transceivers en ambos lados del circuito. El direccionamiento de los datos y de la línea NRFD es controlado por TE, dependiente de las cuatro señales que salen de los circuitos de detección de direccionamiento “DC” para DAV y NRFD. En la tabla 5.2 se muestra la tabla de la verdad para la señal de salida TE, siguiendo la lógica de dirección requerida para el direccionamiento de las señales requerida para el bloque llamado “Lógica TE”. Las salidas del bloque “TE_A” y “TE_B” poseen el mismo valor y solamente se encuentran separadas para lograr el aislamiento adecuado.

El control del direccionamiento de la señal NRFD depende de donde se encuentra activa la señal; cuando se pone en alto la señal del lado A (se denota como la señal NRFD_A) se direcciona hacia B, viceversa sino está activo del lado A.

La dirección de los datos depende de donde se encuentre activa la señal DAV, cuando se encuentra activa la señal del lado A (se denota como DAV_A), los datos llevan un

direccionamiento de A hacia B, y de manera contraria, cuando se encuentra activa la señal en el lado B. Se toma en cuenta que cuando alguna señal de DAV se activa en ambos lados, deja de realizarse el direccionamiento de la señal de NRFD para en lugar permitir la transición de datos.

Tabla 5.2 Tabla de lógica de Direccionamiento de datos.

| ENTRADAS | | | SALIDA | DIRECCIÓN | |
|----------|------|-------|--------|-----------|------|
| DAVA | DAVB | NRFDA | TE | Datos | NRFD |
| 0 | 0 | 0 | 0 | x | A←B |
| 0 | 0 | 1 | 1 | x | A→B |
| 1 | 0 | X | 0 | A→B | A←B |
| 0 | 1 | X | 1 | A←B | A→B |

Se diseñó un circuito a base de compuertas electrónicas que cumple la función de la lógica requerida mostrada en la tabla 5.2. El circuito es mostrado en la imagen 5.12, el cual es un conjunto de tres compuertas con las entradas de DAVB, DAVA, NRFDA y tiene como salida TEC, señal que va dirigida a los transceivers para el direccionamiento de los datos y señales de control.

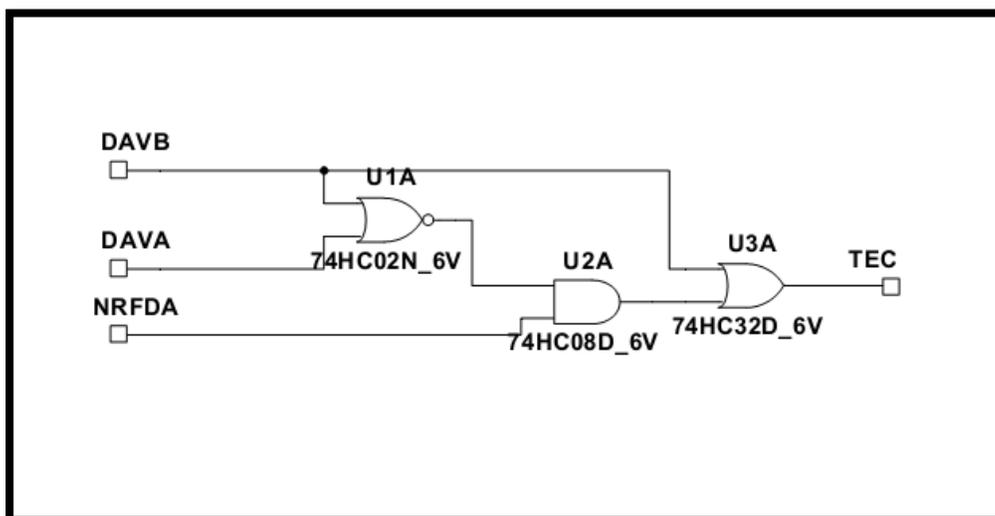


Figura 5.12 Circuito de lógica de direccionamiento de TE.

5.3 Prototipo de aislamiento capacitivo

En la figura 5.13 se ilustra el diagrama de bloques general del circuito de aislamiento capacitivo. El circuito a diferencia del óptico, contiene menos bloques, formado por tres. El bloque central que ofrece el aislamiento de tipo capacitivo, separando el bus en dos, el lado A y el lado B. Los bloques adicionales es para agregarles la carga especificada en el estándar IEEE 488.1, conformado sencillamente por resistencias. Se distingue con una línea punteada el aislamiento separando las fuentes en ambos lados.

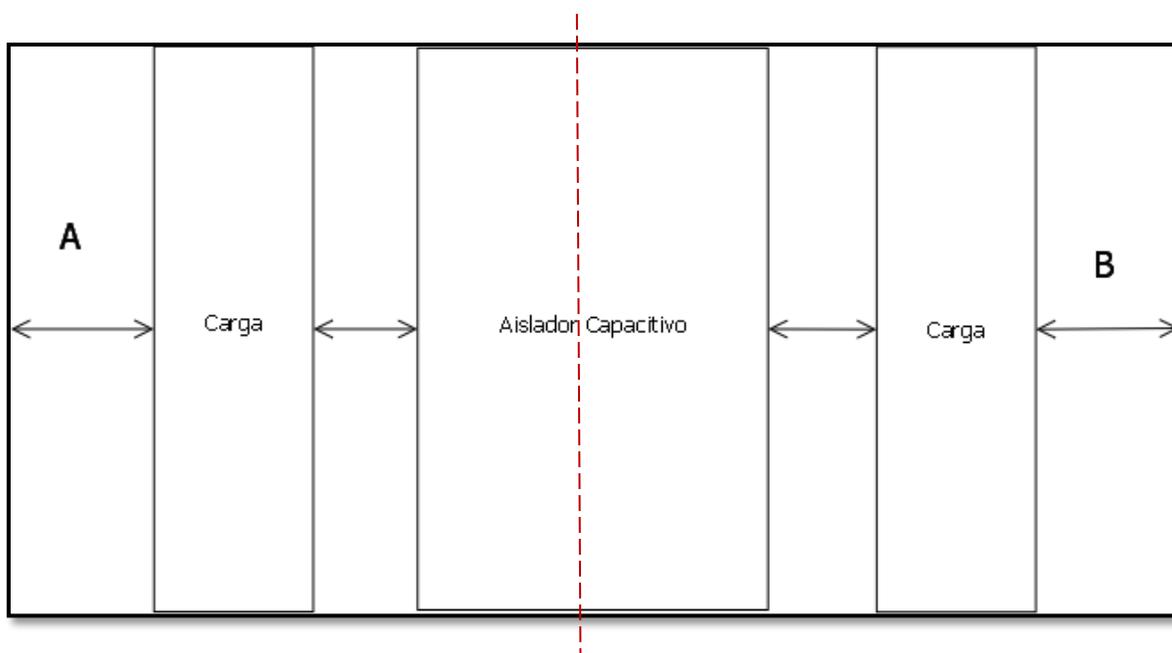


Figura 5.13 Diagrama de bloques de circuito con aislamiento capacitivo.

El circuito está conformado por el circuito integrado ISO1540, circuito bidireccional de aislamiento capacitivo. El componente facilita el diseño de gran manera al cumplir con los requisitos eléctricos del estándar IEEE 488.1, con el uso de compuertas para recibir y enviar los datos de manera bidireccional. En la figura 5.14 se ilustra el circuito por cada línea de comunicación, contando unicamente con el circuito de aislamiento y las resistencias de carga RL1 Y RL2 de $3k\Omega$ y de $6.2K\Omega$ respectivamente.

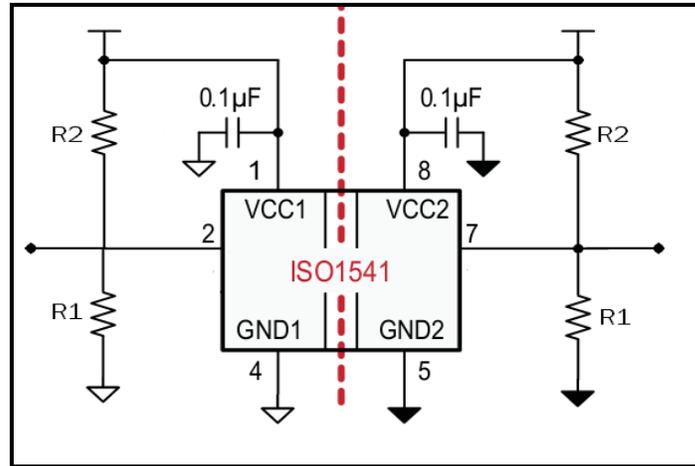


Figura 5.14 Diagrama de circuito capacitivo con componente ISO1540.

La elección del circuito de aislamiento capacitivo ISO1541 se da por sus características de aislamiento, velocidad, y rechazo de modo común deseadas para las líneas comunicación del bus GPIB. Además, la característica principal para su elección es la facilidad de aplicación para el diseño general de aislamiento. En la tabla 5.3 se observa algunas de las características del dicho componente.

Tabla 5.3 Características del aislador capacitivo ISO1540 brindadas por el fabricante.

| Características | Valor |
|--|-----------|
| Inmunidad de transientes de modo común | 50000V/μs |
| Velocidad de comunicación | 1 Mhz |
| Rechazo de modo común | 50kV/μs |
| Aislamiento | 4000 Vrms |

5.4 Alimentación y consumo energético

La alimentación para ambos circuitos se diseñó para que exista un bajo nivel de ruido. Se utilizó el regulador de voltaje de baja deserción REG104 con salida fija de 5V. Se seleccionó el regulador debido a su alta precisión de salida de voltaje ($\pm 2\%$), bajo nivel de ruido (33uVrms) y su capacidad de brindar una corriente hasta de 1A. El regulador tiene una tensión de entrada máxima de 18V, por lo que se le pueden conectar baterías de 5V hasta los 18V, dando al laboratorio también la flexibilidad de uso de distintas baterías.

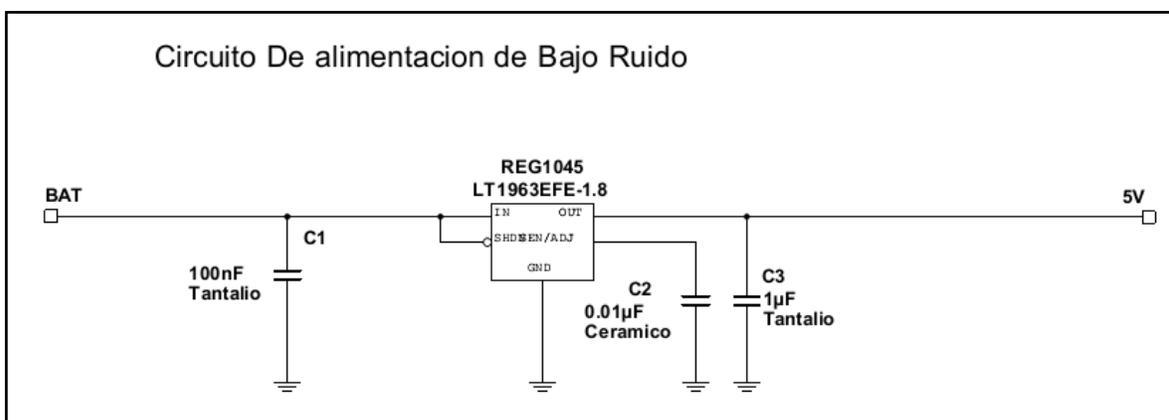


Figura 5.15 Circuito de alimentación de bajo ruido.

5.4.1 Consumo energético en circuito de aislación óptica

El circuito de aislamiento óptico, utiliza tres fuentes de alimentación, para la parte A, B y el control de dirección de las señales del circuito. Cada fuente es alimentada por una batería y regulada por el regulador a los distintos circuitos.

Con el uso de las hojas de datos de los componentes se proyectó un esquema de consumo de corriente eléctrica para cada sección del circuito con diferente alimentación. Para la parte A y B, que son homólogas, se observa en la tabla 5.4 los distintos consumos de corriente por parte de los distintos circuitos integrados. Donde se tiene una corriente total típica de 226mA y máxima de 306mA.

Tabla 5.4 Datos de consumo de corriente proyectados para bloque A y B del circuito.

| Sección | | Típico (mA) | Máximo (mA) |
|-----------------|------------|-------------|-------------|
| Aislador óptico | Diodos | 80 | 112 |
| | Transistor | 104 | 130 |
| Transceivers | SN75160 | 21 | 32 |
| | SN75161 | 21 | 32 |
| | Total | 226 | 306 |

Para el bloque de control de dirección de los datos, el consumo de corriente es más bajo comparado con los otros bloques, esto debido a su inferior número de circuitos integrados. Contando solo con cuatro compuertas y seis optocopladores.

Tabla 5.5 Datos de consumo de corriente proyectados para bloque de control de dirección.

| Sección | | Típico (mA) | Máximo (mA) |
|----------------------|------------|-------------|-------------|
| Control de dirección | Compuertas | 15 | 18 |
| Aislador | HCPL-0723 | 12 | 22 |
| | Total | 27 | 40 |

5.4.2 Consumo energético en circuito de aislación capacitiva

El circuito de aislamiento capacitivo, utiliza dos fuentes de alimentación, para la parte A y B. Cada fuente alimentada por una batería y regulada por el regulador a los distintos circuitos.

Con el uso de las hojas de datos de los componentes se proyectó un esquema de consumo de corriente eléctrica para cada sección del circuito con diferente alimentación. Para la parte A y B, que son homologas, en la tabla 5.6 se observan los distintos consumos de corriente por parte de los distintos circuitos integrados. Donde se tiene una corriente total típica de 113mA y máxima de 310mA.

Tabla 5.6 Datos de consumo de corriente proyectados para circuito de aislación capacitiva.

| Sección | | Típico (mA) | Máximo (mA) |
|----------------------|---------|-------------|-------------|
| Control de dirección | Iso1540 | 80 | 200 |
| Aislador | Carga | 23 | 110 |
| | Total | 113 | 310 |

5.5 Construcción Circuito

Se trabajó en el diseño del circuito impreso para su construcción, con el objetivo de su debida incorporación a las pruebas de calibración en el laboratorio. Además, se contaba con la necesidad del mismo por factores de disminución de ruido y acople al bus de datos por medio de los conectores adecuados, y así cumplir con las características mecánicas del estándar IEEE 488.1.

Para el diseño de los circuitos impresos fueron utilizados únicamente componentes de montaje superficial para optimizar el uso del espacio en el circuito. Además se integraron los conectores especificados en el estándar, fabricados por la empresa “TE connectivity” visualizada en la figura 5.16.



Figura 5.16 Conector de tipo receptáculo para el bus de IEEE 488.1.

El proceso de fabricación de los circuitos impresos finalizó enviando los diseños de los esquemáticos y las capas de los impresos a la empresa Systronics, la cual fue contratada para que brindara los servicios de construcción y ensamblaje de ambos circuitos impresos.

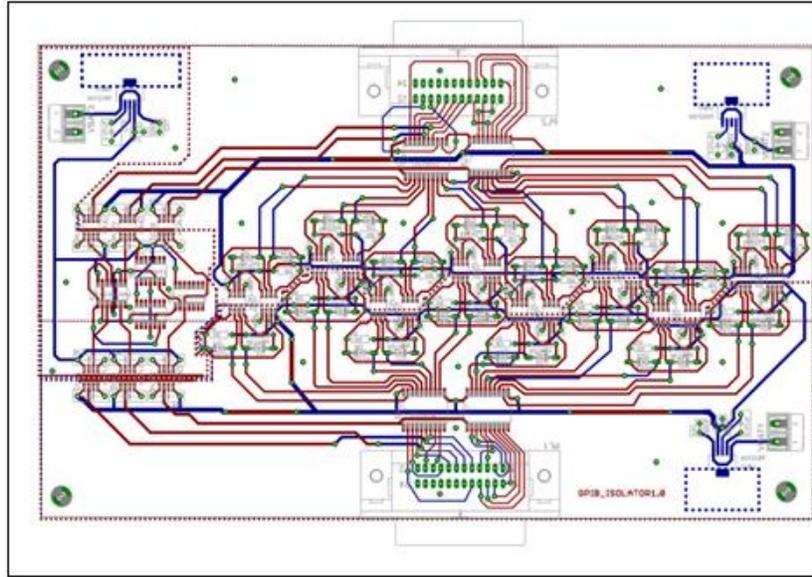


Figura 5.17 Diseño de circuito impreso con aislación óptica.

Las figuras 5.17 y 5.18 muestran los diseños de las pistas para las placas de ambos circuitos que se diseñaron, para luego ser enviadas a construir. En los anexos se presenta las imágenes ampliadas además del proceso de diseño y construcción de dichos circuitos.

