

AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MULTÍMETRO DIGITAL VÍA GPIB

David Tolosa Alarcón

Tutor: Jose M^a Grima Palop

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 25 de Noviembre de 2019

Resumen

Este trabajo desarrolla un software para la automatización del proceso de calibración , implementado en el Laboratorio de Calibración UPV, que involucra el control de instrumentos para obtener lecturas y el posterior cálculo de valores asociados a las medidas para obtener el certificado de calibración del instrumento bajo estudio.

Resum

Aquest treball desenvolupa un software per a l'automatització del procés de calibratge , implementat en el Laboratori de Calibratge UPV, que involucra el control d'instruments per a obtindre lectures i el posterior càlcul de valors associats a les mesures per a obtindre el certificat de calibratge de l'instrument sota estudi.

Summary

This work develops a software for the automation of the calibration process, implemented in the UPV Calibration Laboratory, which involves the control of instruments to obtain readings and the subsequent calculation of values associated with the measurements to obtain the calibration certificate of the instrument under study.

Índice general

1. Introducción	1
2. Contexto del TFG	3
2.1. Calibración	3
2.1.1. ¿Qué es la calibración de un instrumento?	4
2.1.2. Exactitud	5
2.1.3. Trazabilidad	5
2.1.4. Incertidumbre y Tolerancia	7
2.2. Laboratorio de Calibración de la UPV	9
2.2.1. Procedimiento Calibración Multímetros Digitales por Método de Comparación	9
2.2.1.1. Tensión Continua (VDC)	10
2.2.1.2. Tensión Alterna (VAC)	13
2.2.1.3. Corriente Continua (IDC)	14
2.2.1.4. Corriente Alterna (IAC)	15
2.2.2. Procedimiento Calibración Resistencias mediante Método Directo	17
2.2.3. Certificado de Calibración	19
2.3. Equipamiento	20
2.3.1. HP3458A	20
2.3.2. FLUKE5500A	21
2.4. GPIB	23
2.4.1. IEEE 488	23
2.4.2. Conexión y Comunicación	24
2.4.3. Direccionamiento	26
2.4.4. Líneas del bus	26
2.4.4.1. Líneas de control Handshake	27
2.4.4.2. Líneas de control general	28
2.4.4.3. Líneas de datos	29
2.4.5. Comandos de la interfaz	30
2.4.5.1. Comandos Universales	31
2.4.5.2. Comandos Direccionados	32
2.4.6. Comandos para la programación de instrumentos	32
2.4.7. Uso de los comandos a través de GPIB	33
2.5. Labview	35
2.5.1. Características Básicas	35
2.5.2. Elementos	36

2.5.3. Manejo de GPIB en Labview	43
2.5.3.1. VISA	44
3. Desarrollo y Resultados	47
3.1. Condicionantes y puntos críticos	47
3.1.1. Especificaciones del programa	48
3.1.1.1. Configuración	48
3.1.1.2. Control de los equipos	49
3.1.1.3. Tratamiento de los datos	50
3.2. Flujograma general	52
3.3. Entrada	54
3.4. Proceso	56
3.4.1. Medición	56
3.4.1.1. Rutina de Lectura	57
3.4.2. Cálculo Error e Incertidumbre	59
3.4.2.1. Media, Varianza y Error	59
3.4.2.2. Correcciones	60
3.4.2.3. Cálculo incertidumbre	61
3.5. Salida	62
4. Conclusión y propuesta de trabajo futuro	65
Bibliografía	67
Anexos	69
Índice de figuras	69
Índice de tablas	71
Código	73
Menu.vi	73
SubVDC.vi	85
SubVAC.vi	90
SubIDC.vi	92
SubIAC.vi	99
SubR.vi	101
CalcVDC.vi	105
CalcVAC.vi	111
CalcIDC.vi	116
CalcIAC.vi	122
CalcR.vi	127
IncVDC.vi	129
IncVAC.vi	131
InclDC.vi	133
InclAC.vi	135
InclR.vi	137
Read3458.vi	139
ReadKey.vi	140
ReadValue.vi	141
Correcciones.vi	142

WriteData.vi	148
------------------------	-----

Capítulo 1

Introducción

La calibración de multímetros digitales requiere de la obtención de una serie de medidas por parte de los instrumentos involucrados y una serie de cálculos asociados a éstas para poder garantizar que el equipo bajo estudio tiene una fiabilidad en sus medidas. El mundo de la instrumentación ha desarrollado ampliamente recursos para el control de equipos remotamente de manera que facilite o directamente permita procesos de adquisición de medidas.

El objetivo de este proyecto es el de automatizar el proceso de calibración para equipos de medida digitales de tensión, corriente y resistencia. En concreto equipos de la familia 34401A. Se presentará un diseño consistente en un software de control de los equipos para la obtención de las medidas con su posterior procesamiento, obteniendo los resultados necesarios para la certificación del instrumento.

El Laboratorio de Calibración de la UPV dispone de la capacidad de certificar calibraciones para multímetros digitales disponiendo de todos los recursos para ello así como un proceso validado. El alcance de este trabajo engloba la calibración de modelos 34401A/34410A debido a que presentan una similitud para la programación de sus configuraciones.

Los recursos de los que se dispondrán serán los distintos instrumentos que forman el proceso dispuestos por el laboratorio así como los buses necesarios para su conexión. Se utilizará un ordenador para controlar los equipos a través del software. Para ello se utiliza la aplicación para el desarrollo de programas Labview, que ofrece el control de instrumentos de manera fácil a través de una interfaz en el ordenador.

Capítulo 2

Contexto del TFG

A continuación se va describir los elementos esenciales que forman parte del trabajo así como el ámbito en el que éste es desarrollado y tiene alcance.

2.1. Calibración

La evolución de los instrumentos de medida, así como los requerimientos para los diversos tipos de medidas, ha tenido cambios muy rápidos durante la segunda mitad del siglo XX. Uno de los primeros fabricantes de multímetros, AVO[1], lanzó su modelo AVOMeter que realizaba medidas de corriente o tensión continua y resistencia. La precisión del instrumento era entre un 3 % y un 10 % de error en la medida. A finales de 1970 se introdujeron en el mercado multímetros digitales que presentaban precisiones del orden de 10 ppm (0,001 %). Este factor de 10.000 a 1 en la mejora de la precisión de los instrumentos cambió la actitud de la calibración en el mundo. El posible impulso hacia la mejora de equipos de precisión fue debido a la sofisticación de la industria militar durante todo el siglo XX. Así como el auge de la industria aeroespacial y las telecomunicaciones. Al mismo tiempo, mucho de los avances en el área de la metrología han sido guiados a través de sociedades como el *National Institute of Standards and Technology*(NIST)[2] o el *Bureau International des Poids et Mesures*(BIPM)[3].

En el mundo actual la mayor parte de las transacciones económicas llevan asociadas una o varias medidas, la mejora en la precisión y confianza de las medidas aportadas por los instrumentos es un elemento esencial para el desarrollo de una economía globalizada. La capacidad de disponer de mediciones precisas y el coste relativamente bajo de los instrumentos para realizarlas ofrece a las empresas mejores garantías. Pudiendo llegar a todos los sectores económicos que lo precisen mejorando las relaciones nacionales e internacionales. Ya que da fiabilidad a las transacciones. El mundo de la calibración ha desarrollado un sistema entero para la garantía de las medidas así como la fiabilidad de los instrumentos en todos los ámbitos de la metrología. Llegando a cubrir amplios sectores de la actividad humana, con un alcance que lleva desde uso industrial, científico o militar hasta ámbitos más generales. Así como permitiendo aplicaciones tecnológicas o científicas a un público menos especializado.

2.1.1. ¿Qué es la calibración de un instrumento?

Si acudimos a la definición en el Vocabulario de Metrología Internacional, VIM [BIPM,1993][4], la calibración es : « *Conjunto de operaciones que establecen la relación que existe entre los valores indicados por un instrumento de medida con incertidumbre indeterminada, y los correspondientes a los valores conocidos de una magnitud de medida con incertidumbre determinada*».

En una calibración aplicamos un mensurando, con una incertidumbre conocida, a un instrumento de medición que nos ofrece un resultado con una incertidumbre que desconocemos y queremos obtener. Para certificar que un instrumento ha sido calibrado, sus medidas junto a las incertidumbres obtenidas deben estar determinadas dentro del rango indicado por las especificaciones del fabricante. Para ello como indica la definición existe un valor conocido con el que comparar las medidas obtenidas. Existen varios métodos de calibración, referente a las diferentes tipos de medidas que se realicen. Nuestro caso es el estudio de la calibración de equipos medidores de tensión, corriente y resistencia (multímetros). Los métodos más comunes para la calibración de estos equipos son:

- **Calibración directa:** En este método se comparan los valores medidos por el instrumento bajo calibración con los patrones generados con un calibrador, para señales de tensión o corriente, o bien por un conjunto de resistencias de referencia certificadas. El conjunto de valores obtenidos deben estar bajo las especificaciones del fabricante del producto para poder certificar que el equipo puede usarse..
- **Calibración por comparación:** En este caso se incluye un equipo de medición que forma parte del proceso de calibración y tiene mayor precisión que el equipo a calibrar. Siempre hará falta un equipo para la generación de valores de referencia, como las resistencias certificadas, o de un calibrador. El valor medido por el equipo que se quiere calibrar es comparado con el obtenido por el otro equipo, obteniendo una mayor precisión en el error de medida. De la misma manera que en el método anterior, los resultados deben estar bajo las especificaciones que da el fabricante.

Mediante el proceso de calibración de instrumentos se obtiene una información sobre la capacidad de medida actual de nuestro equipo y se garantiza la compatibilidad de éste a través de los resultados obtenidos, que son : La relación entre las medidas del equipo y los valores proporcionados por el patrón junto a las incertidumbres asociadas a ellas. Así es posible establecer y demostrar la trazabilidad del instrumento. De manera que se pueda asegurar que las medidas realizadas por él son consistentes con las de otros y así garantizar su fiabilidad. Es preciso conocer los conceptos fundamentales que la metrología define para conocer con toda amplitud este proceso. Para ello se indican en las siguientes secciones una descripción de los pilares básicos sobre los que se desarrolla la calibración.

2.1.2. Exactitud

Uno de los objetivos más apreciados por los usuarios de instrumentos de medida es que sus resultados sean fiables. La fiabilidad de un instrumento es la permanencia a lo largo del tiempo de la exactitud de sus mediciones. La norma ISO 5725-1[5] incluye la definición de exactitud como : «*la cercanía del valor resultante de una medición al valor de referencia aceptado*». Cuando el término se aplica a un conjunto de mediciones sobre un mismo mensurando, implica un componente de error aleatorio y un componente de error sistemático. Para ello la norma define los conceptos de veracidad y precisión. En español para veracidad(trueness) suele emplearse la palabra exactitud. Pero dentro de la norma se declaran correctamente los 3 términos. Así la *exactitud* de un instrumento está compuesto por la *veracidad* de las medidas, que es la cercanía de la media del conjunto de muestras al valor de referencia, y por la *precisión* de éstas, que es la cercanía de cada una de las medidas entre ellas. Es decir, la dispersión de las medidas bajo un mismo mensurando.

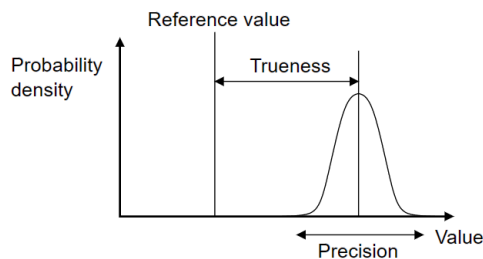


Figura 2.1: Exactitud(Veracidad + Precisión)[6]

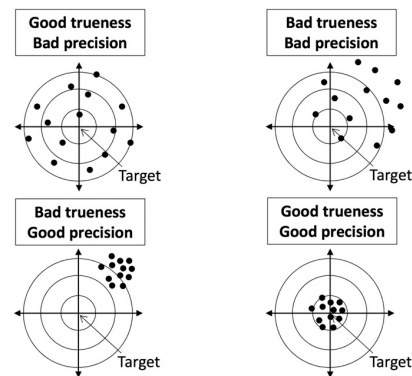


Figura 2.2: Ejemplo diferentes exactitudes y precisiones[7]

Así para que las medidas realizadas por un instrumento sean fiables, éste tiene que ser preciso y exacto(*veraz*). Los fabricantes de instrumentos ponen a disposición en sus hojas de especificaciones información acerca de la exactitud de las medidas en los rangos disponibles como para cada tipo de medida que es capaz de realizar. Un instrumento puede a lo largo de los años perder precisión y veracidad de medida, pudiendo desviarse de los valores iniciales, a este concepto se le llama *deriva*. Estas consideraciones han de tenerse en cuenta a la hora de la calibración para seguir garantizando los resultados que ofrece el equipo.

2.1.3. Trazabilidad

De acuerdo con VIM, la trazabilidad se define como : «*propiedad del resultado de una medición que consiste en que se pueda relacionar el resultado con los patrones apropiados, como una unidad de medida o un estándar de medida, generalmente nacionales o internacionales, a través de una cadena ininterrumpida de comparaciones, todas con incertidumbres conocidas*». Los resultados de las medidas deben ser capaces de referenciarse a patrones de medidas estandarizados o bien en ámbito nacional o internacional. Esto se consigue a través de un sistema de calibración, a través de entidades nacionales e internacionales, que pueda relacionar todos los tipos de medidas con sus patrones estandarizados correspondientes.

■ Organismos nacionales:

En España el Centro Español de Metrología (CEM) y los Institutos Nacionales Acreditados a él son los organismos que aseguran la trazabilidad de las medidas. Estructuran el correcto funcionamiento de la multitud de mediciones de diversa índole, con distinta trascendencia para los ciudadanos. Todos ellos forman la cúspide de la pirámide metrológica nacional, dónde se establecen y mantienen los patrones primarios de las unidades de medida correspondientes al Sistema Internacional de Unidades, declarado de uso legal en España por Ley 32/2014 de Metrología([8]).[9] La (Figura 2.3) muestra la jerarquía.

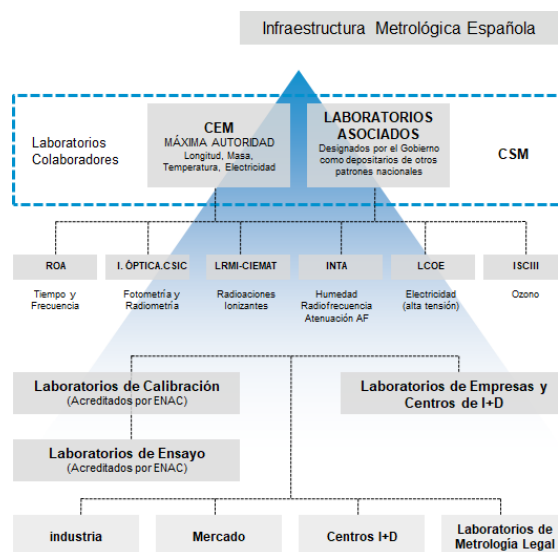


Figura 2.3: Infraestructura metrológica española

Los Laboratorios de Calibración mantienen una trazabilidad demostrable a los patrones nacionales, que permite la normalización y difusión de las unidades de medida por todo el país, llegando a todos los sectores de la sociedad desde uso común hasta la ciencia pasando por la sanidad, educación, comercio o los servicios. Los laboratorios son acreditados por la Entidad Nacional de Acreditación (ENAC)[10], estos organismos, debido a su alcance, forman una parte importante de la infraestructura metrológica española.

■ Organismos Internacionales:

- BIPM. Es una organización internacional dedicada al ámbito de estándares de medidas así como la metrología. Su objeto es el de proveer mundialmente de un sistema de medidas coherentes asegurando la trazabilidad internacional de éstas. Coordinando actividades que permitan la comparación internacional de patrones estándar nacionales, para establecer unos resultados de medidas que sean aceptados internacionalmente.
- OIML.[11] La Organización Internacional de Metrología Legal (del francés *Organisation Internationale de Métrologie Légale - OIML*) promueve la coordinación de los procedimientos metrológicos legales que facilitan el comercio internacional. Puesto que la fiabilidad de las medidas es un proceso necesario en muchos ámbitos económicos, tiene que existir una legislación respecto a las medidas y los equipos de medición que pueda proteger tanto al comprador como el vendedor durante una transacción

económica. Para ello existe la *metrología legal* cuyo ámbito es el de crear estándares globales para su uso en este tipo de legislación.

- ILAC. (*International Laboratory Accreditation Cooperation*) Es la organización internacional para organismos de acreditación que operan bajo la ISO 17011 y que participan en la acreditación de organismos de evaluación de conformidad, incluyendo laboratorios de calibración, laboratorios de ensayos, laboratorios clínicos y organismos de inspección. Se establecen una serie de normas para realizar operaciones específicas según el ámbito del organismo, indicadas en ISO. La acreditación realiza una evaluación independiente para corroborar que se aplican las normas nacionales e internacionales y así garantizar la fiabilidad en la calibración, los resultados de los ensayos, los informes de inspección y las certificaciones.[12]

2.1.4. Incertidumbre y Tolerancia

Recogiendo de nuevo las definiciones del VIM, establece para incertidumbre: «*parámetro, asociado con el resultado de una medida, que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos al mensurando*». Lo ideal cuando realizamos una medida es que su valor sea el mismo que el del mensurando, de manera que podemos decir sin vacilación que ése es su valor. En la realidad siempre existe una duda acerca del valor obtenido en la medición. Para asegurarnos de que lo más seguro es que la medida es correcta y corresponde a la del mensurando, se establece un rango de valores asociados a la medida entre los que varía la posible expresión del mensurando. Este parámetro es llamado *incertidumbre de la medida* y tiene que estar indicado en la expresión del valor de la medida para poder tener una mayor certeza del valor obtenido con el instrumento. Cuando se realiza una calibración lo que se busca es obtener la incertidumbre asociada a las lecturas del instrumento, de manera que podemos saber realmente la exactitud con que realiza las medidas y demostrar la trazabilidad de éstas. El método para determinar la incertidumbre más aceptado es el propuesto por la ISO/IEC “*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*”(GUM). Esta guía establece además más definiciones que afectan al proceso del cálculo y se van a detallar brevemente.

- Incertidumbre Estándar. Incertidumbre de la medida expresada como la desviación estándar.
- Incertidumbre Tipo A. Método de evaluación de la incertidumbre a través del análisis estadístico de una serie de lecturas del valor mensurando.
- Incertidumbre Tipo B. Método de evaluación de la incertidumbre mediante otros métodos que no sean análisis estadístico.
- Incertidumbre Combinada. Incertidumbre del resultado de la medida, obtenida a través de la raíz cuadrada de la suma de términos que afectan a la expresión del mensurando, y a la determinación de su incertidumbre.
- Incertidumbre Expandida. Valor que engloba los rangos de la posible variación del resultado de la medida. Se establece la confianza que se quiere asignar al dato, para la mayoría de casos se asegura que con un 95,45 %(2σ) de probabilidad el valor del mensurando estará dentro de la dispersión de valores indicada por el resultado de la medida junto a su incertidumbre (expandida). Es posible si se requiere asegurarnos más aún y establecer una confianza del

99,9 % (3σ) para el resultado de la medida.(Figura 2.4) Se obtiene la incertidumbre expandida como el resultado de aplicar un factor de cobertura, k , a la incertidumbre combinada que nos asegure con la confianza deseada la posible variación del resultado de la medida.

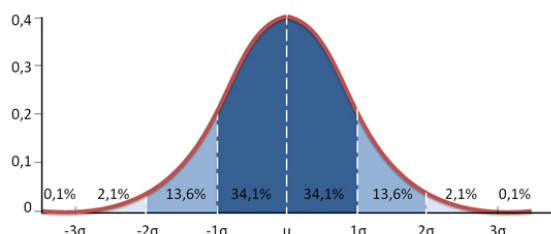


Figura 2.4: Dispersión del resultado de la medida.[13]

La *tolerancia* es otra propiedad que guarda una gran relación con la incertidumbre, lo cual puede llevar a veces a la confusión. Este término está asociado a la metrología. Para poder mostrar el concepto de una manera más clara, vamos a ver la relación entre incertidumbre y tolerancia en dos ámbitos concretos.

- En la metrología legal, la tolerancia puede definirse como la máxima confianza posible que se le puede dar al valor de medida de un instrumento para poder establecer garantías en un ámbito nacional e internacional. Por ejemplo una persona quiere vender 100 gr de oro a otra, ambos quieren estar seguros de que uno no da de más y el otro recibe de menos. Para ello utilizan una báscula digital para obtener una medida fiable, la capacidad máxima del instrumento es de 200 g y una resolución de 1 mg. Según la OIML la tolerancia máxima permitida en este caso es de ± 5 mg. Por lo que las medidas que estarían dispuestas a tolerar serían entre 99,995 g como mínimo y 100,005 g máximo. Pero la propia medición lleva asociada una incertidumbre. El fabricante de la pesa nos asegura una incertidumbre de ± 1 mg para ese rango de medida. Para poder estar conforme con la transacción hay que tener en cuenta esta posible variación, entonces el rango de valores aceptados sería entre 99,996 g mínimo y 100,004 g máximo. Este rango sería la tolerancia admitida para el valor de medida obtenido con el instrumento.
- En la metrología industrial, para el caso de procesos de fabricación de unidades que llevan asociadas mediciones podríamos definir tolerancia como la máxima cantidad de piezas que se desvían del patrón original que se pueden aceptar. Por ejemplo un fabricante textil produce manteles. Los clientes admiten cierta tolerancia de productos fuera del patrón. La empresa para poder fabricar de acuerdo a estos requisitos utiliza una máquina de corte de tejido en la que el fabricante les proporciona una incertidumbre de los valores de las mediciones para los cortes. La empresa teniendo en cuenta las especificaciones de la máquina tiene una certeza de que ésta producirá en la mayoría de casos productos bajo las especificaciones del cliente y que la cantidad de productos erróneos nunca sobrepasará la tolerancia del cliente.

2.2. Laboratorio de Calibración de la UPV

El Laboratorio de Calibración de la UPV(LCUPV)[14] inició su actividad en 1982 siendo el primer laboratorio de calibración en la comunidad valenciana. Está acreditado por ENAC para la calibración en las áreas de medida de Masas, Electricidad y Temperatura. Forma parte de la estructura metrológica española y por tanto garantiza la trazabilidad de las medidas para las calibraciones así como sus incertidumbres.

