

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DATALOGGER”

JAIVER CHICANGANA CIFUENTES



UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

PROGRAMA ACADÉMICO DE FÍSICA

Santiago de Cali, 13 de septiembre de 2012

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DATALOGGER”

**JAIVER CHICANGANA CIFUENTES,
1984**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Físico.

Director:

Otto Vergara García, Dr Ret Nat.

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS

PROGRAMA ACADÉMICO DE FÍSICA

Santiago de Cali, 13 de septiembre de 2012

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y EXACTAS
PROGRAMA ACADÉMICO DE FÍSICA

JAIVER CHICANGANA CIFUENTES,
1984

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN
DATALOGGER”

TEMAS:

- Programación de Pic.
- Interfaz Gráfica.
- Comunicación I^2C
- Adecuación de señales.
- Sobremuestreo y Decimación.

NOTA DE APROBACIÓN.

El trabajo de grado titulado “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DATALOGGER”
presentado por el estudiante JAIVER CHICANGANA CIFUENTES, para optar al
título de Físico, fue revisado por el jurado y calificado como:

Aprobado.

Otto Vergara.

Director.

Jurado.

AGRADECIMIENTOS

- Agradezco al grupo de instrumentación y Física aplicada (GIFA), por darme la oportunidad de ser uno más de sus integrantes.
- Al profesor Otto Vergara por sugerir el tema de tesis y presentarme la oportunidad de formarme y desarrollar este trabajo.
- Al profesor EVal Baca por habernos facilitado el KEITHLEY.
- A mis amigos por la compañía, ayuda, consejos y demás. En especial a mis compañeros del GIFA: Luis, Estiven, Oscar y Julián.
- En general a todas las personas que me brindaron su apoyo y amistad.
- A mi familia, por todo el apoyo, dedicación y amor entregado, en especial a mi mamá, mi papá, mi hermano, a mi tía y su familia.

RESUMEN

Para medición y registro automáticos de señales de voltaje de variación lenta (60 Hz de ancho de banda), se diseñó y construyó un instrumento microcontrolado conformado por: un amplificador de voltaje de ganancia programable (x5, x10, x50, x100, x200, x500), memoria no volátil de 512 Kbyte para almacenamiento de datos de medición y un puerto serial de comunicaciones. La CPU del dispositivo se desarrolló entorno al micro controlador PIC18F2550 [7] de Microchip operando a 16 MHz. Como amplificador se escogió el AD620 [8] de ANALOG DEVICES, un amplificador de instrumentación de bajo offset, cuya ganancia se define con una resistencia, que se conecta al amplificador mediante un canal de un multiplexor analógico, CD4051 [9], de 8 canales, a 6 de los cuales se conectan sendas resistencias; la ganancia se programa por selección del canal del multiplexor. Con el fin de optimizar la resolución del instrumento, el amplificador puede operar en uno de dos modos: monopolar o bipolar; en el primero la señal de entrada debe estar entre 0 y +4.096V y entre -4.096V y +4.096V en el segundo; el modo de operación es programable, la selección del modo y el ajuste de escala (ganancia y desplazamiento de cero) correspondiente a cada modo, la realiza un circuito conformado por un multiplexor analógico triple de 2 canales (CD4053) [10] y un amplificador operacional LF353 [11]. Se utilizó el conversor análogo digital por aproximaciones sucesivas de 10 bits residente en el PIC, y, mediante una fuente precisa de voltaje con compensación de temperatura (LM329) [12], se generó el voltaje de referencia del ADC (4.096 ± 0.001 V). Para utilizar el hardware descrito en adquisición

y registro automáticos de datos (DATALOGGER), se desarrollaron dos programas: la **Interfaz a Usuario** y el **Programa de Control** residente en la CPU del instrumento. La **Interfaz a Usuario** es una aplicación gráfica en Visual Basic 2010 (VB.Net), que, a manera de “Instrumento Virtual”, permite manejar totalmente el DATALOGGER desde un computador bajo WINDOWS; la Interfaz provee funciones para definir los parámetros operacionales del instrumento (ganancia, número de muestras y tiempo de muestreo), y para descarga y almacenamiento de datos de medición. El **Programa de Control**, además de las funciones de bajo nivel asociadas al manejo del hardware (temporización, lectura del ADC, gestión de memoria y comunicaciones), incorpora rutinas de análisis numérico para aumentar la resolución del dato adquirido mediante sobremuestreo de la señal medida y posterior diezmado de los datos de medición. Así, por filtrado digital, se obtuvo una conversión análoga a digital de 12 bits, 2 más que los 10 del ADC del PIC, que permite una resolución de voltaje de $5\ \mu\text{V}$ con una ganancia de 200; en estas condiciones, usado como termómetro, con un termopar tipo K, la resolución del instrumento es de 0.1°C a temperatura ambiente. El instrumento se calibró con el AGILENT 34401A de la CORPORACIÓN METROCALIDAD y con un KEITHLEY 2100. Se realizó una prueba de funcionamiento y confiabilidad, comparando lecturas de voltaje de estos dos voltímetros y del nuestro, observándose una coincidencia mejor que 1.5 por ciento entre ellas.

Objetivo General

- Utilizando dispositivos electrónicos de última generación y herramientas actuales de programación, diseñar, construir y probar el hardware y el software de un datalogger de bajo costo. La resolución del instrumento debe ser de al menos 10 bits y debe comandarse en línea desde un computador anfitrión mediante una interfaz gráfica a usuario intuitiva y amigable.

Objetivos específicos

- **Hardware:** Diseñar, construir y probar los circuitos de los módulos de control de ganancia, de selección del modo operación y de generación del voltaje de referencia del ADC.

- **Software:**

Programa de Control.

Escribir las rutinas de bajo nivel de manejo y control del hardware: temporización de la toma de datos, lectura del ADC, gestión de memoria y comunicaciones con el Host. Desarrollo de las rutinas de análisis numérico para diezmado (acumulación y promedio) de datos.

Interfaz de Usuario.

Escribir los módulos funcionales de la interfaz: rutinas de comunicaciones, de configuración del Datalogger y de archivo de datos.

Índice general

1. Introducción y Antecedentes	12
2. Marco Teórico	14
2.1. Amplificadores Operacionales	15
2.2. Conversor Análogo a Digital <i>ADC</i>	17
2.3. Memoria EEPROM	21
2.4. Multiplexor 74HC4051 y 74HC4053	21
2.5. Comunicación I^2C	22
2.5.1. Protocolo del Bus	25
2.6. Comunicación USART (<i>RS-232</i>)	26
3. Metodología	30
3.1. Estudio de amplificador programable del SAD	30
3.2. Estudio del microvoltímetro 53213 de LEYBOLD DIDACTIC GMBH	31
3.2.1. Compensación offset (función “ <i>Tara</i> ”)	33
3.2.2. Mediciones de tensión	33
3.2.3. Indicaciones de saturación	34
3.3. Frecuencia de Nyquist	35
3.3.1. Efecto aliasing	35
3.4. Termopares	36

4. Diseño y etapas del proyecto	41
4.1. Hardware	41
4.1.1. Regulado de tensión	41
4.1.2. Amplificación	42
4.1.3. Adecuación de señal	42
4.1.4. PIC (Programmable Integrated Circuit)	43
4.1.5. Circuitos Impreso	44
4.2. Software	45
4.2.1. Interfaz gráfica	45
4.2.2. Software del Microcontrolador	47
4.2.3. Calibración	47
4.3. Configuración y puesta en marcha	48
4.3.1. Interfaz	49
4.3.2. HyperTerminal	51
4.3.3. Lectura EEPROM	52
5. Práctica Experimental	54
5.1. Ley de enfriamiento de Newton	54
5.2. Practica en Corporación Metrocalidad	55
6. Conclusiones	59
7. Perspectivas	60
Referencias	61
A. Calibración	63
B. Esquemáticos de Circuitos Eléctricos	67
C. Diagramas de flujo	74
D. Códigos computacionales en Visual Basic	78

E. Códigos computacionales en lenguaje C	89
F. Informe de Calibración	96
G. Método ANOVA	100

Introducción y Antecedentes

En muchas ocasiones, los estudiantes de ciencias y de ingenierías, precisan medir y registrar pequeñas señales de voltaje producidas por sensores y transductores de uso común en el laboratorio; este es el caso, por ejemplo, de la medición de temperatura dado que potencias termoeléctricas entre 20 y 40 $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ son típicas de los termopares comerciales. La medición de señales de estos órdenes de magnitud demanda un instrumento que permita amplificarlas, con precisión y confiabilidad, desde estos niveles hasta los 2 – 5 V que requiere la electrónica de adquisición.