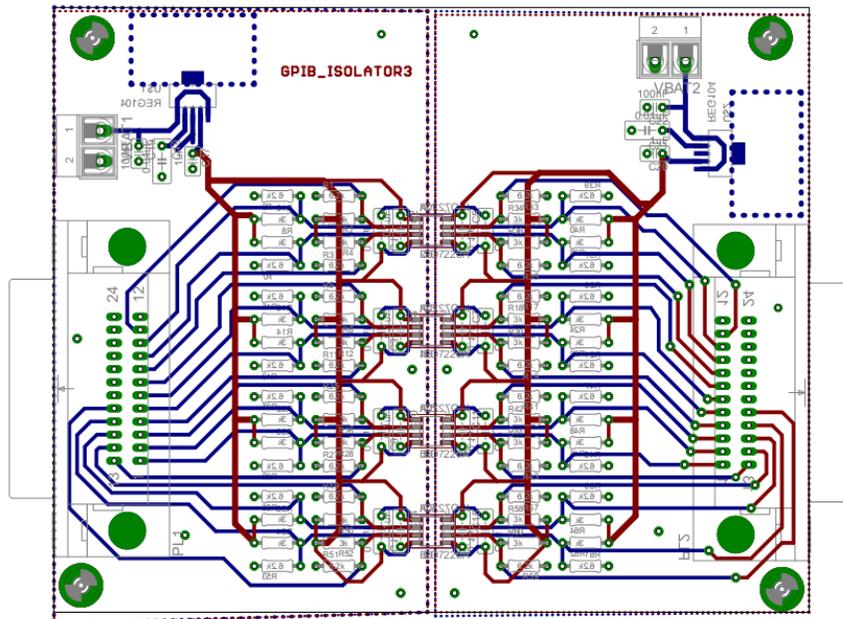


Figura 5.18 Diseño de circuito impreso con aislación capacitiva.

Capítulo 6 Análisis y resultados sobre los prototipos de aislamiento para el bus GPIB

Se realizaron pruebas eléctricas de los distintos bloques de ambos prototipos de aislamiento por aparte, y así analizar su funcionamiento separado. Luego se procedió a realizar las pruebas de los bloques todos juntos.

Finalmente se integraron los circuitos en el laboratorio a distintos procesos de calibración para comprobar su funcionamiento, desempeño y capacidad de comunicación entre los distintos dispositivos que utilizan dicha conexión al bus para su comunicación.

6.1 Pruebas de funcionamiento de circuito de aislamiento óptico

Se ejecutaron pruebas eléctricas a los distintos bloques del circuito de aislamiento óptico, para el análisis posterior de su funcionamiento y cumplimiento de los estándares del bus GPIB.

Para la toma de los datos de las pruebas se utilizó una fuente dual para energizar los distintos bloques, un generador de funciones Simpson 420 y un scopemeter Fluke modelo 105B, el cual tiene integrado un osciloscopio para realizar mediciones básicas. Las imágenes obtenidas del osciloscopio tienen distintos puntos de interés, como el nombre del canal, la escala del canal y el tiempo de retraso. Para una mayor comprensión de las imágenes se hizo un esquema en la figura 6.1

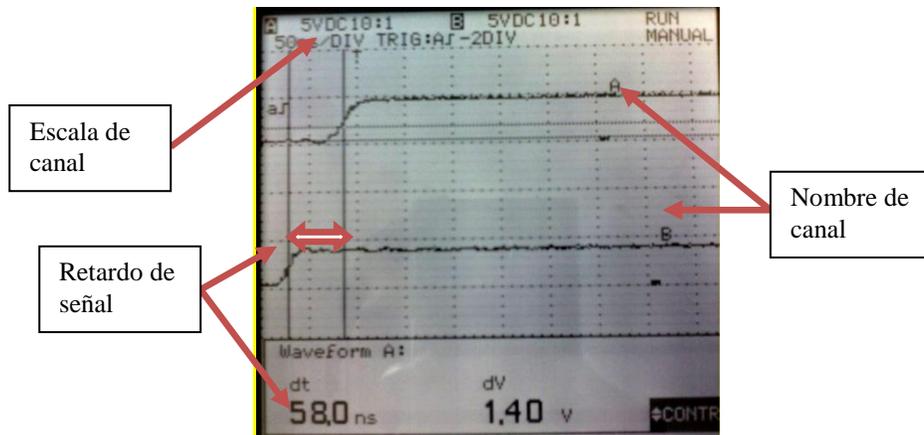


Figura 6.1 Diagrama datos en la imagen del osciloscopio.

6.1.1 Bloque de aislación óptica

El circuito que se muestra en la figura 5.3 fue probado mediante una señal de entrada cuadrada (utilizando un generador de funciones) y obteniendo su salida con un osciloscopio. En la figura 6.2 se observa el retraso que tiene la salida del circuito con respecto a la señal de la entrada. La señal de entrada se muestra en el canal B denotado en la imagen, y la señal de salida en él A. Obteniendo un tiempo de retraso de 58 ns obtenidos en la medición.

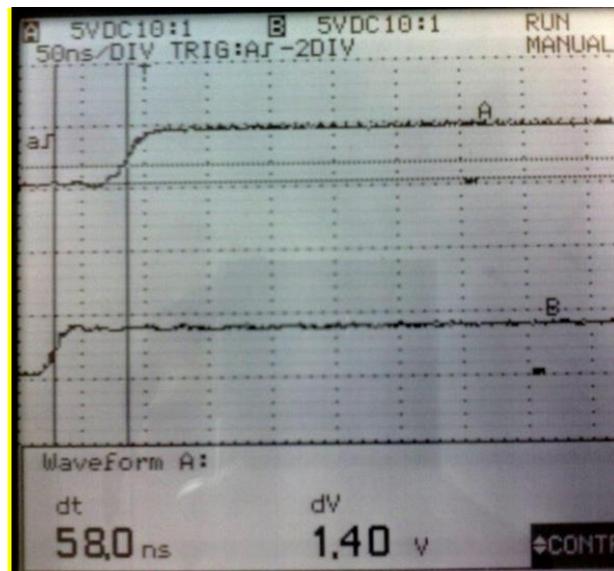


Figura 6.2 Imagen de osciloscopio de retardo de una señal en el bloque de aislamiento.

Se comprueba su funcionamiento para una comunicación bidireccional de colector abierto, obteniendo los mismos resultados de lado A al B y viceversa.

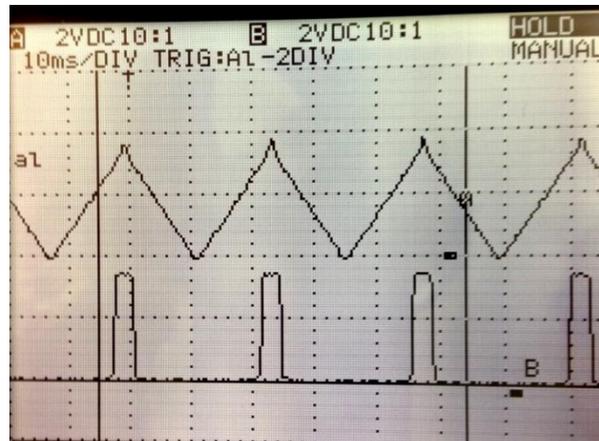


Figura 6.3 Salida ante entrada de señal triangular del circuito del bloque de aislación.

Al circuito se le colocó una entrada de señal triangular para observar el comportamiento como compuerta a la entrada con respecto a su salida, para verificar histéresis como se observa en la figura 6.3. En la tabla 6.1 se tienen los valores de potencial eléctrico para los cuales en la entrada se reconoce los valores lógicos de alto y bajo.

Tabla 6.1 Valores eléctricos para lógica de entrada de Aisladores ópticos

| Valor Lógico | Entrada |
|--------------|--------------|
| Alto | $V_i > 3.1V$ |
| Bajo | $V_i < 3.1V$ |

6.1.2 Bloque de transceivers

Los transceivers utilizados para la entrada y salida del circuito se probaron con el objetivo de verificar su funcionamiento como se plantea en el diseño general del prototipo. Como se observa en la figura 6.4 y 6.5 se tienen los tiempos de retraso de la comunicación de A hacia B de 8,8ns y de B hacia A de 7,2ns.

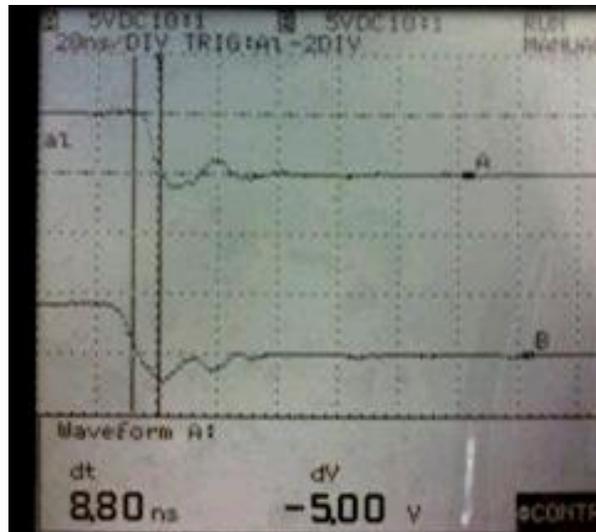


Figura 6.4 Retardo de una línea en el bloque de los transceivers del lado B al A.

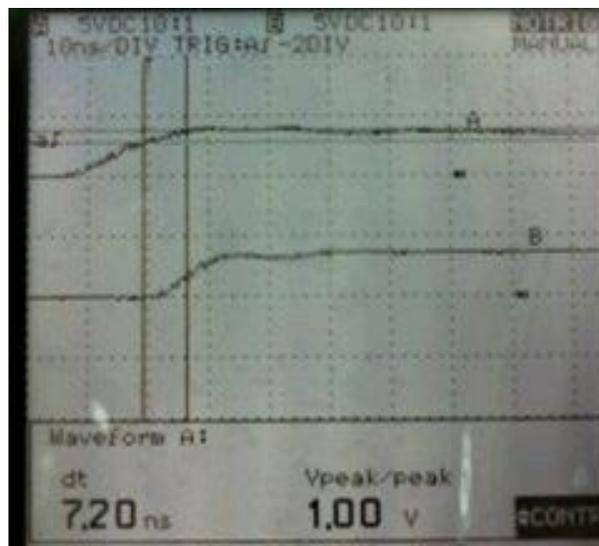


Figura 6.5 Retardo de una línea en el bloque de los transceivers del lado A al B.

La velocidad de transmisión es igual en ambas direcciones, controlada por la señal de control del circuito integrado TE.

6.1.3 Circuito de detección de dirección

El circuito de detección de dirección mostrado en la figura 5.10 fue probado introduciéndole una señal cuadrada en una de sus entradas y obteniendo su salida con el osciloscopio, la otra entrada se encontraba en alto simulando ausencia de comunicación por la misma. En la imagen 6.6 se observa la salida del circuito con respecto a la señal cuadrada, obteniendo una activación de la señal de salida cuando existe una señal baja en la entrada. La señal de entrada es la que se tiene en el canal A y la de salida en el canal B.

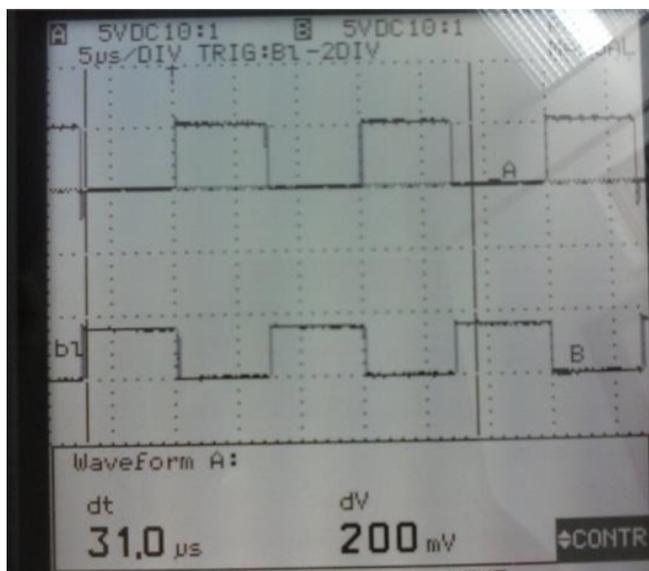


Figura 6.6 Imagen de señal aplicada a circuito de detección de dirección.

En la figura 6.7 se amplía en el tiempo la señal de salida contra la señal de entrada, con el objetivo de visualizar el tiempo de retraso de la señal de entrada con respecto a la de salida. La señal de entrada se tiene en el canal B y la señal de salida en el canal A, observando un tiempo de retraso de 6,4 ns.

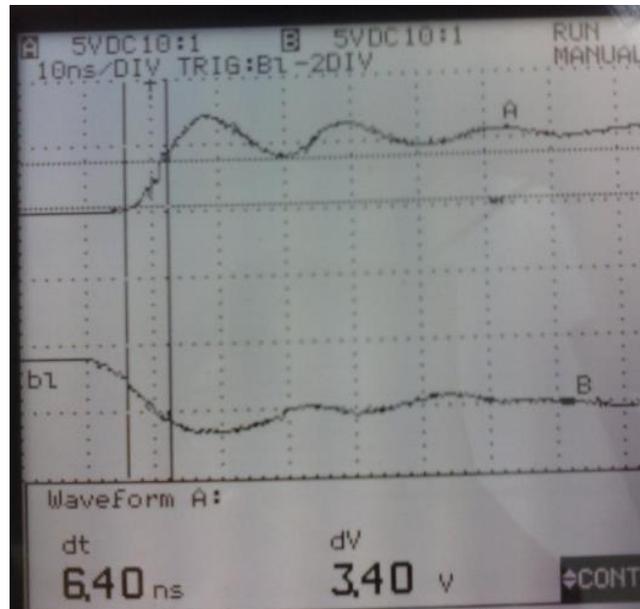


Figura 6.7 Imagen ampliada de una señal aplicada a circuito de detección de dirección.

El circuito de control de dirección, encontrado en la figura 5.11, fue probado introduciendo una señal cuadrada en una entrada y poniendo el resto en alto simulando la ausencia de comunicación. En la figura 6.8 se observa la imagen del osciloscopio donde se ubica la imagen de entrada en el canal B y la señal de salida en el canal A, obteniendo un retraso de 40ns.

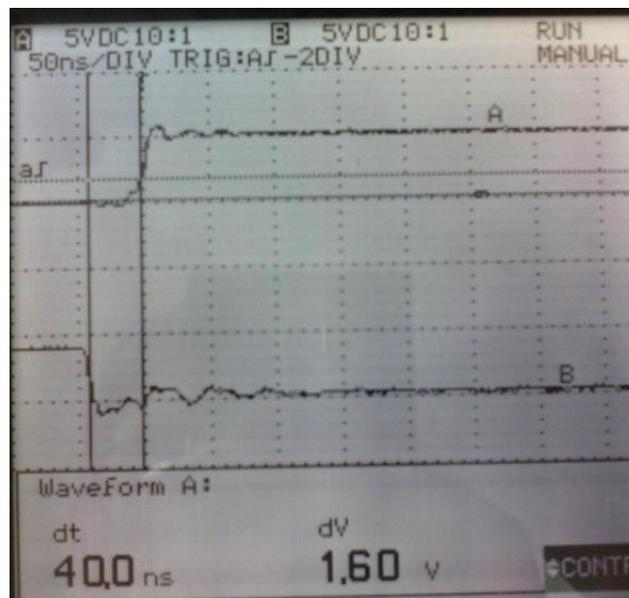


Figura 6.8 Imagen de señal aplicada a circuito de control de dirección.

6.1.4 Circuito Total

Se probó el circuito del prototipo en su totalidad para una línea de comunicación (en el transceiver de control y de datos) en ambos lados, obteniendo así la verificación de su funcionamiento y su retraso en la comunicación. En la figura 6.9 se observa la imagen obtenida en el osciloscopio para el retardo de la señal de entrada por el lado A y de salida por lado B del circuito. La señal de entrada se encuentra en el canal B y la salida en el canal A del osciloscopio, obteniendo un retraso de 59,2 ns en esa dirección.