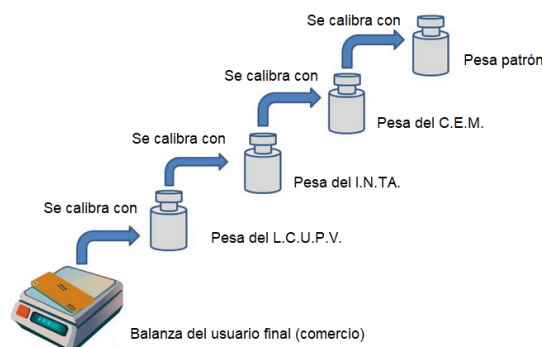


Figura 2.5: Ejemplo trazabilidad LCUPV para el área de masas

Cumple además con la norma ISO/IEC-17025[15], que establece los requisitos necesarios a cumplir por los laboratorios de ensayo y calibración para facilitar la armonización de criterios de calidad. El objetivo principal de la norma es garantizar la competencia técnica y la fiabilidad de los resultados analíticos. Para ello se diseñan unos requisitos para la gestión, que sean capaces de cubrir todas las especificaciones como puede ser definir una estructura del laboratorio que permita la correcta organización en departamentos dedicados a un área de medida, como especificar la responsabilidad, autoridad e interrelación de todo el personal que realiza trabajo. También recoge requisitos técnicos como puede ser que cualquier equipo involucrado en el proceso de calibración deba tener certificada una calibración antes de ser puestos en servicio.

El laboratorio recoge una serie de procedimientos para la calibración de instrumentos, el objeto de este trabajo es realizar los procedimientos asociados a la calibración de equipos digitales de medida de tensión, corriente y resistencia. A continuación se detallarán. La determinación de las incertidumbres de medida es realizada de acuerdo a la GUM.

2.2.1. Procedimiento Calibración Multímetros Digitales por Método de Comparación

El procedimiento *PC-LCUPV-E16* detalla la serie de operaciones que hay que realizar para la correcta obtención de las medidas así como los cálculos necesarios para la determinación de la incertidumbre. Los elementos presentes durante esta calibración son: calibrador FLUKE5500A que generará el patrón de medidas a realizar, multímetro digital de referencia HP3458A con resolución 8 1/2 dígitos y el equipo multímetro a calibrar. Este proceso permite la calibración de equipos con resoluciones hasta 6 1/2 dígitos para medidas de tensión y corriente, continua y alterna. Se obtendrán las medidas de cada uno de los multímetros y se compararán entre ellas para la obtención del error así como la incertidumbre asociada. Las múltiples configuraciones de los equipos se realizarán a través del panel de control frontal que dispone cada instrumento. Para realizar medidas se

establece un proceso de la configuración de los equipos, en cada tipo de medida se tendrán que establecer unos comandos distintos, pero de manera general el orden es el siguiente:

1. Se borran los registros previos en las memorias de los multímetros, para evitar que afecten a las medidas que se van a obtener.
2. Se configuran los multímetros para que se ajusten al rango adecuado y al tipo de medida.
3. Se indica al calibrador el mensurando que se quiere medir.
4. Se saca el patrón a través de la salida del calibrador y se espera a que se estabilicen las medidas.
5. Se indican a los multímetros que realicen 10 lecturas del valor.
6. Se le pide a cada multímetro la media de los valores así como su desviación.
7. Si se da por válido el resultado, volver al paso 1 para la realización de la siguiente medida. Si en cambio quiere repetirse las lecturas volver al paso 5.

Los comandos utilizados por los instrumentos se especificarán posteriormente en su sección. A continuación se enumeran las diferentes conexiones para los tipos de medida, así como los cálculos para la obtención de la incertidumbre y el error.

2.2.1.1. Tensión Continua (VDC)

Inicialmente se realizará la interconexión de los equipos para la obtención de medidas de tensión, la Figura 2.6 ejemplifica las conexiones realizadas para la configuración de medidas para tensión. El circuito creado mantiene en paralelo a los equipos respecto al calibrador para obtener la misma tensión. Se utiliza un cable guarda para el apantallamiento de la línea.

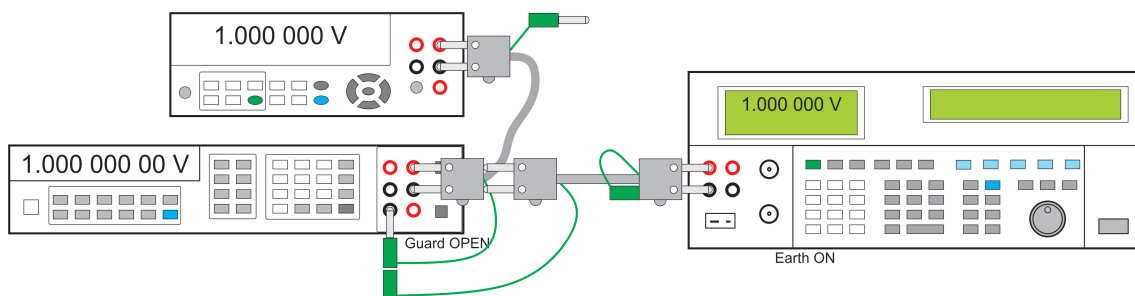


Figura 2.6: Conexión de instrumentos para la medición de tensión

Se realiza el proceso de medición indicado y una vez obtenemos los resultados se procede a obtener el valor del error así como su incertidumbre. La expresión del mensurando obtenido es:

$$e_m = (V_x + \delta_{V_x} - V_{x0} + \delta_t) \cdot f_a - (V_r + \delta_{UV_r} + \delta_{V_r} + \delta_{m_e}(1+j) + \delta_{m_d} + \delta_{m_l} + \delta_{m_t}) \cdot f_c + \delta_c \quad (2.1)$$

- $e_m \equiv$ Mensurando error de medida.

- $V_x \equiv$ Valor medio visualizado por el equipo a calibrar
- $\delta_{V_x} \equiv$ Corrección debido a la resolución de V_x
- $V_{x0} \equiv$ Valor visualizado por el calibrando ante un corto a su entrada.
- $\delta_t \equiv$ Corrección debida a la variación de temperatura durante la calibración.
- $f_a \equiv$ Factor de atenuación

$$f_a = 1 + \frac{R_c}{R_x} \quad (2.2)$$

. Siendo $R_c \equiv$ Resistencia de los cables de conexión entre la referencia y el calibrando.
 $R_x \equiv$ Resistencia interna del calibrando.

- $V_r \equiv$ Valor medio visualizado por el equipo de referencia.
- $\delta_{UV_r} \equiv$ Corrección debida a la incertidumbre de calibración de la referencia ante el valor V_r .
- $\delta_{V_r} \equiv$ Corrección debido a la resolución de V_r .
- $\delta_{me} \equiv$ Corrección por especificaciones de inexactitud del equipo de medida.
- $j \equiv$ Factor para la estimación de la deriva a partir de δ_{me} .
- $\delta_{md} \equiv$ Corrección debida a la deriva del equipo de medida.
- $\delta_{ml} \equiv$ Corrección debida a la no linealidad del equipo de medida.
- $\delta_{mt} \equiv$ Corrección debida al incremento de temperatura respecto de la temperatura de calibración del equipo de referencia.
- $f_c \equiv$ Factor de corrección de la referencia.
- $\delta_c \equiv$ Corrección debida a las tensiones termoeléctricas de contacto.

Antes de continuar con la expresión hay que indicar que las correcciones δ_{me} y δ_{UV_r} solo son utilizadas cuando no se aplica factor de corrección al equipo de referencia ($f_c = 1$). Esta corrección se reemplaza por δ_{ml} y δ_{md} cuando f_c es utilizado. δ_{mt} y δ_t no se aplican ya que no suele haber un incremento de temperatura apreciable. El factor de atenuación, f_a es 1 para todos los casos. Así obtendríamos de forma más simplificada las dos posibles expresiones que utilizaremos en función de si se aplica o no factor de corrección.

$$e_m = (V_x + \delta_{V_x} - V_{x0}) - (V_r + \delta_{V_r} + \delta_{me}(1 + j) + \delta_{UV_r}) + \delta_c \quad (2.3)$$

$$e_m = (V_x + \delta_{V_x} - V_{x0}) - (V_r + \delta_{V_r} + \delta_{ml} + \delta_{md}) \cdot f_c + \delta_c \quad (2.4)$$

V_x y V_r son valores medidos del calibrando y la referencia, respectivamente. Sus valores son el resultado de la media de n valores, con $n \geq 5$, de lecturas realizadas secuencialmente. Se calculará de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\bar{V}_x = \frac{\sum_{k=1}^n V_{x,k}}{n} \quad (2.5)$$

Estos tipos de valores presentan una incertidumbre de tipo A(2.1.4), la expresión matemática que la indica es la de abajo. La representación de la incertidumbre se representa como $u()$ ($V_x \rightarrow u(V_x)$). Ésta tiene asociados $n - 1$ grados de libertad. Las expresiones se han ejemplificado con V_x pero se realizarían igual para el valor medio medido por el equipo de referencia. El valor V_{x0} representa los valores medios del calibrando ante un corto, en el mismo rango que para V_x y su incertidumbre se calcula de la misma manera(Ecuación 2.6).

$$u(\bar{V}_x) = s(\bar{V}_x) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (V_{x,k} - \bar{V}_x)^2} \quad (2.6)$$

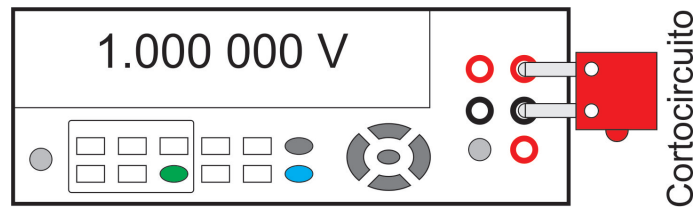


Figura 2.7: Conexión cortocircuito

δ_{V_x} y δ_{V_r} son las correcciones por la capacidad resolutive del multímetro a calibrar y el de referencia respectivamente. Indica el error asociado a la posible variación de una medida en los valores que requieren más resolución (más pequeños) y que pueden no representarse por falta de precisión. Ejemplo, se indica el mensurando 9,999995 V y el equipo de 6 1/2 dígitos puede mostrar 09,99999 V o 10,00000 V ya que no tiene resolución suficiente para representar los valores más pequeños. Estas correcciones no tienen un valor real que afecten al mensurando ($\delta_{V_x} = \delta_{V_r} = 0$), solo añaden incertidumbre. Ésta es de tipo B(Subsección 2.1.4) y se calcula como:

$$u(\delta_{V_x}) = \frac{RESOL}{\sqrt{12}} \quad (2.7)$$

RESOL es el incremento mínimo en ese rango de medida. En el ejemplo anterior para el rango de 10 V presenta el multímetro 0.00001 V de resolución.

δ_{me} hace referencia a la precisión y exactitud(2.1.2) del equipo de referencia. No tiene valor real ($\delta_{me} = 0$) y presenta una incertidumbre tipo B. Su cálculo se obtiene a partir de las especificaciones que nos da el fabricante para los rangos dados. Es el resultado de dividir por $\sqrt{3}$ el valor obtenido del cálculo de la inexactitud a partir de las especificaciones.

$$u(\delta_{me}) = \frac{Inexactitud}{\sqrt{3}} \quad (2.8)$$

La corrección por deriva guarda relación con δ_{me} , cuando no se aplica factor de corrección puede estimarse como $\pm j$ veces $u(\delta_{me})$ ($j \geq 1/3$). Cuando se aplica un factor de corrección al equipo de referencia ($0,95 \leq f_c \leq 1,05$) la corrección δ_{me} y δ_{UVr} son obviadas y sustituidas por δ_{ml} y $\delta_{md} \cdot f_c$ solo tiene valor real y no tiene incertidumbre. La corrección por no linealidad de la

referencia, δ_{ml} , se calcula su incertidumbre a partir de las especificaciones del fabricante y su resultado es dividido por $\sqrt{3}$, de forma similar a Ecuación 2.8. $u(\delta_{md})$ se obtiene como el valor de la última deriva anual calculada, asociada al valor de medida más próximo a V_r para el rango de medida establecido. El laboratorio registra los datos de las derivas del equipo 3458A durante sus calibraciones. Los valores reales de no linealidad y deriva son nulos ($\delta_{ml} = \delta_{md} = 0$).

La corrección por calibración δ_{UVr} indica la incertidumbre de la última calibración del equipo de referencia para el valor nominal del patrón. Su valor se dividirá por el factor de cobertura, k , indicado por el certificado de calibración. δ_c hace referencia a la influencia de las tensiones termoeléctricas producidas por los diferentes materiales de contacto y la diferencia de temperaturas. Se establecen unos valores fijos para las diferentes tensiones termoeléctricas que el laboratorio conoce. La incertidumbre es calculada dividiendo ese valor por $\sqrt{3}$. No tiene valor real.

La expresión del mensurando (Ecuación 2.9) representa que elementos influyen en el valor del error de medida que obtendremos:

$$e_m = (V_x - V_{x0}) - (V_r) \cdot f_c \quad (2.9)$$

A este valor hay que incluirle la incertidumbre que aportan las correcciones y las medidas. Una vez calculadas se obtendrá la incertidumbre combinada aplicando la Ley de Propagación de las Incertidumbres (GUM, Capítulo 5.[16]). Se considera que no hay correlación entre los términos y se desprecia los coeficientes de segundo orden ($C_i = 1$).

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{V_x} u^2(V_x) + C_{\delta_{V_{x0}}} u^2(\delta_{V_{x0}}) + C_{V_r} u^2(V_r) + C_{\delta_{me}} u^2(\delta_{me})(1 + j) + C_{\delta_{UVr}} u^2(\delta_{UVr}) + C_{\delta_c} u^2(\delta_c)} \quad (2.10)$$

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{V_x} u^2(V_x) + C_{\delta_{V_{x0}}} u^2(\delta_{V_{x0}}) + C_{V_r} u^2(V_r) + C_{\delta_{ml}} u^2(\delta_{ml}) + C_{\delta_c} u^2(\delta_c)} \quad (2.11)$$

Se puede observar los dos tipos de incertidumbres combinadas obtenidas en función de si se ha utilizado f_c . Los términos que no presentan incertidumbre no se incluyen en las ecuaciones. La incertidumbre expandida se obtiene aplicando un factor de cobertura, k , al valor de la incertidumbre combinada.

$$u(e_m) = k \cdot u_c(e_m) \quad (2.12)$$

Se establece una probabilidad de cobertura del 95,45 %. De acuerdo con la GUM, si los valores de V_x , V_{x0} y V_r se han obtenido con 10 o más medidas el factor de cobertura a aplicar será $k = 2,00$. Este es el caso general para la calibración de multímetros. La incertidumbre expandida se expresará con uno o dos 2 dígitos significativos. La resolución del valor del mensurando y la incertidumbre deben ser iguales.

Las medidas obtenidas se considerarán válidas cuando los valores obtenidos para cada rango de medida y valor nominal sean inferiores a los límites que indica el fabricante del equipo.

2.2.1.2. Tensión Alterna (VAC)

Las conexiones establecidas entre los equipos son iguales que para VDC (Figura 2.6). La expresión del mensurando para tensión alterna es:

$$e_m = (V_x + \delta_{V_x} + \delta_t) - (V_r + \delta_{UV_r} + \delta_{V_r} + \delta_{me}(1+j) + \delta_{md} + \delta_{ml} + \delta_{mf} + \delta_{mt}) \cdot f_c + \delta_c \quad (2.13)$$

Explicamos el único término que aún no ha sido estudiado:

- $\delta_{mf} \equiv$ Corrección debida al factor de cresta de la señal.

El factor de cresta, $CF = \frac{\hat{V}}{V_{ef}}$, es una corrección que hay que tener en cuenta cuando utilizamos corriente alterna. No tiene valor real ($\delta_{mf} = 0$) y su incertidumbre es de tipo B, es obtenida a partir de las especificaciones del fabricante del equipo referencia, se obtendrá un valor a partir de una expresión y se dividirá por $\sqrt{3}$. Se despreciarán los valores δ_t y δ_{mt} por las mismas indicaciones que en el cálculo de VDC.

La expresión del valor real del mensurando será:

$$e_m = (V_x) - (V_r) \cdot f_c \quad (2.14)$$

Y la incertidumbre combinada, en función de si se ha utilizado factor de cobertura (Ecuación 2.16) o no (Ecuación 2.34):

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{V_x} u^2(V_x) + C_{\delta_{V_x}} u^2(\delta_{V_x}) + C_{V_r} u^2(V_r) + C_{\delta_{me}} u^2(\delta_{me})(1+j) + C_{\delta_{UV_r}} u^2(\delta_{UV_r}) + \dots} \quad (2.15)$$

$$\dots + C_{\delta_{mf}} u^2(\delta_{mf} + C_{\delta_c} u^2(\delta_c))$$

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{V_x} u^2(V_x) + C_{\delta_{V_{x0}}} u^2(\delta_{V_{x0}}) + C_{V_r} u^2(V_r) + C_{\delta_{mi}} u^2(\delta_{mi}) + C_{\delta_{mf}} u^2(\delta_{mf} + C_{\delta_c} u^2(\delta_c))} \quad (2.16)$$

La incertidumbre combinada se obtendrá igual que en Ecuación 2.12 considerando un cobertura del 95,45%, como se realiza 10 o más medidas $k=2,00$.

2.2.1.3. Corriente Continua (IDC)

Se realiza una interconexión en serie entre los tres equipos, calibrador FLUKE5500A, multímetro 3458A de 8 1/2 dígitos de referencia y el calibrando 34401A de 6 1/2 dígitos.

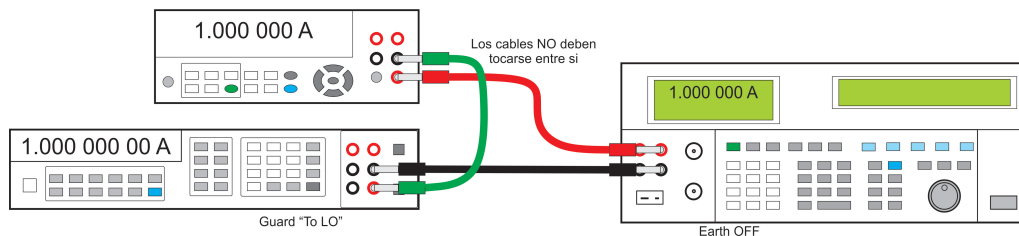


Figura 2.8: Interconexión equipos para corriente

La expresión del mensurando es:

$$e_m = (I_x + \delta_{I_x} - I_{x0} + \delta_t) - (I_r + \delta_{UI_r} + \delta_{I_r} + \delta_{me}(1+j) + \delta_{md} + \delta_{ml} + \delta_{mt}) \cdot f_c + \delta_c \quad (2.17)$$

Los términos no explicados son:

- $I_x \equiv$ Valor medio visualizado por el equipo a calibrar
- $\delta_{Ix} \equiv$ Corrección debido a la resolución de I_x
- $I_{x0} \equiv$ Valor visualizado por el calibrando ante un circuito abierto a su entrada. $R_x \equiv$ Resistencia interna del calibrando.
- $I_r \equiv$ Valor medio visualizado por el equipo de referencia.
- $\delta_{UIr} \equiv$ Corrección debida a la incertidumbre de calibración de la referencia ante el valor I_r .
- $\delta_{Ir} \equiv$ Corrección debido a la resolución de I_r .

I_x, I_{x0} e I_r son obtenidos mediante la media de los valores obtenidos de la misma manera que en Ecuación 2.5. Sus incertidumbres son de tipo A y se calculan según Ecuación 2.6. Se aplican las mismas consideraciones si se utiliza o no f_c . En el caso de la corrección por no linealidad, δ_{ml} , si el fabricante no especifica nada para corriente se utilizará la décima parte de las especificaciones de exactitud. La expresión del valor del mensurando es:

$$e_m = (I_x - I_{x0}) - (I_r) \cdot f_c \quad (2.18)$$

Y la incertidumbre combinada es (con factor corrección \rightarrow Ecuación 2.20 ; sin $f_c \rightarrow$ Ecuación 2.19):

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{Ix}u^2(I_x) + C_{\delta_{Ix0}}u^2(\delta_{Ix0}) + C_{Ir}u^2(I_r) + C_{\delta_{me}}u^2(\delta_{me})(1+j) + C_{\delta_{UIr}}u^2(\delta_{UIr}) + C_{\delta_c}u^2(\delta_c)} \quad (2.19)$$

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{Ix}u^2(I_x) + C_{\delta_{Ix0}}u^2(\delta_{Ix0}) + C_{Ir}u^2(I_r) + C_{\delta_{ml}}u^2(\delta_{ml}) + C_{\delta_c}u^2(\delta_c)} \quad (2.20)$$

Se obtiene la incertidumbre expandida multiplicando la incertidumbre combinada por el factor de cobertura, $k=2,00$, ya que tomamos mínimo 10 muestras.

2.2.1.4. Corriente Alterna (IAC)

Se utiliza la misma conexión que en la Figura 2.8. La expresión del mensurando es :

$$e_m = (I_x + \delta_{Ix} + \delta_t) - K_n f_{ck} f_{cl} (I_r + \delta_{UIr} + \delta_{Ir} + \delta_{me}(1+j) + \delta_{md} + \delta_{ml} + \delta_{mf} + \delta_{mt}) \cdot f_c + \delta_c \quad (2.21)$$

Los nuevos términos son:

- $K_n \equiv$ Relación de la transformación nominal
- $f_{ck} \equiv$ Factor de corrección de K_n :

$$f_{ck} = \frac{1}{1 + \frac{e_{\%}}{100}} \quad (2.22)$$

Siendo $e_{\%}$ el error de relación del transformador.

- $f_{cl} \equiv$ Factor de corrección por excursión de corriente en el rango.

$$f_{cl} = 1 + \frac{e_{cl}\%}{100} \quad (2.23)$$

$e_{cl}\%$ = Diferencia máxima entre los errores de transformación dentro de un mismo rango.