Un instrumento “inteligente” conformado por un amplificador de voltaje preciso y confiable, de ganancia programable y memoria para almacenamiento de datos, es esencial tanto en el laboratorio de docencia como en el de investigación. Por su agregado tecnológico, es equipo de importación de alto costo, con precios de difícil acceso para colegios y universidades. Dados los altos costos del material didáctico, el Departamento de Física – desde su fundación – ha impulsado el diseño y producción de equipo de laboratorio de buenas especificaciones a bajo costo buscando difundir e implantar nuevas tecnologías en nuestro entorno; con este propósito surgió el Multitaller de Materiales Didácticos bajo cuyo auspicio se produjo el Sistema de Adquisición de Datos, SAD, antecedente instrumental inmediato de nuestro instrumento. Del módulo de 4 entradas análogas del SAD, el Datalogger conserva los mecanismos de selección de ganancia y de modo de operación, y la generación del voltaje de referencia, circuitos probados

en los cursos de Teoría de Circuitos y de Electrónica Analógica en cuyas prácticas de laboratorio el SAD se utiliza como interfaz inteligente de un PC; para estas prácticas se escribió una primera interfaz gráfica de usuario en Visual Basic, trabajo para el cual se desarrollaron los algoritmos y rutinas de manejo del puerto seriado. Con el fin de facilitar el uso y manejo del instrumento, se redujo el ambicioso conjunto de funciones del SAD, y, para simplificar la electrónica, se optó por un amplificador de un canal y se introdujo un microcontrolador de última generación cuya arquitectura integra, “a bordo”, unidades funcionales como el ADC y el puerto serial de comunicaciones.

Capítulo 2

Marco Teórico

En este capítulo se dará a conocer al lector cuales son las tecnologías, protocolos de comunicación y dispositivos que utilizamos. Dentro de los cuales están: Amplificadores operacionales y de instrumentación; estos están presentes en la etapa de adecuación del voltaje de referencia el cual se implemento para un auto diagnostico, y de amplificación de la señal respectivamente, ya que se encargan de amplificar la señal de entrada desde $50\ \mu V$ hasta $5V$. Conversor análogo a digital *ADC*; no utilizamos directamente uno de estos dispositivos pero el *Pic* tiene implementado un *ADC* de $10 - bits$ en sus puertos y considero que es importante que el lector se haga una idea de lo que está ocurriendo en la entrada de estos. Memoria *EEPROM*; esta es la encargada del almacenamiento de los datos, cuando se programa a tiempos largos de toma de datos. Comunicación *I²C*; este es el protocolo de comunicación que maneja la *EEPROM* y por tanto es el protocolo que utilizamos para comunicar nuestra *EEPROM* con el microcontrolador. Multiplexor (*74HC4051*), (*74HC4053*); que es el encargado de seleccionar el valor de ganancia con el cual se hara la toma de datos. Comunicación *USART (RS - 232)*; este es el protocolo de comunicación que utilizamos para comunicar nuestro equipo amplificador con el computador anfitrión donde corre nuestra interfaz de usuario.

2.1. Amplificadores Operacionales

Un amplificador operacional es básicamente un amplificador diferencial de corriente continua con ganancia muy elevada. En la Figura 2.2 se observa los dos terminales de entrada, de los que uno está señalado con $+$ y se denomina entrada sin inversión y el otro señalado con $-$, entrada con inversión. La ganancia de tensión en lazo abierto A_{vol} normalmente es de 100 dB (en proporción de tensiones 100.000), lo que significa que una pequeña diferencia en la entrada ($V_d = V_+ - V_-$), provoca un gran cambio en la salida. El amplificador responde a la diferencia entre las dos tensiones de entrada y si esta diferencia es cero, la salida estará muy próxima, también a cero. Es por esta razón que el amplificador operacional (OA) debe de tener una vía de entrada positiva y otra negativa para poder tener una salida prácticamente nula del mismo alrededor de cero [6]. En la figura 2.1 se muestra la apariencia física del amplificador con un empaquetado Dil 8, el cual es usado para el de referencia LF353, que contiene dos amplificadores operacionales internos y el AD620 que es un amplificador de instrumentación, que son usados en el diseño del presente proyecto.

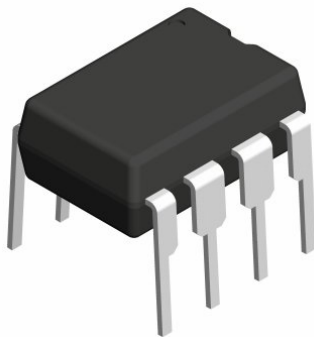


Figura 2.1: Empaquetado Dil 8.

En la figura 2.2 se muestra el símbolo usado en los diagramas esquemáticos para la representación de los amplificadores operacionales y de instrumentación.

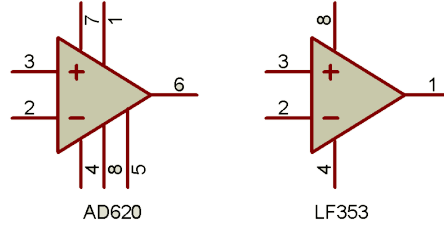


Figura 2.2: Amplificador de instrumentación y operacional.

Gracias a su capacidad para la realización de operaciones matemáticas y su fácil implementación como amplificadores de señal, el amplificador operacional KF353 es utilizados en la etapa de acondicionamiento de voltaje de referencia para poder tener un autodiagnostico cuando sea requerido.

Los amplificadores de Instrumentación son amplificadores diferenciales que generalmente proveen varias características deseables, tales como un CMRR alto, niveles de V_{OS} , I_B e I_{OS} bajos y estables, e impedancia de entrada alta para ambas entradas. El siguiente diagrama muestra un modos de construir amplificadores de instrumentación usando Amplificadores Operacionales.

En la figura 2.3 se muestra la estructura de un amplificador:

Al existir realimentación negativa se puede considerar un cortocircuito virtual entre las entradas inversora y no inversora (símbolos $-$ y $+$ respectivamente) de los dos operacionales. Por ello se tendrán las tensiones en dichos terminales y por lo tanto en los extremos de la resistencia R_g .

Así que por ella circulará una corriente

$$I_g = (V_2 - V_1) \left(\frac{1}{R_g} \right) \quad (2.1)$$

Y debido a la alta impedancia de entrada del ($A.O.$), esa corriente será la misma que atraviesa las resistencias R_1 Por lo tanto la tensión que cae en toda la rama formada

por R_g , R_1 y R_1 será:

$$V_{intermedia} = \left(\frac{V_2 - V_1}{R_g} \right) (R_g + 2R_3) \quad (2.2)$$

Simplificando:

$$V_{intermedia} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_3}{R_g} \right) \quad (2.3)$$

Que será la DIFERENCIA de tensión entre la salida inmediata de los dos ($A.O.$) (justo antes de las R_1). Puesto que el resto del circuito es un restador de ganancia la unidad ($R_1 = R_2$) su salida será exactamente la diferencia de tensión de su entrada (sin añadir ganancia), la cual se acaba de definir.

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_3}{R_g} \right) \quad (2.4)$$

Nótese como se ha simplificado la expresión dando valores iguales a las resistencias. En caso de que las resistencias no sean iguales, la ganancia total del amplificador de instrumentación será:

$$V_{out} = (V_2 - V_1) \left(1 + \frac{2R_3}{R_g} \right) \left(\frac{R_2}{R_1} \right) \quad (2.5)$$

En circuitos integrados suele encapsularse todo excepto la resistencia R_g para poder controlar la ganancia. También puede sustituirse la conexión a tierra por otra a una tensión dada.

2.2. Conversor Análogo a Digital ADC

Un conversor análogo - digital (ADC) es un dispositivo electrónico que convierte señales de voltaje o corriente que se presentan en cantidades continuas para ser transformadas en cantidades discretas de tiempo en forma de códigos digitales, que por lo

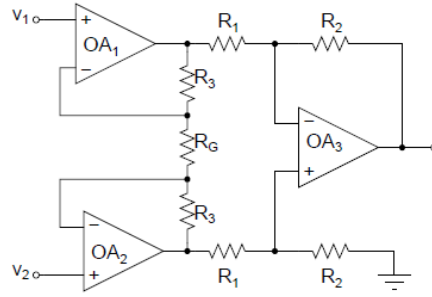


Figura 2.3: Amplificador de instrumentación con Amplificadores operacionales.

general son binarios.