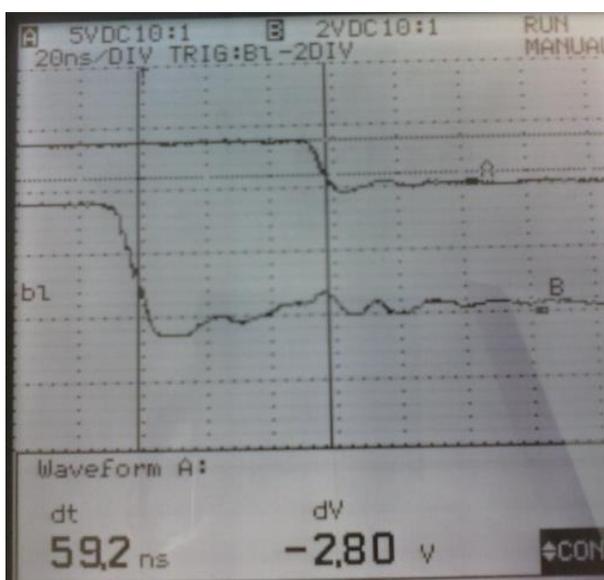


Figura 6.9 Prueba de retardo de señal en el circuito de aislamiento óptico del lado A al B.

En la figura 6.10 se muestra la imagen obtenida en el osciloscopio para el retardo de la señal de entrada por el lado B y de salida por lado A del circuito, obteniendo un retraso de 96,0 ns.

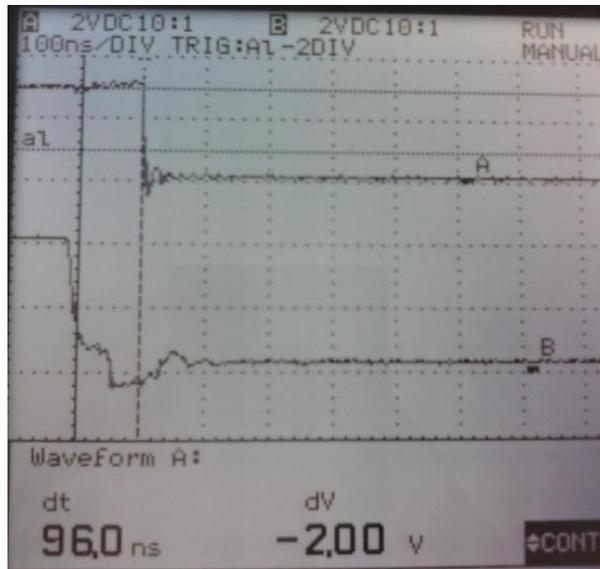


Figura 6.10 Prueba de retardo de señal en el circuito de aislamiento óptico del lado B al A.

6.2 Pruebas de funcionamiento de circuito de aislamiento capacitivo

Se ejecutaron pruebas eléctricas para una línea de comunicación del circuito de aislamiento óptico, para el análisis posterior de su funcionamiento y cumplimiento de los estándares del bus GPIB.

Al igual que las pruebas para el circuito de aislamiento óptico, se utilizó el mismo equipo para las pruebas del capacitivo.

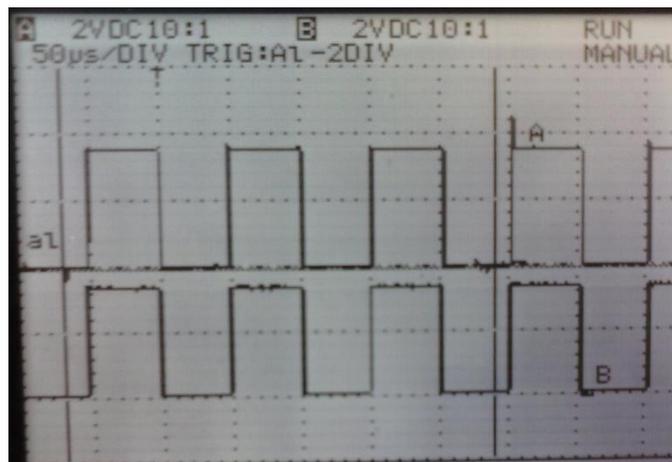


Figura 6.11 Señal de salida del circuito de aislación capacitiva con entrada cuadrada.

En la figura 6.11 se observa la imagen obtenida del osciloscopio para la señal de entrada y de salida en una línea del circuito de aislación óptica. A la entrada se le aplicó una señal cuadrada con el generador de funciones. La señal de entrada se encuentra en el canal A y la señal de salida en la B del osciloscopio. Las diferencias en las señales no se aprecian debido al poco retraso entre ambas.

La señal de salida con respecto a la señal de entrada se amplió en función del tiempo en la figura 6.12, donde se observa la diferencia entre las señales y se logra apreciar el tiempo de retraso de la señal de entrada puesta en el canal A, con la señal de salida en el canal B, el cual fue de 43,2 ns.

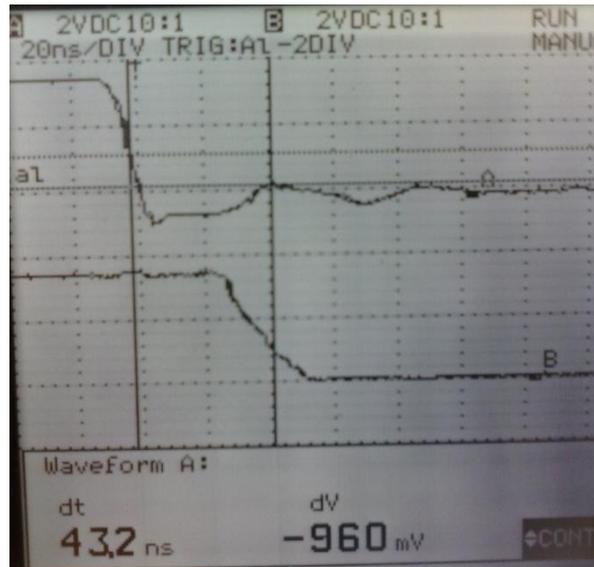


Figura 6.12 Señal de salida del circuito de aislación capacitiva ampliada en el tiempo.

El comportamiento del circuito no varió cuando se puso como entrada en el lado A, o en el lado B, comprobándose así la comunicación bidireccional.

En la tabla 6.2 se observan los valores eléctricos obtenidos para los estados lógicos de entrada del circuito, dichos datos obtenidos asemejan a los datos mostrados por el fabricante del circuito integrado ISO1540 en sus hojas de datos.

Tabla 6.2 Valores eléctricos de los estados lógicos de entrada de circuito de aislamiento capacitivo

| Valor Lógico | Entrada |
|---------------------|----------------|
| Alto | $V_i > 3.3V$ |
| Bajo | $V_i < 0.5V$ |

6.3 Pruebas en laboratorio

Una vez realizadas las pruebas eléctricas en las distintas líneas de comunicación a los circuitos de aislamiento, se procedió a incorporarlas a las pruebas de laboratorio para verificar su debido funcionamiento, y sus posibles efectos en las mediciones del laboratorio.

En el laboratorio se realizaron pruebas en procesos de calibración de capacitancia, corriente directa, corriente alterna, tensión y resistencia. En las pruebas se procedió a realizar el proceso calibración con y sin el circuito de aislamiento para el previo análisis.

6.3.1 Pruebas de comunicación para el circuito de aislamiento óptico

El circuito de aislamiento óptico fue acoplado para la comunicación con diferentes equipos de medición conectados a la computadora. El intercambio de información entre los equipos y la computadora presentaron problemas. La transmisión de datos de la computadora dirigida hacia los equipos se lograba, en cambio cuando los equipos enviaban los datos, dichos datos llegaban de manera errónea limitando la comunicación en ambos sentidos.

Por parte de la computadora sí se reconocía el equipo conectado a esta, pero a la hora de recibir datos, en su mayoría llegaban con problemas, por lo que en todos los procesos de calibración probados los datos obtenidos resultaban erróneos para el análisis.

6.3.2 Pruebas de comunicación para el circuito de aislamiento capacitivo

El circuito de aislamiento capacitivo al igual que el óptico fue acoplado para la comunicación con diferentes equipos de medición conectados a la computadora. Al contrario del óptico, la comunicación realizada por el circuito fue la óptima para permitir la correcta transmisión y recepción de datos por parte de los distintos dispositivos conectados al bus de datos.

6.3.2.1 Pruebas en calibración de capacitancia

Las pruebas de capacitancia se hicieron conectando la computadora por medio de GPIB con y sin aislador a un equipo de medición LCR de precisión 4284A marca Agilent, este a su vez conectado a una década de capacitancia (un capacitor variable con características metrológicas) para medir su magnitud.

Se tomaron cien mediciones para distintos valores de capacitancia introducidos en la década. Los valores promedios de las mediciones y sus respectivas desviaciones estándar se muestran en la tabla 6.3. El total de las mediciones se pueden observar en los apéndices.

Tabla 6.3 Valores promedio y desviaciones estándar de mediciones.

| | Con Aislador | | Sin Aislador | |
|-----------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|
| | Promedio | Desviación estándar | Promedio | Desviación estándar |
| 1uF | 0.99846726 | 0.000355416 | 0.99845336 | 0.000482843 |
| 10uF | 10.02274 | 0.000417786 | 10.023821 | 0.000385938 |
| 100uF | 100.05894 | 0.000371184 | 100.05874 | 0.000463191 |
| 1000uF | 1000.39 | 5.71298E-13 | 1000.3898 | 0.001407053 |
| 10000uF | 10003.967 | 0.047258156 | 10003.972 | 0.045126086 |
| 100000uF | 100002.81 | 0.394277244 | 100005.98 | 0.2 |

6.3.2.2 Pruebas en calibración en tensión alterna

Se realizaron pruebas para las calibraciones para tensión alterna. La computadora fue conectada con y sin aislación GPIB a un calibrador 5720 marca FLUKE y un multímetro digital 3458 marca Agilent. El calibrador encargado de generar las variables eléctricas es conectado al multímetro para que este tome las mediciones. En la tabla 6.4 se muestran los valores obtenidos para las desviaciones estándar de la toma de diez medidas por cada valor generado. El total de las mediciones se pueden observar en los apéndices.

Tabla 6.4 Valores de desviaciones estándar de mediciones de tensión alterna.

| Tensión (V) | Frecuencia | Desviación Estándar Con Acople | Desviación Estándar Sin Acople |
|--------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0,100 00 | 300 Hz | 1,03357E-06 | 2,59675E-06 |
| 0,100 00 | 10 kHz | 9,1179E-07 | 2,75505E-06 |
| 0,100 00 | 100 kHz | 1,1064E-06 | 2,5315E-06 |
| 1,000 00 | 300 Hz | 2,67935E-06 | 2,40528E-06 |
| 1,000 00 | 1 kHz | 3,06407E-06 | 3,59497E-06 |
| 1,000 00 | 10 kHz | 2,16739E-06 | 3,91371E-06 |
| 1,000 00 | 100 kHz | 1,73766E-06 | 4,15495E-06 |
| 1,000 00 | 1 000 kHz | 5,21776E-06 | 1,02549E-05 |
| 10,000 00 | 10 Hz | 7,14027E-05 | 4,58273E-05 |
| 10,000 00 | 300 Hz | 8,52747E-06 | 1,25567E-05 |
| 10,000 00 | 10 kHz | 6,98535E-06 | 7,35084E-06 |
| 10,000 00 | 100 kHz | 1,78654E-05 | 1,16577E-05 |
| 10,000 00 | 1 000 kHz | 7,47306E-05 | 5,93314E-05 |
| 100,000 00 | 55 Hz | 0,000167473 | 0,000100937 |
| 100,000 00 | 1 kHz | 8,13762E-05 | 9,24222E-05 |
| 100,000 00 | 100 kHz | 0,000166318 | 0,000187713 |
| 57,700 00 | 60 Hz | 7,90245E-05 | 7,71879E-05 |
| 69,300 00 | 60 Hz | 6,17046E-05 | 9,81998E-05 |
| 100,000 00 | 60 Hz | 6,24124E-05 | 8,18667E-05 |
| 120,000 00 | 60 Hz | 0,000710011 | 0,000838772 |
| 138,600 00 | 60 Hz | 0,000518697 | 0,000784077 |
| 240,000 00 | 60 Hz | 0,001097029 | 0,000762598 |

6.3.2.3 Pruebas en calibración en tensión directa

Se realizaron pruebas para las calibraciones de tensión directa. Al igual que en tensión alterna, la computadora fue conectada con y sin aislación GPIB a un calibrador 5720 marca FLUKE y un multímetro digital 3458 marca Agilent. El calibrador encargado de generar las variables eléctricas es conectado al multímetro para que este tome las mediciones. En la tabla 6.5 se muestran los valores obtenidos para las desviaciones estándar de la toma de diez medidas por cada valor generado. El total de las mediciones se pueden observar en los apéndices.

Tabla 6.5 Valores de desviaciones estándar de mediciones de tensión directa.

| Tensión | Desviación Estándar Con Acople | Desviación Estándar Sin Acople |
|----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0.001 V | 5.82383E-08 | 2.06526E-08 |
| 0.01 V | 2.97278E-08 | 1.91449E-08 |
| 0.1 V | 1.86537E-08 | 1.54431E-08 |
| 1 V | 3.61953E-08 | 2.06013E-08 |
| 10 V | 2.23896E-07 | 2.7717E-07 |
| 100 V | 4.02206E-06 | 3.65658E-06 |
| 1000 V | 0.000390373 | 0.000404211 |

6.3.2.3 Pruebas en calibración en corriente alterna

En corriente alterna se utilizaron los mismos equipos que para tensión directa y alterna. A diferencia de las pruebas en tensión, se hizo un cambio en la configuración de los cables para la debida medición de corriente. En la tabla 6.6 se muestran los valores de desviación estándar para las diez medidas que se realizaron para cada valor de corriente. El total de las mediciones se pueden observar en los apéndices.

Tabla 6.6 Valores de desviaciones estándar de mediciones de corriente alterna.

| Corriente | Frecuencia | Desviación Estándar con acople | Desviación Estándar sin Acople |
|------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 0.01 A | 300 Hz | 9.59664E-09 | 1.33851E-08 |
| 0.01 A | 5 kHz | 1.37401E-08 | 1.34432E-08 |
| 0.1 A | 1 kHz | 8.30362E-08 | 5.71314E-08 |
| 1 A | 55 Hz | 1.55793E-06 | 2.89042E-06 |
| 1 A | 300 Hz | 1.3461E-06 | 9.68193E-07 |
| 1 A | 5 kHz | 3.2103E-06 | 1.46352E-06 |

6.3.2.4 Pruebas en calibración en corriente directa

Se realizaron pruebas para las calibraciones de corriente directa. Se utilizó la misma configuración que en la prueba de corriente alterna. En la tabla 6.7 se muestran los valores obtenidos para las desviaciones estándar de la toma de diez medidas por cada valor de corriente generado. El total de las mediciones se pueden observar en los apéndices.

Tabla 6.7 Valores de desviaciones estándar de mediciones de corriente directa.

| Corriente | Desviación Estándar Con Acople | Desviación Estándar Sin Acople |
|------------------|---|---|
| 0.01 A | 3.24058E-09 | 3.81277E-09 |
| 0.1 A | 1.25016E-08 | 2.72115E-08 |
| 1 A | 3.66306E-07 | 4.65595E-07 |

6.3.2.5 Pruebas en calibración en resistencia

Se realizaron pruebas para las calibraciones de resistencia. Se utilizó el mismo equipo de generación y medición que en las calibraciones de corriente y tensión, con la diferencia de que se utilizó una conexión distinta. En la tabla 6.8 se muestran los valores obtenidos para las desviaciones estándar de la toma de diez medidas por cada valor de resistencia generado. El total de las mediciones se pueden observar en los anexos.

Tabla 6.8 Valores de desviaciones estándar de mediciones de resistencia.

| Resistencia | Desviación Estándar Con Acople | Desviación Estándar Sin Acople |
|--------------------|---|---|
| 0 Ω | 2.90004E-06 | 6.43744E-06 |
| 1 Ω | 5.92133E-06 | 5.07816E-06 |
| 10 Ω | 9.13172E-05 | 4.84394E-05 |
| 100 Ω | 0.000119398 | 0.000145283 |
| 1 k Ω | 0.000560299 | 0.000997098 |
| 10 k Ω | 0.00546178 | 0.004587569 |
| 100 k Ω | 0.194641939 | 0.180948133 |
| 1 M Ω | 4.664583903 | 3.372046494 |
| 10 M Ω | 158.452702 | 145.5652294 |
| 100 M Ω | 2.90004E-06 | 6.43744E-06 |

6.1.3 Pruebas de consumo energético

Se realizaron pruebas de consumo de corriente para ambos circuitos. Para las pruebas se utilizó un multímetro pequeño marca METEX M3650CR, en el cual se utilizó su función de medición de corriente directa y se colocó en la entrada del regulador de voltaje de los distintos circuitos.

En la figura 6.13 se observa cómo se realizaron las pruebas de consumo de corriente, la computadora conectada en el lado A del circuito y el equipo conectado en el lado B, para la alimentación de los circuitos se utilizaron baterías recargables de 6V con capacidad de 4.5Ah con las que cuenta el laboratorio.