Los términos están asociados al uso del transformador en el proceso, éste se introducirá si es necesario medir corriente por encima de 1A. En el resto de casos, estos valores se despreciarán ($K_n = f_{ck} = 1$). Para el caso de f_{cl} la media de los valores de $e_{cl}\%$ (Ecuación 2.23) es nula, por tanto $f_{cl} = 1$. Presenta una incertidumbre de tipo B y se obtiene a través de la fórmula:

$$u(f_{cl}) = \frac{|e_{cl}\%|}{100\sqrt{3}} \quad (2.24)$$

K_n corresponde con la relación del transformación nominal $K_n = \frac{I_p}{I_s}$, donde I_p es la corriente del primario e I_s del secundario. Este valor no presenta incertidumbre. f_{ck} tiene un valor descrito por Ecuación 2.22, la incertidumbre asociada es de tipo A y se obtiene con la expresión:

$$u(f_{ck}) = f_{ck}^2 \sqrt{\left(\frac{u(e\%)}{200}\right)^2 + \left(\frac{|e_d\%|}{100\sqrt{3}}\right)^2} \approx \sqrt{\left(\frac{u(e\%)}{200}\right)^2 + \left(\frac{|e_d\%|}{100\sqrt{3}}\right)^2} \quad (2.25)$$

La expresión del valor del mensurando para corriente alterna es:

$$e_m = (I_x) - K_n f_{ck}(I_r) \cdot f_c \quad (2.26)$$

Y la propagación de las incertidumbres en la incertidumbre combinada es:

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{I_x}^2 u^2(I_x) + C_{\delta_{I_x}}^2 u^2(\delta_{I_x}) + C_{I_r}^2 u^2(I_r) + C_{\delta_{m_e}}^2 u^2(\delta_{m_e})(1+j) + C_{f_{ck}}^2 u^2(f_{ck}) + \dots} \quad (2.27)$$

$$\dots + C_{f_{cl}}^2 u^2(f_{cl}) + C_{\delta_{U_{I_r}}}^2 u^2(\delta_{U_{I_r}}) + C_{\delta_{m_f}}^2 u^2(\delta_{m_f} + C_{\delta_c}^2 u^2(\delta_c))$$

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{I_x}^2 u^2(I_x) + C_{\delta_{I_x}}^2 u^2(\delta_{I_x}) + C_{I_r}^2 u^2(I_r) + C_{f_{ck}}^2 u^2(f_{ck}) + C_{f_{cl}}^2 u^2(f_{cl}) + C_{\delta_{m_l}}^2 u^2(\delta_{m_l}) + \dots} \quad (2.28)$$

$$\dots + C_{\delta_{m_d}}^2 u^2(\delta_{m_d} + C_{\delta_{m_f}}^2 u^2(\delta_{m_f} + C_{\delta_c}^2 u^2(\delta_c))$$

En Ecuación 2.27 no se utiliza factor de cobertura y en Ecuación 2.28 si. La incertidumbre expandida se obtiene según Ecuación 2.12 con un factor de cobertura $k=2,00$.

2.2.2. Procedimiento Calibración Resistencias mediante Método Directo

Este procedimiento, *PC-LCUPV-E06*, es utilizado para la calibración de resistencias mediante la comparación con unos patrones de referencia del que dispone el laboratorio. El procedimiento *PC-LCUPV-E16* explicado anteriormente no recoge la calibración de equipos multímetros que puedan medir resistencias. Para ello se utiliza este procedimiento. Los elementos que lo componen son las resistencias de referencia y el equipo a calibrar HP34401A. No es necesario el equipo 3458A de referencia ya que se dispone de estas resistencias certificadas y no es necesaria más precisión. El control de los comandos para adquirir medidas así como ajustar los rangos del multímetro a calibrar seguirá el proceso descrito en 2.2.1. Se comparará el valor de las lecturas del calibrando con los valores nominales de las resistencias. El conexionado del equipo se realizará a 4 terminales para fiabilizar la medida, a partir de $1\text{M}\Omega$ se pasará a 2 terminales debido a que el equipo no permite lecturas a cuatro terminales a partir de ese rango.

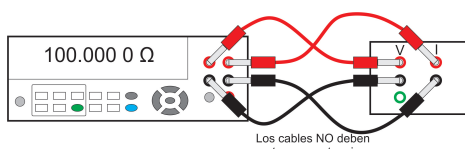


Figura 2.9: Conexión a 4 terminales

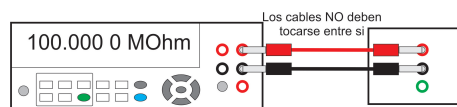


Figura 2.10: Conexión a 2 terminales

La expresión del mensurando es :

$$e_m = (R_x + \delta_{R_x} - R_{x0} + \delta_{R_{tx}}) - (R_s + \delta_{R_{ds}} + \delta_{R_{ts}} + \delta_{R_{ps}} + \delta_{R_{cs}}) \quad (2.29)$$

- $e_m \equiv$ Mensurando error de medida.
- $R_x \equiv$ Valor medio visualizado por el equipo a calibrar cuando se conecta la resistencia.
- $\delta_{R_x} \equiv$ Corrección debido a la resolución de R_x
- $R_{x0} \equiv$ Valor visualizado por el calibrando ante un corto a su entrada.
- $\delta_{R_{x0}} \equiv$ Corrección por resolución de R_0 .
- $\delta_{R_{tx}} \equiv$ Corrección por coeficiente de temperatura del calibrando.
- $R_s \equiv$ Valor de la resistencia de referencia aplicada.
- $\delta_{R_{ds}} \equiv$ Deriva de las resistencia de referencia aplicada.
- $\delta_{R_{ts}} \equiv$ Corrección debido a la variación de la referencia debido a una temperatura de trabajo diferente a la de calibración.
- $\delta_{R_{ps}} \equiv$ Corrección debido a la variación de la referencia debida a una corriente de medida diferente a la de calibración.
- $\delta_{R_{cs}} \equiv$ Corrección por resistencia de contactos o aislamiento.

Las correcciones debidas a las temperaturas δ_{Rtx} y δ_{Rts} se ignoran ya que las temperaturas de calibración se garantizan en el laboratorio. R_x y R_{x0} son medias de valores leídos en el calibrando y siguen las ecuaciones 2.5 y 2.6 para la obtención de su valor e incertidumbre respectivamente. Los términos δ_{Rx} y δ_{Rx0} son incertidumbres de resolución del equipo a calibrar y se calculan según Ecuación 2.7 ya descrita anteriormente. La resolución del equipo es la cantidad más pequeña que se puede registrar. Estas correcciones no tienen valor real ($\delta_{Rx} = \delta_{Rx0} = 0$). R_s es el valor de la resistencia de referencia y es obtenido así como su incertidumbre de su último certificado de calibración. La incertidumbre tiene que dividirse por el factor de cobertura, k , indicado en el informe de calibración. En caso de utilizar varias resistencias en serie se obtendrá el valor y su incertidumbre como la suma de los valores indicados por las referencias.

δ_{Rds} indica la deriva de la referencia y es indicado o bien a través de un histórico de la deriva entre calibraciones o bien calculando la tendencia entre las dos últimas calibraciones. No tiene valor real y su incertidumbre es de tipo B.

$$u(\delta_{Rds}) = \frac{Rds}{\sqrt{3}} \quad (2.30)$$

δ_{Rps} establece una corrección cuando se mide con una corriente distinta a la de calibración. Para nuestro caso, el multímetro 34401A utiliza corrientes adecuadas para cada rango de medida por lo que se ignorará este parámetro. Para las correcciones debidas a las posibles resistencias generadas por los contactos y el aislamiento, δ_{Rcs} , se tendrán en cuenta los tipos de referencias utilizadas así como sus valores:

- $R_s \leq 100k\Omega$:
 - Se utiliza resistencias de referencia RR-x. $\Delta R_{cs} = 0\Omega$
 - Se utiliza las Décadas de Resistencias de referencia. Se utilizarán los valores incluidos en sus especificaciones según su valor.

- $R_s \geq 1M\Omega$:

Como las medidas se realizan a 2 terminales existirá un incremento en la resistencia debido al aislamiento de los cables, R_{iso} . El valor se obtendrá de la siguiente forma:

$$\Delta R_{cs} = \frac{-R_s}{1 + \frac{R_{iso}}{R_s}} \quad (2.31)$$

Para este término se considera un valor medio nulo ($\delta_{Rcs} = 0$). Su incertidumbre es tipo B y se obtendrá de la siguiente manera:

$$u(\delta_{Rcs}) = \frac{\pm \Delta R_{cs}}{\sqrt{3}} \quad (2.32)$$

Una vez obtenidos todos los valores se indicará el valor de error de medida:

$$e_m = (R_x - R_{x0}) - (R_s) \quad (2.33)$$

Y se obtendrá la incertidumbre combinada de acuerdo a la GUM:

$$u_c(e_m) = \sqrt{C_{R_x} u^2(R_x) + C_{\delta_{R_x}} u^2(\delta_{R_x}) + C_{R_{x0}} u^2(R_{x0}) + C_{\delta_{R_{x0}}} u^2(\delta_{R_{x0}}) + C_{R_s} u^2(R_s) + \dots} \quad (2.34)$$

$$\dots + C_{\delta_{R_{ds}}} u^2(\delta_{R_{ds}}) + C_{\delta_{R_{cs}}} u^2(\delta_{R_{cs}})$$

Obtendremos finalmente la incertidumbre expandida multiplicando $u_c(e_m)$ por un factor de cobertura, si establecemos un mínimo de 10 medidas por valor medio, $k = 2$.

2.2.3. Certificado de Calibración

Las medidas obtenidas a través de los procedimientos anteriores se considerarán válidas siempre que los errores de medida obtenidos así como sus incertidumbres no superen unos límites especificados para cada valor medio obtenido. El laboratorio realizará un informe acerca de los resultados para poder exponer la resolución. ENAC establece un formato de certificado para ello. La información que se añade al certificado de calibración incluye de manera ordenada todos los rangos de medida del equipo a calibrar, los valores medios medidos por el equipo de referencia y el calibrando y las incertidumbres calculadas. Se incluirán también las condiciones de medida y de manera opcional los errores de medida y las especificaciones sobre las condiciones de la calibración.

ENAC reconoce la calibración a través de la inclusión de su logotipo cuando el procedimiento utilizado es aprobado por la ENAC y más del 50 % de las medidas se encuentran dentro del último alcance reconocido por ENAC. Si alguna medida está fuera de este alcance tendrá que indicarse con un asterisco para referenciar textualmente al comentario establecido por la ENAC: “Las actividades marcadas están fuera del alcance de la acreditación ENAC”.

Se indicará además en el certificado la trazabilidad de la calibración, así como el procedimiento utilizado, el equipo y sus certificaciones.

2.3. Equipamiento

En el laboratorio de metrología se dispone de los siguientes equipos para el procedimiento de calibración por el método de comparación. Es necesario que el multímetro de referencia tenga una precisión mayor que la del equipo a comparar. Para ello se dispone del equipo HP3458A con una resolución de ocho dígitos y medio, suficiente para la correcta calibración. También necesitamos garantizar una fiabilidad de las tensiones y corrientes generadas, siendo las incertidumbres de éstas las mínimas posibles para evitar error. Para ello utilizaremos el calibrador FLUKE5500A que generará patrones estables adecuados al proceso. Estos dos equipos forman parte de la estructura que dispone el laboratorio para la calibración de multímetros digitales de hasta 6 1/2 dígitos.

2.3.1. HP3458A

Este equipo es un multímetro de medida digital (DMM) de 8 dígitos y medio, este tipo de resolución no es común a los equipos profesionales o comerciales. Esto hace al 3458A uno de los pocos equipos con estas funcionalidades. Fue introducido al mercado en 1989 y hasta hoy sigue siendo utilizado y comprado para pruebas de calibración, así como para sistemas que necesitan una gran cantidad de lecturas.



Figura 2.11: HP3458A

Viejo, pero no obsoleto, presenta funcionalidades de gran precisión (hasta 0.1 ppm en medidas de tensión continua) y gran velocidad de recogida de muestras (Hasta 100.000 lecturas/segundo con 4.5 dígitos de resolución). En cuanto a lo que nos interesa, este equipo cuenta con una gran precisión en la linealidad de conversión A/D, gracias también porque dispone de tiempos de integración altos, que llegan a 0.05 ppm en 10 Voltios. Presenta resoluciones que van desde 100mV hasta 1000V para tensión. Además el ruido interno es reducido a menos de 0.1 ppm rms, produciendo así 8.5 dígitos de resolución totalmente operacionales.

El equipo también presenta una memoria interna con un lenguaje de instrucciones que va más allá de los multímetros digitales más convencionales. Permite controlar desde el número de muestras por disparo, el tipo de memoria utilizada (FIFO, LIFO), hasta escribir subrutinas en memoria que serán posteriormente ejecutadas, pudiendo crearse pequeños scripts para cuando se quiera realizar un tipo de medida que requiera varios pasos.

Las especificaciones técnicas garantizan además una mínima inexactitud de medida así como una desviación a medio/largo plazo mínima y evaluable (8 ppm/año).

Range	Accuracy, tcal $\pm 5^\circ\text{C}$ $\pm(\text{ppm of Reading} + \text{ppm of Range})$		Resolution
	90 Day	1 Year	
100mV	3.5 + 3	5 + 3	10 nV
1V	3.1 + 0.3	4 + 0.3	10 nV
10V	2.6 + 0.05	4 + 0.05	100 nV
100V	4.5 + 0.3	6 + 0.3	1 μV
1000V	4.5 + 0.1	6 + 0.1	10 μV

Tabla 2.1: 3458A Inexactitud VDC

Range	Accuracy, tcal $\pm 5^\circ\text{C}$ $\pm(\text{ppm of Reading} + \text{ppm of Range})$		Resolution
	90 Day	1 Year	
10 Ω	15 + 5	15 + 5	10 $\mu\Omega$
100 Ω	10 + 5	12 + 5	10 $\mu\Omega$
1k Ω	8 + 0.5	10 + 0,5	100 $\mu\Omega$
10k Ω	8 + 0.5	10 + 0,5	1m Ω
100k Ω	8 + 0.5	10 + 0,5	10m Ω
1M Ω	12 + 2	15 + 2	100m Ω
10M Ω	50 + 10	50 + 10	1 Ω
100M Ω	500 + 10	500 + 10	10 Ω
1G Ω	0,5 % + 10	0,5 % + 10	100 Ω

Tabla 2.2: 3458A Exactitud Resistencia

Range	Accuracy, tcal $\pm 5^\circ\text{C}$ $\pm(\text{ppm of Reading} + \text{ppm of Range})$		Resolution
	90 Day	1 Year	
100 nA	30 + 400	30 + 400	1 pA
1 μA	15 + 40	20 + 40	1 pA
10 μA	15 + 10	20 + 10	1 pA
100 μA	15 + 8	20 + 8	10 pA
1 mA	15 + 5	20 + 5	100 pA
10 mA	15 + 5	20 + 5	1 nA
100 mA	30 + 5	35 + 5	10 nA
1 A	100 + 10	110 + 10	100 nA

Tabla 2.3: 3458A Inexactitud IDC

2.3.2. FLUKE5500A

El equipo FLUKE5500A es un calibrador multifunción que nos servirá para generar las distintas medidas que requeriremos durante el proceso. El objetivo es conseguir la mayor exactitud posible. Con este equipo es posible calibrar multímetros de precisión en medidas de tensión continua y alterna, así como corriente, además de resistencia. También sirve para calibrar capacidad

AC Accuracy (*% of Reading + % of Range*)

Range	ACBAND>2 MHz							
	1Hz to 40Hz	40Hz to 1kHz	1kHz to 20kHz	20kHz to 50kHz	50kHz to 100kHz	100kHz to 300kHz	300 kHz to 1MHz	1MHz to 2MHz
10mV	0.03 + 0.03	0.02 + 0.011	0.03 + 0.011	0.1 + 0.011	0.5 + 0.011	4.0 + 0.02	-	-
100mV - 10V	0.007 + 0.004	0.007 + 0.002	0.014 + 0.002	0.03 + 0.002	0.08 + 0.002	0.3 + 0.01	1 + 0.01	1.5 + 0.01
100V	0.02 + 0.004	0.02 + 0.002	0.02 + 0.002	0.035 + 0.002	0.12 + 0.002	0.4 + 0.01	1.5 + 0.01	-
1000V	0.04 + 0.004	0.04 + 0.002	0.06 + 0.002	0.12 + 0.002	0.3 + 0.002	-	-	-

Tabla 2.4: 3458A Inexactitud VAC

y temperatura. El equipo es controlado mediante el panel frontal donde dispone de botones para indicar el valor así como la unidad. Pudiendo generar valores muy pequeños o grandes. El proceso para generar un patrón es:

1. Indicar valor y tipo medida (100 mV)
2. Pulsar enter.(Indica al calibrador a su salida que prepare el patrón)
3. Pulsar botón OPER.(Comando para que genere el valor)
4. Cuando se desea parar, pulsar STBY.(Deja de sacar el valor a la salida pero mantiene la configuración del patrón)
5. Si se desea otro valor pulsar CLEAR(borra los datos indicados) y volver a 1.

El calibrador ofrece inexactitudes mínimas y especificadas por el fabricante.

Range	Absolute Uncertainty, $\pm 5^\circ\text{C}$ $\pm(\% \text{ of output} + \mu\text{V})$				Resolution μV
	90 days		1 year		
0 to 329.9999 mV	0.005	3	0.006	3	0.1
0 to 3.299999 V	0.004	5	0.005	5	1
0 to 32.99999 V	0.004	50	0.005	50	10
30 to 329.9999 V	0.0045	500	0.0055	500	10
100 to 1020.000 V	0.0045	1500	0.0055	1500	1000

Tabla 2.5: FLUKE 5500A DC Voltage Specifications

Range	Absolute Uncertainty, $t_{cal} \pm 5^\circ C$ $\pm(\% \text{ of output} + \mu V)$				Resolution Ω
	90 days		1 year		
0 to 10.99 Ω	0.009	0.008	0.012	0.008	0.001
11 to 32.999 Ω	0.009	0.015	0.012	0.015	0.001
33 to 109.999 Ω	0.007	0.015	0.009	0.015	0.001
110 to 329.999 Ω	0.007	0.015	0.009	0.015	0.001
330 Ω to 1.09999 k Ω	0.007	0.06	0.009	0.06	0.01
1.1 to 3.29999 k Ω	0.007	0.06	0.009	0.06	0.01
3.3 to 10.9999 k Ω	0.007	0.6	0.009	0.6	0.1
11 to 32.9999 k Ω	0.007	0.6	0.009	0.6	0.1
33 to 109.999 k Ω	0.008	6	0.011	6	1
110 to 329.999 k Ω	0.009	6	0.012	6	1
330k Ω to 1.09999 M Ω	0.011	55	0.015	55	10
1.1 to 3.29999 M Ω	0.011	55	0.015	55	10
3.3 to 10.9999 M Ω	0.045	550	0.06	550	100
11 to 32.9999 M Ω	0.075	550	0.1	550	100
33 to 109.999 M Ω	0.4	5500	0.5	5500	1000
110 to 330 M Ω	0.4	16500	0.5	16500	1000

Tabla 2.6: FLUKE5500A Resistance Specifications

2.4. GPIB

El desarrollo de la automatización de procesos de medida es un gran avance para la metrología. Como hemos comprobado, para que el resultado de la medida tenga cierto rigor científico es necesario repetir la lectura de la medida varias veces. El aumento del número de medidas o la complejidad del sistema supone un problema ya que el proceso puede llegar a ser largo y tedioso si es llevado a cabo controlando manualmente los equipos involucrados, aumentando la probabilidad de error humano.

En la instrumentación, el desarrollo de equipos con la capacidad de ser controlados remotamente ayuda a mejorar los procesos de tomas de medidas. Establecer conexiones independientes cuando se usa un solo instrumento puede ser una solución aceptable, si se precisa del control de múltiples equipos a través de su interconexión, surge un problema que empieza desde la compatibilidad de sus conectores, tipos de cables y señalización de líneas hasta los tipos de formato de datos que son aceptados o como direccionar la información a cada instrumento.

A mediados de los setenta se estableció la norma de interconexión y comunicación IEEE-488 para intentar dar una posible solución. Tuvo una gran aceptación entre los fabricantes de instrumentos promoviendo su uso para la comunicación entre equipos.

2.4.1. IEEE 488

Como ya hemos dicho, la IEEE 488 se compone de una serie de normas, estándares y especificaciones, para poder dar soporte a un bus de interconexión sin importar el fabricante. Teniendo esto

en cuenta, es importante dar una revisión histórica. A mitad de los años 60, la compañía Hewlett-Packard decidió investigar la creación de una interfaz que sería utilizada en sus instrumentos. La razón de esta decisión es debido al incremento de la complejidad de los equipos que hacia necesario una manera óptima de poder manejar un mayor número de equipos , además de evitar tener que estar instruyendo a más técnicos para poder realizar las pruebas que con cada avance añadían exponencialmente más verificaciones y dificultad. Para ello la compañía desarrolló el bus HP-IB, buscando poder comunicar dos instrumentos entre sí.

Ésto fue el origen de la norma para la interconexión de aparatos de medidas que se desarrolló a partir de 1972 por iniciativa de HP, que dos años después sería aceptada por parte de la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC). El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) publicaría el documento titulado “Interfaz Digital para Instrumentación Programable”, que contenía las especificaciones de una interfaz estándar americana. Más tarde la norma se revisó y complementó con la información recibida por parte de los fabricantes con sus experiencias y sugerencias, pasando a llamarse “IEEE Standard 488-1978”. Esta norma ha pasado a ser el estándar para el Bus de Instrumentación de Propósito General (GPIB) y la mayoría de los fabricantes de instrumentación del mundo lo utilizan. Actualmente se conoce como IEEE 488.1 debido a más revisiones y posteriores actualizaciones, En ella se describe la interfaz en todos sus términos. Esta norma especifica las capas mecánicas del estándar (conectores y cables), así como las líneas lógicas y la señalización. También establece un protocolo para la gestión del bus. Posteriormente se añadió la extensión IEEE 488.2[17] que define , entre otras cosas, una serie de comandos para su uso en la comunicación GPIB. La norma no define en ningún momento instrucciones para la programación de instrumentos, ni una aplicación para el control del bus.