En la figura 2.4 se muestra el diagrama interno de un *ADC* básico, el cual tiene un voltaje de entrada V_{IN} , que no debe ser mayor que el voltaje de referencia V_{REF} , y que convierte dicho voltaje de entrada a un código binario de tres bits (Y_0, Y_1, Y_2).

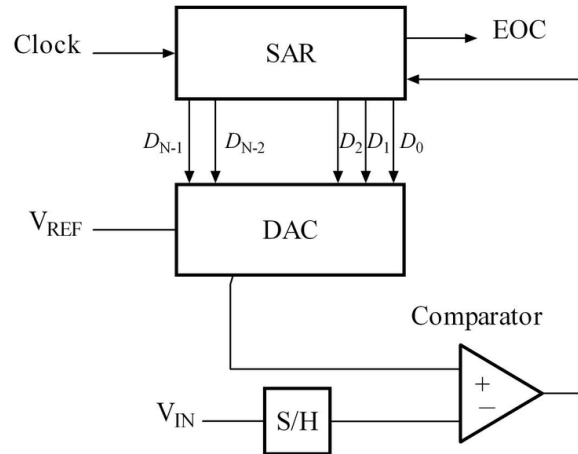


Figura 2.4: Diagrama interno de un *ADC*.

La resolución del conversor indica el número de valores discretos que él puede producir sobre el rango de valor analógico. El número de valores discretos disponibles es una potencia de 2. El mínimo valor en voltaje requerido para garantizar un valor de

voltaje a la salida se denomina bit menos significativo o LSB (least significant bit). La forma en que se determina la resolución (Q) se muestra en la ecuación 2.6, donde Q es igual al voltaje LSB, y es igual a la totalidad del rango de voltaje medido o E_{FSR} (overall voltage measurement range), dividido por el número de intervalos de voltaje discretos N

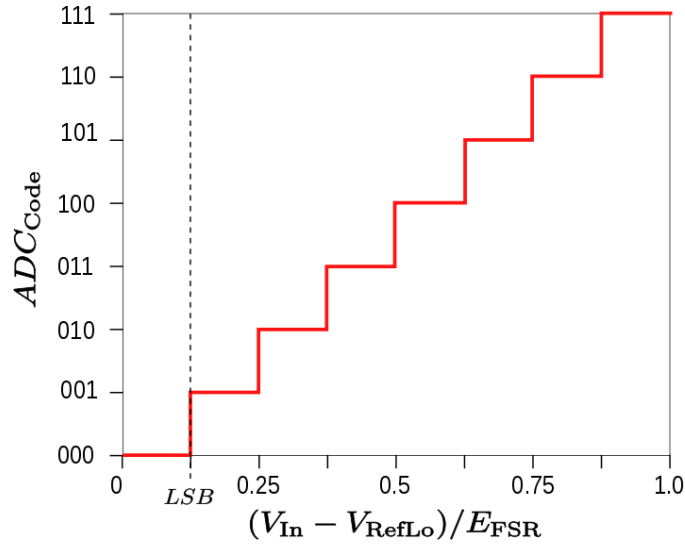


Figura 2.5: Esquema de codificación de un ADC de 8 bits .

$$Q = \frac{E_{FSR}}{N} \quad (2.6)$$

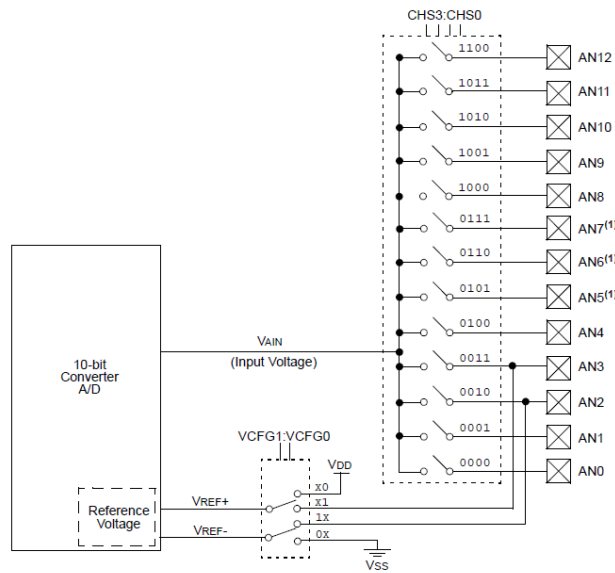
En la figura 2.5 se muestra el esquema de codificación de un ADC de 8 bits, Donde se observa, según la ecuación 2.7, que el voltaje E_{FSR} esta dado por la diferencia entre el extremo más alto de voltaje o V_{RefHi} (high extreme voltage) y el extremo más bajo de voltaje o V_{RefLow} (high extreme voltage) hacer codificado [18].

$$E_{FSR} = V_{RefHi} - V_{RefLow} \quad (2.7)$$

El número total de intervalos de voltaje está dado por la ecuación 2.8, donde M es la resolución del ADC en bits.

$$N = 2^M \quad (2.8)$$

El microcontrolador PIC 18F2550 posee un ADC interno de 10 bits que nos permite la adquisición de datos analógicos por los pines del puerto A y su posterior almacenamiento en registros de 8 bits. En la figura 2.6 se muestra el esquema del ADC interno del microcontrolador cuestión. Este ADC interno le da la oportunidad al usuario de elegir si quiere un voltaje de referencia interno o externo, la velocidad de adquisición de datos, el número de canales de conversión que necesite y el número de bits de resolución entre 8 y 10 bits.



Note 1: Channels AN5 through AN7 are not available on 28-pin devices.
Note 2: I/O pins have diode protection to VDD and VSS.

Figura 2.6: Diagrama en bloques del *ADC* del pic 18Fxxxx

Aparte de todas las ventajas descritas anteriormente, se utilizó este ADC interno en el diseño del datalogger ya que por estar dentro del microcontrolador ahorra mucho

espacio para el diseño de la tarjeta, aumenta la velocidad y confiabilidad de transmisión de los datos, es más económico y fácil de adquirir en el mercado local.

2.3. Memoria EEPROM

EEPROM o E^2 PROM son las siglas de Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory (ROM programable y borrrable eléctricamente). Es un tipo de memoria ROM que puede ser programada, borrada y reprogramada eléctricamente, a diferencia de la EPROM que ha de borrarse mediante un aparato que emite rayos ultravioletas. Son memorias no volátiles. Las celdas de memoria de una EEPROM están constituidas por un transistor MOS, que tiene una compuerta flotante (estructura SAMOS), su estado normal esta cortado y la salida proporciona un 1 lógico.

Aunque una EEPROM puede ser leída un número ilimitado de veces, sólo puede ser borrada y reprogramada entre 100.000 y un millón de veces.

Estos dispositivos suelen comunicarse mediante protocolos como I^2C , SPI y Microwire. En otras ocasiones, se integra dentro de chips como microcontroladores y DSPs para lograr una mayor rapidez [15, 16].

La memoria flash es una forma avanzada de EEPROM creada por el Dr. Fujio Masuoka mientras trabajaba para Toshiba en 1984 y fue presentada en la Reunión de Aparatos Electrónicos de la IEEE de 1984. Intel vio el potencial de la invención y en 1988 lanzó el primer chip comercial de tipo NOR .