Figura 6.13 Prueba de medición de consumo de corriente por parte del circuito.

En la tabla 6.9 se muestran los valores corrientes máximos obtenidos en el funcionamiento del circuito de aislación óptica para la parte del bloque A y B. Ambos bloques presentaron el mismo consumo de corriente, por lo que en la tabla se indica los valores obtenidos para ambos. La tabla muestra los valores de consumo de corriente

máximo cuando no había comunicación en el dispositivo, y cuando existía comunicación a través del dispositivo.

Tabla 6.9 Valores de consumo de corriente para circuito de aislamiento óptico

| Operación del circuito | Corriente máxima (mA) |
|-------------------------------|------------------------------|
| Libre | 181,7 |
| Con comunicación | 185 |

De igual manera se realizó la medición para el circuito de aislación capacitiva para los bloques en ambos lados. Los datos obtenidos de las mediciones de consumo de corriente máxima para ambos bloques se encuentran en la tabla 6.10.

Tabla 6.10 Valores de consumo de corriente para circuito de aislamiento capacitivo

| Operación del circuito | Corriente máxima (mA) |
|-------------------------------|------------------------------|
| Libre | 31,3 |
| Con comunicación | 34,6 |

A partir del conocimiento del consumo de corriente promedio en ambos circuitos y la capacidad que poseen las baterías en el laboratorio, se calculó el tiempo de funcionamiento de la batería en funcionamiento dado por:

$$Duracion\ de\ bateria\ en\ funcionamiento\ (horas) = \frac{Capacidad\ de\ la\ bateria\ (mAh)}{Consumo\ de\ corriente\ (mA)}$$

Donde se obtiene una duración de 24,32 y 130,05 horas en funcionamiento para los circuitos de aislación óptica y capacitiva respectivamente con las baterías.

6.4 Análisis de los prototipos de aislamiento

El análisis de los circuitos se realizó con respecto a los resultados obtenidos de las pruebas eléctricas en las líneas de los circuitos, su incorporación en distintos procesos de calibración y pruebas de consumo de corriente por parte de cada uno. Se analizó el cumplimiento de las normas eléctricas y mecánicas del estándar IEEE 488.1, para finalmente realizar una evaluación sobre la incorporación del prototipo definitivo para su uso en el laboratorio.

6.4.1 Funcionamiento del circuito de aislamiento óptico para el bus GPIB

Al circuito se le realizaron distintas pruebas eléctricas en sus diferentes bloques, comprobando el correcto funcionamiento de cada línea de comunicación por separado, además se tomaron en cuenta los tiempos de propagación de los mismos, tomando en cuenta su importancia para la comunicación.

El bloque de aislación óptica encontrada en la figura 6.3, funciona de la manera esperada, logrando una comunicación bidireccional para líneas de comunicación de colector abierto. Con respecto a los tiempos de propagación se tuvo un retraso de 58 nS dentro de la comunicación en el circuito, el cual es el tiempo esperado según las hojas de datos del HCPL-0631 y las simulaciones hechas previamente.

Los niveles eléctricos y lógicos obtenidos para las entradas del bloque fueron distintos a los requeridos por el estándar IEEE 488.1 visto anteriormente, debido a que la activación del optocoplador viene dada por el LED, que para su activación se usa corriente y no voltaje. Los resultados de dichos niveles eléctricos eran los esperados según las simulaciones de dicho bloque, por lo se había añadido el bloque de transceivers para cumplir con las especificaciones del estándar del GPIB.

Con el bloque de aislación óptica que se encuentra en medio del circuito se logra uno de los objetivos principales del prototipo el cual es lograr la aislación galvánica entre las líneas de comunicación, separando el bus de comunicación en dos. La aislación es garantizada por el fabricante del optoacoplador HCPL-0631 dando entre sus características un aislamiento de 5000 Vrms.

El circuito de detección de dirección tiene el funcionamiento esperado, brindando la señal de activación de comunicación del bus para cada lado del dispositivo, ya sea del lado A o B, dando garantía al diseño del circuito de control de dirección. En las pruebas se obtiene un tiempo esperado de 6,4nS en la detección de comunicación en una línea de comunicación.

El bloque de control de dirección en su totalidad cumplió con las características deseadas en el diseño, funcionando desde los circuitos de aislación del bloque, pasando por el circuito de detección de comunicación y la lógica de direccionamiento integrada para dar la señal de TE a los transceivers para que direccionen los datos en el bus. En las pruebas se obtuvo una duración de activación de la señal TE (cuando ocurre la detección de comunicación) de 40nS, desde que la señal de DAV o NDAC es detectada hasta la salida del bloque TE que va a los transceivers.

Cabe destacar que la salida del bloque de dirección por la lógica de direccionamiento se encuentra en bajo esperando alguna señal que comunique. Como resultado la señal TE se encuentra en bajo siempre que no haya comunicación.

Con todos los bloques acoplados se realizó la prueba de transmisión de una línea completa en ambos lados, para el caso de transmisión de la señal DAV y NRFD de lado A al B y viceversa. Se probaron las señales DAV y NRFD porque estas están relacionadas directamente en la dirección del circuito. Cuando DAV se pone en bajo señala la comunicación por parte de ese lado del bus. En la figura 6.8 se observa la imagen obtenida del tiempo que dura la señal en ponerse en bajo en el lado A para señalar la comunicación y la salida del lado B, obteniendo un tiempo de retraso de 59,2nS. De manera inversa del lado

B se realizó la prueba teniendo un tiempo mayor igual a 96,0nS observado en la figura 6.9. La diferencia de retardo se da por el bloque de control de direccionamiento. La señal TE esta en bajo cuando no existe la comunicación, por lo que por defecto el direccionamiento de la comunicación se encuentra de A hacia B y los datos pasan directamente sin el retardo del bloque de control de dirección para activar la comunicación. A diferencia cuando la señal se dirige de la parte B del bus hacia la A, el bloque de direccionamiento primero detecta la señal y activa la señal de TE dando un mayor tiempo de retraso. Se observa que la diferencia en ambas señales es de 36,8 nS tiempo similar a los 40 nS de duración de la activación de la señal de TE en la prueba anterior.

La incorporación del circuito a los procesos de calibración tuvo resultados negativos, donde no se pudo realizar la comunicación entre los dispositivos del laboratorio con puerto GPIB, debido a la corrupción de los datos en la recepción por parte de la computadora. Esto ocurre debido a la posible falta de sincronía en la señales de los datos con las señales de control, cuando ocurre comunicación de la parte B del circuito. Sin embargo, por falta de equipo de pruebas adecuado no se pudieron realizar las pruebas necesarias para verificar con certeza la causa del fallo.

Así la verificación, pruebas y mejora en el diseño del circuito de aislamiento quedan abiertas a próximo estudios y evaluaciones para mejorar la propuesta de diseño presentada en este proyecto.

6.4.2 Funcionamiento del circuito de aislamiento capacitivo para el bus GPIB

En el circuito de aislamiento capacitivo se realizaron pruebas similares al circuito de aislamiento óptico. A diferencia, el circuito de aislamiento capacitivo posee menos bloques y es menos complejo. Primero se realizaron pruebas eléctricas para comprobar su debido funcionamiento, y luego se incorporó en la comunicación de distintos equipos del laboratorio con la computadora.

En la figura 6.11 se observa la imagen del osciloscopio, para la salida del circuito en una línea de comunicación con entrada de señal cuadrado. Obteniendo el funcionamiento esperado por parte del mismo. Se obtuvo el mismo comportamiento para la señal de entrada por la parte A y la parte B, corroborando la comunicación bidireccional.

Para la comunicación en ambos lados se obtuvo un tiempo de retraso de 43,2 ns, siendo este menor que el tiempo de retraso obtenido para el circuito de aislamiento óptico en su comunicación por ambos lados.

El circuito cumple con el objetivo principal del prototipo el cual es lograr la aislación galvánica entre las líneas de comunicación, separando el bus de comunicación en dos. La aislación es garantizada por el fabricante del circuito utilizado ISO1540 dando entre sus características un aislamiento de 4000 Vrms.

6.4.3 Cumplimiento de Estándar IEEE 488.1

Uno de los objetivos generales del prototipo es el cumplimiento de los estándares eléctricos y mecánicos de la norma de la IEEE 488.1. En la tabla 6.11 se tiene un resumen de los distintos puntos de la norma y el cumplimiento de ambos circuitos.

La tabla hace mención a los puntos establecidos en el estándar para las normas establecidas para las características eléctricas y mecánicas. En el capítulo cinco se mencionan las distintas características del estándar, en los anexos se encuentra las partes de interés del estándar IEEE 488.1 para mayor entendimiento del lector.

Las características señaladas con una N.C. (no corresponde) fueron características que no corresponden en el diseño de los circuitos de aislamiento.

Tabla 6.11 Cumplimiento de Estándares de Norma IEEE 488.1

| Requisitos | Descripción | Cumplimiento en el circuito de aislamiento óptico | Cumplimiento en el circuito de aislamiento capacitivo |
|--|---|---|---|
| 3. Especificaciones Eléctricas | | | |
| 3.2 Relación de estados Lógicos y Eléctricos | Los niveles eléctricos correspondientes para los estados Lógicos | X | X |
| 3.3 Requisitos del Driver | | | |
| 3.3.1 Tipos de Driver | Se debe usar drivers de colector abierto o triestado para las señales del bus | X | X |
| 3.3.2 Especificaciones del Driver | Máxima corriente de drenado de 48mA | X | X |
| | Corriente inversa -5,2mA | X | X |
| 3.4 Requisitos del Receiver | | | |
| 3.4.1 Especificaciones de Receiver permitidas | Estados lógicos eléctricos del receiver | X | X |
| 3.5 Cargas Requeridas para el dispositivo | | | |
| 3.5.1 Terminación resistiva | Cada línea de señal debe tener carga resistiva | X | X |
| 3.5.2 Protección de voltaje negativo | Proveer un limitador de voltaje negativo | X | X |
| 3.5.3 Requisitos de carga DC | Características figura 15 en el estándar | X | X |
| 3.5.4 Limite de carga capacitiva | Capacitancia interna de Carga menor de 100pF | X | X |
| 3.5.5 Configuración típica del Circuito | Resistencias típicas en Figura 16 en el estándar | X | X |
| 3.6 Requisitos de Tierras | Requisitos de conexiones de tierra | N.C. | N.C. |
| 3.7 Características de Cables | Características deseadas de los cables del bus | N.C | N.C. |
| 3.8 Valores de Tiempos para transición de estados | Valores en S de los diferentes tiempos de espera de la comunicación | X | X |
| 4. Especificaciones Mecánicas | | | |
| 4.2 Tipo de Conector | Tipo de conector establecido en el estándar | X | X |
| 4.3 Asignación de Contactos en el Conector | Asignación de pines de los conectores | X | X |
| 4.4 Montaje del Conector del dispositivo | Características del montaje del conector a un dispositivo | X | X |
| 4.5 Ensamblaje del cable | Características de ensamblaje del dispositivo | N.C. | N.C. |

6.4.4 Consumo de potencia

Con las pruebas de consumo energético en ambos circuitos, se observa en las tablas 6.9 y 6.10 que el consumo de corriente del circuito óptico es mayor que el del circuito capacitivo, resultado esperado debido a que el circuito de acople óptico posee mucho más bloques y circuitos integrados que el capacitivo.

La baja demanda energética de ambos circuitos, propicia el funcionamiento del dispositivo por medio de las baterías para los procesos de calibración de larga duración. Con el cálculo del tiempo de duración de los circuitos en funcionamiento se evidencia, quedando demostrado que el circuito de asilamiento capacitivo dura más en funcionamiento que el óptico con las mismas condiciones de alimentación energética.

6.4.5 Pruebas del prototipo de asilamiento capacitivo en el laboratorio

En las distintas pruebas en el laboratorio se vieron resultados satisfactorios donde se muestra un similar comportamiento de los datos obtenidos en los equipos cuando se realizaban con y sin el dispositivo de aislamiento capacitivo en el bus GPIB.

Se analizaron datos obtenidos de manera que se pudiera demostrar la diferencia o variación en las mediciones, procesando los datos medidos, calculando su promedio y desviación estándar.

En el capítulo 6.3.2 se encuentran los datos obtenidos para las mediciones en las calibraciones de capacitancia, tensión alterna, tensión directa, corriente alterna, corriente directa y resistencia.

En las mediciones de la calibración de capacitancia, vistas en la tabla 6.3 muestra que no existe una tendencia notable en cuanto a la diferencia entre las distintas desviaciones estándar, por lo que se demuestra que la incorporación del circuito no afecta de manera positiva ni negativa a las mediciones, por lo que se puede establecer que la variación en las medidas de capacitancia son propias del instrumento o causada por otro problema ajeno al bus GPIB.

En las mediciones de la calibración de tensión alterna, vistas en la tabla 6.4, se tiene un número mayor de medidas, donde se tomaron datos para tensiones bajas menos de 1V, y tensiones altas de 240V. A diferencia de la mediciones en capacitancia si hubo una tendencia notable en la diferencia que hubo en la desviación estándar con y sin el prototipo de aislación, teniendo que en el 68.18% de las mediciones se tuvo una desviación estándar menor con el acople. En la figura 6.14 se tiene una gráfica donde se agrupan las distintas mediciones de bajo voltaje observando la gran diferencia positiva en hasta un 150% en la desviación que existe en las mediciones con el acople. Dicha diferencia no se da en tanta magnitud en mediciones de alta tensión.

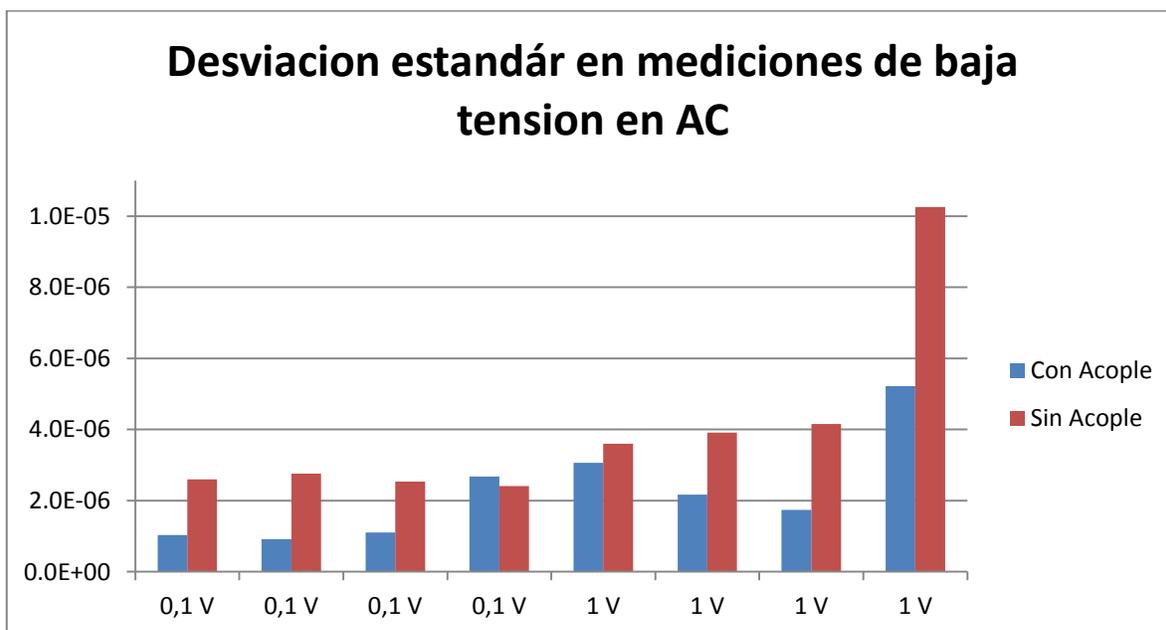


Figura 6.14 Gráfica de la desviación estándar en las mediciones de bajo voltaje en AC.

6.4.6 Comparación de los circuitos de aislamiento

La comparación de ambos circuitos de aislamiento se realiza con base a las necesidades del laboratorio, donde se toman en cuenta los criterios previamente discutidos y los objetivos del proyecto.

La construcción de ambos circuitos tuvo un proceso similar, la diferencia entre ambos además de su diferente método de aislamiento, fue que el circuito de aislamiento óptico posee más bloques que lo convierte en un circuito más grande en diseño y en tamaño. El tamaño del diseño del circuito influyó en la cantidad de material necesitado para la construcción de ambos circuitos, haciendo el circuito de aislamiento capacitivo más económico en cuanto al uso de material y espacio, haciéndolo además más fácil en la adaptación a los equipos del laboratorio por su tamaño reducido.