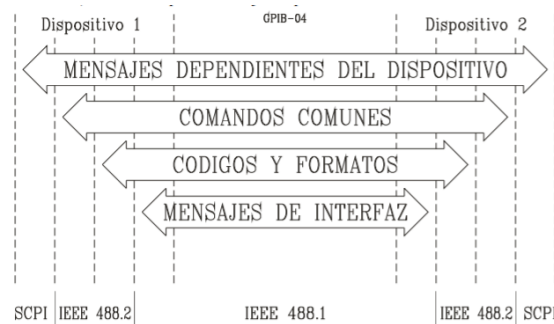


Figura 2.12: Capas funcionales IEEE 488.1[18]

Esto creó que por una parte los diseñadores de instrumentos tuvieran máxima flexibilidad a la hora de optimizar sus recursos hardware y software. Mientras que los programadores tenían serios problemas para poder modular funciones debido a que la programación del instrumento de un fabricante difícilmente se podría aprovechar para la de uno similar de otro fabricante.

2.4.2. Conexión y Comunicación

Este estándar presenta un sistema de comunicación con tres elementos estructurales. Éstos pueden ser dispositivos de escucha (*listeners*), comunicadores (*talkers*) o controladores. Un dispositivo comunicador sería aquel capaz de transmitir a través del bus correspondiente datos de medidas así como información acerca de su estado, en respuesta de la petición de un controlador. Un comunicador generalmente también es un dispositivo de escucha. Éste es aquel que puede recibir órdenes

del controlador así como información para ejecutar posteriormente una acción. Un ejemplo sería un multímetro, que recibe inicialmente comandos para su configuración, aplicando internamente las características pertinentes, al que seguidamente el controlador envía una petición de lectura y entonces el multímetro pasa a comunicarse respondiendo con los datos de las medidas. También un dispositivo de escucha no tiene por qué tener la capacidad de comunicarse.

El controlador sería el cerebro del sistema, es el que dispone de los comandos con los que se puede realizar la comunicación entre los distintos dispositivos. Este tipo de comunicación está optimizado para un sistema con un controlador y uno o varios dispositivos. De manera que la comunicación efectiva se realice de manera: *Orden del controlador, respuesta del dispositivo*. Es posible crear sistemas con varios controladores, pero presentaría una interfaz compleja en la que sería necesario indicar que controlador es maestro y éste determinaría que unidad tiene el control del bus para cada momento dado. Los elementos denominados dispositivos no tienen la capacidad de convertirse en controladores, no disponen de comandos con los que realizar peticiones a través del bus. Pero si pueden crearse sistemas sin controladores, por ejemplo un voltímetro (dispositivo comunicador) y un equipo de visualización (escucha) en el cual constantemente el voltímetro ofrece lecturas que son transmitidas y mostradas a través del *display*.

Estos sistemas pueden tener hasta 14 equipos activos de escucha conectados simultáneamente. Por lo que permite una diversidad de configuraciones utilizando múltiples equipos de medida, generadores... Pero solo puede haber un elemento transmitiendo a través del bus a la vez, es decir, las respuestas de los equipos comunicadores con el controlador son recibidas individualmente tras una petición que se envía inicialmente. Consecuentemente un equipo que sea capaz de recibir órdenes y enviar información, será un elemento de escucha y comunicador en un sistema pero nunca a la vez.

Todos los elementos en la interfaz IEEE-488 se conectan en paralelo a través del cable GPIB, este sistema puede contener 15 elementos interconectados. Cada cable tiene en sus terminaciones un conector hembra y macho, de manera que las conexiones se pueden realizar dispositivo a dispositivo, realizando interconexiones a través de las terminaciones.

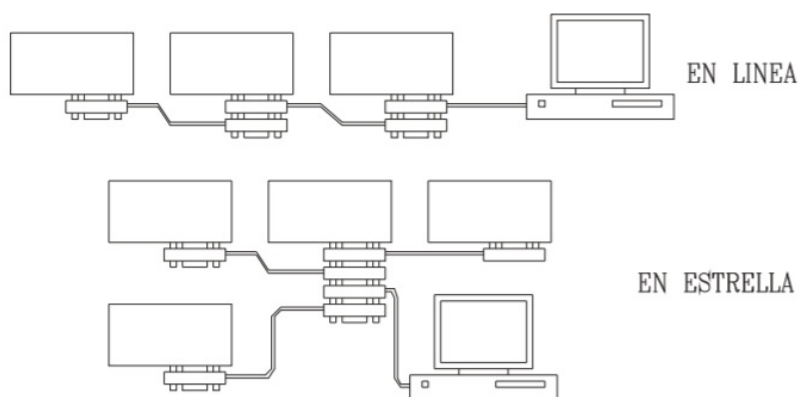


Figura 2.13: Conexión dispositivos interfaz IEEE-488[18]

Permitiendo varias agrupaciones de dispositivos en las configuraciones de estrella, en línea o bien agrupaciones mixtas de las configuraciones anteriores. La disposición ofrece que siempre haya al menos un elemento libre para poder añadir si se requiere un nuevo equipo al sistema. La máxima longitud por cable es 20 metros y si se requiere velocidades de transferencia de datos

alta se limita a 15 metros. Estas dimensiones están pensadas para poder tener equipos localizados físicamente cercanos entre ellos. Permitiendo ordenar instrumentos en formatos tipo armario *rack*.

La norma IEEE488[19] incluye las especificaciones para los conectores que serán utilizados en todos los dispositivos y equipos. La Figura 2.14[20] muestra la disposición de los 24 pines del conector así como su estructura, diseñada para poder apilar conectores y realizar interconexiones como en la Figura 2.13.

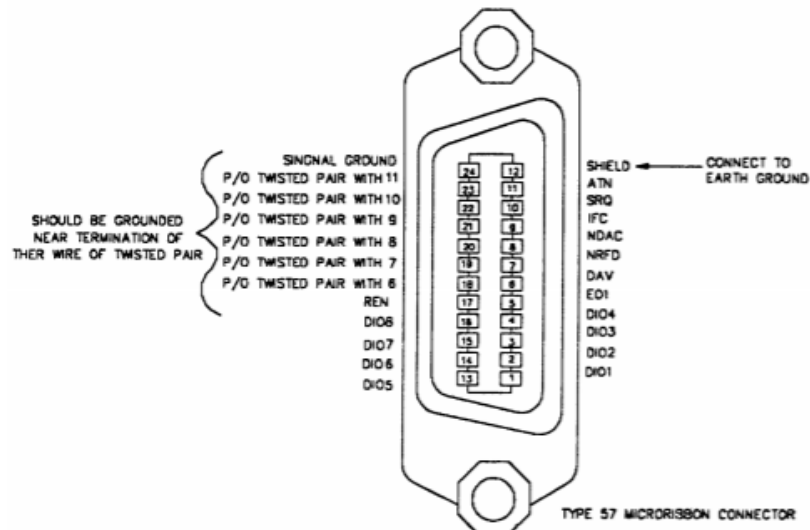


Figura 2.14: Pines de conexión del conector IEEE 488

2.4.3. Direccionamiento

Para poder realizarse una comunicación de datos correcta cada dispositivo del sistema debe estar identificado con una dirección única. IEEE488[19] asigna 31 direcciones, dejando a disposición un número de 30 direcciones disponibles para los dispositivos, siendo reservada la 31 para propósitos de control. Éstas se pueden establecer a través de configuración software. Ya sea que el equipo ofrece en su hardware una configuración a través de un menú o, en el caso de un controlador, asignando vía una aplicación la dirección de éste. Existen también equipos que permiten una asignación de pines a través de un conjunto de switches localizados en el hardware del dispositivo.

Se recomienda generalmente utilizar la dirección 0 para el controlador, para los equipos es preferible utilizar direcciones a partir de la 10, así separando y ordenando los distintos elementos de la comunicación. A menudo las compañías establecen unas direcciones estándar para sus instrumentos, de manera que a la hora de crear sistemas combinándolos sea sencillo ver su disposición.

2.4.4. Líneas del bus

Cada bus de conexión está compuesto, como muestra la Figura 2.14, por 16 líneas activas, una línea de masa, otra de “escudo” o apantallamiento y 6 líneas para el par trenzado (3 pares) para el *handshake*, que es un protocolo de control de transferencia que se detallará más adelante. Nos

centraremos en las líneas activas, de las cuales, ocho son usadas para la transmisión de datos, tres para el control del *handshake* y las restantes 5 para gestión del interfaz.

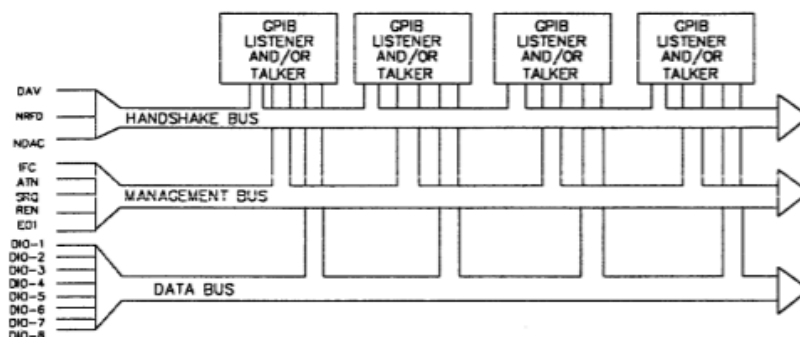


Figura 2.15: Líneas del bus GPIB

La comunicación de los diferentes grupos de líneas activas se realizan en paralelo entre ellas y en serie para cada uno de los dispositivos conectados. La comunicación es bilateral pudiendo transmitir información en ambos sentidos. Se utiliza lógica negativa, esto es debido a que los dispositivos GPIB son diseñados con salidas de transistor en colector abierto, que transmiten un nivel “cero” de voltaje para indicar una condición verdadera (un 1). Esto permite la conexión de todos los dispositivos en paralelo, ya que evita la capacidad de cualquier dispositivo de crear una condición verdadera en su salida, además reduce la susceptibilidad de la línea al ruido, creando un nivel “uno” o alto de tensión a la salida de cualquier línea que no esté en uso.

El tipo de transmisión de información sería a través de la forma *bit parallel, byte serial*, lo que indica que para cada una de las líneas activas de control se envía un bit de información las cuales habilitan o no la información entrante, que vendría a través de los buses de datos, DIO-[1..8], formando una palabra de un byte.

2.4.4.1. Líneas de control Handshake

Durante el propósito de la comunicación existen órdenes que son transmitidas para ser recibidas por varios equipos. Antes de que se inicie una nueva transmisión cada dispositivo a la escucha debe tener consciencia de que la transmisión ha finalizado y el mensaje ha sido recibido por todos los dispositivos a los que se ha direccionado la orden. La función del protocolo *handshake* es ésta. Es necesario debido a la diferencia entre equipos en la velocidad de aceptación y recepción de datos. A través del sistema de 3 cables de par trenzado se evita que un dispositivo a la escucha “rápido” no acepte nuevas entradas mientras otro más “lento” aún no ha terminado de procesar el mensaje. Las líneas activas del handshake controlan la transferencia de datos:

- **NRFD** (Not Ready For Data). Esta línea es utilizada por todos los dispositivos del bus para indicar su estado actual para aceptar una nueva transmisión de datos. Si un instrumento no está listo por cualquier razón indicará una salida a 0 (Verdadera), deshabilitando al controlador (o otro comunicador) a realizar una nueva transmisión. Solo cuando todos los dispositivos tienen este bit a 1 (falso) se permite la comunicación de datos.

- **DAV** (Data Valid). Solo utilizada por el equipo comunicador ,*talker*, para indicar que la información transmitida a través de las 8 líneas activas es válida.
- **NDAC** (No Data Accepted). Utilizada por el/los equipo/s a la escucha para indicar que aún no se aceptan datos a través de una salida a nivel 0 (verdad) . En caso de múltiples *listeners*, la línea no se devuelve a 1 (false) hasta que el equipo más lento haya aceptado la información.

2.4.4.2. Líneas de control general

Además de las líneas del *handshake* hay un total de cinco líneas de control de la interfaz para proporcionar un correcto flujo de las órdenes e información a través del bus. Éstas son:

- **ATN** (Attention). Esta línea es monitorizada por todos los dispositivos del bus pero solo es usada por el controlador. Su función es situar la interfaz en modo comando cuando es verdadero(0), y en modo datos cuando es falso. En modo comando todos los dispositivos capaces de escuchar recibirán la siguiente transmisión y aceptarán información proveniente de las líneas de datos como órdenes o direcciones. Si el controlador envía datos deja la línea a nivel alto.
- **IFC** (Interface Clear). Solo utilizada por el controlador para inicializar la interfaz en un modo a la espera dónde no hay actividad en el bus. El resto de dispositivos monitoriza esta línea, cuando la línea está a nivel bajo (verdad) todos los dispositivos con capacidad de escuchar o comunicarse se establecen en no escucha y no comunicación.
- **REN** (Remote Enable). Esta línea es gestionada solo por el controlador para habilitar a todos los dispositivos a la escucha que hayan sido direccionados en modo remoto, dejando esta línea a nivel bajo . Todos los dispositivos capaces de trabajar en remoto/local entonces no responderán a controles por parte del hardware propio del equipo. Si la línea está a nivel alto (Falso) entonces los equipos pasan a modo local. También es posible en algunos equipos volver a local a través de un botón en su interfaz, generalmente llamado LOCAL.
- **SRQ** (Service Request). Esta línea puede ser utilizada por cualquier dispositivo del bus para mostrar necesidad de ser atendido, por ejemplo, debido a un error de sintaxis del último comando recibido o por realizar una medida que sobrepasa los límites de resolución del equipo (*overload*). Si se activa esta petición en cualquier dispositivo puede interrumpir la secuencia de eventos actual que llevaba el programa.

A su vez el controlador puede limpiar la línea(devolverla a nivel alto), mediante una función característica denominada *serial poll*, si la señal SRQ está activa, el controlador detiene la comunicación de datos y pide información de estado de cada uno de los dispositivos conectados, ésta es transmitida por las líneas de datos, que han sido configuradas previamente para ello. La información es recibida y almacenada. Puede ser usada para gestionar las peticiones a través de la programación de rutinas que atiendan a los estados indicados por los equipos.

- **EOI** (End Or Identify). Depende del estado de ATN. Si la línea ATN está activa(modos comando) esta línea es utilizada por el controlador para realizar una encuesta a todos los dispositivos, dónde responderán hasta 8 equipos a la vez, indicando cada uno en una línea de datos diferente un bit de estado.

Si el estado de la línea ATN es inactivo(modos datos) esta línea es usada por cualquier dispositivo que se esté comunicando para indicar el último byte de información del mensaje. La norma IEEE-488 permite utilizar para indicar el fin de transmisión el carácter de salto de página (ASCII 10). En algunos equipos es posible configurar que carácter hace de final de línea, generalmente usados aparte del carácter de control ASCII 10, el retorno de carro (ASCII 13) o el fin de transmisión (ASCII 4). También es posible, si el dispositivo lo permite, configurar para que se transmitan datos desde un dispositivo sin que se indique el byte de final de transmisión, dejando la responsabilidad al controlador de terminar la comunicación a través de la programación de una rutina. Por ejemplo, el controlador inicialmente configura al dispositivo para que no exista carácter de terminación, después le pide los datos de las lecturas que está haciendo, éste inicia la transmisión de la información, y el controlador finaliza la comunicación tras una condición (tras el paso de un tiempo o cuando la línea de datos no envíe información) habilitando la línea IFC o poniendo la línea ATN a nivel bajo (modo comando) para continuar con el siguiente comando en la secuencia. A modo ilustrativo, la Tabla 2.7[20] muestra una serie de comandos para la programación de los tipos de caracteres de finalización en un medidor digital Fluke.

Sintaxis comandos	Carácter de terminación
W0(default)	Habilita CR,LF y EOT
W1	Habilita CR y LF
W2	Habilita CR y EOT
W3	Habilita solo CR
W4	Habilita LF y EOT
W5	Habilita solo LF
W6	Habilita solo EOT
W7	Deshabilita todos los caracteres de terminación

CR=Retorno de carro, LF=Salto de página, EOT=Final de Transmisión

Tabla 2.7: Caracteres de terminación comunes programables a través de GPIB

2.4.4.3. Líneas de datos

La transmisión de datos es dada a través de las ocho líneas activas DIO[1..8]. Siendo DIO1 el bit menos significativo. Estas líneas pueden transmitir instrucciones para la configuración de los equipos, direcciones del bus, datos de la medida de un dispositivo, palabras de estado y comandos universales o direccionados. El documento IEEE-488.2[17] especifica los tipos de formato requeridos para cualquier tipo de mensaje que vaya a ser transmitido, algunos pueden ser opcionales para el diseñador del equipo. La Figura 2.16 ilustra los formatos requeridos y opcionales.

El dispositivo, sea de escucha(*listener*) o comunicador(*talker*), debe entender mínimamente información en un formato numérico para cuando se transmitan direcciones a través del bus, bien porque se preguntan la dirección del dispositivo o porque el controlador direcciona un comando a un dispositivo y el resto de dispositivos tiene que obtener la dirección para saber si ha sido asignado. Los dispositivos con capacidad para comunicarse además deben aceptar mensajes con formato tipo ASCII para la configuración del instrumento y generalmente este formato también es utilizado para el envío de lecturas realizadas por el dispositivo.

LISTENER FORMATS	STATUS
<Decimal Numeric Program Data>	Required
<Character Program Data>	Optional
<Suffix Program Data>	Optional
<Non-Decimal Numeric Program Data>	Optional
<String Program Data>	Optional
<Arbitrary Block Program Data>	Optional
<Expression Program Data>	Optional
TALKER FORMATS	
<NR1 Numeric Response Data>	Required
<Arbitrary ASCII Response Data>	Required
<Character Response Data>	Optional
<NR2 Numeric Response Data>	Optional
<NR3 Numeric Response Data>	Optional
<Hexadecimal Numeric Response Data>	Optional
<Octal Numeric Response Data> Optional	
<Binary Numeric Response Data>	Optional
<String Response Data>	Optional
<Definite Length Arbitrary Block Response Data>	Optional
<Indefinite Length Arbitrary Block Response Data>	Optional

Figura 2.16: Formatos de datos requeridos y opcionales especificados por IEEE-488.2

La Tabla 2.8[20] muestra la codificación de los datos en código 7 bit ASCII. Podemos ver la asignación de los valores de las líneas DIO[1..8] con su representación en código 7 bit ASCII. Existe un apéndice de la norma IEEE-488, el IEEE-P981, que puede proveer cierta estandarización para los fabricantes de equipos GPIB. Establece una estructura común del mensaje y define el procedimiento del protocolo de control.

2.4.5. Comandos de la interfaz

Hay que diferenciar inicialmente entre comandos de la interfaz y comandos para la programación de los dispositivos. Los primeros atienden a la actividad del bus y están indicados por la norma IEEE-488.1[19]. Mientras que los segundos son una serie de comandos creados por el fabricante del dispositivo, que pueden tener mismo nombre que comandos de interfaz o hacer funciones similares, para el control de éste a través del bus y no están incluidos en el IEEE-488.1. Ésto es debido a que la norma solo tiene interés por describir el interfaz y su correcta gestión, por lo que no se establecieron comandos para la programación de dispositivos. Permitiendo libertad a los fabricantes de equipos para la creación de comandos para operar a través del bus. Pero ahora nos centraremos en los comandos de interfaz.

Existen dos tipos de comandos de interfaz:

- **Comandos Universales:** Estos comandos son enviados a todos los dispositivos conectados en el bus. Se dividen en dos tipos, los comandos monolínea que son aquellos que utilizan las líneas de control proporcionadas por el bus: ATN, IFC, REN y EOI. Y ya han sido descritas en ???. El otro tipo sería el comando multilínea que es enviado a través de las líneas de datos y aceptado por los dispositivos cuando la línea ATN se presenta a nivel alto (modo comando).
- **Comandos Direccionados:** Son aquellos que solo son aceptados por los dispositivos que previamente han sido direccionados. También son enviados a través de los buses de datos y aceptados cuando la línea ATN está en modo comando. Existen también comandos adicionales que son utilizados de apoyo de los comandos direccionados, como puede ser indicar una dirección secundaria o asignar una configuración extra para el comando.

TABLA CÓDIGOS ASCII/ISO & IEEE								
b7 b6 b5 BITS b4b3b2b1	0 0 0	0 0 1	0 1 0	0 1 1	1 0 0	1 0 1	1 1 0	1 1 1
	CONTROL		SIMBÓLOS NÚMEROS		MAYÚSCULAS		MINÚSCULAS	
0 0 0 0	NUL	DLE	SP	0	@	P	,	p
0 0 0 1	SOHL	DC1	!	1	A	Q	a	q
0 0 1 0	STX	DC2	“	2	B	R	b	r
0 0 1 1	ETX	DC3	#	3	C	S	c	s
0 1 0 0	EOT	DC4	\$	4	D	T	d	t
0 1 0 1	ENQ	NAK	%	5	E	U	e	u
0 1 1 0	ACK	SYN	&	6	F	V	f	v
0 1 1 1	BEL	ETB	,	7	G	W	g	w
1 0 0 0	BS	CAN	(	8	H	X	h	x
1 0 0 1	HT	EM	)	9	I	Y	i	y
1 0 1 0	LF	SUB	*	:	J	Z	j	z
1 0 1 1	VT	ESC	+	;	K	[	k	{
1 1 0 0	FF	FS	'	<	L	\	a	q
1 1 0 1	CR	GS	-	=	M	]	l	:
1 1 1 0	SO	RS	.	>	N	^	n	≈
1 1 1 1	SI	US	/	?	O	_	o	(DEL)
	COMANDOS DIRECCIONADOS	COMANDOS UNIVERSALES						

Tabla 2.8: Relación códigos ASCII y comandos para los valores de bits 1 a 7 del byte de datos

2.4.5.1. Comandos Universales

Los comandos universales que utilizan las líneas de datos son los siguientes:

- **DCL**(Device Clear): Este comando hace que el dispositivo vuelva a una configuración predefinida. Los dispositivos solo aceptarán la orden si están en modo remoto o han sido direccionados. El estado inicial al que vuelve el equipo es definido por el fabricante.
- **LLO**(Local Lockout). Este comando es utilizado para deshabilitar el panel de control del dispositivo o volver a habilitar el modo local. Es útil cuando se realizan procesos automatizados a través del bus para evitar la manipulación del equipo de manera ajena al programa.
- **SPE**(Serial Poll Enable). Activa en todos los equipos comunicadores el modo *serial poll*. Éstos transmiten a través de las líneas de datos una palabra de 8 bits con información de estado del dispositivo. Usado para atender a las peticiones de un equipo que tiene activa la línea SRQ.
- **SPD**(Serial Poll Disable). Este comando va seguido del comando SPE. Vuelve a los dispositivos comunicadores a su estado inicial en el que transmitirán información cuando sean direccionados para ello.
- **PPU**(Parallel Poll Unconfigure). El comando resetea aquellos dispositivos que reconozcan comandos *parallel poll*. Esta acción se realiza cuando algún dispositivo es incapaz de responder a estos tipos de comando debido a que se encuentra en un estado ambiguo o ha ocurrido un error.