2.4. Multiplexor 74HC4051 y 74HC4053

Los Multiplexores son circuitos Combinacionales con varias entradas y una única salida de datos, están dotados de entradas de control capaces de seleccionar una, y sólo una, de las entradas de datos para permitir su transmisión desde la entrada seleccionada hacia dicha salida. En el campo de la electrónica el multiplexor se utiliza como

dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las por un medio de transmisión compartido. Para ello lo que hace es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varios nodos puedan comunicarse al mismo tiempo. Una señal que está multiplexada debe demultiplexarse en el otro extremo. Según la forma en que se realice esta división del medio de transmisión, existen varias clases de multiplexación:

- Multiplexación por división de frecuencia
- Multiplexación por división de tiempo
- Multiplexación por división de código
- Multiplexación por división de longitud de onda

2.5. Comunicación I^2C

El I^2C (Circuitos Inter-Integrados), es una interfaz de comunicaciones, desarrollada por Philips, para comunicar sus microcontroladores con otros chips periféricos, de una forma simple y de bajo costo. Al I^2C también se le conoce como la interfaz de dos-hilos y puede ser utilizada para conectar diversos tipos de memorias, conversores A/D y D/A, pantallas LCD, potenciómetros digitales, sensores e incluso otros procesadores. I^2C es un protocolo sincrónico en el que todas las transmisiones están referidas a una señal de reloj común, generada por el maestro, normalmente un procesador. El periférico receptor, esclavo usa este reloj para sincronizar la adquisición de la cadena de bit en serie. Muchos chips pueden estar conectados al mismo SPI de un mismo maestro. este sistema de intercambio de información a través de tan solo dos líneas permite a circuitos integrados y módulos OEM interactuar entre sí a velocidades de 100Kbits por segundo en el modo estándar. Emplea comunicación serie, utilizando un conductor para manejar el timing (pulsos de reloj) y otro para intercambiar datos.

Este bus se basa en tres señales:

- SDA (System Data) por la cual viajan los datos entre los dispositivos.
- SCL (System Clock) por la cual transitan los pulsos de reloj que sincronizan el sistema.
- GND (Masa) Interconectada entre todos los dispositivos “*enganchados*” al bus.

Las líneas SDA y SCL son del tipo drenador abierto, similares a las de colector abierto pero asociadas a un transistor de efecto de campo (ó FET). Se deben poner en estado alto (conectar a la alimentación por medio de resistores Pull-Up) para construir una estructura de bus tal que se permita conectar en paralelo múltiples entradas y salidas, pero obsérvese que que las líneas tienen una especificación máxima de 400pF en lo que respecta a capacidad de carga como se muestra en la figura 2.7.

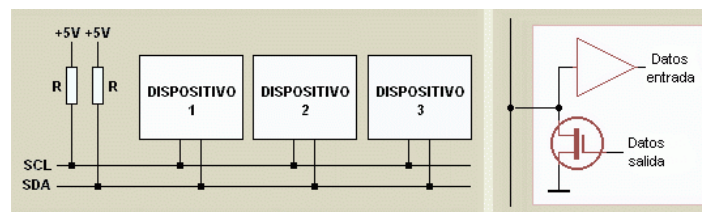


Figura 2.7: Conexión I^2C básica

Los dispositivos conectados al bus I^2C tienen una dirección única para cada uno. También pueden ser maestros o esclavos. El dispositivo maestro inicia la transferencia de datos y además genera la señal de reloj, pero no es necesario que el maestro sea siempre el mismo dispositivo, esta característica se la pueden ir pasando los dispositivos que tengan esa capacidad. Esta característica hace que al bus I^2C se le denomine bus multimaestro.

Las definiciones o términos utilizados en relación con las funciones del bus I2C son las siguientes:

- **Maestro (Master):** Dispositivo que determina la temporización y la dirección del tráfico de datos en el bus. Es el único que aplica los pulsos de reloj en la línea SCL. Cuando se conectan varios dispositivos maestros a un mismo bus la configuración obtenida se denomina “*multi-maestro*”.
- **Esclavo (Slave):** Cualquier dispositivo conectado al bus incapaz de generar pulsos de reloj. Reciben señales de comando y de reloj proveniente del dispositivo maestro.
- **Bus Desocupado (Bus Free):** Estado en el cual ambas líneas (SDA y SCL) están inactivas, presentando un estado lógico alto. Únicamente en este momento es cuando un dispositivo maestro puede comenzar a hacer uso del bus.
- **Comienzo (Start):** Sucede cuando un dispositivo maestro hace ocupación del bus, generando esta condición. La línea de datos (SDA) toma un estado bajo mientras que la línea de reloj (SCL) permanece alta.
- **Parada (Stop):** Un dispositivo maestro puede generar esta condición dejando libre el bus. La línea de datos toma un estado lógico alto mientras que la de reloj permanece también en ese estado.
- **Dato Válido (Valid Data):** Sucede cuando un dato presente en la línea SDA es estable mientras la línea SCL está a nivel lógico alto.
- **Formato de Datos (Data Format):** La transmisión de datos a través de este bus consta de 8 bits de datos (ó 1 byte). A cada byte le sigue un noveno pulso de reloj durante el cual el dispositivo receptor del byte debe generar un pulso de reconocimiento, conocido como ACK (del inglés Acknowledge). Esto se logra

situando la línea de datos a un nivel lógico bajo mientras transcurre el noveno pulso de reloj.

- **Dirección (Address):** Cada dispositivo diseñado para funcionar en este bus dispone de su propia y única dirección de acceso, que viene pre-establecida por el fabricante. Hay dispositivos que permiten establecer externamente parte de la dirección de acceso. Esto permite que una serie del mismo tipo de dispositivos se puedan conectar en un mismo bus sin problemas de identificación. La dirección 00 es la denominada “*de acceso general*”, por la cual responden todos los dispositivos conectados al bus.
- **Lectura/Escritura (Bit R/W):** Cada dispositivo dispone de una dirección de 7 bits. El octavo bit (el menos significativo ó LSB) enviado durante la operación de direccionamiento corresponde al bit que indica el tipo de operación a realizar. Si este bit es alto el dispositivo maestro lee información proveniente de un dispositivo esclavo. En cambio, si este bit fuese bajo el dispositivo maestro escribe información en un dispositivo esclavo.

2.5.1. Protocolo del Bus

Como es lógico, para iniciar una comunicación entre dispositivos conectados al bus I2C se debe respetar un protocolo. Tan pronto como el bus esté libre, un dispositivo maestro puede ocuparlo generando una condición de inicio. El primer byte transmitido después de la condición de inicio contiene los siete bits que componen la dirección del dispositivo de destino seleccionado y un octavo bit correspondiente a la operación deseada (lectura o escritura). Si el dispositivo cuya dirección se apuntó en los siete bits está presente en el bus éste responde enviando el pulso de reconocimiento ó ACK. Seguidamente puede comenzar el intercambio de información entre los dispositivos como se muestra en la figura.

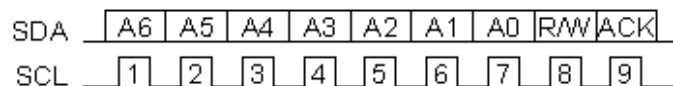


Figura 2.8: Conexión I^2C básica

Cuando la señal R/W está previamente a nivel lógico bajo, el dispositivo maestro envía datos al dispositivo esclavo hasta que deja de recibir los pulsos de reconocimiento, o hasta que se hayan transmitido todos los datos.

En el caso contrario, es decir cuando la señal R/W estaba a nivel lógico alto, el dispositivo maestro genera pulsos de reloj durante los cuales el dispositivo esclavo puede enviar datos. Luego de cada byte recibido el dispositivo maestro (que en este momento está recibiendo datos) genera un pulso de reconocimiento.

El dispositivo maestro puede dejar libre el bus generando una condición de parada (Stop). Si se desea seguir transmitiendo, el dispositivo maestro puede generar otra condición de inicio en lugar de una condición de parada. Esta nueva condición de inicio se denomina “*inicio repetitivo*” y se puede emplear para direccionar un dispositivo esclavo diferente ó para alterar el estado del bit de lectura/escritura (R/W) [19, 20].

2.6. Comunicación USART ($RS - 232$)

La comunicación *USART* (Universal Serial Asynchronous Receiver/Transmitter) es un tipo de transmisión/recepción asíncrona que dentro del hardware de un computador traduce los datos en formato paralelo a formato serie. Este tipo de comunicación comúnmente utilizada en conjunción con otros estándares de comunicación como *EIA RS - 232*. El estándar de esta comunicación consta de dos secciones:

- **Características de la señal eléctrica.** Definición de los voltajes que representan los ceros y unos lógicos.

- **Características mecánicas de la conexión.** Establece que el DTE dispondrá de un conector macho y el DCE un conector hembra. También se especifican la asignación de números a las patillas. El tipo y las medidas del conector son establecidos por la organización internacional de estándares (ISO). Los más utilizados son los de 9 pines (DB-9 Figura 2.9) y los de 25 (DB-25).