La diferencia en cuanto al consumo de energía en ambos circuitos es debido también al tamaño y cantidad de circuitos de los mismos, por esto el consumo del circuito de aislamiento óptico es mayor.

Ambos circuitos logran cumplir con las normas eléctricas y mecánicas del estándar IEEE 488.1, logrando así la correcta compatibilidad eléctrica y mecánica con los equipos con comunicación GPIB.

Los circuitos poseen un aislamiento galvánico entre las líneas de cantidad similar garantizado por el fabricante, ambos superando a los dispositivos comerciales. Cabe destacar que el aislamiento del circuito óptico posee mayores características de aislamiento.

En cuanto a la incorporación de los circuitos en el laboratorio, con el circuito de aislamiento óptico no se pudo realizar ninguna prueba debido a sus problemas en la comunicación con los distintos dispositivos que imposibilitaban las pruebas de calibración. A diferencia el circuito de aislamiento capacitivo si logra la comunicación con los diferentes

equipos encontrados en el laboratorio, donde se pudieron realizar pruebas en distintos procesos de calibración.

Los resultados de las pruebas del circuito en el laboratorio demuestran que el uso del dispositivo no afecta negativamente en las mediciones, y de manera contraria en diferentes pruebas tienen un efecto positivo, disminuyendo la variación o ruido que se dio en las mediciones.

El dispositivo de aislamiento capacitivo presenta mejores características que el óptico en cuanto a la construcción, diseño, costo, adaptación y consumo de potencia. Al contrario, la indebida comunicación del circuito de aislamiento óptico imposibilita realizar una evaluación para llegar a concluir cual dispositivo tiene mejor funcionamiento en los procesos del laboratorio.

Debido a los resultados obtenidos en el circuito de aislamiento capacitivo, se llega a la conclusión de su correcto funcionamiento y efectos positivos en las pruebas realizadas.

Por lo tanto se concluye que el circuito de aislamiento capacitivo cuenta con las características adecuadas para ser integrado a los procesos de calibración de laboratorio.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones

- Los prototipos de aislamiento capacitivo y óptico brindan el aislamiento necesario para garantizar el correcto funcionamiento de los equipos de medición que el laboratorio necesita.
- El cumplimiento de los estándares eléctricos y mecánicos 488.1 propician el correcto funcionamiento y compatibilidad del prototipo de aislamiento capacitivo con los distintos equipos del laboratorio.
- Se logra el diseño de ambos prototipos para que su consumo de energía logre ser proporcionado por las baterías de 4,5Ah para que duren durante los procesos de calibración.
- La utilización del aislamiento capacitivo a diferencia del aislamiento óptico establece una mejor solución desde el punto de vista de construcción, tamaño, consumo de energía adaptación, en el diseño y construcción de un dispositivo de aislamiento galvánico en el bus de datos IEEE 488.
- El prototipo de aislamiento capacitivo comparado con el óptico es el que se apega a las necesidades del laboratorio, seleccionándolo como el dispositivo para ser integrado a los procesos de calibración del laboratorio.
- El circuito de direccionamiento del circuito de aislamiento óptico no funciona de la manera correcta debido a sus problemas de sincronía en la comunicación.

7.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar el prototipo de aislamiento en las calibraciones de tensión alterna para posterior estudio y disminuir la variación que se da en las mediciones en la ausencia del mismo.
- En una segunda versión del prototipo se podría agregar un circuito adicional que indique la carga de las baterías de manera visual, para la prevención del usuario cuando estas se encuentran descargadas.
- Para una segunda versión del prototipo diseñar un tipo de recubrimiento que proteja el circuito y a la vez presente aislamiento contra las señales electromagnéticas que pueden haber presentes.
- El prototipo de aislamiento óptico queda abierto a su posterior estudio con mejores herramientas de diseño que permitan su mejora.

Bibliografía

- [1] R. M. Marban and J. A. Pellece C., *Metrologia para no metrologos*, Segunda edicion ed. Calzada Mateo Flores, Guatemala: OEA, 2002.
- [2] FLUKE, *Calibration*, Segunda edicion ed. Everett, WA, Estados Unidos: The Davis Group, 1994.
- [3] Grupo Ice. (2012, Febrero) LMVA. [Online].
http://www.grupoice.com/wps/portal/AcercaICE_LMVE#.UGx-L9mH3iQ
- [4] R. M. Marbán Dr. C. Sanetra. (2007, junio) ENFRENTANDO EL DESAFÍO GLOBAL DE LA CALIDAD: UNA INFRAESTRUCTURA NACIONAL DE CALIDAD. [Online].
http://www.ptb.de/de/org/q/q5/docs/OAS_SP07.pdf
- [5] ICS ELECTRONICS, "GPIB 101 - A TUTORIAL ABOUT THE GPIB BUS," ICS ELECTRONICS, Commerce Circle, Pleasanton, CA, Paper 2012.
- [6] ICS Electronics, "EXTENDING THE GPIB BUS," Systems West Inc, Paper AB48-12, 2012.
- [7] N. Rasmussen, "Inter-System Ground Nooise: Causes and Efects," Schneider Electric, White Paper 2011.
- [8] Hewlett Packard. (1998, Enero) Tutorial Description of the Hewlett-Packard Interface Bus. Tutorial.
- [9] "IEEE Standard Digital Interface for ," Standard STD 488.1-1987, 1987.
- [10] H. W. Ott, *Noise Reduction Techniques in Electronic Systems*, Segundo edicion ed. New York, United States: Wiley, 2001.
- [11] Keithley, *Low Level Measurments Handbook*, Sexta edición ed., 80440KSI, Ed. Cleveland, Ohio, U.S.A, 2004.
- [12] National Intruments. (2012, Julio) Isolation Technologies for Reliable Industrial Measurements. Tutorial.
- [13] M. Moro Piñeiro, *Metrologia introduccion, conceptos y instrumentos*. Oviedo, España: Servicio de publicaciones Universidad de Oviedo, 2000.
- [14] I.C.E. (2012, junio) Historia del I.C.E. [Online].
http://www.grupoice.com/wps/portal/gice/acerca_ice/acerca_ice_asi_somos/acerca_ice_asi_somos_historia!/ut/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os_gQL0N_D2cLEwN_Vy8_XA08zY09TUzNTi1BnI6B8JC55gwBjE5J0GwRYugLlXX0tg8xcDQwMiNJtgAM4GhDQ7eeRn5uqX5AbGhpR7qgIAPkP--s!/dl3
- [15] B. Wolbert, "Designing With Low Drop-Out Voltage Regulators," Micrel Semiconductor, San Jose, CA, Guia de diseño 2008.

- [16] Canadian Calibration Network, "Practices for Calibration Laboratories," Standards Council of Canada, Ottawa, Ontario, Guide NRC/CLAS-06, 1995.
- [17] R. M. Howard, *Principles of Random Signal Analysis and Low Noise Design*, Primera edicion ed. New York, United States: Wiley-Interscience, 2002.
- [18] National Instruments. (2010, Mayo) Digital Multimeter Measurements Techniques and Defenitions. Tutorial.

Apéndices

A.1 Glosario, abreviaturas y simbología

LMVE: Laboratorio metrológico de variables eléctricas

ICE: Instituto costarricense de electricidad

GPIB: Bus de Instrumentación de propósito general

SI: Sistema internacional

IEEE: Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos

CD: Corriente directa

CA: Corriente alterna

Proceso de Calibración: Ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con los valores de la magnitud que ha de medir.

Proceso de medición: conjunto de operaciones para determinar el valor de una magnitud.

Exactitud: se denomina exactitud a la capacidad de un instrumento de acercarse al valor de la magnitud real

Precisión: se conoce también como error de medición, y corresponde al margen máximo entre el valor medido y el real; se expresa en porcentaje del valor del fondo de escala.

Tecnología TTL: Corresponde a Transistor Transistor Logic, su característica básica, radica en que las entradas y salidas de los componentes que están implementados en esta tecnología poseen transistores BJT.

Estándar: es la redacción y aprobación de normas que se establecen para garantizar el acoplamiento de elementos construidos independientemente, así como garantizar el repuesto en caso de ser necesario, garantizar la calidad de los elementos fabricados, la seguridad de funcionamiento y trabajar con responsabilidad social.

A.2 Tablas de Mediciones en Calibración

Tabla A.1 Mediciones tomadas en la calibración sin dispositivo de aislamiento

| Punto No. | Función | Escala obj. Bajo prueba | Valor generado por el patrón | Variable Independiente | Observaciones Consecutivas sin | | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| 1 | Voltaje CD | 0.1 V | 0.000 00 | N/A | -7.02657199E-07 | -7.00199128E-07 | -6.98092210E-07 | -6.78427640E-07 | -6.95809715E-07 | -6.79656676E-07 | -6.97565480E-07 | -6.84923971E-07 | -6.90366843E-07 | -7.04412964E-07 | |
| 1 | | 0.1 V | 0.001 00 | | 9.99292837E-04 | 9.99294066E-04 | 9.99290204E-04 | 9.99294769E-04 | 9.99252104E-04 | 9.99278264E-04 | 9.99259829E-04 | 9.99261936E-04 | 9.99279318E-04 | 9.99235073E-04 | |
| 2 | | 0.1 V | 0.010 00 | | 9.99926159E-03 | 9.99925984E-03 | 9.99921840E-03 | 9.99924404E-03 | 9.99921629E-03 | 9.99921191E-03 | 9.99922384E-03 | 9.99921805E-03 | 9.99921981E-03 | 9.99924607E-03 | |
| 3 | | 0.1 V | 0.100 00 | | 9.99993298E-02 | 9.99993407E-02 | 9.99993458E-02 | 9.99993679E-02 | 9.99993388E-02 | 9.99993465E-02 | 9.99993649E-02 | 9.99993198E-02 | 9.99993493E-02 | 9.99993272E-02 | |
| 4 | | 1 V | 1.000 00 | | 9.99999728E-01 | 9.99999665E-01 | 9.99999689E-01 | 9.99999672E-01 | 9.99999675E-01 | 9.99999678E-01 | 9.99999687E-01 | 9.99999701E-01 | 9.99999665E-01 | 9.99999663E-01 | 9.99999670E-01 |
| 5 | | 10 V | 10.000 00 | | 9.99999820E+00 | 9.99999815E+00 | 9.99999843E+00 | 9.99999845E+00 | 9.99999878E+00 | 9.99999892E+00 | 9.99999887E+00 | 9.99999873E+00 | 9.99999831E+00 | 9.99999859E+00 | |
| 6 | | 100 V | 100.000 00 | | 9.99999816E+01 | 9.99999833E+01 | 9.99999779E+01 | 9.99999770E+01 | 9.99999765E+01 | 9.99999800E+01 | 9.99999766E+01 | 9.99999754E+01 | 9.99999710E+01 | 9.99999735E+01 | |
| 7 | 1 000 V | 1 000.000 00 | 1.00000195E+03 | 1.00000085E+03 | 1.00000109E+03 | 1.00000132E+03 | 1.00000150E+03 | 1.00000162E+03 | 1.00000174E+03 | 1.00000185E+03 | 1.00000195E+03 | 1.00000207E+03 | | | |
| 8 | Voltaje CA | 0.1 V | 0.100 00 | 300 Hz | 9.99960286E-02 | 9.99952835E-02 | 9.99943714E-02 | 9.99969307E-02 | 9.99949017E-02 | 9.99945255E-02 | 9.99960045E-02 | 9.99936482E-02 | 9.99949572E-02 | 9.99946941E-02 | |
| 9 | | 0.1 V | 0.100 00 | 10 kHz | 9.99970417E-02 | 9.99968330E-02 | 9.99993937E-02 | 9.99985643E-02 | 1.00000483E-01 | 9.99977844E-02 | 1.00002016E-01 | 9.99982386E-02 | 9.99991863E-02 | 9.99985665E-02 | |
| 10 | | 0.1 V | 0.100 00 | 100 kHz | 9.99849553E-02 | 9.99857246E-02 | 9.99850425E-02 | 9.99840963E-02 | 9.99847241E-02 | 9.99838508E-02 | 9.99857694E-02 | 9.99865136E-02 | 9.99869637E-02 | 9.99858405E-02 | |
| 11 | | 1 V | 1.000 00 | 300 Hz | 9.99967598E-01 | 9.99967339E-01 | 9.99968262E-01 | 9.99967179E-01 | 9.99966507E-01 | 9.99964794E-01 | 9.99966980E-01 | 9.99967373E-01 | 9.99965219E-01 | 9.99966418E-01 | |
| 12 | | 1 V | 1.000 00 | 1 kHz | 9.99985430E-01 | 9.99978980E-01 | 9.99982513E-01 | 9.99978871E-01 | 9.99981202E-01 | 9.99978077E-01 | 9.99981112E-01 | 9.99981038E-01 | 9.99981860E-01 | 9.99980647E-01 | |
| 13 | | 1 V | 1.000 00 | 10 kHz | 9.99965717E-01 | 9.99965473E-01 | 9.99964176E-01 | 9.99960571E-01 | 9.99962698E-01 | 9.99963832E-01 | 9.99963199E-01 | 9.99964771E-01 | 9.99958066E-01 | 9.99962202E-01 | |
| 14 | | 1 V | 1.000 00 | 100 kHz | 1.00014732E+00 | 1.00014849E+00 | 1.00015163E+00 | 1.00014923E+00 | 1.00014871E+00 | 1.00014948E+00 | 1.00014946E+00 | 1.00014881E+00 | 1.00014844E+00 | 1.00014438E+00 | |
| 15 | | 1 V | 1.000 00 | 1 000 kHz | 1.00726717E+00 | 1.00727234E+00 | 1.00727635E+00 | 1.00726666E+00 | 1.00727460E+00 | 1.00727654E+00 | 1.00726787E+00 | 1.00727457E+00 | 1.00728030E+00 | 1.00727010E+00 | |
| 16 | | 10 V | 10.000 00 | 10 Hz | 1.00002620E+01 | 1.00001918E+01 | 1.00001229E+01 | 1.00002215E+01 | 1.00002003E+01 | 1.00001801E+01 | 1.00000961E+01 | 1.00001096E+01 | 1.00001806E+01 | 1.00002090E+01 | |
| 17 | | 10 V | 10.000 00 | 300 Hz | 9.99984365E+00 | 9.99982129E+00 | 9.99981668E+00 | 9.99983275E+00 | 9.99982676E+00 | 9.99982691E+00 | 9.99982624E+00 | 9.99981120E+00 | 9.99982244E+00 | 9.99983118E+00 | |
| 18 | | 10 V | 10.000 00 | 10 kHz | 9.99974060E+00 | 9.99973524E+00 | 9.99972777E+00 | 9.99972179E+00 | 9.99973672E+00 | 9.99972519E+00 | 9.99971166E+00 | 9.99972316E+00 | 9.99971804E+00 | 9.99972531E+00 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|----|--------------|---------|---------------|-----------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| 19 | | 10 V | 10.0000 | 100 kHz | 9.99807874E+00 | 9.99806759E+00 | 9.99805813E+00 | 9.99806332E+00 | 9.99806166E+00 | 9.99805753E+00 | 9.99807030E+00 | 9.99807270E+00 | 9.99808090E+00 | 9.99804264E+00 |
| 20 | | 10 V | 10.0000 | 1 000 kHz | 1.00590648E+01 | 1.00590197E+01 | 1.00590441E+01 | 1.00591263E+01 | 1.00591124E+01 | 1.00590541E+01 | 1.00591108E+01 | 1.00591734E+01 | 1.00591401E+01 | 1.00590962E+01 |
| 21 | | 100 V | 100.0000 | 55 Hz | 9.99993854E+01 | 9.99993888E+01 | 9.99993919E+01 | 9.99991979E+01 | 9.99993370E+01 | 9.99994523E+01 | 9.99990565E+01 | 9.99994730E+01 | 9.99992916E+01 | 9.99991276E+01 |
| 22 | | 100 V | 100.0000 | 1 kHz | 1.00000678E+02 | 1.00000703E+02 | 1.00000609E+02 | 1.00000607E+02 | 1.00000690E+02 | 1.00000629E+02 | 1.00000669E+02 | 1.00000730E+02 | 1.00000745E+02 | 1.00000659E+02 |
| 23 | | 100 V | 100.0000 | 100 kHz | 1.00028976E+02 | 1.00028847E+02 | 1.00028439E+02 | 1.00028865E+02 | 1.00028753E+02 | 1.00028604E+02 | 1.00028447E+02 | 1.00028614E+02 | 1.00028640E+02 | 1.00028607E+02 |
| 24 | | 100 V | 57.7000 | 60 Hz | 5.76990166E+01 | 5.76993100E+01 | 5.76992624E+01 | 5.76990710E+01 | 5.76992428E+01 | 5.76992251E+01 | 5.76993733E+01 | 5.76992425E+01 | 5.76992948E+01 | 5.76992535E+01 |
| 25 | | 100 V | 69.3000 | 60 Hz | 6.92985487E+01 | 6.92984786E+01 | 6.92985858E+01 | 6.92987584E+01 | 6.92989592E+01 | 6.92988219E+01 | 6.92984374E+01 | 6.92985403E+01 | 6.92988550E+01 | 6.92985355E+01 |
| 26 | | 100 V | 100.0000 | 60 Hz | 9.99990347E+01 | 9.99989178E+01 | 9.99992527E+01 | 9.99991611E+01 | 9.99992726E+01 | 9.99993906E+01 | 9.99991944E+01 | 9.99993703E+01 | 9.99990852E+01 | 9.99992860E+01 |
| 27 | | 1 000 V | 120.0000 | 60 Hz | 1.20004045E+02 | 1.20003664E+02 | 1.20003439E+02 | 1.20005245E+02 | 1.20003347E+02 | 1.20003085E+02 | 1.20003797E+02 | 1.20005703E+02 | 1.20005145E+02 | 1.20005885E+02 |
| 28 | | 1 000 V | 138.6000 | 60 Hz | 1.38599396E+02 | 1.38598417E+02 | 1.38598036E+02 | 1.38598949E+02 | 1.38601123E+02 | 1.38597796E+02 | 1.38601353E+02 | 1.38598338E+02 | 1.38599617E+02 | 1.38601898E+02 |
| 29 | | 1 000 V | 240.0000 | 60 Hz | 2.40004901E+02 | 2.40001029E+02 | 2.40004142E+02 | 2.40005037E+02 | 2.40003795E+02 | 2.40003441E+02 | 2.40002924E+02 | 2.40002762E+02 | 2.40001955E+02 | 2.40004115E+02 |
| 30 | Corriente CD | 0.01 A | 0.010 00 | -- | 9.99999618E-03 | 9.99999906E-03 | 9.99999446E-03 | 9.99999920E-03 | 1.00000001E-02 | 1.00000013E-02 | 9.99999790E-03 | 1.00000060E-02 | 1.00000064E-02 | 1.00000011E-02 |
| 31 | | 0.1 A | 0.100 00 | -- | 9.99997280E-02 | 9.99997581E-02 | 9.99997169E-02 | 9.99997518E-02 | 9.99997343E-02 | 9.99997058E-02 | 9.99997661E-02 | 9.99996899E-02 | 9.99996883E-02 | 9.99997359E-02 |
| 32 | | 1 A | 1.000 00 | => 1 min | 9.99993930E-01 | 9.99993655E-01 | 9.99993295E-01 | 9.99992953E-01 | 9.99993604E-01 | 9.99992884E-01 | 9.99992730E-01 | 9.99992901E-01 | 9.99992867E-01 | 9.99992490E-01 |
| 33 | Corriente CA | 0.01 A | 0.010 00 | 300 Hz | 1.00005441E-02 | 1.00005384E-02 | 1.00005407E-02 | 1.00005552E-02 | 1.00005343E-02 | 1.00005164E-02 | 1.00005248E-02 | 1.00005529E-02 | 1.00005218E-02 | 1.00005233E-02 |
| 34 | | 0.01 A | 0.010 00 | 5 kHz | 1.00011692E-02 | 1.00011818E-02 | 1.00011498E-02 | 1.00011404E-02 | 1.00011564E-02 | 1.00011412E-02 | 1.00011434E-02 | 1.00011503E-02 | 1.00011432E-02 | 1.00011480E-02 |
| 35 | | 0.1 A | 0.100 00 | 1 kHz | 1.00008684E-01 | 1.00008724E-01 | 1.00008744E-01 | 1.00008667E-01 | 1.00008618E-01 | 1.00008816E-01 | 1.00008756E-01 | 1.00008725E-01 | 1.00008716E-01 | 1.00008780E-01 |
| 36 | | 1 A | 1.000 00 | 55 Hz | 9.99962105E-01 | 9.99960682E-01 | 9.99960936E-01 | 9.99959853E-01 | 9.99959349E-01 | 9.99958288E-01 | 9.99957959E-01 | 9.99956847E-01 | 9.99954177E-01 | 9.99953262E-01 |
| 37 | | 1 A | 1.000 00 | 300 Hz | 1.00004230E+00 | 1.00004264E+00 | 1.00004209E+00 | 1.00004299E+00 | 1.00004460E+00 | 1.00004210E+00 | 1.00004378E+00 | 1.00004191E+00 | 1.00004135E+00 | 1.00004207E+00 |
| 38 | | 1 A | 1.000 00 | 5 kHz | 1.00087353E+00 | 1.00087118E+00 | 1.00087100E+00 | 1.00087088E+00 | 1.00087161E+00 | 1.00087056E+00 | 1.00086961E+00 | 1.00086849E+00 | 1.00086885E+00 | 1.00086980E+00 |
| 39 | Resistencia | 1 Ω | 0.000 00 | N/A | -1.01272078E-05 | -2.34259255E-06 | 8.64957250E-06 | 2.09031336E-06 | 9.85690867E-06 | 3.42378912E-07 | -7.80263520E-06 | 3.18952986E-06 | -5.82044150E-06 | -3.13547003E-06 |
| 39 | | 10 Ω | 1.000 000 0 | | 1.00004725E+00 | 1.00004948E+00 | 1.00004570E+00 | 1.00004683E+00 | 1.00003427E+00 | 1.00005665E+00 | 1.00004144E+00 | 1.00003970E+00 | 1.00004883E+00 | 1.00005229E+00 |
| 40 | | 10 Ω | 10.000 000 0 | | 9.99988716E+00 | 9.99988724E+00 | 9.99987747E+00 | 9.99987923E+00 | 9.99987619E+00 | 9.99987325E+00 | 9.99987978E+00 | 9.99987835E+00 | 9.99987170E+00 | 9.99987868E+00 |
| 41 | | 100 Ω | 100.000 000 0 | | 1.00009497E+02 | 1.00009434E+02 | 1.00009511E+02 | 1.00009494E+02 | 1.00009587E+02 | 1.00009491E+02 | 1.00009558E+02 | 1.00009498E+02 | 1.00009584E+02 | 1.00009550E+02 |
| 42 | | 1 kΩ | 1.000 000 0 | | 1.00003214E+03 | 1.00003219E+03 | 1.00003203E+03 | 1.00003207E+03 | 1.00003217E+03 | 1.00003228E+03 | 1.00003231E+03 | 1.00003237E+03 | 1.00003241E+03 | 1.00003245E+03 |
| 43 | | 10 kΩ | 10.000 000 0 | | 1.00000755E+04 | 1.00000762E+04 | 1.00000750E+04 | 1.00000736E+04 | 1.00000759E+04 | 1.00000754E+04 | 1.00000756E+04 | 1.00000773E+04 | 1.00000761E+04 | 1.00000767E+04 |
| 44 | | 100 kΩ | 100.000 000 0 | | 9.99990065E+04 | 9.99990080E+04 | 9.99990173E+04 | 9.99990044E+04 | 9.99990055E+04 | 9.99990119E+04 | 9.99990123E+04 | 9.99990137E+04 | 9.99990145E+04 | 9.99990051E+04 |