2.4.5.2. Comandos Direccionados

Básicamente son comandos que se asignan a una dirección, por tanto se conoce previamente la dirección o direcciones asignadas en la interfaz a el/los dispositivos. La norma IEEE-488 propone para propósito general del bus, para indicar unas operaciones básicas que deben establecer los instrumentos para una comunicación eficiente. No es necesario por parte de los equipos de responder a estas órdenes ya que el fabricante determina que comandos son necesarios para el correcto funcionamiento de la unidad cuando es controlada vía GPIB.

- **GET**(Group Execute Trigger). Este comando hace que todos los dispositivos direccionados con funcionalidad GET reciban la orden de iniciar una acción preprogramada. Los dispositivos que aceptan este comando son capaces de generar eventos, denominados de disparo (*trigger events*), en el que realizan una acción propia del instrumento. Por ejemplo un multímetro realizará una lectura o un generador producirá en su salida una señal preconfigurada. El propósito del comando es que se puedan generar estos eventos de forma simultánea en varios dispositivos.
- **GTL**(Go To Local). Provoca que el equipo a la escucha direccionado deje su estado remoto y vuelve a habilitar el panel de control frontal del instrumento. Si el dispositivo es direccionado de nuevo con un nuevo comando, éste volverá a habilitar el modo remoto.
- **PPC**(Parallel Poll Configure). El comando PPC indica a el/los dispositivo/s direccionado/s una configuración de los buses de datos para responder información de estado, es decir se prepara para el modo *parallel poll*. Es una variante del *serial poll* y su funcionalidad es la misma, obtener información de estado de los dispositivos, las diferencias son que el método *parallel poll* es más rápido pero solo puede obtener información de hasta 8 dispositivos a la vez y solo un bit de información por cada uno. Este comando se ayuda de dos comandos adicionales, **PPE**(Parallel Poll Enable) y **PPD**(Parallel Poll Disabled), para realizar la comunicación correspondiente. Primero se envía el comando PPC seguido de PPE. Cuando se termina la transmisión de la información de estado, el controlador envía el comando PPD para finalizar el modo.
- **UNT**(Untalk). Desactiva el direccionamiento del equipo que se esté comunicando en ese momento. No es necesario el uso del comando ya que cuando se inicia un nuevo comando a un equipo direccionado diferente y éste va a comunicarse, el equipo anterior es deshabilitado automáticamente.
- **UNL**(Unlisten). El comando deshabilita la escucha de todos los dispositivos, desasignando todas las direcciones. Esta orden se utiliza para luego direccionar solo aquellos equipos en los que estemos interesados en enviarle información.

2.4.6. Comandos para la programación de instrumentos

La norma IEEE-488.2[17] establece una serie de comandos para la comunicación con instrumentos, siendo algunos de ellos obligatorios. Estos comandos se denominan comunes, ya que existen comandos específicos para un instrumento determinado y por tanto no se reflejan en la norma, denominados comandos no comunes. Se detallan a continuación en la Tabla 2.9 los comandos comunes que son obligatorios.

COMANDO	DESCRIPCIÓN
*IDN?	Indica al dispositivo que se identifique
*RST	El equipo realiza internamente un reset
*TST?	El equipo realiza un auto-test
*OPC	Cuando el equipo finalice una operación lo indicará activando un bit de estado
OPC?	Pregunta por la información del bit de estado que controla OPC.
*WAI	Indica al instrumento que espere y no realice ninguna acción hasta la siguiente orden.
*IST?	Pide información del bit IST.
*PRE	Escribe en el registro PPE para la configuración del modo <i>parallel poll</i> .
*PRE?	Realiza la lectura del registro PPE para obtener las direcciones asignadas para el <i>parallel poll</i> .
*CLS?	Borra el byte de estado del dispositivo
*ESE	Escribe en el registro de habilitación de sucesos estándar.
*ESE?	Lee el registro ESE.
*ESR?	Lee y después borra el registro ESE.
*SRE	Escribe en el registro de habilitación de petición de servicio.
*SRE?	Lee el registro SRE.
*STB?	Lee el byte de estado.
*TRG	Indica al dispositivo que inicie un evento de disparo.
*PCB	Solo utilizados por controladores, pasa el control a otro dispositivo.

Tabla 2.9: Comandos de dispositivo obligatorios por la norma IEEE488.2

2.4.7. Uso de los comandos a través de GPIB

Se va a ejemplificar una comunicación entre un controlador y un dispositivo, en concreto el multímetro digital 34401A del que se encarga este trabajo para así explicar conceptos de las sintaxis de instrucciones. Conocemos los comandos comunes a la interfaz, pero se incluirán otros propios del instrumento que se explicarán a continuación.

Todos los comandos son direccionados, así que se conoce la dirección del dispositivo y se están enviando las órdenes a él. Inicialmente le pedimos que se identifique, usamos:

```
*IDN?
```

El carácter “?” indica que se espera una respuesta por parte del dispositivo. El equipo este responderá con el mensaje correspondiente a su identificación. Será del tipo :

```
HEWLETT-PACKARD,34401A,<dirGPIB>, .
```

De esta manera podemos obtener la dirección del equipo. A continuación pedimos al instrumento que realice un reset y después lo configuramos para que mida tensión continua en el rango de 100mV. Los comandos serían:

```
*RST;CONF:VOLT:DC:RANGE 0.1
```

Aquí hay dos comandos, el primero *RST que realice el reset, después se utiliza el comando *CONF* que nos dispone el fabricante. El carácter “;” hace función de separador de instrucciones o mensajes. Mientras que el carácter “:” separa entre distintos campos de un comando. El carácter de espacio es utilizado al final de la segunda orden para separar entre encabezado y valor del parámetro. El comando CONF configura el multímetro en función de los parámetros elegidos, en

este caso se ha elegido para que se configure en medición de tensión, en concreto tensión continua para un rango de 0,1V.

Se realizarán, entonces, dos comunicaciones a través del bus. En la primera el equipo direccionado realizará un reset interno, cuando éste indique que ha finalizado de procesar la orden al controlador se ejecutará la siguiente, en este caso se configura el multímetro para el parámetro dado y finalizará la comunicación cuando termine la operación.

Ya tenemos al multímetro configurado y listo para realizar lecturas, se le aplicaría una fuente de tensión continua en el rango de 100mV a través de un equipo externo que no estamos controlando vía GPIB para simplificar el proceso. Ahora pedimos al multímetro que realice una lectura y nos envíe datos de ella. Los comandos serían:

```
*TRG:COUN 1;SAMP:COUN 1;
```

Con *TRG habilitamos el evento de disparo para que el multímetro realice la lectura, le indicamos con el parámetro COUN que solo realice una vez este evento. A continuación indicamos con el comando *SAMP* al multímetro que genere un evento de muestra, en el cual se transmite la lectura generada en el evento trigger al controlador.

El fabricante proporciona un comando para realizar esta acción de manera más simple: READ?. Indicando el carácter "?", el dispositivo devolverá la lectura tras realizarla. Los eventos que realizará internamente el instrumento serán los mismos.

Cuando queramos finalizar la comunicación y devolver el equipo a local, enviaremos el comando GTL a la dirección del equipo terminando el proceso.

2.5. Labview

Labview es un sistema de programación gráfico, es el D.A.E (*Develop Application Enviroment*) de National Instruments. Está pensado para sistemas hardware y software de pruebas, control y diseño, simulado o real y embebido. Su punto fuerte es que a través de una sola aplicación de desarrollo podemos de manera sencilla adquirir datos de equipos externos, desarrollar un análisis a través del procesamiento de éstos, y ofrecer funciones para la visualización sencillas e intuitivas que permiten comprobar resultados de forma rápida.

A diferencia de los lenguajes de programación basados en líneas de texto, dónde las instrucciones determinan la ejecución de programa, Labview usa programación de flujo de datos donde el flujo de éstos es el que determina la ejecución.

2.5.1. Características Básicas

Labview denomina a los programas creados *Virtual Instruments*, o instrumentos virtuales, ésto es debido a que las funciones que se implementan tienen su similitud con un instrumento, (*un programa que lea continuamente cierta medida es como si utilizaras un instrumento para obtenerla*). Por tanto la extensión .vi es propia de este software. Todo los VI usan funciones que manipulan entradas provenientes de la interfaz o de otras fuentes y muestra información resultante a través de algún display o la guarda en archivos para su posterior uso. También hay que decir que la programación es modular, es decir un VI puede utilizarse en otro programa, llamando al primero subVI, creando una jerarquía de módulos. Estos conceptos se aprovecharán adelante para el desarrollo de la aplicación.

El entorno de Labview se compone principalmente de dos partes, el **Panel Frontal**(PF) y el **Diagrama de Bloques**(DdB). En el PF se muestra lo que vería el usuario final: entradas para manipular y salidas de resultados. De las muchas formas posibles: matrices de entrada de datos, indicador de temperatura a través de una barra (tipo termómetro) o a través de un display numérico, botones para parar el proceso o para cambiar su funcionamiento... El PF es básicamente la interfaz del programa.

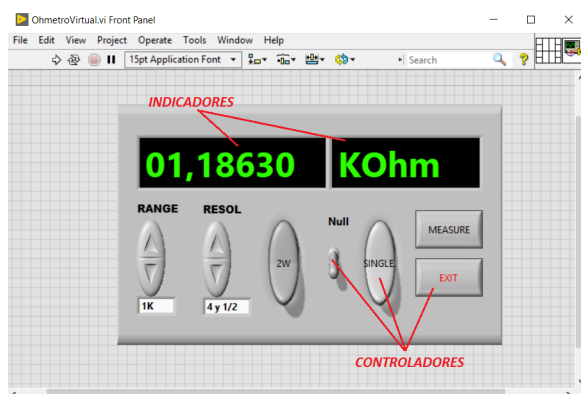


Figura 2.17: Ejemplo de un Panel Frontal

En el panel frontal se introducen **controladores** e **indicadores**. Que son los terminales de entrada y salida, respectivamente en un VI, al que el usuario puede acceder y comprobar a través

del PF. Los controladores simulan entradas propias del instrumento que se programe así como información adicional necesaria para el funcionamiento del VI. Los indicadores simulan salidas del dispositivo que a través del Bloque de Diagramas son generadas o adquiridas.

En el Diagrama de Bloques es donde veremos realmente el código del programa, allí se realizan todas las interconexiones entre las distintas entradas y salidas así como operaciones o conexiones con otros módulos que definen la funcionalidad del VI. Generalmente existe una asociación única entre elementos en el PF y el DdB. Un objeto creado en el Panel Frontal, tiene una representación inequívoca en el Diagrama de Bloques, de esta manera se permite de manera sencilla controlar variables de entrada así como representar indicadores de valores de salida.

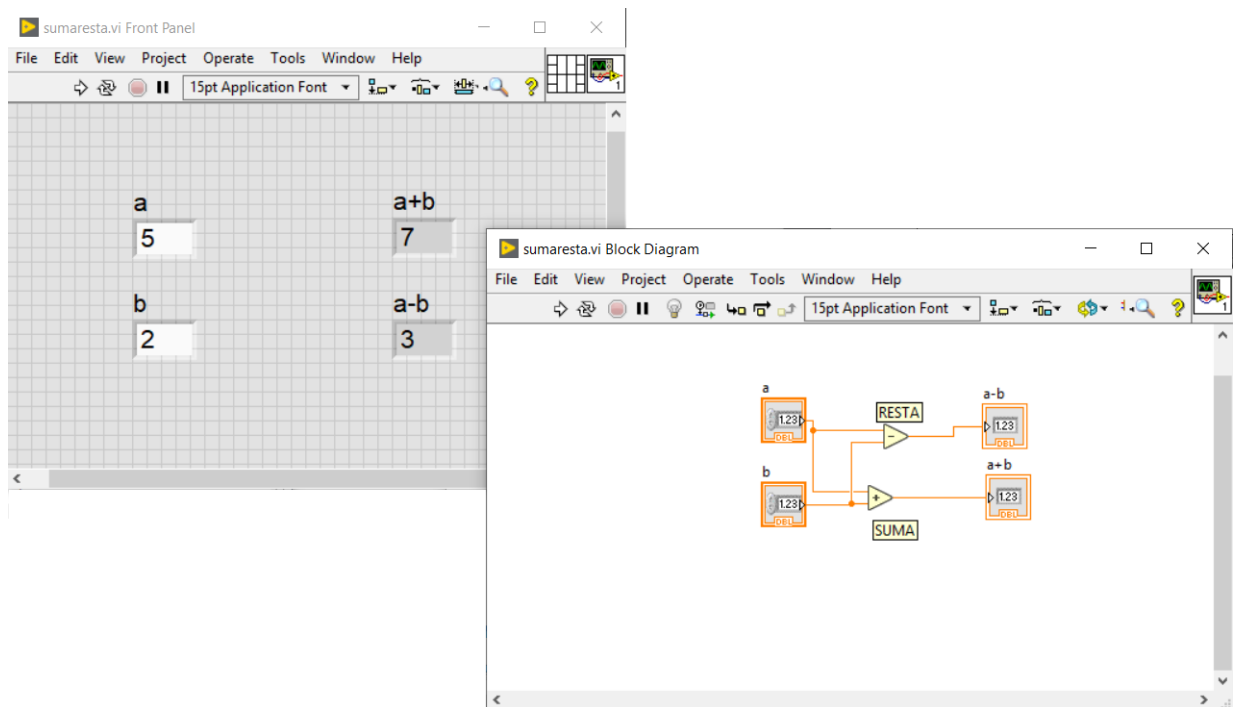


Figura 2.18: Diagrama de Bloques y su correspondiente Panel Frontal

2.5.2. Elementos

Como la programación en Labview es gráfica, es necesario representar los distintos elementos que actúan en el VI así como las interconexiones o las estructuras programables. Existen también funciones que provee Labview y también tienen que ser representadas. A continuación se detallan los elementos principales de Labview:

- TERMINALES:** Los terminales representan el tipo de dato, sea control o indicador, del elemento creado. De la misma manera que en el lenguaje de programación basado en texto, son las variables del programa y pueden ser de varios tipos: Numérico, de texto o booleano. Dentro de cada tipo es posible dar un formato al terminal. Generalmente en la parte de abajo del terminal es indicado el formato. En la Figura 2.19 se muestran varios ejemplos, como podemos ver en los terminales llamados Doble Precisión esta indicado el formato con el

nombre DBL. Los terminales numéricos se les puede dar varios formatos, pudiendo ser enteros, de coma flotante, complejos así como indicar una precisión (Doble, simple, extendida) o un tamaño (32,16,8 bits).

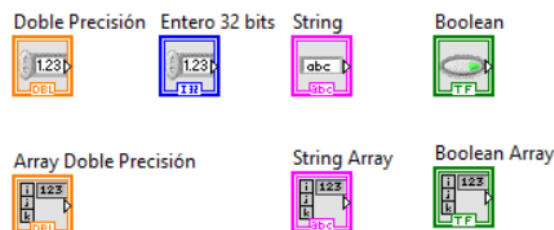


Figura 2.19: Ejemplos representación Terminales

Labview también ofrece la posibilidad que nuestro terminal sea un conjunto de variables del mismo tipo, es decir, construir un array de datos. Para ello es necesario configurar al terminal para que se muestre como un array. También es posible la creación de terminales que no tienen representación, es decir no son ni controladores ni indicadores, y por tanto son valores fijos, son terminales constantes. Labview ofrece constantes universales para el desarrollo de programas (π , $\pm\infty$, carácter de espacio o de salto de carro...). La representación viene dada con un cuadro del color del tipo de terminal que es.

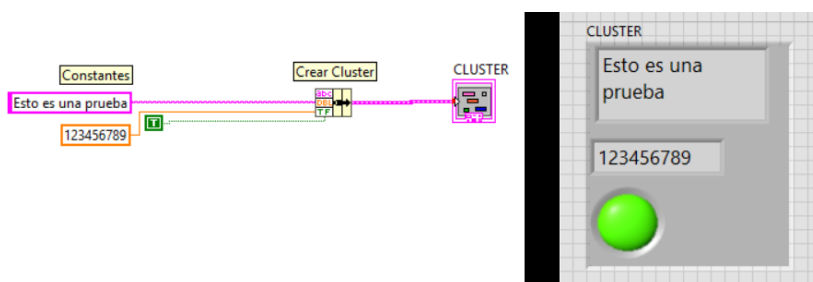


Figura 2.20: Constantes y Cluster

También es posible agrupar terminales de tipos distintos, pero éstos no forman un array, si no una agrupación denominada *Cluster*. Estos tipos de terminales son útiles para la gestión de errores, ya que podemos recibir a través de un terminal un conjunto de valores, por ejemplo, ID del error (numérico), descripción de éste (cadena de texto) e indicación si éste aun está presente (booleano). Labview propone un cluster específico para esto, llamado Cluster de error, es similar al mostrado en la Figura 2.20.

Existen más terminales, muchos son variantes de terminales anteriores, así puede haber matrices (array numérico de 2 dimensiones), Terminales I/O, que indican rutas de archivos o recursos (es una cadena de texto). Hay terminales que realizan la presentación gráfica de un conjunto de datos (señales). Cada uno de estos elementos tendrá su color característico. Un terminal puede tener representaciones distintas en el PF, según sea controlador o indicador y puede haber múltiples formas de mostrar un mismo dato. Ésto es una ventaja a la hora de crear programas ya que nos facilita la interpretación de datos así como la manipulación a través del control de terminales.



Figura 2.21: Representaciones en el PF de terminales

- **NODOS:** Los bloques o nodos son objetos que solo se muestran en el DdB, tienen entradas y salidas y realizan una operación determinada cuando el programa es ejecutado. Pueden ser funciones, operaciones, otros módulos VI (subVI), rutinas escritas en lenguaje de programación basado en texto... Labview da a disposición múltiples bloques según la intención del programador, a continuación se van a detallar los grupos más utilizados en este trabajo:
 - **Funciones:** Son programas que están integrados en el sistema y es la base de cualquier operación que se quiera realizar. Se pueden dividir en funciones básicas, como son los nodos Suma y Resta de la Figura 2.18, o funciones más complejas que son un conjunto de las anteriores. Por tanto tienen extensión .vi ya que son programas que utilizan nodos más básicos.

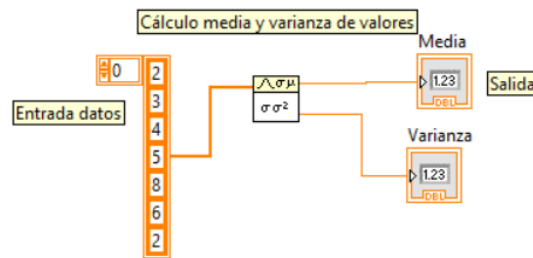


Figura 2.22: Ejemplo función para el cálculo de la media y la varianza

- **Property Nodes:** Son unas funciones especiales que sirven para la configuración a través del DdB de las propiedades de terminales. El property node se crea sobre un elemento y modifica inicialmente una propiedad indicada (valor, nombre, tamaño...) pero se pueden ir añadiendo nuevas sobre él, Es útil para inicializar terminales.

- SubVIs:** Es un programa que ha sido desarrollado por el usuario, utilizando funciones propias de Labview y que es utilizado en el VI actual. Para que cualquier VI pueda ser utilizado en otro hay que asignar primero las entradas y las salidas para que pueda ser funcional. Para ello todos los programas tienen un icono en el PF en la esquina superior derecha.

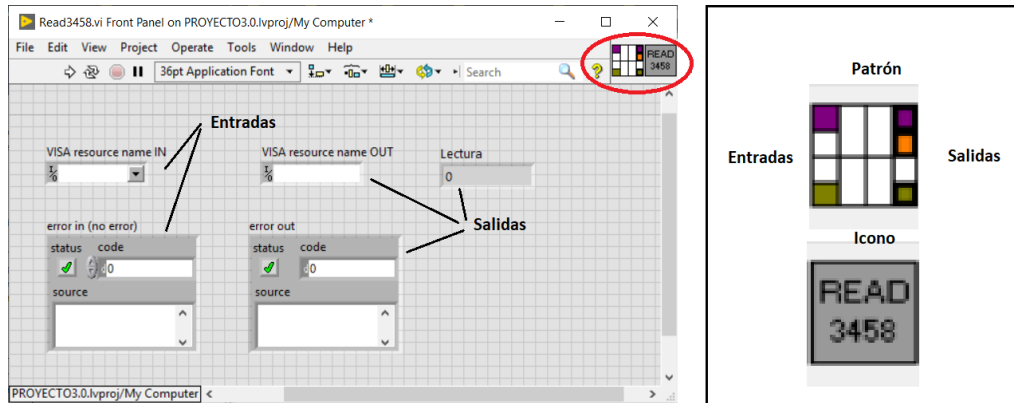


Figura 2.23: Asignación entrada/salidas a un SubVI

Éste tiene dos partes, el icono que es la representación gráfica del módulo y el patrón, que es donde se indica las entradas y salidas del programa. Existen una diversidad de patrones para poder elegir el que más se acerque a lo que necesitamos, como el flujo de programa en Labview es de izquierda a derecha, se espera en el patrón que las entradas se sitúen a la parte más a la izquierda del bloque y las salidas a la derecha. Las entradas y salidas tienen que corresponder con terminales del VI propio, de manera sencilla se elige la posición en el patrón y se indica que elemento lo ocupa. Como se puede ver en la Figura 2.23, cada terminal de entrada y salida que es requerido para la función tiene un color según el tipo de dato que se ha incluido. La Figura 2.24 muestra la inclusión del SubVI dentro de un programa. Labview nos permite editar el icono del SubVI para así identificarlo más fácilmente.