Figura 2.9: Conector DB – 9

Los tres circuitos principales utilizados para la comunicación son los siguientes:

- **Línea 2** (*TXD*). Salida de datos del DTE.
- **Línea 3** (*RXD*). Entrada de datos al DTE.
- **Línea 7** (*comn*). Circuito común, referencia para determinar la polaridad y voltaje de las otras líneas.

Los nombres dados en el modelo oficial *RS – 232* para las señales de datos y acoplamiento, así como su asignación a las diferentes patillas (pines) del conector DB-9, aparecen en el Cuadro 2.1.

El protocolo establecido por la norma *RS2 – 32* envía la información estructurada en 4 partes:

1. **Bit de inicio o arranque** (*START*). Es un paso de “1” a “0” lógico. Cuando el receptor detecta el bit de inicio sabe que la transmisión ha comenzado.

Pin DB – 9	Nombre	Función
------------	--------	---------

1	DCD	DETECCIÓN DE PORTE DE DATOS (ENTRADA)
2	RXD	RECEPCIÓN DE DATOS (ENTRADA)
3	TXD	TRANSMISIÓN DE DATOS (SALIDA)
4	DTR	TERMINAL DE DATOS LISTO (SALIDA)
5	COMÚN	COMÚN COMÚN (REFERENCIA)
6	DSR	DISPOSITIVO DE DATOS LISTO (ENTRADA)
7	RTS	PETICIÓN DE ENVÍO (SALIDA)
8	CTS	DISPUESTO PARA ENVIAR (ENTRADA)
9	RI	INDICADOR DE LLAMADA (ENTRADA)

Tabla 2.1: Asignación de pines de conectores DB – 9

2. **Bits de datos** (*DATAS*). Los bits de datos son enviados al receptor después del bit de Start. El bit de menos peso LSB es transmitido primero y el de mayor peso MSB el último.
3. **Bit de paridad** (*Parity*). Este bit en aplicaciones sencillas no suele utilizarse. Con este bit se pueden descubrir errores en la transmisión. Se puede dar paridad par o impar. En la paridad par, por ejemplo, la palabra de datos a transmitir se completa con el bit de paridad de manera que el número de bits “1” enviados sea par.
4. **Bit de parada** (*STOP*). Indica la finalización de la transmisión de una palabra de datos. La línea queda a “1” lógico. El protocolo de transmisión de datos permite 1, 1, 5 ó 2 bits de parada.

Lo anterior se puede observado en la figura 2.14, donde se muestra la mínima unidad de información que se envía a través del protocolo RS -232 en función del tiempo.

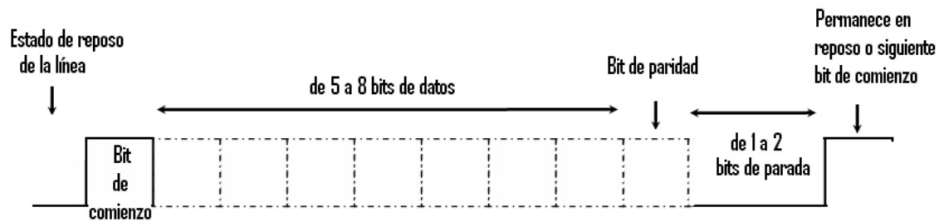


Figura 2.10: Tramo de datos en la comunicación $RS - 232$.

En el proyecto de la tesis se utilizó el sistema de comunicación $RS - 232$ por la experiencia adquirida en la elaboración de proyectos anteriores con excelentes resultados ya que es un protocolo universal, confiable, económico y fácil de implementar porque solo requiere el acople del circuito integrado MAX232 con cinco pequeños capacitores, como se muestra en la figura 2.11.

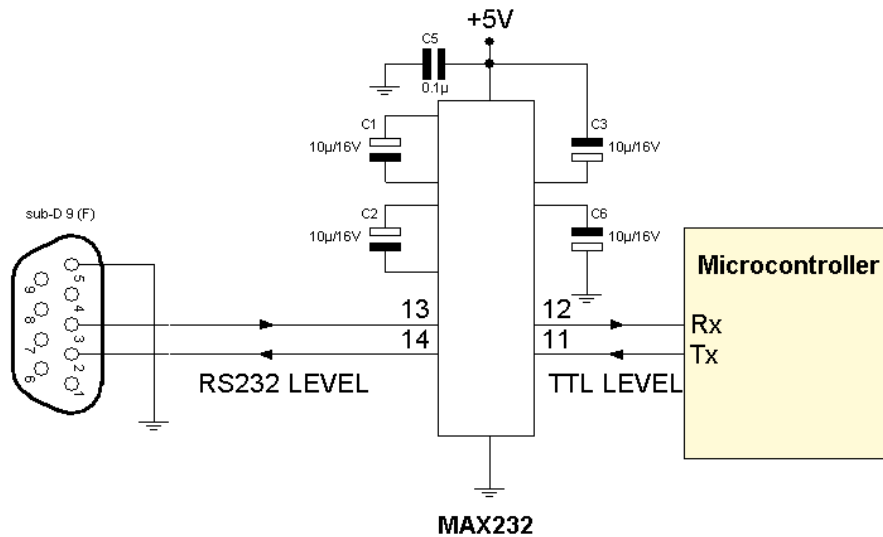


Figura 2.11: Implementación del sistema de comunicación $RS - 232$ [21].

3.1. Estudio de amplificador programable del SAD

Se inició el proceso con el estudio del amplificador programable diseñado y construido en la tesis de maestría del doctor Andrés Simar, en la cual dicho amplificador forma parte de un sistema de adquisición de datos. En esta etapa del proyecto se estudiaron las partes del hardware y software del amplificador programable diseñado y construido para el SAD. Interesaba conocer las técnicas utilizadas en la construcción y las partes utilizadas en estas donde como se observa en el anexo B.1, se tienen los siguientes componentes electrónicos:

1. Resistencias.
2. Condensadores.
3. Trimmers.
4. Diodos.
5. Multiplexores (74HC4051,4052,4053).
6. Amplificadores operacionales (Lf347,Lf353).
7. Conversos analógico a digital (ADC0820).

8. Regulador de temperatura (Lm329).

De los cuales despues de su estudio se decidio continuar utilizando unos y descartar otros por las necesidades y limitaciones de presición que se tuvieron en su momento. y como posivilidades a futuro de implementar nuevas opciones se continuo trabajando con el multiplexor 74HC4051, 74HC4053, con el *Lm329* para octener los voltajes de referencia que se utilizaran para el *ADC* del microcontrolador, amplificador operacional *Lf353*, los trimer, diodos, condensadores, resistencias, se utilizara el *ADC* del pic y se cambio la amplificación que correspondia a los operacionales *Lf347* y *Lf353* por un amplificador de instrumentación de la familia de *Analog Divices* AD620 por su mejor comportamiento con el offset y por la reducion de componentes, aparte de su facil manejo y consecución en el mercado, y se continuo con el resto del diseño ya que funciona.

3.2. Estudio del microvoltímetro 53213 de LEYBOLD DIDACTIC GMBH

El microvoltímetro indica tensiones de corrientes continuas desde 100 nV hasta 20 V en forma digital; además, los valores medidos pueden ser suministrados a un instrumento analógico a través de una salida amplificada. Esta unidad es insensible a señales de interferencia de baja frecuencia (zumbidos perturbadores) y puede compensar automáticamente tensiones de corrientes continuas externas fijas en todos los rangos (el potencial fijo de termopares). El microvoltímetro puede conmutarse a medición en voltio/segundos. Esto permite la determinación directa del flujo magnético en experimentos de inducción.