| | | | | | | | | | | | | |
|----|--------|------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 45 | 1 MΩ | 1.000 000 0 | 9.99973560E+05 | 9.99973786E+05 | 9.99973923E+05 | 9.99973945E+05 | 9.99973963E+05 | 9.99974067E+05 | 9.99974075E+05 | 9.99974057E+05 | 9.99974100E+05 | 9.99974183E+05 |
| 46 | 10 MΩ | 10.000 000 0 | 9.99879654E+06 | 9.99880105E+06 | 9.99880429E+06 | 9.99880666E+06 | 9.99880512E+06 | 9.99880458E+06 | 9.99880573E+06 | 9.99880616E+06 | 9.99880710E+06 | 9.99880782E+06 |
| 47 | 100 MΩ | 100.000 000 0 | 1.00019553E+08 | 1.00019139E+08 | 1.00019165E+08 | 1.00019095E+08 | 1.00019274E+08 | 1.00019113E+08 | 1.00019069E+08 | 1.00019183E+08 | 1.00019309E+08 | 1.00019113E+08 |

Tabla A.2 Mediciones tomadas en la calibración con dispositivo de aislamiento capacitivo

| Punto No. | Función | Escala obj. Bajo prueba | Valor generado por el patrón | Variable Independiente | Observaciones Consecutivas: | | | | | | | | | |
|-----------|------------|-------------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | Voltaje CD | 0.1 V | 0.000 00 | N/A | -1.50468840E-07 | -1.71713565E-07 | -1.59072076E-07 | -1.33964673E-07 | -1.72591447E-07 | -1.54155941E-07 | -1.65568397E-07 | -1.36247164E-07 | -1.86988699E-07 | -1.96820968E-07 |
| 1 | | 0.1 V | 0.001 00 | | 1.00003048E-03 | 9.99970788E-04 | 9.99907229E-04 | 9.99868251E-04 | 9.99844899E-04 | 9.99815403E-04 | 9.99845602E-04 | 9.99845602E-04 | 9.99815578E-04 | 9.99836823E-04 |
| 2 | | 0.1 V | 0.010 00 | | 9.99991014E-03 | 9.99985694E-03 | 9.99983587E-03 | 9.99984219E-03 | 9.99983727E-03 | 9.99983236E-03 | 9.99983078E-03 | 9.99981621E-03 | 9.99983166E-03 | 9.99979584E-03 |
| 3 | | 0.1 V | 0.100 00 | | 9.99998715E-02 | 9.99998485E-02 | 9.99998715E-02 | 9.99999004E-02 | 9.99998903E-02 | 9.99999038E-02 | 9.99998960E-02 | 9.99998727E-02 | 9.99998792E-02 | 9.99999076E-02 |
| 4 | | 1 V | 1.000 00 | | 1.00000047E+00 | 1.00000040E+00 | 1.00000044E+00 | 1.00000046E+00 | 1.00000046E+00 | 1.00000051E+00 | 1.00000051E+00 | 1.00000045E+00 | 1.00000047E+00 | 1.00000052E+00 |
| 5 | | 10 V | 10.000 00 | | 9.99999816E+00 | 9.99999820E+00 | 9.99999811E+00 | 9.99999850E+00 | 9.99999851E+00 | 9.99999848E+00 | 9.99999883E+00 | 9.99999857E+00 | 9.99999860E+00 | 9.99999850E+00 |
| 6 | | 100 V | 100.000 00 | | 9.99999593E+01 | 9.99999506E+01 | 9.99999581E+01 | 9.99999576E+01 | 9.99999537E+01 | 9.99999483E+01 | 9.99999507E+01 | 9.99999511E+01 | 9.99999583E+01 | 9.99999567E+01 |
| 7 | 1 000 V | 1 000.000 00 | 1.00000092E+03 | 9.99999814E+02 | 9.99999986E+02 | 1.00000016E+03 | 1.00000034E+03 | 1.00000049E+03 | 1.00000062E+03 | 1.00000071E+03 | 1.00000081E+03 | 1.00000091E+03 | | |
| 8 | Voltaje CA | 0.1 V | 0.100 00 | 300 Hz | 1.00001352E-01 | 1.00003074E-01 | 1.00002772E-01 | 1.00002660E-01 | 1.00001013E-01 | 1.00001525E-01 | 1.00002531E-01 | 1.00001345E-01 | 1.00002352E-01 | 1.00005338E-01 |
| 9 | | 0.1 V | 0.100 00 | 10 kHz | 1.00007687E-01 | 1.00006267E-01 | 1.00005450E-01 | 1.00004890E-01 | 1.00007283E-01 | 1.00009737E-01 | 1.00008124E-01 | 1.00008378E-01 | 1.00008573E-01 | 1.00004953E-01 |
| 10 | | 0.1 V | 0.100 00 | 100 kHz | 9.99954475E-02 | 9.99944057E-02 | 9.99972776E-02 | 9.99969925E-02 | 9.99966351E-02 | 9.99923693E-02 | 9.99941203E-02 | 9.99915694E-02 | 9.99938521E-02 | 9.99944522E-02 |
| 11 | | 1 V | 1.000 00 | 300 Hz | 1.00002636E+00 | 1.00002552E+00 | 1.00002672E+00 | 1.00002691E+00 | 1.00002444E+00 | 1.00002644E+00 | 1.00002319E+00 | 1.00002164E+00 | 1.00002551E+00 | 1.00002275E+00 |
| 12 | | 1 V | 1.000 00 | 1 kHz | 1.00004125E+00 | 1.00003785E+00 | 1.00004286E+00 | 1.00004146E+00 | 1.00004092E+00 | 1.00003547E+00 | 1.00003822E+00 | 1.00003696E+00 | 1.00003852E+00 | 1.00003661E+00 |
| 13 | | 1 V | 1.000 00 | 10 kHz | 1.00002362E+00 | 1.00001993E+00 | 1.00002073E+00 | 1.00002426E+00 | 1.00002202E+00 | 1.00002359E+00 | 1.00002494E+00 | 1.00002074E+00 | 1.00002342E+00 | 1.00002413E+00 |
| 14 | | 1 V | 1.000 00 | 100 kHz | 1.00021017E+00 | 1.00020911E+00 | 1.00021212E+00 | 1.00021525E+00 | 1.00021270E+00 | 1.00020860E+00 | 1.00020805E+00 | 1.00021193E+00 | 1.00021105E+00 | 1.00020726E+00 |
| 15 | | 1 V | 1.000 00 | 1 000 kHz | 1.00738291E+00 | 1.00739283E+00 | 1.00739557E+00 | 1.00739508E+00 | 1.00739327E+00 | 1.00740083E+00 | 1.00739488E+00 | 1.00739227E+00 | 1.00739425E+00 | 1.00738820E+00 |
| 16 | | 10 V | 10.000 00 | 10 Hz | 1.00006361E+01 | 1.00004526E+01 | 1.00005569E+01 | 1.00004465E+01 | 1.00004891E+01 | 1.00006125E+01 | 1.00006075E+01 | 1.00006631E+01 | 1.00005759E+01 | 1.00006882E+01 |
| 17 | | 10 V | 10.000 00 | 300 Hz | 1.00002077E+01 | 1.00002157E+01 | 1.00002099E+01 | 1.00002041E+01 | 1.00002126E+01 | 1.00002089E+01 | 1.00002284E+01 | 1.00002139E+01 | 1.00002227E+01 | 1.00002237E+01 |
| 18 | | 10 V | 10.000 00 | 10 kHz | 1.00002204E+01 | 1.00002086E+01 | 1.00002097E+01 | 1.00002041E+01 | 1.00002143E+01 | 1.00002330E+01 | 1.00002232E+01 | 1.00001923E+01 | 1.00001743E+01 | 1.00001916E+01 |
| 19 | | 10 V | 10.000 00 | 100 kHz | 9.99861697E+00 | 9.99860791E+00 | 9.99861963E+00 | 9.99860514E+00 | 9.99861466E+00 | 9.99857199E+00 | 9.99861793E+00 | 9.99859976E+00 | 9.99859964E+00 | 9.99858714E+00 |
| 20 | | 10 V | 10.000 00 | 1 000 kHz | 1.00601016E+01 | 1.00601612E+01 | 1.00601228E+01 | 1.00601658E+01 | 1.00601768E+01 | 1.00601526E+01 | 1.00601732E+01 | 1.00601481E+01 | 1.00601773E+01 | 1.00601507E+01 |
| 21 | | 100 V | 100.000 00 | 55 Hz | 1.00005996E+02 | 1.00005885E+02 | 1.00005825E+02 | 1.00005944E+02 | 1.00005878E+02 | 1.00005838E+02 | 1.00005930E+02 | 1.00005974E+02 | 1.00005717E+02 | 1.00005690E+02 |
| 22 | 100 V | 100.000 00 | 1 kHz | 1.00006935E+02 | 1.00006866E+02 | 1.00006791E+02 | 1.00006996E+02 | 1.00006860E+02 | 1.00006903E+02 | 1.00006945E+02 | 1.00006851E+02 | 1.00006755E+02 | 1.00006951E+02 | |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----------------|------------|------------------|----------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| 23 | | 100 V | 100.000 00 | 100 kHz | 1.00030310E+02 | 1.00030348E+02 | 1.00030034E+02 | 1.00029848E+02 | 1.00030241E+02 | 1.00030006E+02 | 1.00029855E+02 | 1.00030055E+02 | 1.00029945E+02 | 1.00029798E+02 | |
| 24 | | 100 V | 57.700 00 | 60 Hz | 5.77030155E+01 | 5.77030311E+01 | 5.77028916E+01 | 5.77029748E+01 | 5.77029899E+01 | 5.77027504E+01 | 5.77027953E+01 | 5.77026469E+01 | 5.77029001E+01 | 5.77026316E+01 | |
| 25 | | 100 V | 69.300 00 | 60 Hz | 6.93028838E+01 | 6.93028995E+01 | 6.93027965E+01 | 6.93027340E+01 | 6.93028624E+01 | 6.93030228E+01 | 6.93027957E+01 | 6.93030993E+01 | 6.93029021E+01 | 6.93028696E+01 | |
| 26 | | 100 V | 100.000 00 | 60 Hz | 1.00005148E+02 | 1.00005054E+02 | 1.00005262E+02 | 1.00005335E+02 | 1.00005408E+02 | 1.00005147E+02 | 1.00005318E+02 | 1.00005112E+02 | 1.00005157E+02 | 1.00005268E+02 | |
| 27 | | 1 000 V | 120.000 00 | 60 Hz | 1.20005778E+02 | 1.20004450E+02 | 1.20003647E+02 | 1.20005419E+02 | 1.20004636E+02 | 1.20006201E+02 | 1.20003805E+02 | 1.20006249E+02 | 1.20004687E+02 | 1.20005495E+02 | |
| 28 | | 1 000 V | 138.600 00 | 60 Hz | 1.38600354E+02 | 1.38599907E+02 | 1.38603042E+02 | 1.38602126E+02 | 1.38601326E+02 | 1.38599684E+02 | 1.38599665E+02 | 1.38600759E+02 | 1.38601486E+02 | 1.38601473E+02 | |
| 29 | | 1 000 V | 240.000 00 | 60 Hz | 2.40003065E+02 | 2.40004006E+02 | 2.40002724E+02 | 2.40004430E+02 | 2.40003770E+02 | 2.40002587E+02 | 2.40001231E+02 | 2.40001913E+02 | 2.40002154E+02 | 2.40002884E+02 | |
| 30 | Corriente CD | 0.01 A | 0.010 00 | -- | 9.99985808E-03 | 9.99986114E-03 | 9.99985948E-03 | 9.99986326E-03 | 9.99986451E-03 | 9.99985882E-03 | 9.99986016E-03 | 9.99985461E-03 | 9.99985658E-03 | 9.99985523E-03 | |
| 31 | | 0.1 A | 0.100 00 | -- | 9.99992261E-02 | 9.99992261E-02 | 9.99992325E-02 | 9.99992198E-02 | 9.99992388E-02 | 9.99992277E-02 | 9.99992452E-02 | 9.99992118E-02 | 9.99992420E-02 | 9.99992531E-02 | |
| 32 | | 1 A | 1.000 00 | => 1 min | 9.99986944E-01 | 9.99986584E-01 | 9.99986378E-01 | 9.99986618E-01 | 9.99986155E-01 | 9.99985864E-01 | 9.99985898E-01 | 9.99986018E-01 | 9.99985932E-01 | 9.99986087E-01 | |
| 33 | Corriente CA | 0.01 A | 0.010 00 | 300 Hz | 1.00005999E-02 | 1.00006116E-02 | 1.00006016E-02 | 1.00006194E-02 | 1.00006092E-02 | 1.00006205E-02 | 1.00006076E-02 | 1.00006084E-02 | 1.00006143E-02 | 1.00006321E-02 | |
| 34 | | 0.01 A | 0.010 00 | 5 kHz | 1.00013086E-02 | 1.00013205E-02 | 1.00013108E-02 | 1.00013351E-02 | 1.00013431E-02 | 1.00013299E-02 | 1.00013261E-02 | 1.00013206E-02 | 1.00012996E-02 | 1.00013068E-02 | |
| 35 | | 0.1 A | 0.100 00 | 1 kHz | 1.00010759E-01 | 1.00010828E-01 | 1.00010853E-01 | 1.00010752E-01 | 1.00010904E-01 | 1.00010770E-01 | 1.00010814E-01 | 1.00010872E-01 | 1.00011025E-01 | 1.00010895E-01 | |
| 36 | | 1 A | 1.000 00 | 55 Hz | 9.99973644E-01 | 9.99973672E-01 | 9.99973033E-01 | 9.99971978E-01 | 9.99972932E-01 | 9.99971875E-01 | 9.99971585E-01 | 9.99970213E-01 | 9.99971002E-01 | 9.99968808E-01 | |
| 37 | | 1 A | 1.000 00 | 300 Hz | 1.00005622E+00 | 1.00005708E+00 | 1.00005682E+00 | 1.00005858E+00 | 1.00005838E+00 | 1.00005539E+00 | 1.00005484E+00 | 1.00005549E+00 | 1.00005608E+00 | 1.00005480E+00 | |
| 38 | | 1 A | 1.000 00 | 5 kHz | 1.00088228E+00 | 1.00088361E+00 | 1.00088383E+00 | 1.00088079E+00 | 1.00088207E+00 | 1.00087731E+00 | 1.00087684E+00 | 1.00087673E+00 | 1.00087712E+00 | 1.00087550E+00 | |
| 39 | Resistencia | 1 Ω | 0.000 00 | | -8.61351196E-06 | ##### | -3.62199980E-06 | -9.85688502E-06 | 5.60418874E-06 | -3.08140281E-06 | 1.06137208E-05 | 1.20733327E-06 | 8.10895477E-07 | -4.61309427E-06 | |
| 39 | | 10 Ω | 1.000 000 0 | | 1.00003305E+00 | 1.00002719E+00 | 1.00002270E+00 | 1.00002722E+00 | 1.00002726E+00 | 1.00002841E+00 | 1.00003187E+00 | 1.00002886E+00 | 1.00002933E+00 | 1.00003063E+00 | |