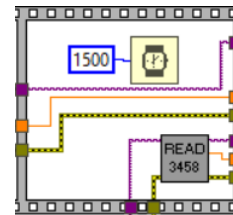


Figura 2.24: SubVI utilizado en otro VI

- CABLES:** A través de ellos se transmite la información en el DdB. En la Figura 2.22 los cables se han utilizado para introducir un array de números al nodo que calcula la media y la varianza, posteriormente se ha unido a sus salidas un cable para cada indicador. Cada cable comunica un solo tipo de dato. Así a la entrada de la función de la Figura 2.22 el cable es más grande, se transfiere un array de datos, mientras que a la salida el cable es más fino, indicando que transmite un dato. Pueden tener distintos colores, representando el tipo de dato igual que en los terminales (Figura 2.19). En la Figura 2.24 se puede ver distintos colores y formas de los cables
- ESTRUCTURAS:** Son elementos de control del proceso, responden igual que las estructuras de programación en líneas de texto (bucles while o for, estructuras if o switch case...) Pero son representadas gráficamente. Al igual que los nodos, tienen terminales a los que conectar otros elementos del DdB. Pueden ofrecer una salida de datos. Cada estructura tiene un

borde reescalable distintivo para encerrar la sección del DdB que quiere ejecutarse según la regla de la estructura. La sección que está dentro de la estructura es llamada **subdiagrama**. Los puntos donde los datos entran y salen de la estructura son llamados **túneles**. Es representado como un punto en el borde de la estructura. A continuación se enumeran las estructuras principales:

- **FOR LOOP:** Ejecuta un subdiagrama un número predeterminado de veces. El número de iteraciones puede ser controlado a través de N o de forma implícita introduciendo un array de datos a través de un túnel entonces se repetirá la estructura hasta que no queden datos en el array. Ambos ejemplos se ven en la Figura 2.26 . Existe también un terminal de iteración que nos indica el número de veces que se ha ejecutado la estructura. Como vemos hay 3 tipos de túneles en el programa. Uno sería el túnel normal que por cada iteración introducirá el dato entrante. El túnel indexado pasa un valor por cada iteración del array de datos. El último es un registro de desplazamiento, este túnel especial sirve para que el flujo de datos continúe entre iteraciones. Así inicialmente se le pasará el dato entrante conectado, se realizará la operación y en la siguiente iteración se introduce el dato de salida de la anterior iteración. Cuando finaliza la estructura el valor es el resultante en la última iteración.

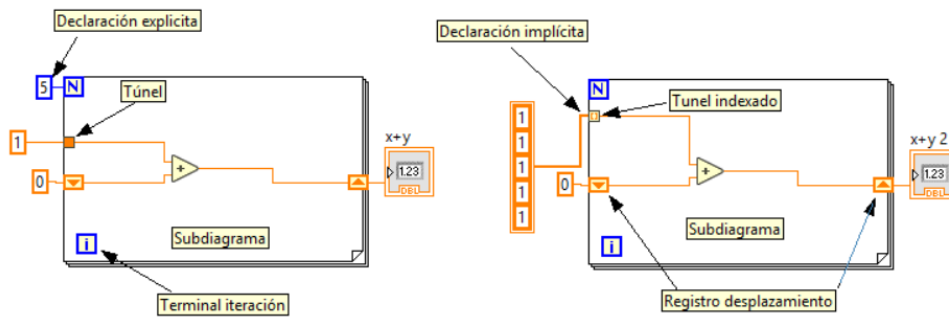


Figura 2.25: Ejemplo estructura For Loop

- **WHILE LOOP:** Esta estructura es similar a For Loop, la diferencia es que el subdiagrama se ejecuta hasta que es activado el terminal de interrupción (condición verdadera). Ésto permite que podamos realizar una tarea indefinidas veces hasta que mediante un control decidamos parar.

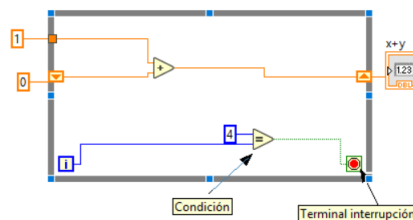


Figura 2.26: Ejemplo estructura While Loop

- **SELECT CASE:** Escoge entre varios subdiagramas prediseñados en función de una condición. Ésta se establece a través del selector (Figura 2.27) y puede ser una condición booleana (verdadero/falso) o bien en función de un dato a la entrada, pudiendo conectar un número o un texto. En este caso las condiciones tienen que ser declaradas en el identificador de subdiagrama y siempre tiene que haber una condición por defecto (default) ya que en estos casos nunca se cubren todas las posibilidades.

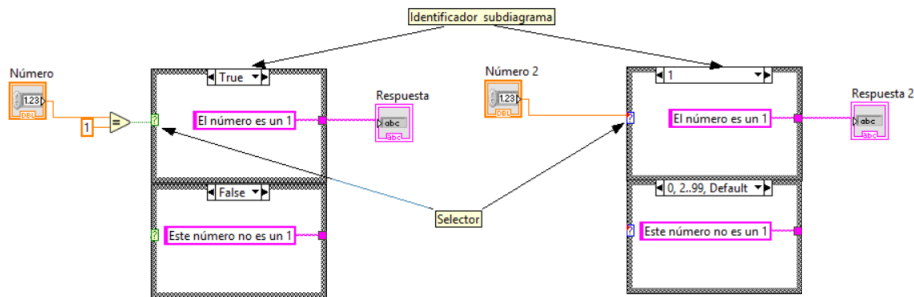


Figura 2.27: Ejemplo estructura Select Case

- **FLAT SEQUENCE:** Este tipo de secuencia es útil para ordenar eventos en el bloque de diagramas. Generalmente hay más de una de estas estructuras adjuntas, denominadas *frames*, su función es que mientras no termina el subdiagrama de la estructura anterior no empieza el siguiente.

Como ya sabemos, Labview utiliza programación de flujo de datos, es decir hasta que no se entreguen todos los datos en una función a la entrada ésta no se inicia, de manera que la secuenciación se organiza en función de como organizamos el DdB. A veces no queremos que una función se inicialice aunque tenga toda la información para ello hasta que otra no termine ya que trabajan en paralelo. O como en el caso de las conexión GPIB, en dónde solo se comunica un dispositivo a la vez y no nos interesa ejecutar dos rutinas de lectura a la vez.

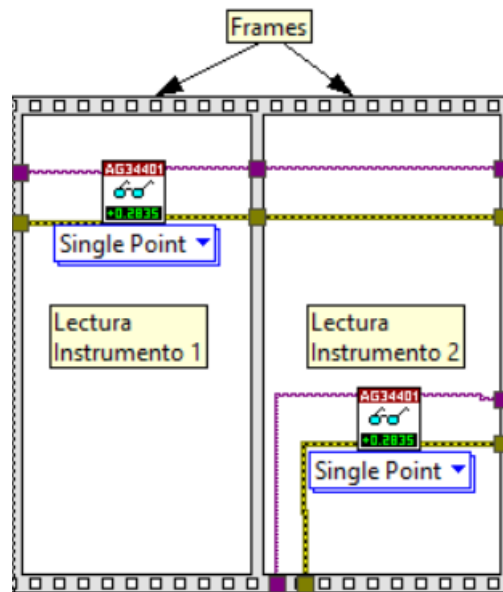
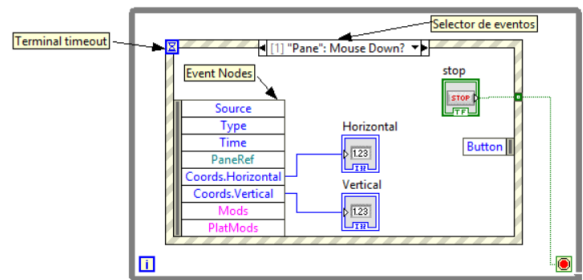
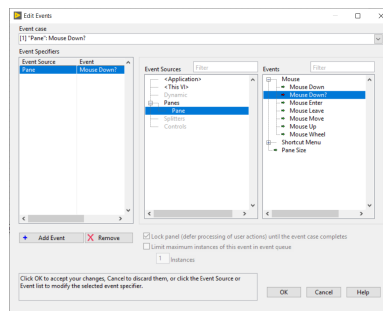


Figura 2.28: VISA en una estructura de secuencia

- **EVENT CASE:** Contiene, de forma similar a la estructura case, uno o varios subdiagramas que son ejecutados en función de los eventos que se generen en el VI. Un evento es una notificación independiente de la secuencia del programa como puede ser el click del ratón o una tecla pulsada. También existen eventos de entrada/salida con dispositivos externos que incluyen en su hardware interrupciones, *triggers* o *timers*, que señalicen procesos internos. Funcionan dentro de un while loop, de manera que cuando ocurre el evento sea el subdiagrama correspondiente el que decida si termina el proceso o sigue con la estructura de eventos. Cuando se inicia esta estructura tiene inicialmente un solo caso por defecto denominado *timeout*, este evento es activado a través del terminal de timeout (Figura 2.30). Utilizado cuando se quiere controlar el tiempo en el que se gestionan los eventos. Si queremos añadir un nuevo caso tendremos que indicar a través de unas opciones a que tipo de evento atenderá, por ejemplo se configura en la Figura 2.29 para cuando se haga click en el PF con el ratón.

Figura 2.29: Panel creación nuevo evento Figura 2.30: Ejemplo estructura event case



La estructura tiene adjunta los *event nodes*, que de manera similar a los *property nodes* representan valores y propiedades en este caso del tipo de evento ocurrido. Cada tipo de evento tiene unos event nodes propios. En el ejemplo(Figura 2.30) se obtienen las coordenadas de posición relativas al panel frontal de dónde se ha hecho click. También se evalúa el estado del botón STOP por si ha sido pulsado, finalizando el bucle y por tanto el programa.

2.5.3. Manejo de GPIB en Labview

La adquisición de datos y control de equipos remotamente es una de las operaciones características de este software. Labview soporta IEEE-488 así como otros protocolos de comunicación pero estos no son objeto de este trabajo. Para poder comunicarse el ordenador sobre el que funciona el programa debe disponer en su hardware de una interfaz GPIB, que hará de controladora del bus. Para que Labview soporte la interfaz es necesario un software que maneje el flujo de mensajes y órdenes entre Labview y la interfaz. Para ello se dispone del driver NI-488.2. Además labview dispone de una librería para el control del bus GPIB

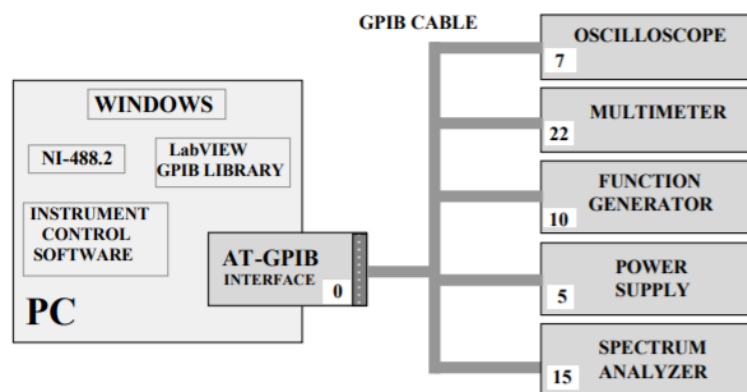


Figura 2.31: Disposición del control del bus GPIB[21]

El usuario debe conocer las órdenes del instrumento que quiere controlar, que deben ser proporcionadas por el fabricante. Aunque existen algunos comandos comunes a los que generalmente los instrumentos responden(2.4.6). A través de las funciones que nos ofrece el software podemos comunicar estas instrucciones así como recibir información. Los VIs más utilizados para GPIB son los mostrados abajo. Los comandos de instrumento son direccionados por lo que el conocimiento de las direcciones de los equipos es necesario para poder utilizar estas funciones.

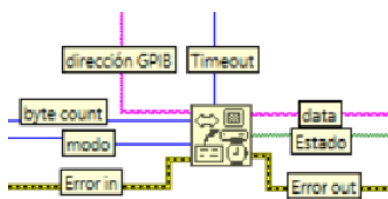


Figura 2.32: función GPIB read

El VI **GPIB READ** realiza la lectura de un número especificado de bytes (*byte count*) de un instrumento comunicador en la dirección especificada.

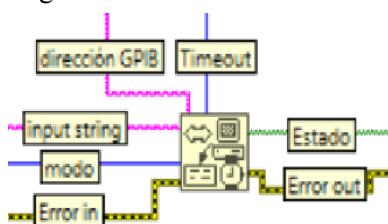


Figura 2.33: función GPIB write

La función **GPIB WRITE** envía a través del bus GPIB un comando indicado en *input string*, el formato de las órdenes es en cadena de texto, generalmente ASCII(2.4.4.3).

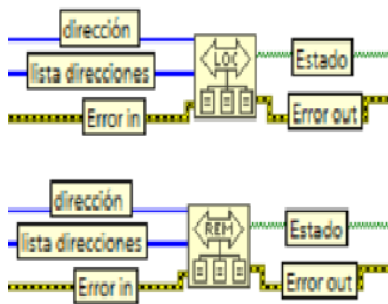


Figura 2.34: funciones GPIB Enable Local & Enable Remote

La norma IEEE-488.2[17] incluyó una serie de comandos nuevos así como funcionalidades (*parallel poll*) para el control y gestión del bus. Labview incluye en su librería VIs para ello. Un control eficiente del interfaz por parte del programa es necesario para evitar errores. **ENABLE LOCAL** y **ENABLE REMOTE** ofrecen la deshabilitación y habilitación, respectivamente, del instrumento o instrumentos direccionados. (En Figura 2.34 se observa como hay dos líneas para cada tipo de dato). De esta manera gestionaremos más eficientemente el flujo de programa, necesario cuando el proceso es complejo, incluyendo varios VIs

2.5.3.1. VISA

La librería VISA (*Virtual Instrument Software Architecture*) es un estándar para el desarrollo de programas para el control de instrumentos independiente del tipo de bus de comunicación utilizado. De manera que no sea necesario conocer las singularidades de cada interfaz para poder comunicarse. Para ello VISA establece un direccionamiento a base de *recursos*. Un recurso consiste en la descripción completa de una funcionalidad particular del dispositivo, como puede ser el tipo de interfaz o su dirección. Para direccionar un dispositivo en VISA se necesita más de un recurso, para ello se crean *cadena de recursos*. En la Tabla 2.10 se muestran las cadenas de direccionamientos para el bus GPIB. Los caracteres “::” separan los distintos recursos. Primero es indicado el estándar utilizado junto a la dirección o direcciones del controlador o controladores (*[board]*). Los recursos INTFC y SERVANT van dirigidos a los controladores, sirven para organizar la jerarquía entre controladores (2.4.2). INTFC establece el controlador direccionado en la interfaz, SERVANT hace que los controladores direccionados sean esclavos del controlador que esté actuando en la interfaz.

Interfaz	Sintaxis
GPIB	GPIB[<i>board</i>]::[<i>primary address</i>]::[<i>secondary address</i>]::INSTR
	GPIB[<i>board</i>]::INTFC
	GPIB[<i>board</i>]::SERVANT

Tabla 2.10: Direccionamiento VISA

El recurso INSTR es el que indica la comunicación con los instrumentos. Antes de poder enviar

```
GPIB0::22:INSTR
```

Figura 2.35: Ejemplo recurso VISA

comandos es necesario establecer la comunicación VISA con el equipo, para ello se inicia lo que se denomina una *sesión* en la que se establece la comunicación a través del recurso VISA (Figura 2.35) que establece un direccionamiento inequívoco al instrumento. El recurso indica el controlador que realizará la comunicación a través de la interfaz y establecerá la comunicación con el instrumento direccionado. Es posible mantener varias sesiones activas sobre un mismo recurso y sobre varios instrumentos a la vez. Cada sesión es independiente, pudiendo reservar ciertos atributos como locales (exclusivos de una sesión) o globales (comunes para todas las sesiones del recurso). Labview ofrece una librería VISA con funciones para poder iniciar y finalizar sesiones, así como para realizar funcionalidades similares a las que dispone para GPIB. VISA ofrece a los programadores de interfaces aunar los múltiples estándares en un mismo estilo de comunicación. Por eso los fabricantes suelen desarrollar librerías de Labview y drivers para el control de sus instrumentos en VISA. Estos programas permiten una mayor comodidad a la hora de manipular estos dispositivos, ya que aplican múltiples funciones dentro de sus VIs así como los comandos particulares del instrumento, evitando la necesidad de tener que conocerlos. Por eso se ha utilizado en este proyecto drivers para el control del equipo 34410A, cuyas funciones se indicarán durante el desarrollo.

Capítulo 3

Desarrollo y Resultados

Se plantea el desarrollo de la automatización de los procesos PC-LCUPV-E16(2.2.1) y PC-LCUPV-E06(2.2.2) del laboratorio de Calibración de la UPV. A través de la programación en Labview del control de los equipos involucrados, utilizando el bus de comunicación GPIB. También se desarrollarán módulos VI para el cálculo de la incertidumbre asociada a las medidas. De manera que el programa presentará ante el técnico responsable de la calibración información completa acerca de los valores de error en la medida para su posterior análisis, que permita determinar la calibración del equipo bajo estudio.

3.1. Condicionantes y puntos críticos

El condicionante más crítico de este trabajo es el hecho que no se estaba aprovechando la comunicación GPIB entre equipos y que la tarea manual de adquisición de datos así como ajustar los equipos a los distintos rangos de medida era meticulosa y lenta. En el laboratorio se dispone de ordenadores que tienen instalados Labview con todas las librerías y drivers necesarios para establecer una comunicación con los equipos utilizados. Además de buses GPIB así como la interfaz necesaria para el control a través de un ordenador. La posibilidad de crear un sistema para la automatización del proceso que además fuera fácil de gestionar y establecer es factible. Realizar la interconexión GPIB de los instrumentos, que se pueden disponer de manera próxima para su fácil manejo, es una tarea más sencilla que el control de cada uno de éstos a través de sus paneles de control, teniendo en cuenta que no realizaremos ninguna configuración manual extra. Si tenemos en cuenta que este tipo de trabajo es realizado por una sola persona, el control de los instrumentos a través de un programa evita de manera más eficiente el posible error humano garantizando la validez del proceso de calibración. La programación de rutinas para el control de instrumentos no es ni mucho menos una tarea difícil, el desarrollador dispone de librerías para la gestión básica del interfaz GPIB vía Labview(2.5.3), además los fabricantes de los equipos dejan a disposición funciones para la configuración y control de éstos, facilitando aún más el proceso. Por no hablar de la cantidad de información existente en los foros de National Instruments por parte de usuarios que ya han desarrollado funciones similares. Por lo que la automatización de procesos de control de instrumentos es un concepto con mucho recorrido que ha sido estudiado detenidamente todos los elementos que lo involucran. Como este trabajo se plantea además cubrir todo el proceso de calibración, se plantea la obtención de las incertidumbres asociadas a las medidas. El cálculo debe-

rá tener en cuenta las especificaciones para cada método y para cada instrumento. El proceso está establecido por el laboratorio, apoyándose en la GUM, y se conoce de manera precisa todos los elementos que influyen en su expresión. Esta funcionalidad se incluye dentro de la programación en Labview, ya que el entorno dispone de suficientes recursos para el establecimiento completo de los diferentes métodos de cálculo de la incertidumbre. Además la modularidad que ofrece el software permitirá la programación de funciones independientes a las que el usuario podrá acceder para la comprobación de datos, ya que existirá una interfaz gráfica (el Panel Frontal) en todas ellas que de forma sencilla permitirá al usuario utilizarla.

3.1.1. Especificaciones del programa

A partir de aquí se desarrolla a través de Labview lo que será el proceso de automatización. El programa será un proyecto Labview con diferentes *instrumentos virtuales*(VIs) que harán las distintas funcionalidades requeridas por el proceso. Se detallarán las consideraciones que se han decidido para la correcta programación así como para la adaptabilidad del programa, que permita al usuario realizar las modificaciones oportunas de manera sencilla , ofreciendo flexibilidad.

3.1.1.1. Configuración

El proceso de calibración de multímetros certificado por la ENAC indica una serie de rangos de medida (generalmente se calibran todos los rangos posibles por el equipo) así como una serie de valores nominales que tienen que ponerse bajo estudio. Estos rangos y valores de medidas no son datos estáticos y pueden ser modificados a lo largo del tiempo, por tanto debe existir una manera en la que se indique al programa esta información y que sea fácil de cambiar por el usuario cuando lo necesite. Para ello Labview dispone de funciones para leer y escribir **archivos de configuración** que permiten obtener datos expuestos a cambios. Estos archivos tienen una estructura propia (.ini) que permite al software distinguir entre secciones y conjuntos de valores.

```
[SECTION VDC]
0.1V= "+0.01V -0.01V +0.1V -0.1V"
1V= "+1V -1V"
10V= "+1V -1V +3V +5V -5V +7V +9V -9V"
100V= "+100V -100V"
1000V= "+500V +900V -900V"

[SECTION VAC]
0.1V= "0.002V,55Hz 0.002V,1000Hz 0.002V,20000Hz 0.1V,55Hz 0.1V,1000Hz 0.1V,20000Hz"
1V= "0.1V,55Hz 0.1V,1000Hz 0.1V,20000Hz 0.5V,1000Hz 0.9V,55Hz 0.9V,1000Hz 0.9V,20000Hz 0.9V,50000Hz 0.9V,300000Hz"
10V= "10V,55Hz 10V,1000Hz 10V,20000Hz 10V,50000Hz 10V,100000Hz"
100V= "100V,55Hz 100V,1000Hz 100V,20000Hz"
750V= "700V,55Hz 700V,1000Hz"

[SECTION IDC]
0.0001A= "+0.00001A -0.00001A +0.0001A -0.0001A"
0.001A= "+0.0001A -0.0001A"
0.01A= "+0.01A -0.01A"
0.1A= "+0.1A -0.1A"
1A= "+0.1A -0.1A +0.5A -0.5A +0.9A -0.9A"

[SECTION IAC]
0.0001A= "0.0001A,55Hz 0.0001A,1000Hz 0.0001A,5000Hz"
0.001A= "0.0001A,1000Hz 0.001A,55Hz 0.001A,1000Hz 0.001A,5000Hz"
0.01A= "0.001A,1000Hz 0.01A,55Hz 0.01A,1000Hz 0.01A,5000Hz"
0.1A= "0.01A,1000Hz 0.1A,55Hz 0.1A,1000Hz 0.1A,5000Hz"
1A= "0.1A,55Hz 0.1A,1000Hz 0.1A,5000Hz 0.9A,55Hz 0.9A,1000Hz 0.9A,5000Hz"
3A= "0.3A,1000Hz 1.5A,1000Hz 2.7A,55Hz 2.7A,1000Hz"
```

Figura 3.1: Ejemplo Archivo Configuración

La Figura 3.1 es un ejemplo de estos archivos. El valor entre corchetes, [], indica una sección que es un conjunto de claves , se puede ver como se han creado secciones para cada tipo de medida (VDC,VAC,IDC,IAC,R). Las claves representan cada rango posible a seleccionar y su valor indica, entre dobles comillas a la derecha del símbolo "=", los valores nominales de cada medida a realizar.