1. Par de hembrillas de entrada de 4 mm, hembrilla inferior a masa; tensión máxima ± 20 V, protección frente a sobrecorrientes hasta 230 V_{ef} . Resistencia de entrada:

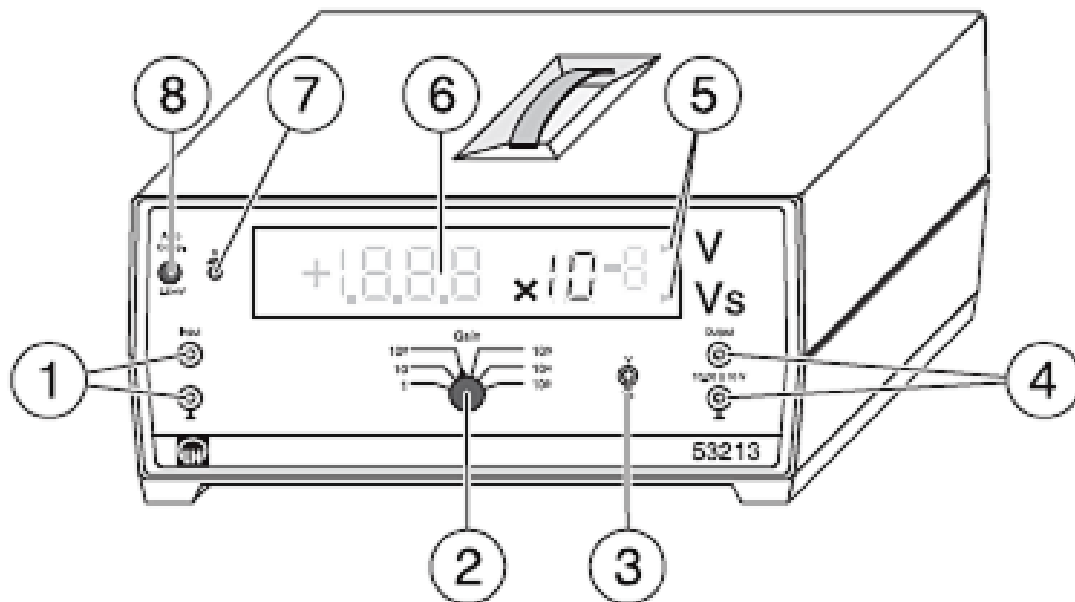


Figura 3.1: *microvoltímetro*

- 1 $M\Omega$ para el rango de 20 V, $100\ k\Omega$ para todos los otros rangos.
- 2. Conmutador-selector de ganancia para factores de amplificación de $\times 1$ a $\times 10^5$, escalonados en décadas; acoplado a la indicación digital del rango.
- 3. Conmutador-selector del modo de funcionamiento, con indicación de la función 5:
 Posición “V”: medición de tensión
 Posición “Reset”: posición cero de la indicación de la medición de voltio/segundos
 Posición “Vs”: integración de la tensión medida; medición del flujo magnético en voltio/segundos
- 4. Salida analógica: par de hembrillas de 4 mm, hembrilla inferior conectada a masa; tensión de salida máxima $\pm 20\ V$; a prueba de tensión externa hasta $25\ V_{ef}$
 Resistencia de salida: $100\ \Omega$

5. Indicación del modo de medición, V ó V_s : dos *LEDs* en forma de flechas, con el conmutador-selector acoplado 3.
6. Indicador digital, 3 dígitos, con indicación del exponente 10^0 - 10^{-5} y desborde (véase la sección 3.4)
7. Potenciómetro offset (véase la subsección 3.2.1)
8. Pulsador para la compensación automática de una tensión de entrada externa y tensiones offset internas (Offset, véase las subsecciones 3.2.1 y 3.2.2).

3.2.1. Compensación offset (función “*Tara*”)

Como se muestra en la figura 3.1. Al accionar el pulsador 8 la unidad almacena la tensión aplicada a la entrada y la suministra internamente con el signo contrario, de tal manera que unos 1,5 s después de soltar el pulsador 8 se compensan a cero la indicación y la salida analógica (en forma aproximada).

Procedimiento para la compensación: Poner el conmutador-selector 3 del modo de funcionamiento en la posición “ V ”. Si el circuito de medición se encuentra conectado pero sin tensión, accionar el pulsador 8 para la compensación externa automática y las tensiones internas offset; en caso de no haber alcanzado la posición cero en el indicador digital y en la salida analógica después de soltar el pulsador, realizar el ajuste fino con el potenciómetro 7.

3.2.2. Mediciones de tensión

Colocar el conmutador-selector 3 en la posición “ V ”

Tensión U

1. Conectar el circuito de medición al par de hembrillas 1, pero sin aplicar tensión al circuito de medición (desconectar todas las fuentes tensión y corriente externas);

seleccionar el rango de medición apropiado.

2. En caso de mediciones sensibles ($U < 1 \text{ mV}$): esperar hasta que disminuya la tensión termoelectrica en el circuito de medición (aprox. 1 minuto), luego
3. Compensar el offset accionando el pulsador 8, eventualmente efectuar un ajuste fino en el potenciómetro 7 para poner a cero la indicación digital y la salida analógica.
4. Aplicar la tensión U a medir: a tal fin, conectar las fuentes de tensión y corriente en el circuito de medición; leer el valor de la tensión.

Variaciones de tensión ΔU

Elegir el factor de ganancia y conseguir un rango óptimo para medir ΔU . Compensar el offset y la tensión aplicada U como se indica en la sección 3.2.1. Activar las variaciones de tensión ΔU (variaciones de temperatura en un termoelemento) y leer ΔU .

3.2.3. Indicaciones de saturación

Si el rango de medición de $\pm 19.99 \text{ VDC}$ se sobrepasa, las tres últimas cifras del indicador digital desaparecerán. Si esto ocurre, reducir el factor de ganancia (girar el conmutador-selector 2 en sentido antihorario), o en caso dado, compensar a cero la tensión aplicada a la entrada mediante el pulsador 8 (véase la sección 3.2.1). Si se presenta una saturación de los pasos de amplificación de la unidad (aunque sea por corto tiempo) -no se puede monitorizar la posición “ V_s ”- desaparecen las tres últimas cifras de la indicación digital y se escucha una señal acústica. En este caso el factor de ganancia se reduce o la amplitud de la señal disminuye. Si se intenta compensar mayores tensiones offset (véase [22] tabla 1), se interrumpe el proceso de compensación y se iluminan todos los puntos decimales del indicador digital. Para poner la unidad nuevamente en funcionamiento, se debe conectar el circuito de medición sin tensión y luego presionar el pulsador 8 (véase la sección 3.2.1).

3.3. Frecuencia de Nyquist

Es el nombre del ingeniero sueco-americano Harry Nyquist, según el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, para poder replicar con exactitud la forma de una onda es necesario que la frecuencia de muestreo sea superior al doble de la máxima frecuencia a muestrear.

En teoría, una frecuencia de Nyquist sólo más grande que el ancho de banda de la señal es suficiente para permitir la reconstrucción perfecta de la señal procedente de las muestras: véase teorema de muestreo: la frecuencia crítica. Sin embargo, esta reconstrucción requiere de un filtro ideal que pasa por algunas frecuencias sin cambios, mientras que la supresión de todos los demás por completo (comúnmente llamado un filtro pasa bajos). En la práctica, la reconstrucción perfecta es inalcanzable. Una cierta cantidad de aliasing es inevitable. La frecuencia de Nyquist no debe confundirse con la tasa de Nyquist, que es el límite inferior de la frecuencia de muestreo que satisfaga el criterio de muestreo de Nyquist para una señal o una familia de señales. Este límite inferior es dos veces el ancho de banda o la frecuencia máxima de la componente de señal. Tasa de Nyquist, como comúnmente utilizado con respecto a un muestreo, es una característica de una señal continua en el tiempo, no de un sistema, mientras que la frecuencia de Nyquist es una característica de un sistema de tiempo discreto, no de una señal [24] [25] [26] [27].

3.3.1. Efecto aliasing

Si se utiliza una frecuencia menor a la establecida por el teorema de Nyquist, se produce una distorsión conocida como aliasing; algunos autores traducen este término como solapamiento. El aliasing impide recuperar correctamente la señal cuando las muestras de ésta se obtienen a intervalos de tiempo demasiado largos. La forma de la onda recuperada presenta pendientes muy abruptas.

3.4. Termopares

Los termopares son uniones de dos metales donde se produce un voltaje que depende de la temperatura (mejor, de una diferencia de temperatura). Consideremos en primer lugar tres efectos necesarios para comprender su funcionamiento: El efecto Thomson, el efecto Peltier y el efecto Seebeck. ninguno de ellos esta relacionado con el efecto Joule, pues son todos reversibles.