| 40 | | 10 Ω | 10.000 000 0 | | 9.99989356E+00 | 9.99988727E+00 | 9.99988244E+00 | 9.99988511E+00 | 9.99988150E+00 | 9.99988716E+00 | 9.99988096E+00 | 9.99988500E+00 | 9.99989651E+00 | 9.99987671E+00 | |
| 41 | | 100 Ω | 100.000 000 0 | | 1.00009484E+02 | 1.00009514E+02 | 1.00009493E+02 | 1.00009513E+02 | 1.00009481E+02 | 1.00009514E+02 | 1.00009487E+02 | 1.00009389E+02 | 1.00009515E+02 | 1.00009751E+02 | |
| 42 | | 1 kΩ | 1.000 000 0 | | 1.00003263E+03 | 1.00003272E+03 | 1.00003275E+03 | 1.00003285E+03 | 1.00003293E+03 | 1.00003290E+03 | 1.00003290E+03 | 1.00003296E+03 | 1.00003295E+03 | 1.00003300E+03 | |
| 43 | | 10 kΩ | 10.000 000 0 | | 1.00000916E+04 | 1.00000929E+04 | 1.00000931E+04 | 1.00000930E+04 | 1.00000923E+04 | 1.00000923E+04 | 1.00000923E+04 | 1.00000933E+04 | 1.00000932E+04 | 1.00000921E+04 | 1.00000924E+04 |
| 44 | | 100 kΩ | 100.000 000 0 | | 9.99991569E+04 | 9.99991515E+04 | 9.99991547E+04 | 9.99991659E+04 | 9.99991543E+04 | 9.99991587E+04 | 9.99991605E+04 | 9.99991482E+04 | 9.99991547E+04 | 9.99991482E+04 | |
| 45 | | 1 MΩ | 1.000 000 0 | | 9.99974506E+05 | 9.99974697E+05 | 9.99975060E+05 | 9.99974938E+05 | 9.99974913E+05 | 9.99974959E+05 | 9.99974877E+05 | 9.99975150E+05 | 9.99975049E+05 | 9.99975082E+05 | |
| 46 | | 10 MΩ | 10.000 000 0 | | 9.99879362E+06 | 9.99879891E+06 | 9.99879920E+06 | 9.99880194E+06 | 9.99880302E+06 | 9.99880417E+06 | 9.99880593E+06 | 9.99880665E+06 | 9.99880752E+06 | 9.99880863E+06 | |
| 47 | | 100 MΩ | 100.000 000 0 | | 1.00024889E+08 | 1.00024776E+08 | 1.00024627E+08 | 1.00024549E+08 | 1.00024588E+08 | 1.00024453E+08 | 1.00024610E+08 | 1.00024575E+08 | 1.00024828E+08 | 1.00024915E+08 | |

Anexo1

ANSI/IEEE Std 488.1-1987

(Revision of ANSI/IEEE Std.488-1978)

An American National Standard

IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation

Sponsor

**Automated Instrumentation Technical Committee
of the
IEEE Instrumentation and Measurement Society**

Approved June 11, 1987

IEEE Standards Board

Approved February 2, 1988

American National Standards Institute

ISBN 471-62222-2

© Copyright 1988 by

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc

345 East 47th Street, New York, NY 10017, USA

No part of this publication may be reproduced in any form, in an electronic retrieval system or otherwise, without the prior written permission of the publisher.

| P3 | P2 | P1 | PPR Message |
|----|----|----|-------------|
| 0 | 0 | 0 | PPR1 |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| . | . | . | . |
| 1 | 1 | 1 | PPR8 |

7 — D1-D4 specify don't-care bits that shall not be decoded by the receiving device. It is recommended that all zeroes be sent.

8 — S1-S6, S8 specify the device dependent status. (DIO7 is used for the RQS message.)

9 — The source of the message on the ATN line is always the C function, whereas the messages on the DIO and EOI lines are enabled by the T function.

10 — The source of the messages on the ATN and EOI lines is always the C function, whereas the source of the messages on the DIO lines is always the PP function.

11 — This code is provided for system use, see 6.3.

2.13.7.2 Device Dependent Messages

The specific coding of device dependent messages is beyond the scope of this standard. After a talker and listener(s) have been addressed via interface messages, any commonly understood binary, BCD, or alphanumeric code may be used when the ATN message is false.

- 1) The alphanumeric codes (dense subset of the ISO code, columns 2 through 5) are preferred for communication of the device dependent messages wherever possible. Bit 1 through bit 7 of the ISO code corresponds to DIO1-DIO7.
- 2) When other codes are used (for example, binary) the most significant bit should be placed on the DIO line that has the highest number (for example, DIO8 for bit 8).

The ISO code is further illustrated in Appendix E as it correlates with the codes of this standard.

2.13.8 State Transition Timing Values

The T_x and t_y values listed in Section 2 throughout the interface function descriptions and state diagrams are defined in 3.8.

3. Electrical Specifications

3.1 Application

This section defines the electrical specifications for interface systems to be used in environments where:

- 1) Physical distance between devices is short
- 2) Electrical noise is relatively low

All electrical specifications for the driver and receiver circuits are based on the use of transistor transistor logic (TTL) technology.

NOTES:

- 1 — Interface function circuitry connected to the drivers or receivers may be implemented in other device technologies at the designer's choice.
- 2 — Driver and receiver devices need only be used on those signal lines required for the interface functions implemented (see 3.5.1 for termination requirements).
- 3 — Either open collector or three-state drivers may be used as determined by data rate considerations of 3.3 and 5.2.

3.2 Logical and Electrical State Relationships

The relationship between the logical states defined in Table , Remote Message Coding, and the electrical state levels present on the signal lines is as follows:

| Coding Logical State | Electrical Signal Levels |
|----------------------|---|
| 0 | corresponds to $\geq +2.0$ V, called high state |
| 1 | corresponds to $\leq +0.8$ V, called low state |

The high and low states are based on standard TTL levels for which the power source does not exceed +5.25 V dc and is referenced to logic ground.

This section indicates current flow into a node with a positive sign and current flow out of a node with a negative sign.

3.3 Driver Requirements

Messages may be sent in either an active or passive manner over the interface (see 2.1.3). All passive true message transfer occurs the high state and shall be carried on a signal line using open collector drivers.

3.3.1 Driver Types

Open collector drivers shall be used to drive the SRQ, NRFD, and NDAC signal lines.

Open collector drivers or three-state drivers may be used to drive DIO 1-8, DAV, IFC, ATN, REN, and EOI signal lines with this exception: DIO1-8 shall use open collector drivers for parallel polling applications (see 2.9.3.3).

NOTE — Three-state drivers are useful for systems where higher speed operation is required

It is recommended that a three-state driver be used within a controller to drive the ATN signal line if the controller is intended to be used in a system in which other devices are implemented with three-state drivers on the DIO, DAV, and EOI signal lines.

3.3.2 Driver Specifications

The specifications for drivers shall be as follows:

Low state: Output voltage (three-state or open collector drivers) $< +0.5$ V at +48 mA sink current

The driver shall be capable of sinking 48 mA continuously.

High state: Output voltage (three-state) $\geq +2.4$ V at -5.2 mA

Output voltage (open collector) (see 3.5)

The indicated voltage values are measured at the device connector between the signal line and logic ground.

See 3.5.3 for additional requirements which may apply to the driver.

3.4 Receiver Requirements

3.4.1 Receiver Specifications, Allowed

The specification for receivers with nominal noise immunity shall be as follows:

Low state: Input voltage $\leq +0.8$ V

High state: Input voltage $\geq +2.0$ V

See 3.5.3 for additional requirements which may apply to the receiver.

3.4.2 Receiver Specifications, Preferred

To provide added noise immunity, the use of Schmitt-type receiver circuits (or equivalent) for all signal lines is recommended. The specifications for these receivers shall be as follows:

Hysteresis: $V_t \text{ pos} - V_t \text{ neg} \geq +0.4$ V

Low state: Negative going threshold voltage $V_t \text{ neg} \geq +0.8$ V

High state: Positive going threshold voltage $+2.0 \geq V_t \text{ pos}$

3.5 Composite Device Load Requirements

3.5.1 Resistive Termination

Each signal line (whether or not it is connected to a driver or receiver) shall be terminated within the device by a resistive load whose major purpose is to establish a steady-state voltage when all drivers on a line are in the high-impedance state. This load is also used to maintain a uniform device impedance on the line and improve noise immunity. For specific requirements see the last paragraph of 3.5.3, and for typical resistive values see 3.5.5.

3.5.2 Negative Voltage Clamping

Each signal line to which a receiver is connected shall be provided with means to limit the negative voltage excursions. Typically this circuit element is a diode clamp contained within the receiver component.

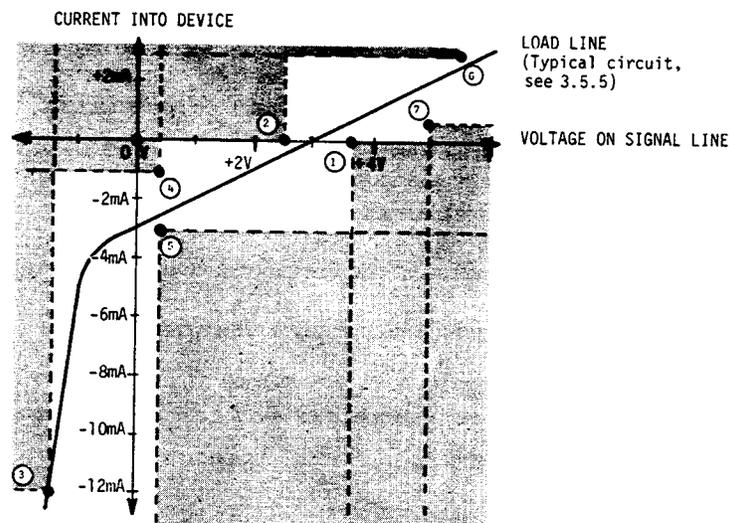
3.5.3 DC Load Requirements

The dc load characteristics of a device are affected by the driver and receiver circuits as well as the resistive termination and voltage clamping circuits; therefore they are specified for the composite device interface circuits not for the individual components. This section, however, provides complete specifications for the resistive termination and voltage clamping circuits.

Load measurement conditions assume that the receiver, driver, and resistive termination circuits are connected together within the device with the driver in the high-impedance state.

Each signal line interface within a device shall have the following dc load characteristics and shall fall within the unshaded area of Fig 15.

- 1) If $I \leq 0$ mA, V shall be < 3.7 V
- 2) If $I \geq 0$ mA, V shall be > 2.5 V
- 3) If $I \geq 12.0$ mA, V shall be > -1.5 V (only if receiver exists)
- 4) If $V \leq 0.4$ V, I shall be $< +1.3$ mA
- 5) If $V \geq 0.4$ V, I shall be > -3.2 mA
- 6) If $V \leq 5.5$ V, I shall be < 2.5 mA
- 7) If $V \geq 5.0$ V, I shall be > 0.7 mA or the small-signal Z shall be < 2 k Ω at 1 MHz



NOTE: The slope of the dc load line should, in general, correspond to a resistance not in excess of 3 k Ω .