Así se dispone una estructura que permita identificar al programa *Tipo de medida* → *Rango seleccionado* → *Valores Nominales*. Una vez han sido creados estos archivos a través de Labview, el usuario puede modificarlos con un editor de texto plano, permitiendo el cambio de rangos y valores cuando sea necesario.

Para el cálculo de la incertidumbre de las medidas obtenidas es necesario obtener las distintas correcciones, algunas necesitan especificaciones de los instrumentos dadas por el fabricante. Además existen dos formas de obtener la incertidumbre, como se ha explicado, en función de si se aplica factor de corrección. Todas esto tiene que ser indicado al programa y de la misma manera que antes son susceptibles a ser modificadas. Por tanto también se incluye otro archivo de configuración para indicar todas las especificaciones necesarias para el cálculo de las correcciones. En la Figura 3.2 se muestra como se indican los valores de las incertidumbres de medida del equipo de referencia HP3458A obtenidas en la última calibración. Necesarias para el cálculo de la corrección por calibración.

[CALIBRACION VAC]	[CALIBRACION IDC]
0.002V,55Hz = "650"	+0.00001A = "10"
0.002V,1000Hz = "600"	-0.00001A = "10"
0.002V,20000Hz = "600"	+0.0001A = "10"
0.1V,55Hz = "30"	-0.0001A = "10"
0.1V,1000Hz = "25"	+0.001A = "10"
0.1V,20000Hz = "35"	-0.001A = "10"
0.5V,1000Hz = "30"	+0.01A = "10"
0.9V,55Hz = "10"	-0.01A = "10"
0.9V,1000Hz = "10"	+0.1A = "10"
0.9V,20000Hz = "15"	-0.1A = "10"
0.9V,50000Hz = "15"	0,3 = "10"
0.9V,300000Hz = "35"	+0.5A = "10"
10V,55Hz = "20"	-0.5A = "10"
10V,1000Hz = "15"	+0.9A = "10"
10V,20000Hz = "15"	-0.9A = "10"
10V,50000Hz = "15"	
10V,100000Hz = "15"	
100V,55Hz = "35"	
100V,1000Hz = "25"	
100V,20000Hz = "25"	
700V,55Hz = "80"	
700V,1000Hz = "50"	

Figura 3.2: Ejemplo Archivo Correcciones

3.1.1.2. Control de los equipos

Como ya se ha indicado, se va a establecer una conexión GPIB entre los tres equipos utilizados y el ordenador para el proceso de obtención de medidas. Se especifica que funciones van a realizar estas configuraciones. En el caso del equipo a calibrar 34401A se van a utilizar los drivers VISA que deja el fabricante. Las funciones a utilizar son la de lectura(*Read.vi*) y de configuración(*Configure Measurement.vi*) así como las que inician y cierran la comunicación con el equipo. De forma similar utilizaremos los módulos VISA para el equipo 3548A, a excepción de la función suministrada por la librería para la lectura. Debido a que aportan operaciones que no nos interesan, como apagar el display del equipo o establecen procesamientos internos de los datos que pueden alargar el proceso de lectura ya que mantiene el bus ocupado en la comunicación con el instrumento. Se ha aportado un VI para la lectura desarrollado de forma similar al suministrado por el fabricante, pero limitando las órdenes enviadas a realizar la lectura y obtener el dato, configurando el equipo para que no

almacene ni proceso el dato internamente. La particularidad que tiene este proceso es a la hora de pedir la medida al instrumento, se tiene que indicar la deshabilitación del carácter de fin de transmisión(2.4.4.2), ésto se realiza porque el equipo 3458A envía la información de las lecturas en formato hexadecimal. Pudiendo confundir el controlador un valor de la lectura con el valor ASCII para la representación del carácter utilizado como fin de transmisión. Una vez desactivado se realiza la lectura de 4 bytes del canal, que es el tamaño que da el equipo para las medidas. Si no se recibiera datos al paso de un tiempo la función dejaría de leer. Al finalizar la lectura se vuelve a habilitar el carácter fin de transmisión para que no influya en otras comunicaciones futuras.

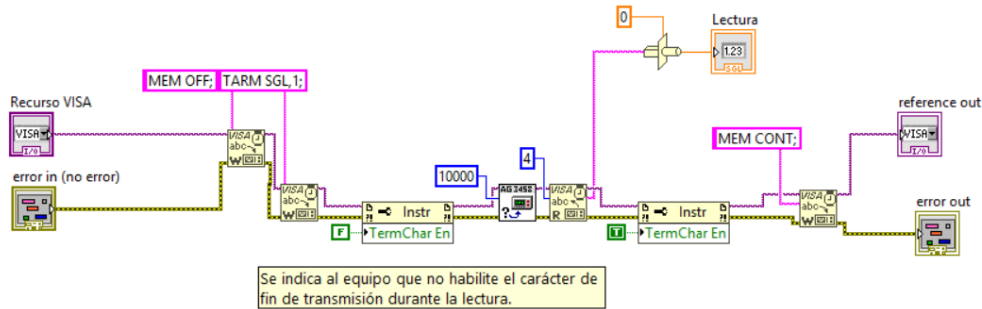


Figura 3.3: DdB de la función lectura implementada para el equipo 3458A

3.1.1.3. Tratamiento de los datos

El programa gestionará datos provenientes de los archivos de configuración, de los instrumentos o de los propios controles del panel frontal. Realizará cálculos matemáticos así como enviará cadenas de texto con las órdenes. También tendrá que representar la información necesaria en un formato accesible. Los datos de entrada/salida de los instrumentos tienen el formato de cadenas de texto. Los valores obtenidos de los archivos de configuración también. Aunque cuando sea requerido operaciones matemáticas se formatearán los datos, cuando se tengan que mostrar datos se necesita indicar de forma simple información asociada al dato. Por ejemplo cuando se obtienen las medidas, hay que indicar que esas medidas corresponden a un valor nominal utilizado en un rango configurado. Para ello se va a utilizar el terminal **Multicolumn List Box** que ofrece Labview, es un indicador que muestra información a través de una serie de columnas y filas. Los datos aceptados son numéricos o cadenas de texto. Debido a que la mayoría de la información es tratada en texto, se utilizará este formato para la gestión de datos del programa. Esto facilita la visualización pudiendo unir información obtenida de diferentes maneras. La Figura 3.4 muestra como se puede mostrar las medidas obtenidas de los instrumentos para el valor y rango seleccionado(recogido del archivo de configuración) de una forma sencilla en un terminal multicolumn listbox. Además Labview dispone de funciones para transformar en un archivo de texto este tipo de tablas, lo cual hace sencillo la salida de información del programa.

RANGO	Ix	Ir
0.0001A, 55Hz	0.0001A	
	9,99694453E-5	9,99933618E-5
	9,99721103E-5	9,99934200E-5
	1,00009873E-4	9,99933400E-5
	1,00035037E-4	9,99931653E-5
	1,00041186E-4	9,99932890E-5
	1,00026134E-4	9,99930780E-5
	1,00007047E-4	9,99932527E-5
	9,99855367E-5	9,99926924E-5
	9,99695212E-5	9,99927433E-5
	9,99758374E-5	9,99928016E-5
0.0001A, 1000Hz		
	1,00031741E-4	1,00012912E-4
	1,00030577E-4	1,00012949E-4
	1,00031364E-4	1,00012723E-4
	1,00030674E-4	1,00012177E-4
	1,00030841E-4	1,00013589E-4
	1,00027637E-4	1,00012170E-4
	1,00028940E-4	1,00011712E-4
	1,00030805E-4	1,00011093E-4
	1,00027817E-4	1,00011004E-4

Figura 3.4: Multicolumn Listbox con datos de las medidas obtenidas

El proceso necesita también guardar con precisión los valores numéricos de las medidas, así como los resultados de los cálculos para la obtención de la incertidumbre. Una pérdida de precisión en estos datos puede implicar la no validez de éstos. Aunque para poder disponer de los datos de manera sencilla, a través de los terminales explicados, se necesita formatear los datos a cadena de texto. Por eso los datos numéricos críticos para el proceso (las lecturas de las medidas, las correcciones y la incertidumbre), son formateados en notificación científica con 8 decimales de precisión (Figura 3.4) antes de ser pasados a cadena de texto o cuando se van a utilizar para algún cálculo. Evitando cualquier pérdida de información debido a la conversión número/texto. El instrumento con más precisión es el 3458A con 8 1/2 dígitos, por ello se emplea 8 decimales en los datos numéricos, ya que será la máxima precisión de dato requerida.

3.2. Flujograma general

El programa posee una jerarquía basada en diferentes módulos VI que establecen los distintos procesos así como funcionalidades implementadas. Durante la calibración se producen diferentes eventos, éstos tienen que producirse independientemente, y algunos tienen que ocurrir primero para poder producirse los otros. Por eso se vertebra el programa a través de un VI, llamado *menu.vi*, cuyo propósito es establecer la estructura general del programa. Podría separarse en las siguientes partes:

1. Entrada de datos por parte del usuario.
2. Selección de tipo de medida a realizar y rangos.(Interacción con usuario)
3. Obtención de las medidas.(Control de instrumentos)
4. Cálculo de las incertidumbres.(procesamiento interno)
5. Salida de resultados

Para realizar este proceso se establecen estructuras de secuencia dentro de *menu.vi* que separen y ordenen los distintos módulos que operan. Para la obtención de las medidas se han implementado VIs independientes para cada tipo (VDC,VAC,IDC,IAC,R). El control a través del bus GPIB es similar independiente de la configuración del instrumento. Pero se crean módulos diferentes para su funcionalidad ya que el proceso de calibración establece diferentes conexiones entre los equipos, así como procedimientos y se prefiere controlar cada proceso de manera individual, garantizando su correcto funcionamiento. De manera similar para el cálculo de las incertidumbres existen variaciones según el tipo de medida realizada, por lo que se crean también VIs diferenciados. Una vez obtenido todos los datos de la calibración, se dispondrá la información en un archivo de texto para su almacenamiento.

La Figura 3.5 mostraría el flujo de programa que llevaría nuestro VI principal *menu.vi*. Una de sus características es que permite realizar los tipos de medidas que queramos, pudiendo escoger entre uno, varios o todos. El programa solo llama a los módulos solicitados. De forma igual obtiene resultados solo de los subprogramas que se han ejecutado. Por ejemplo, se selecciona que el programa obtenga la calibración para tensión continua y alterna en todos sus rangos. La secuencia será, llamará al VI para VDC y obtendrá las medidas, después hará lo mismo para VAC. Como no se han seleccionado más tipos de medida, no llamará a los restantes subprogramas de medidas. Posteriormente realizará de forma análoga la obtención de las incertidumbres utilizando los módulos para el cálculo de los tipos de medida solicitados. Finalmente añadirá a un archivo de texto solo los resultados de las rutinas ejecutadas.

Muchas veces los VIs necesitan información disponible en otro módulo, como la ruta donde se encuentra el archivo de correcciones o la tabla de medidas obtenida tras el proceso de medición. Para ello Labview dispone de lo que se llama *variables globales*, que son almacenadas dentro de un VI, a modo de “memoria interna”. Por eso son creados dos VIs, llamados memoria in y memoria out, que contienen las diferentes variables globales necesarias para el correcto funcionamiento del programa.

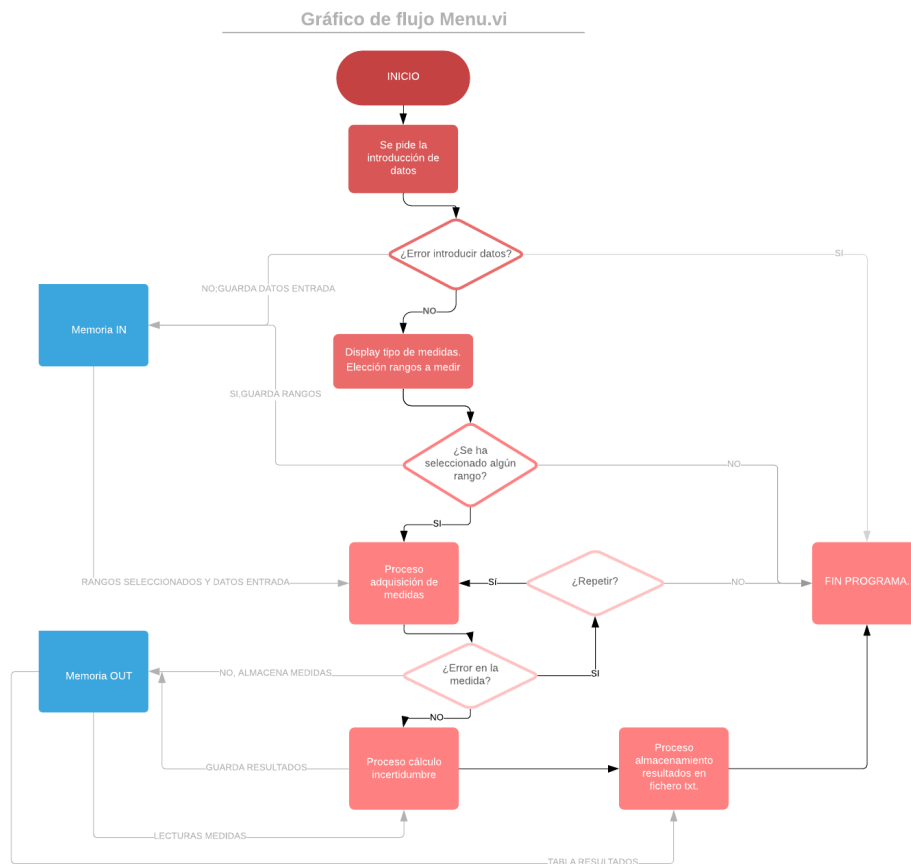


Figura 3.5: Gráfico de flujo programa

El control de errores es realizado a través un tipo de estructura case especializada para esto. La gestión implementada es simple, si en alguno de estos procesos hay error el programa finaliza. Los errores se pueden presentar a la entrada por la mala introducción de algún elemento. En la selección solo hay un error posible y es que no se haya seleccionado nada. Durante las rutinas de medición, los SubVIs que atienden a este proceso tienen un control interno que finaliza su secuencia en caso de error o porque se han parado manualmente. A su salida se indica para que el programa principal sepa si el proceso de medición ha sido interrumpido. Si la medición ha ido correctamente seguirá con su flujo de programa, en caso de que el SubVI le indique que se ha parado el proceso a mitad, el programa principal preguntará si repetir la medida. La Figura 3.6 muestra el diagrama de bloques implementado en el programa principal, menu.vi, para el proceso de medidas en el que llama a cada subrutina para ello. Vemos como tiene una estructura case de error que engloba todo el proceso, éste es debido a que tiene prioridad sobre el resto y no permite actuar al subdiagrama que contiene en caso de error. Dentro vemos el subVI que realiza las medidas para el caso de tensión alterna (VAC) y vemos como se controla el posible error proveniente de él.

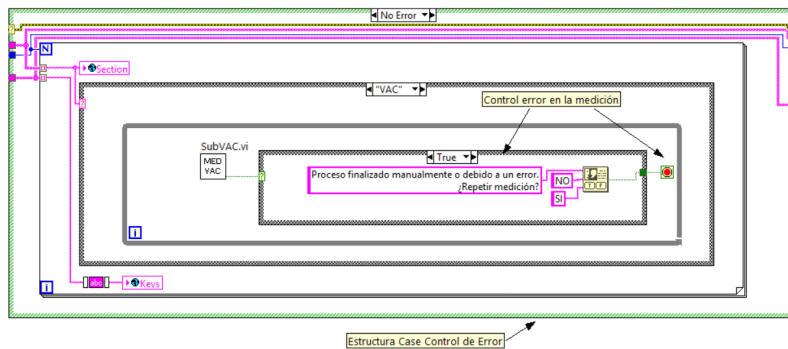


Figura 3.6: DdB para las llamadas a las rutinas de medición

3.3. Entrada

El usuario realizará la calibración a través de la interfaz del programa, que serán los paneles frontales de los VIs que se irán ejecutando. Previamente a iniciar el programa, el usuario debe conocer las direcciones GPIB de los instrumentos, así como la ruta de los archivos de configuración y correcciones. Para obtener las direcciones de los instrumentos el usuario accederá al programa que ofrece NI *Measure and Automation eXplorer*, MAX, y buscará las direcciones a través de la opción buses GPIB del programa. Una vez conocidas las direcciones se iniciará el programa a través de Menu.vi. El usuario dispondrá de un panel frontal (Figura 3.7) simple que permita introducir los parámetros necesarios.

RANGOS DE MEDIDAS	
VDC	
	0.1V
	1V
	10V
	100V
	1000V
VAC	
✓	0.1V
✓	1V
	10V
	100V
	750V
IDC	
✓	0.0001A
	0.001A
	0.01A
	0.1A
	1A
IAC	
✓	0.0001A
	0.001A
	0.01A
	0.1A
	1A

Figura 3.7: Panel Frontal de Menu.vi

Inicialmente, al ejecutar el VI, el programa pedirá las direcciones GPIB de los equipos y las rutas de los archivos de configuración a través de una serie de mensajes que aparecerán en la pantalla del ordenador. Primero introducirá las direcciones de los equipos GPIB, tras ello el programa comprobará si los equipos han sido asignados a las direcciones indicadas, para ello ordenará que

se identifiquen (comando *IDN?). Si la respuesta es satisfactoria el programa lo indicará y continuará el proceso, En caso de error en alguna dirección , el proceso parará como se ha explicado anteriormente.



Figura 3.8: Ventana introducción direcciones

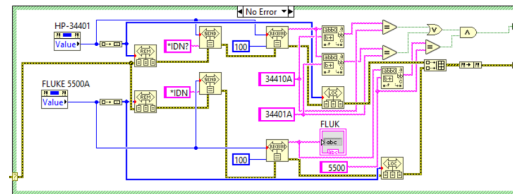


Figura 3.9: DdB para la comprobación de direcciones GPIB

Se preguntará posteriormente por la ruta de los archivos de configuración, primero se pedirá el archivo de configuración y después el de correcciones. Una vez indicado el path del primero el programa se quedará en ese directorio para más comodidad del usuario. En caso de carga de un fichero erróneo el programa lo notificará y finalizará el proceso.

Ahora empieza la carga del archivo de configuración en la Multicolumn Listbox del menú para su visualización, el usuario observará la tabla con todos los rangos disponibles según el archivo de configuración. Si nos fijamos en la Figura 3.1 anterior y la comparamos con la tabla del menú (Figura 3.7), solo se ha mostrado los valores de sección y clave del fichero , correspondientes a los tipos de medida y rangos. Esto es debido a que el usuario solo elige el tipo de medida y los rangos a medir. Ya que para la calibración del equipo en un rango se comprueban ciertos valores certificados que son indicados por el director del laboratorio y establecidos por la ENAC. De todas maneras, para que el certificado sea válido, es necesario comprobar todos los rangos en todos los tipos de medidas. Pero se le permite al usuario elegir por si quisiera realizar las medidas por tipos separadas y después comprobar resultados, en vez de hacerlas todas a la vez. O por si quisiera repetir medidas para comprobar resultados. La selección de los valores de entrada se realiza a través del diagrama de bloques de la Figura 3.10 , es una estructura de evento que es atendida cuando se hace click en la tabla, cuando esto ocurre se añade el símbolo ✓ al valor seleccionado, de la misma manera se deseleccionan las distintas opciones. También se atiende cuando se pulsa el botón Continuar entendiendo el programa que ha terminado la selección de valores.

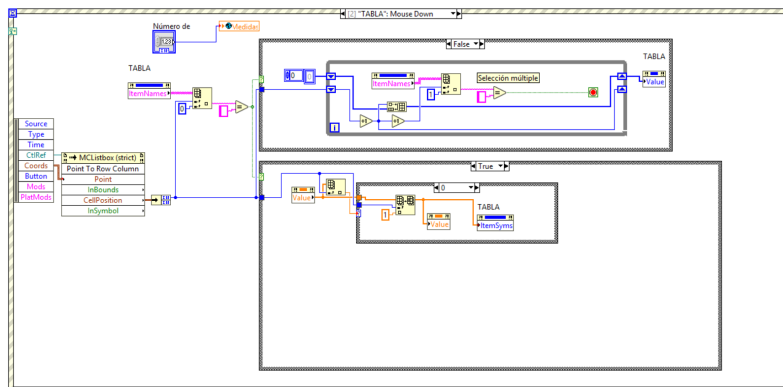


Figura 3.10: DdB para la selección de rangos de medida

3.4. Proceso

A partir de aquí el programa tiene toda la información necesaria para realizar el proceso de calibración. La secuencia se establece en el Vi principal menu.vi, primero estaría la secuencia para la obtención de los diferentes tipos de medidas y después la del cálculo de las incertidumbres. El usuario será guiado a través de los distintos tipos de medición seleccionados y le será indicado cuando es necesaria su intervención. El proceso se ha diseñado para que las intervenciones del usuario no tengan que ser constantes uniendo los procesos en el que se le requiere para que posteriormente el software trabaje solo. El usuario solo intervendrá durante el proceso de medición para realizar las diferentes configuraciones de los equipos para medir en tensión , corriente o resistencia (Figura 2.6,Figura 2.7,Figura 2.8,Figura 2.9 y Figura 2.10). Siendo el resto del proceso invisible para él, de todas maneras el cálculo de las incertidumbres se realiza tan rápido que no se podría apreciar. Posteriormente si se requiere se podrán abrir los VIs que han hecho el cálculo para la comprobación de resultados.