- * **Efecto Thomson:** Es un metal en el cual se establece un gradiente de temperatura aparece una redistribución de carga que da lugar a un campo eléctrico. Ello es debido a la difusión de los electrones. Lo describió lord Kelvin en 1854, quien lo definió de esta manera: absorción o liberación que se produce si una corriente fluye a la vez que el calor por un conductor; si ambas corrientes fluyen en el mismo sentido se libera calor, y si fluyen en sentido opuesto se absorbe. El efecto es proporcional ala corriente. El campo eléctrico que se estable como resultado del gradiente de una temperatura es:

$$\vec{E} = z\nabla TV \Rightarrow \int_{T_1}^{T_2} z dT \quad (3.1)$$

A z se le llama efecto Thomson, y se da como ejemplo algunos metales:

- Constantán $-23 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
 - Platino $-9 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
 - Cobre $+2 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
- * **Efecto Peltier:** Fue descubierto en 1834. La unión de dos metales se calienta o enfría según se haga pasar una corriente eléctrica en un sentido o en otro. Este

efecto también depende linealmente de la corriente y se debe a las electronegatividades de los diferentes materiales. Como el efecto es reversible, una diferencia de temperatura provoca a su vez una transvase de electrones y aparece como consecuencia una diferencia de potencial:

$$\nabla T \Rightarrow V = \Pi_{AB|T} \quad (3.2)$$

* **Efecto Seebeck:** Fue descubierto antes que el efecto Thomson y el efecto Peltier en (1821), pero puede considerarse simplemente como la suma de ambos. Es el que define el funcionamiento de los termopares. En el circuito formado por dos metales A y B soldados cuyas uniones se encuentran a temperaturas diferentes $T_1 \neq T_2$ se establece una corriente eléctrica proporcional a la diferencia de temperaturas. A tal unión se le denomina termopar. Como el efecto es reversible, nos encontramos ante un transductor en sentido estricto, un dispositivo que transforma energía térmica en eléctrica (y viceversa).

Para medir la diferencia de temperatura es necesario habilitar el circuito y medir los voltajes que sería:

$$V_{AB} = \Pi_{AB|T_1} - \Pi_{AB|T_2} + z_B(T_1 - T_2) - z_A(T_1 - T_2) \quad (3.3)$$

Pero con ello se introduce un tercer metal, el del circuito del instrumento de medida, y las uniones forman otro termopar. El voltaje registrado será una función no sólo de la diferencia de la temperatura a la que se encuentre la unión $A - B$, sino también de las uniones formadas en los bornes del instrumento de medida. Puede ser que el metal del circuito de medida sea el mismo que uno de los dos con los que está fabricado el termopar, en cuyo caso sólo se introduce un nuevo termopar y no dos. A esta unión se le llama la *junta fría*. En cualquier caso, es necesario resolver este inconveniente.

Una de las maneras de hacerlo consiste en asegurar que los dos bornes del aparato de

medida se encuentren a la misma temperatura. Si la temperatura de la junta fría se registra con la ayuda de un sensor interno, el instrumento puede convertir directamente la salida a unidades de temperatura mediante una calibración registrada internamente (lo que se llama compensación de junta fría). En caso de que no sea así, otra posibilidad consiste en medir el voltaje obtenido en bornes “conocida la temperatura de la junta fría” corregirla después del proceso de adquisición. En el caso de que lo que se desee sea medir una diferencia de temperaturas, no es necesario proceder a compensar las juntas frías. Pero sí que es importante asegurarse de que los termopares sean idénticos (que procedan del mismo lote, fabricado con las mismas materias primas y con el mismo procedimiento). Algunos proveedores ofrecen esta posibilidad. Sin embargo, para obtener una buena exactitud en una medición con un solo termopar, es necesario que la junta fría se mantenga a una temperatura cuidadosamente controlada: un cerio de referencia. De la calidad de esta referencia depende la exactitud de la medida. Un recipiente en el que se conserve hielo fundente (a 0.01°C) es adecuado, pero mantenerlo en el laboratorio puede resultar laborioso. Existen aparatos que mantienen automáticamente un pequeño volumen de agua y hielo a esa temperatura o que la simulan electrónicamente (*ceros electrónicos*); a ellos se les conecta el termopar y estabilizan la junta fría, pero son caros. Por ello, obtener temperaturas exactas con un termopar no es práctico. Las no linealidades de la función de E/S se suman a este problema. En cambio, tomando algunas precauciones, la precisión y la resolución (que pueden llegar a la centésima de grado) son satisfactorias. Es habitual asociar varios termopares y medir el voltaje resultante (para luego convertirlo a temperatura) en ciertas configuraciones que proporcionan directamente la temperatura media de los termopares, la suma, o la resta. Para fabricar los termopares se emplean diversas combinaciones de metales o aleaciones (*pares o calibraciones*). Para cada par, a una temperatura superior a la de la junta fría un metal es el positivo y otro el negativo. Las calibraciones más usuales son:

- **Tipo T:** Cobre (+) constantán (-). El constantán es una aleación de níquel-cobre. La sensibilidad es de $40.9 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ [6]. Las ventajas de esta calibración son su responsabilidad y su resolución, por lo que se emplean mucho en el laboratorio.
- **Tipo K:** Cromel (+) alumel (-) que son respectivamente aleaciones de cromo-níquel y de aluminio-níquel. Es la calibración que más se aproxima a la linealidad, y está muy difundida en la industria. Su sensibilidad es de $40.6 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo J:** Hierro (+) constantán (-). Proporciona una fem elevada: la sensibilidad es de $51.7 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$:
- Existen otros muchos pares que se emplean en circunstancias especiales: el tipo E, de chromel (+) y constantán (-), o el tipo S, platino-rodio (+) y platino (-), que se utiliza en entornos corrosivos, u otras que soportan temperaturas muy elevadas, etc.

Las calibraciones se distinguen por el color que los cables y de la funda. Pero cada país sigue su propio código de colores, lo cual introduce confusión. La fabricación de los termopares es problemática a causa de los óxidos que se pueden formar durante la soldadura y que falsean la medida porque introducen una resistencia espúrea. Es de señalar que para obtener una señal que dependa de la temperatura basta con reotrcer los cables en sí. Pero las impurezas de la superficie de los metales y la oxidación de la interfaz afectan mucho la medida. La manera correcta de soldar los cables es al oxacetileno o mejor aún con un arco láser. El tamaño de la perla (*bead*) depende del método. Se obtiene una buena aproximación multiplicando por tres el diámetro del hilo. Normalmente, los fabricantes hacen un recocido (*annealing*) para evitar defectos e impurezas. A fin de proporcionarles resistencias mecánica, se recubre a los termopares de una funda, compuesta de un aislante en el que se embuten los hilos y opcionalmente de una vaina metálica. Si se deja al aire la soldadura se dice que es un termopar abierto (*exposed*). En caso de que la vaina recubra totalemnte el termopar, pero estando la

soldadura en contacto con la vaina, se dice que esta conectada a masa (*grounded*). Si por el contrario el elemento sensor está dentro del recubrimiento sin tocar la vaina, se dice aislado (*insulated*) y si no tiene recubrimiento alguno se llama desnudo (*bare*). Las imposiciones del entorno en el que se coloque el termopar determinan el recubrimiento apropiado como se puede observar en la figura 3.2. Otro detalle a tener en cuenta es el uso de los llamados *cables de compensación*. Es conveniente elaborar los termopares con cables finos, pero si la medición se realiza en un lugar físicamente alejado del instrumento “más de un par de metros” la resistencia de los hilos puede resultar excesiva. Entonces se emplean los cables citados, para evitar las pérdidas resistivas. Las ventajas de los termopares son la facilidad de uso, su precio, y la gran difusión de que gozan. Además, si los hilos son finos el tiempo característico llega a ser del orden de las centésimas de segundo. Por otro lado, tiene el inconveniente de que para obtener una temperatura exacta hay que proveer de una junta fría. Además, como la señal de salida es de muy bajo nivel, es necesario amplificarla o emplear instrumentación muy sensible. Por el mismo motivo, la señal es susceptible de ser contaminada fácilmente con ruido electrónico y señales parásitas, de modo que hay que prestar especial atención al blindaje [23].