Figure 15—DC Load Boundary Specification

3.5.4 Capacity Load Limit

The internal capacitance load on each signal line shall not exceed 100 pF within each device (see 5.2).

NOTE — The effect of device capacitance on bus operations is most critical at low voltages. Since the design of driver and receiver circuits may contribute capacitive loads that vary with voltage, the capacitance should be measured at several voltage levels, all below 2 V, with the device powered on.

3.5.5 Typical Circuit Configuration

Figure 16 shows a typical circuit configuration for signal line input-output circuits for which readily available component exist. This basic circuit is compatible with both TTL micro-circuit and discrete element devices. The specifications for this typical configuration are as follows:

- R_{L1} : 3 k $\Omega \pm 5\%$, (to V_{cc})
 R_{L2} : 6.2 k $\Omega \pm 5\%$ (to ground)

Driver: Output leakage current (open collector driver) $+0.25 \text{ mA max at } V_0 = +5.25 \text{ V}$ Output leakage current (three-state driver) $\pm 40 \mu\text{A max at } V_0 = +2.4 \text{ V}$

Receiver: Input current

$-1.6 \text{ mA max at } V_0 = +0.4 \text{ V}$

Input leakage current

$+40 \mu\text{A max at } V_0 = +2.4 \text{ V}$

$+1.0 \text{ mA max at } V_0 = 5.25 \text{ V}$

V_{cc} : $+5 \text{ V} \pm 5\%$

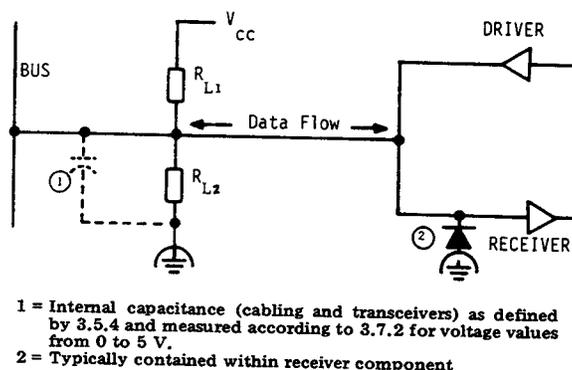


Figure 16—Typical Signal Line Input-Output Circuit

Only a single driver and receiver may be connected to each signal line in the typical configuration of Fig 16. Other configurations may exist in which this restriction does not hold provided the composite device load specifications of 3.5.3 are met.

3.6 Ground Requirements

The overall shield of the interconnecting cable shall be connected through one contact of the connector to frame (safety earth) to minimize susceptibility to and generation of external noise.

WARNING: *Devices should not be operated at significantly different frame potentials. The interface connection system may not be capable of handling excessive ground currents.*

It is recommended that the ground returns of the individual control and status signal lines be connected to logic ground at the logic circuit driver or receiver to minimize cross-talk interference transients.

3.7 Cable Characteristics

3.7.1 Conductor Requirements

The maximum resistance for the cable conductors shall be, per meter of length:

- 1) Each signal line (for example, DIOI, ATN) 0.14Ω
- 2) Each individual signal line ground return 0.14Ω
- 3) Common logic ground return 0.085Ω
- 4) Overall shield 0.0085Ω

3.7.2 Cable Construction

The cable should contain at least 24 conductors of which 16 shall be used for signal lines and the balance used for logic ground returns and overall shield.

The maximum capacitance measured (at 1 kHz) between any signal line and all other lines (signals, grounds, and shield) connected to ground shall be 150 pF per meter.

The shield shall contain a braid of 36 AWG wire or equivalent with at least 85% coverage.

The cable shall be constructed to minimize the effects of cross talk between signal lines, the susceptibility of the signal lines to external noise, and the transmission of interface signals to the external environment.

- 1) Each of the signal lines DAV, NRFD, NDAC, IFC, ATN, EOI, REN, and SRQ shall be twisted with one of the logic ground wires or isolated using an equivalent scheme to minimize cross talk
- 2) The cable shall contain an overall shield carried through the cable assembly and connectors at both ends to be returned to earth ground.
- 3) A cable construction in which twisted pairs contained in the core of the cable and the individual DIO lines contained around the periphery of this core has been found satisfactory as has been the use of twisted pair conductors for all 16 signal lines where each signal line is twisted with an earth conductor.
- 4) Alternately, any other internal cable construction which yields the same results may be used.

3.8 State Transition Timing Values

To ensure maximum possible compatibility among interconnected devices, Table 39 states the mandatory time relationships between critical signal inputs and outputs to a specific device.

The T_1 , $T_6 - T_9$ time values allow for the normal propagation delays of the transmission path and the circuit delays within other devices.

They are measured from the time the source output driver is seen to start its transition as viewed from its associated connector. It is further recommended that, for the minimum values of T_1 , $T_6 - T_9$; the high-state driver voltage not be degraded, cable resistance and capacitance be kept as low as possible, and cross talk be kept at a minimum value.

Table 39—Time Values

| Time Value Identifier* | Function (applies to) | Description | Value |
|------------------------|-----------------------|---|---|
| T_1 | SH | settling time for multiline messages | $\geq 2 \mu\text{s}^\dagger$ |
| t_2 | SH,AH,T,L,LE,TE | response to ATN | $\leq 200 \text{ ns}$ |
| T_3 | AH | interface message accept time [‡] | $>0 \text{ § }^\S$ |
| t_4 | T,TE,L,LE,C,RL | response to IFC or REN false | $<100 \mu\text{s}$ |
| t_5 | PP | response to ATN \wedge EOI | $\leq 200 \text{ ns}$ |
| T_6 | C | parallel poll execution time | $\geq 2 \mu\text{s}$ |
| T_7 | C | controller delay to allow current talker to see ATN message | $\geq 500 \text{ ns}$ |
| T_8 | C | length of IFC or REN false | $> 100 \mu\text{s}$ |
| T_9 | C | delay for EOI** | $\geq 1.5 \mu\text{s}^{\dagger\dagger}$ |
| T_{10} | C | delay for DAV | $\geq 1.5 \mu\text{s}$ |

*Time values specified by a lower case t indicate the maximum time allowed to make a state transition. Time values specified by an upper case T indicate the minimum time that a function shall remain in a state before exiting

[†]If three-state drivers are used on the DIO, DAV, and EOI lines, T_1 may be:

- 1) $\geq 1100 \text{ ns}$
- 2) Or $\geq 700 \text{ ns}$ if it is known that within the controller ATN is driven by a three-state driver however this value is not recommended.
- 3) Or $\geq 500 \text{ ns}$ for all subsequent bytes following the first sent after each false transition of ATN (the first byte shall be sent in accordance with (1) or (2))
- 4) Or $\geq 350 \text{ ns}$ for all subsequent bytes following the first sent after each false transition of ATN under conditions specified in 5.2 and warning note.

[‡]Time required for interface functions to accept, not necessarily respond to, interface messages.

[§]Implementation dependent

**Delay required for EOI, NDAC, and NRFD signal lines to indicate valid states.

^{††} $\geq 600 \text{ ns}$ for three-state drivers.

4. Mechanical Specifications

4.1 Application

This section defines the mechanical specification for interface systems to be used in environments where:

- 1) Physical distances between devices are limited
- 2) Star or linear bus interconnection networks are useful
- 3) Connector mounting space is limited

4.2 Connector Type

A quality connector of the rack and panel type with proven performance shall be used which has these minimum characteristics.

4.2.1 Electrical Considerations

Voltage rating; 200 V

Current rating; (at $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) 5 A per contact

Contact resistance; (at 10 mA) $< 20 \text{ m}\Omega$

Insulation resistance; $> 1 \text{ G}\Omega$

Test Voltage; (1 min, 20 °C) 500 V

Capacitance; (between contacts at 1 kHz) $< 1.5 \text{ pF}$

Endurance; (with 1 A and 70 °C) $> 1000 \text{ h}$

4.2.2 Mechanical Considerations

Number of contacts; 24

Contact surface; (self-wiping) 2.16 mm

Polarization; (shell shape) trapezoidal

Shell material; corrosion resistant, conductive

Retention force per contact; $> 0.15 \text{ N}$

Typical insertion and withdrawal force (F); $8 \text{ N} < F < 89 \text{ N}$

Endurance; (for specified contact resistance) > 500 insertions

Clearance between adjacent contacts; $> 0.5 \text{ mm}$

Solderability (if applicable); nominal 235 °C, 2 s

Typical external dimensions (see 4.4 for additional dimensions);

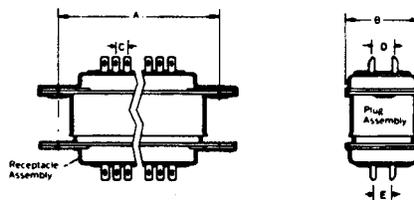
A 46.8 mm

B 15.5 mm

C 2.16 mm

D 4.29 mm

E 3.33 mm



4.2.3 Environmental Considerations

Basic environmental performance relative to temperature, humidity and vibration criteria should be determined in accordance with IEC Publication 68-2 (1982) [2] for climatic category 25/070/21 or MIL STD 202F (1986) [5], where appropriate.

4.3 Connector Contact Assignments

A contact assignment of the cable connector and the device connector shall be as shown below:

| Contact | Signal Line | Contact | Signal lines |
|---------|-------------|---------|--------------|
| 1 | DIO1 | 13 | DIO5 |
| 2 | DIO2 | 14 | DIO6 |
| 3 | DIO3 | 15 | DIO7 |
| 4 | DIO4 | 16 | DIO8 |
| 5 | EOI (24) | 17 | REN(24) |
| 6 | DAV | 18 | Gnd. (6) |
| 7 | NRFD | 19 | Gnd. (7) |
| 8 | NDAC | 20 | Gnd. (8) |
| 9 | IFC | 21 | Gnd. (9) |
| 10 | SRQ | 22 | Gnd. (10) |
| 11 | ATN | 23 | Gnd. (11) |
| 12 | SHIELD | 24 | Gnd. LOGIC |

NOTE — Gnd, (*n*) refers to the signal ground return of the referenced contact. EOI and REN return on contact 24.

4.4 Device Connector Mounting

Each device shall be provided with a receptacle type connector having the typical dimensions shown in Fig 17. The two rows of twelve contacts each are centered within the trapezoidal shell. The connector mounting shall make provisions to accept the locking screws of the cable assembly.

The preferred orientation of the connector, as mounted on a device and viewed from the rear of the device in its normal operating position, is with contact 1 in the upper right-hand corner. The connector location should allow for sufficient cable clearance as shown in Fig 21.

The connector may be mounted on either the outside or inside of the panel for which the typical panel cutout dimensions are given in Fig 18.

The connector shall be attached to the device with one of the stud mount standoffs shown in Fig 19 as determined by the panel mounting method used.

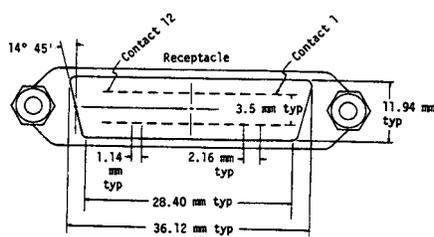


Figure 17—Receptacle Dimensions

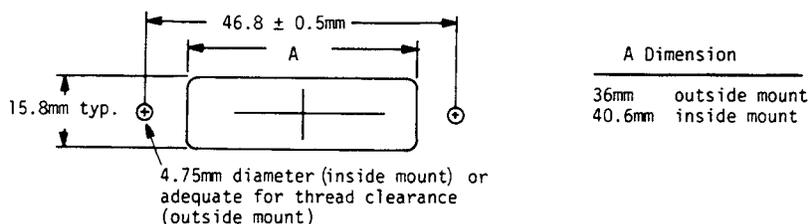


Figure 18—Connector Panel Cutout

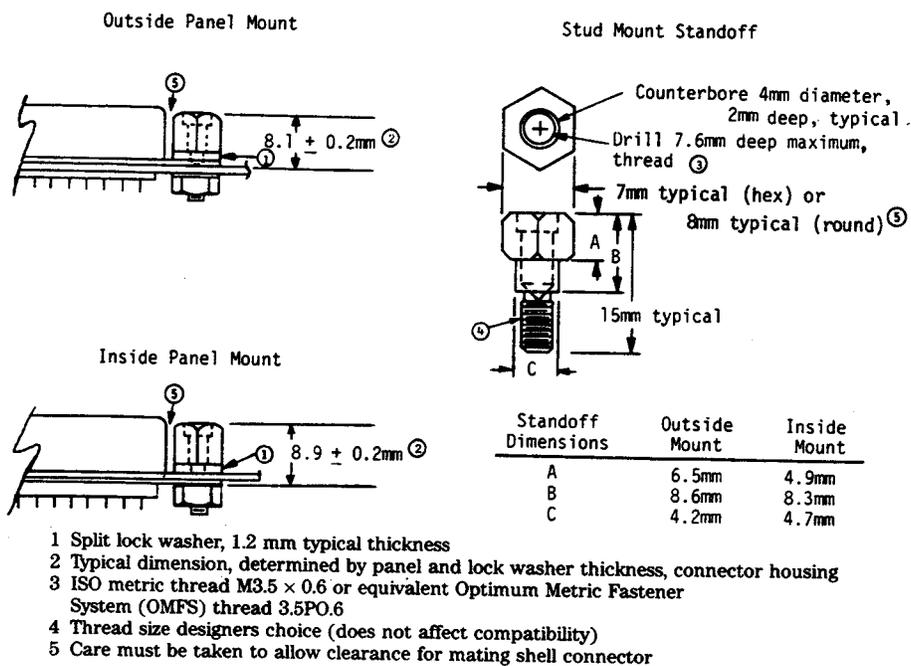


Figure 19—Mounting Dimensions

4.5 Cable Assembly

The cable assembly shall be provided with both a plug and a receptacle connector type at each end of the cable. The preferred method of assembling the stacked connectors contains a rigid structure (assures a reliable and positive connection of multiple cable assemblies) as shown in Fig 21.

Each connector assembly shall be fitted with a pair of captive locking screws. Each lock screw shall conform to the mechanical dimension shown in Fig 20. A retaining ring, or equivalent, shall be used to retain the lock screw as a captive element.

It is recommended that each pair of connectors, assembled according to the first paragraph of 4.5, be partially enclosed within a suitable housing as shown in Fig 21.

Individual cable assemblies may be of any length up to 4 m.

The housing may be plastic or metallic material, the latter is preferred for superior EMC performance; see Appendix I.4 for additional information on appropriate means for screening the complete cable assembly.

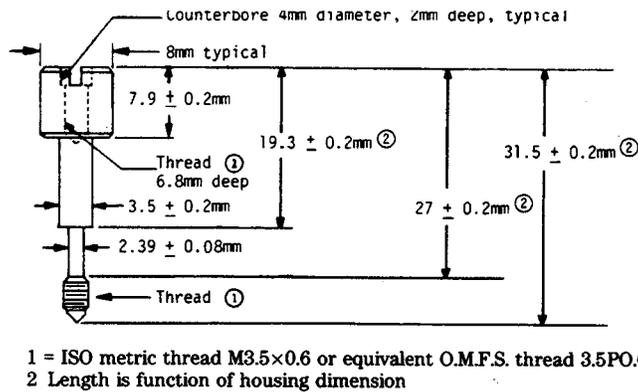
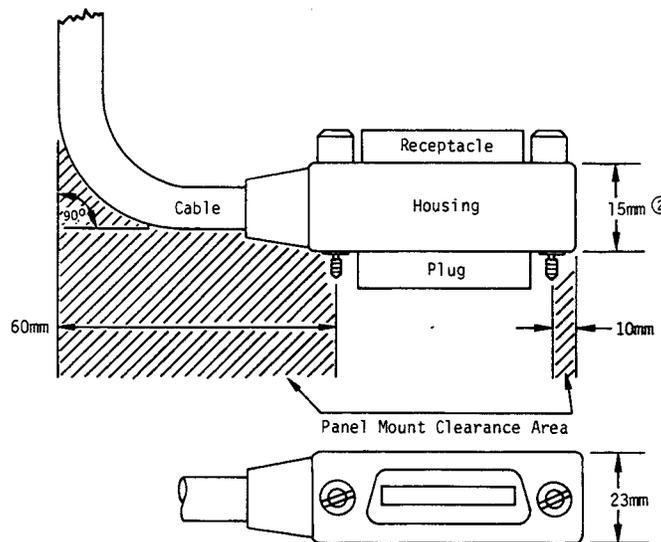


Figure 20—Lock Screw



NOTES: (1) All measurements are typical.
 (2) Length of lock screw is a function of this dimension.

Figure 21—Cable Connector Housing