3.4.1. Medición

Los VI que realizan el proceso de obtención de lecturas de los equipos 3458A y 34410A son denominados en el proyecto: SubVDC,SubVAC,SubIDC,SubIAC y SubR. Los PF de estos programas tienen una estructura común general, como ejemplo se muestra el PF de SubVDC(Figura 3.11). En él se indica a través de una tabla tipo multicolumn listbox las distintas medidas obtenidas, también se puede observar el rango de medida, el valor nominal aplicado y las medidas que los equipos están haciendo en ese momento. Se dispone de un botón de STOP por si se quiere parar el proceso. Todos los programas de medida disponen de control de error,las propias funciones de Labview para GPIB detienen la rutina cuando hay un error en el bus. Se incluye además un control de los valores de lecturas, si a los multímetros el calibrador les pasa un valor de medida que está por encima del rango en el que están midiendo éstos pueden verse dañados. Cuando ocurren estos casos los equipos devuelven un valor de *overload* (sobrecarga) al ordenarles que lean. Si el programa recibe una lectura que corresponde con la de *overload* se finalizará automáticamente.



Figura 3.11: Panel Frontal del VI de medida para tensión continua

Cuando se inicie el programa se le avisará al usuario del tipo de medida que se va a realizar para que realice la configuración necesaria. Cada tipo de medida lleva asociada una conexión pre-determinada de los equipos, para que el usuario no tenga que estar cambiando la conexión bajo un tipo de medida frecuentemente los SubVi se organizan de manera que se tengan que hacer los mínimos cambios:

- SubVDC: Realizará los cortos primero por cada rango seleccionado y después las medidas asociadas.
- SubVAC: Todas las medidas por cada rango, no habrá cambio de conexiones.
- SubIDC: Primero los abiertos en cada rango y después las medidas, indicando conexión distinta para valores superiores a 1.5A
- SubIAC: Todas las medidas por cada rango, teniendo en cuenta el caso >1.5A
- SubR: Pedirá para cada medida la conexión de la resistencia de referencia requerida.

Para los cortos y los abiertos se les indicará al usuario que realicen la configuración indicada, posteriormente se realizarán las medidas necesarias y al finalizar se mostrará un mensaje para que el usuario vuelva a realizar el conexionado correspondiente. En el caso de la medición de resistencias, debido al procedimiento el usuario tendrá que ir cambiando las distintas referencias indicadas, para ello el programa avisará cuando hay que conectar la resistencias, realizará la lectura, y después pedirá el conexionado de la siguiente resistencia requerida.

3.4.1.1. Rutina de Lectura

En todos los programas de medida el proceso lee de las variables globales la información asociada a los equipos así como las opciones elegidas por el usuario. La rutina de lectura está definida por dos bucles de iteración(estructura FOR LOOP) anidados. Uno para cada **rango** seleccionado y dentro otro para cada **valor nominal** en el que se realizará la lectura. Cuando el VI recibe los rangos seleccionados son dispuestos en forma de array utilizando la función implementada *Read-Key.vi* para asignar un valor de rango en cada iteración del programa. Para la obtención de los valores de medida se ha creado el VI *ReadValue.vi* que lee los datos del rango (claves) seleccionado y obtiene del fichero de configuración los valores de la clave, que son dispuestos en forma de array.

Antes de empezar esta rutina se inicia la comunicación con los equipos, habilitándolos para el control remoto. Cuando ésta finaliza se cierra también la comunicación y se devuelve los instrumentos a local. En el caso del calibrador además se reinicia para que no almacene ningún dato de salida que pueda afectar a otros programas de medición. Para SubR solo se controlará el equipo a calibrar. Cada vez que empiece la lectura en un rango, la rutina configurará los multímetros para que se establezcan en el tipo de medida y rango adecuados. Para ello se utilizan las funciones que dispone cada fabricante para su equipo.

El proceso de lectura involucra a los tres equipos conectados(excepto para medir resistencia) y es ordenado a través de estructuras secuenciales, ésto es importante ya que se permite solo una comunicación con un equipo a la vez. Cada vez que se inicie recibirá un rango y un valor nominal. La secuencia establecida es la siguiente:

1. Ordena al calibrador que ponga en su salida el valor nominal indicado.
2. Ordena al calibrador que saque su salida. Espera 5 segundos a que la señal se normalice.
3. Se realiza la lectura en el equipo a calibrar.
4. Se realiza la lectura en el equipo de referencia.
5. Vuelve a 3 hasta que se realiza el número de medidas indicado.
6. Se pide al calibrador que deje de sacar el valor de salida.

El diagrama de bloques que realiza la lectura de los equipos es el de la Figura 3.12. Es un bucle que se repite tantas veces como número de medidas se hayan indicado. En cada iteración se obtienen la medida obtenida por cada equipo y son almacenadas en la tabla(Figura 3.11). Se evalúa también si ha ocurrido overload, en tal caso se finaliza la lectura y se indica el error. Las rutinas para la lectura de cortos y abiertos es igual excluyendo las lecturas del equipo 3458a. Para el caso de subR solo se configurará el multímetro 34401A utilizando solo la secuencia de lectura.

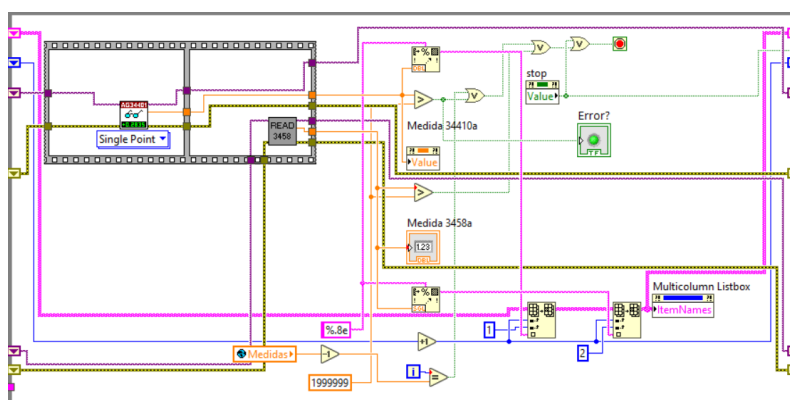


Figura 3.12: DdB para la obtención de lecturas

Una vez el programa ha obtenido todas las medidas requeridas, son almacenadas en variables globales para su uso. Cuando se han llamado a todos los VIs de medición que se han requerido finaliza el proceso de adquisición de datos.

3.4.2. Cálculo Error e Incertidumbre

Las subrutinas para el proceso del cálculo de la incertidumbre son: CalcVDC, CalcVAC, CalcIDC, CalcIAC y CalcR. De forma similar al proceso de medición, solo se llaman a las funciones de los tipos de medida seleccionados. Los programas obtienen los datos de medida de las variables globales que almacenan cada tabla por separado generada durante las medidas.

Ya que conocemos los distintos rangos seleccionados y los valores nominales se utiliza una estructura de bucles for loop anidados igual a la realizada en los VI de medida. De manera que para cada valor nominal de cada rango se establecerá una secuencia de operaciones. Éstas son:

1. Cálculo medias y varianzas del conjunto de medidas de los equipos asociadas al valor nominal y obtención del error de medida.
2. Obtención de las especificaciones necesarias para el cálculo de las correcciones.

Los datos se irán almacenando en la tabla que contiene el programa y se muestra en el PF (Figura 3.13). Para posteriormente ser introducidos en el VI que obtiene las incertidumbres, cada tipo de medida tiene un cálculo diferente por lo que se implementan programas diferentes: IncVDC, IncVAC, IncIDC, IncIAC, IncR.

RANGO	VALOR	Vx	Vr	fc	Error	desVx	desVy	j	inexactitud	linealidad	deriva	calibracion U00

Figura 3.13: Tabla del PF de los programas de cálculo

3.4.2.1. Media, Varianza y Error

El programa tendrá que obtener los valores de las medidas efectuadas para el valor nominal que se está evaluando. Las tablas globales disponen de esa información. El conjunto de medidas es obtenido y almacenado en un array para realizar la media y la varianza de los valores mediante una función que Labview dispone para ello (se ejemplificó en Figura 2.22). Así para el multímetro a calibrar y el de referencia. Ahora pasaremos al cálculo de la expresión del mensurando, que es el error de medida, se recuerda las diferentes formas que puede tener:

- VDC: $e_m = (V_x - V_0) - V_r * f_c$
- VAC: $e_m = V_x - V_r * f_c$
- IDC: $e_m = (I_x - I_0) - I_r * f_c$
- IAC: $e_m = I_x - I_r * f_c$
- R: $e_m = (R_x - R_0^{(1)}) - R_r^{(2)}$. 1: Cuando exista corto. 2: Valor nominal Resistencia referencia

Para algunas expresiones es necesario conocer el valor de offset (V_0, I_0, R_0) que es el valor que presenta el calibrando ante un corto o un abierto en el rango establecido. Por tanto es necesario conocer primero este valor para obtener el error de medida. Para ello los programas correspondientes realizan primero el cálculo de la media y varianza de los valores de corto o abierto para el rango que se está evaluando, así es posible ofrecer el valor de offset a los valores nominales del rango.

Vemos también que se pide el factor de cobertura, f_c . Existe uno para cada valor nominal y están guardados en el archivo de correcciones, se explicará mas adelante como se obtiene. La cuestión es que el proceso ya tiene ese valor y lo utiliza para obtener la expresión del mensurando. Este valor se indicará posteriormente en el certificado y por eso se formatea para que tenga una representación fácil de ver, para ello se implementa el VI *FormatoNum.vi*. El formato que sigue es : “ ± 000.00 UnidadMedida” donde la unidad de la medida es representada en el múltiplo (V,mV, μ V...) adecuado. s.

3.4.2.2. Correcciones

Para cada valor nominal asignado a un rango existen un conjunto de especificaciones que son necesarias para el cálculo de correcciones y la obtención de la incertidumbre de la medida. Se programa un VI, *Correcciones.vi*, para la obtención de todos los parámetros requeridos. Básicamente abre el archivo donde se encuentran las especificaciones y en función de su entrada accede a los valores necesarios. Son requeridos para su funcionamiento:

- Tipo de medida
- Rango de medida
- Valor nominal

Entonces obtiene las especificaciones y las indica a la salida del programa para su posterior almacenamiento. Éstas son:

- Factor de cobertura.
- Exactitud del equipo de referencia para el rango seleccionado (y frecuencia aplicada en el caso de VAC,IAC).
- Factor j para la obtención de la deriva a partir de la corrección por inexactitud de la referencia.
- Especificación para la no linealidad del equipo de referencia en el rango indicado.
- Valor de la deriva de la referencia.
- Incertidumbre de la referencia en su última calibración.

Cada tipo de medida utiliza unas especificaciones u otras para ello se crean estructuras para establecer los casos posibles y los valores requeridos. Cuando finaliza el módulo se almacenan los datos en la tabla (Figura 3.13) del programa de cálculo.

Esta operación se realiza secuencialmente para cada valor nominal indicado junto con la obtención de las medias y varianzas de las respectivas medidas y el cálculo del error. Cuando finaliza las iteraciones tenemos la tabla con toda la información necesaria para el cálculo de la incertidumbre.

3.4.2.3. Cálculo incertidumbre

Tras obtener toda la información necesaria se llamará a el VI para el cálculo de incertidumbre correspondiente (IncVDC,IncVAC,IncIDC,IncIAC e IncR). En estos programas se establece la rutina para la obtención de la incertidumbre según los procesos PC-LCUPV-E16 o PC-LCUPV-E06 descritos anteriormente. El valor de la incertidumbre es formateado con *FormatoNum.vi* para una mejor representación. Cuando son obtenidas todas las incertidumbres el programa guarda en una tabla aparte los valores que van a ser indicados en la certificación. Éstos son el rango, el valor nominal, el error de las medidas obtenidas bajo ese valor y la incertidumbre asociada al error. Esta tabla de resultados se pasará a la variable global correspondiente para su posterior uso.

3.5. Salida

Una vez concluido el proceso de adquisición de datos de las medidas y su posterior cálculo de los errores y sus incertidumbres, tendríamos a la salida de los programas de cálculo una tabla con todos los resultados. Los valores de error e incertidumbre son formateados para que muestren las unidades en que están representados los valores y se deja dos decimales de precisión, de la misma manera que en los certificados de calibración.

La última secuencia realizada por el programa principal(menu.vi) es para guardar los resultados en un archivo de texto. Inicialmente el programa le preguntará dónde quiere guardar los resultados, pudiendo crear un archivo nuevo o sobrescribir uno existente. Una vez lo indique se realizará el proceso de escritura en el archivo para cada tipo de medida utilizado. La escritura la realiza el VI implementado *Write Data.vi*. Esta función recibe el tipo de medida para buscar la tabla de resultados de la variable global correspondiente. Cuando la obtiene convierte esta tabla en un string, separando columnas con un tabulador y filas con un salto de carro. De esta manera podemos escribir el resultado en el archivo de texto para su visualización. Tras la escritura de la tabla se añade un salto de carro más para que la siguiente tabla se escriba debajo de la siguiente. Cuando hayan terminado las iteraciones necesarias el programa finaliza dejando un archivo de la siguiente forma. Aquí el usuario tendrá el resultado de la calibración del equipo.

```

-----
VDC
-----
RANGO  VALOR  ERROR  INCERTID.
100mV  CORTO  +1,20 uV  -----
100mV  +0,01V  -1,01 uV  +1,8 uV
100mV  -0,01V  -801,02 nV  +2,1 uV
100mV  +0,1V  +940,11 nV  +4,1 uV
100mV  -0,1V  +1,12 uV  +4,6 uV
1V     CORTO  +1,94 uV  -----
1V     +1V    25,21 uV  +13,1 uV
1V     -1V    26,30 uV  +14,5 uV
-----
VAC
-----
RANGO  VALOR  ERROR  INCERTID.
10V    10V,55HZ  -1,0 mV  +2,4 mV
10V    10V,1000HZ  -756,10 uV  +2,7 mV
10V    10V,20000HZ  -3,1 mV  +4,0 mV
10V    10V,50000HZ  +5,3 mV  +6,1 mV
10V    10V,100000HZ  +13,5 mV  +17,1 mV

```

Figura 3.14: Archivo txt con los resultados de la calibración

El resultado es almacenado en .txt y no se genera ningún reporte, que Labview permite implementar. Esto es debido a que el documento de certificación tiene una estructura definida por la ENAC y añadir los datos que se precisan es más fácil utilizando un .txt (es como se realiza actualmente en el laboratorio). Además posteriormente a la finalización del programa el usuario podrá comprobar los cálculos realizados observando los diferentes PF de los VIs de cálculo para asegurarse de los valores obtenidos.(Figura 3.15)

RANGO	VALOR	Vx	Vr	fc	Error	desVx	desVy	j	inexactitud	linealidad	Deriva	Calibracion	U(X)
0.1V	0.002V,55Hz	1,99887315E-3	2,00025199E-3	1	- 1,38 uV	1,80611369E-5	7,91789027E-8	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	650	+ 0,65 mV
0.1V	0.002V,1000Hz	1,99950982E-3	2,00049132E-3	1	- 0,98 uV	6,68356153E-7	5,49383883E-8	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	600	+ 0,60 mV
0.1V	0.002V,2000Hz	2,00120083E-3	2,00125671E-3	1	- 55,87 nV	6,81030868E-7	1,23280496E-7	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	600	+ 0,60 mV
0.1V	0.1V,55Hz	9,99773761E-2	9,99811262E-2	1	- 3,75 uV	8,78248308E-6	5,46559924E-7	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	30	+ 65,09 uV
0.1V	0.1V,1000Hz	9,99750375E-2	9,99851294E-2	1	- 10,09 uV	7,93984061E-7	3,56030976E-7	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	25	+ 62,92 uV
0.1V	0.1V,2000Hz	9,99832345E-2	9,99778338E-2	1	+ 5,40 uV	7,57579350E-7	2,80221591E-7	0,5	0,5	0,5+0,5	1,5	35	+ 67,52 uV
1V	0.1V,55Hz	9,99804531E-2	9,99794453E-2	1	+ 1,01 uV	2,83975959E-6	4,73922132E-7	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	30	
1V	0.1V,1000Hz	9,99763049E-2	9,99850452E-2	1	- 0,74 uV	6,68978676E-7	3,07932718E-7	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	25	
1V	0.1V,2000Hz	9,99819849E-2	9,99781974E-2	1	+ 3,79 uV	8,07313140E-7	1,81428540E-7	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	35	
1V	0.5V,1000Hz	4,99919541E-1	4,99861047E-1	1	+ 58,49 uV	4,51924070E-6	6,60634437E-6	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	30	
1V	0.9V,55Hz	8,99836370E-1	8,99810344E-1	1	+ 26,03 uV	9,21366166E-6	5,32565072E-6	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	10	
1V	0.9V,1000Hz	8,99830398E-1	8,99893492E-1	1	- 63,09 uV	2,44232039E-6	2,83573115E-6	0,5	0,5	0,3+0,1	1,5	10	

Figura 3.15: Tabla con resultados del programa de cálculo

Capítulo 4

Conclusión y propuesta de trabajo futuro

La automatización de procesos que conllevan el control de instrumentos es una tarea que ya ha sido abarcada de manera general. Comprendemos las mejoras que ofrece el establecer un proceso de adquisición de datos a través del controlador del bus, facilitándolo y evitando el posible error humano. Labview es una herramienta que nos permite crear instrumentos virtuales que puedan representar al proceso de lectura con una interfaz (Panel Frontal) que permite al usuario visualizar los resultados de una forma sencilla. El uso de este software para el control de buses de comunicación de instrumentos es una opción útil en procesos de calibración que incluyen múltiples equipos o es necesario realizar muchas lecturas. La modularidad de Labview permite el uso de programas individuales para su posterior aplicación en otros proyectos. Por lo que es un activo muy útil para laboratorios o empresas que trabajen con equipos de instrumentación. La programación de un proceso entero puede ser una tarea compleja pero la disponibilidad de numerosas funciones dispuestas por los fabricantes de equipos facilitan aún más el trabajo. La conclusión es que el mundo de la instrumentación ya ha dispuesto de todos los elementos necesarios para avanzar hacia la creación de programas para la automatización del control de equipos, entendiendo que su aplicación es condicional y siendo decisión del usuario la forma de controlar el instrumento.

Facilitar el proceso de calibración ha sido uno de los objetivos de este proyecto, el usuario no necesita de una mayor comprensión del proceso y es obvio que mejora la eficiencia del laboratorio, reduciendo el tiempo de operación y permitiendo al técnico responsable atender otros asuntos del laboratorio. Ya que todo el proceso está explicado detalladamente, considerando todas las opciones, es fácil la integración en un programa evitando cargar con la repetición de lecturas y cálculos a la persona responsable. Siendo la única responsabilidad de ésta la comprobación del correcto desarrollo del proceso a partir de la configuración de las diferentes conexiones o el posterior análisis y validación de los datos obtenidos. Reduciendo a su vez el posible error debido al factor humano.

El trabajo desarrollado para el Laboratorio de Calibración de la UPV puede ser reutilizado y continuado, pudiendo ampliar configuraciones nuevas de equipos así como a nuevos multímetros digitales. Ya que las funciones para el control de los equipos las implementa el fabricante y solo precisaría cambiarlas.

Bibliografía

- [1] *History of the manufacturer AVO Ltd.; London*. <https://web.archive.org/web/20160711161341/http://www.radiom.com/5571>.
- [2] National Institute of Standards y Technology. <https://www.nist.gov/>.
- [3] Bureau International des Poids et Mesures. <https://www.bipm.org/en/about-us/>.
- [4] *International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms(VIM)*. BIPM. 2008. URL: https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf.
- [5] *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and reults*. International Organization for Standardization. 1994. ISBN: 1-55937-238-9. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:5725:-1:ed-1:v1:en>.
- [6] *Figura descriptiva de exactitud (veracidad y precisión) de acuerdo a ISO 5725-1*. <https://es.wikipedia.org/wiki/A>
- [7] Leo Joskowicz. *Figura 1-A. Ilustración ejemplo veracidad precisión según ISO 5725-1*. https://www.researchgate.net/figure/A-and-1-B-Trueness-and-precision-ISO-5725-1-Fig-1-A-Illustration-of-the-concept-of_fig2_316258859.
- [8] *Ley 32/2014 de Metrología*. Boletín Oficial del Estado. Dic. de 2014.
- [9] Centro Español de Metrología. *Infraestructura metrológica española*. <https://www.cem.es/cem/metrologia/sistema>
- [10] Entidad Nacional de Acreditación. <https://www.enac.es/>.
- [11] International Organization of Legal Metrology. *What is legal metrology?* <https://www.oiml.org/en/about/legal-metrology>.
- [12] International Laboratory Accreditation Cooperation. <https://ilac.org/language-pages/spanish/>.
- [13] *Figura Campana de Gauss*. <http://www.investinghispania.com/2016/03/que-es-el-drawdown-en-trading/media-operaciones-trading/>.
- [14] Laboratorio de Calibración Universitat Politècnica de Valencia. <http://calibracion.webs.upv.es/?lang=es>.
- [15] *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y de calibración*. ISO/IEC 17025:2005. 2005.
- [16] *Guide to the expression of uncertainty in measurement(GUM)*. BIPM. 2008.
- [17] *IEEE Standard Codes, Formats, Protocols and Common Commands for Use With Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation*. ANSI/IEEE. 1992. ISBN: 1-55937-238-9. URL: [http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%5C%20\(V0\)/Dispense/DISP_7STANDARD%5C%20IEEE%5C%20488_2%5C%201992.pdf](http://webuser.unicas.it/misure/MAQ_OLD%5C%20(V0)/Dispense/DISP_7STANDARD%5C%20IEEE%5C%20488_2%5C%201992.pdf).

-
- [18] Jose María Grima Palop. *Instrumentación Programada (GPIB-LXI-VISA)*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [19] *IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation*. ANSI/IEEE. 1987. ISBN: 471-62222-2. URL: http://www3.fi.mdp.edu.ar/mediciones/apuntes/IEEE-488_78.pdf.
- [20] Anthony J. Caristi. *General Purpose Instrumentation Bus Manual*. Academic Press INC., 1989. ISBN: 0-12-1598220-9.
- [21] Leonard Sokoloff. *GPIB Instrument Control*. Inf. téc. DeVry College of Technology, 2002.