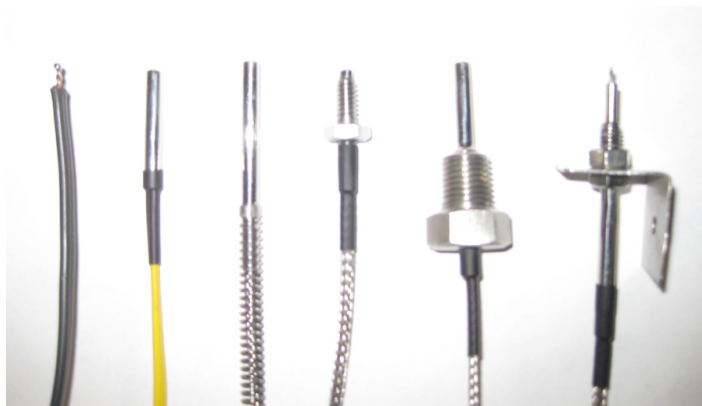


Figura 3.2: Clases de empaques de termopares

Diseño y etapas del proyecto

4.1. Hardware

El Hardware es un sistema inteligente, microprocesado, controlado desde un computador anfitrión con dos funciones principales: control del valor de ganancia y adquisición del dato de la señal de respuesta del ADC.

4.1.1. Regulado de tensión

La etapa de regulado de tensión utiliza un transformador de salidas múltiples 9 VAC 6 VAC 6 VAC 9 VAC con derivación central. Las dos salidas rotuladas de 9 VAC y la derivación central se utilizan en un rectificador de onda completa con un regulador 7805 que provee la alimentación a la electrónica digital 5 VDC. las dos salidas rotuladas 6 VAC y la derivación central se utilizan en sendos circuitos dobladores de voltaje por medio de los cuales obtenemos +12 VDC y -12 VDC para la operación de los dispositivos analógicos (amplificación) de esta última por medio de un regulador 7905 obtenemos -5 VDC destinado para algunos dispositivos analógicos como se observa en el anexo B.2 [3].

4.1.2. Amplificación

La etapa de amplificación (como se observa en el anexo B.3) consiste en la adecuación de la señal proveniente de la fuente que se utiliza, de tal forma que los niveles de tensión estén en el rango de 0 a 4,096 ó de $-4,096$ a 4,096 VDC.

Para la adecuación de la señal se utilizó un amplificador de instrumentacion *AD620*, al cual se conectó aun amplificador operacional *LF353* para poder variar la ganancia de amplificación se utilizó un multiplexor *74HC4051N* que de acuerdo a la configuración en sus entradas *S2*, *S1* y *S0* selecciona las resistencias de ganancia RX5, RX10, RX50, RX100, RX200 o RX500 como se representa en la tabla 4.1.

Pin <i>S2</i>	Pin <i>S1</i>	Pin <i>S0</i>	Resistencia de Ganancia
1	0	0	RX5
0	1	0	RX10
1	1	0	RX50
0	1	1	RX100
0	0	1	RX500
1	0	1	RX1K

Tabla 4.1: *Correspondencia de configuración de pines a resistencia de ganancia*

4.1.3. Adecuación de señal

La adecuación de señal corresponde a una etapa de potencia en la cual se limitan los niveles de la señal que llegan al microcontrolador para que correspondan como máximo a los niveles de referencia con que trabaja el ADC interno necesarios para el correcto funcionamiento de este, ademas para poder trabajar con valores negativos sin ocasionarle daños al microcontrolador. Ya que se tienen dos formas de funcionamiento, una solo con valores desde 0 a $+4.096$ VDC y la otra con valores entre -4.096 VDC a

+4.096 VDC. Para lo cual se utiliza el multiplexor 74HC4053 para la escogencia de una de las formas de trabajo según lo necesite el usuario como se representa en la tabla 4.2.

Pin S3	Pin S2	Pin S1	Resistencia de Ganancia
0	0	0	bicanal
0	1	1	monocanal

Tabla 4.2: Correspondencia de configuración de pines a resistencia de ganancia

4.1.4. PIC (Programmable Integrated Circuit)

El PIC o microcontrolador es el dispositivo central del proceso, ya que es el encargado de recibir una orden desde el computador anfitrión, que ha sido procesada y adecuada por el MAX-232, para indicar la resistencia de ganancia seleccionada en la etapa de amplificación, la cantidad de datos a ser tomados, luego, envía al computador un paquete de datos con el valor registrado en la entrada analógica.

El microcontrolador que se usa para este proyecto es un Pic 18F2550, de *Microchip* y corresponde a un Pic de gama media, ya que posee una memoria *FLASH* de programa de 32kBytes, una memoria de datos *SRAM* de 2048KBytes, una memoria *EEPROM* de datos interna de 256Byts, 24 pines de entradas y salidas digitales, conversor de Análogo a Digital de 10 bits, además tiene implementados los protocolos de comunicación: *SPI* y Master *I²C* para los cuales tiene asociados tres pines, 4 Timers: uno de 8 – bits y 3 de 16 – bits, 2 comparadores y tiene implementado un protocolo de comunicación *USB*; estas características lo ubican entre los pics de gama media.

4.1.5. Circuitos Impreso

El desarrollo consta de dos circuitos impresos diseñados con ayuda de un CAD (Computer Assisten Desing), la fuente de poder y la unidad de control, cuyos esquematicos e impresos se muestran en las figuras 4.1, B.3, B.4, B.5, 4.2, B.2; La fuente de poder y la unidad de control se ubicaron en tarjetas electrónicas independientes para evitar ruido por inducción en el circuito de amplificación.

- Consiste en el arreglo físico de la etapa de selección de rango, ganancia, amplificación, adecuación de señal, almacenamiento de datos, comunicación serial por RS-232 y Microcontrolador (figura4.1).
- Fuente de poder (figura4.2).

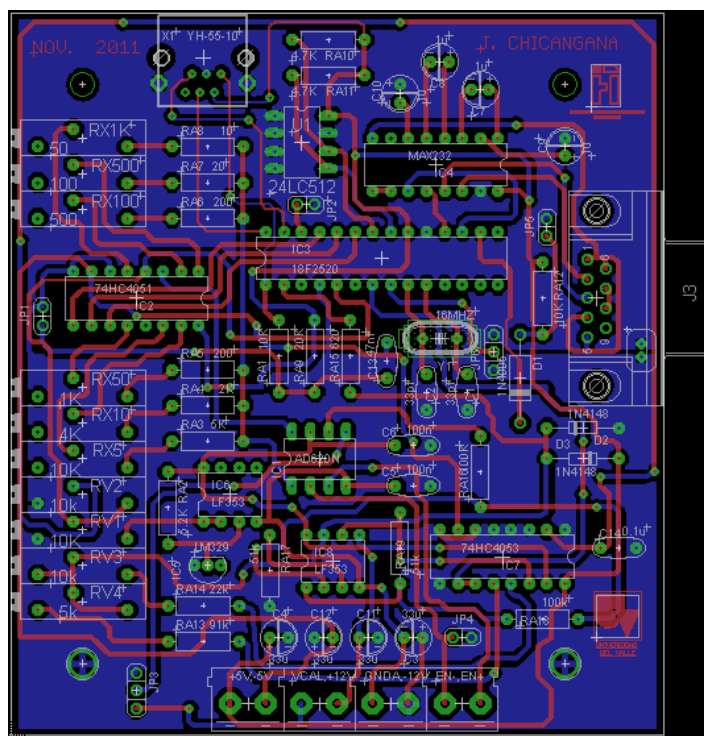


Figura 4.1: Circuito Impreso etapa de control.

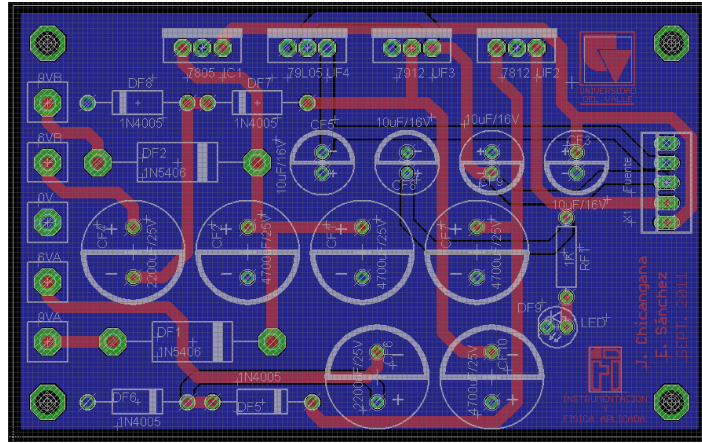


Figura 4.2: Circuito Impreso fuente de poder.

4.2. Software

El sistema de Control Automático para el datalogger consta de dos software: el primero corresponde al de la interface gráfica de usuario, hecha en el programa Visual Basic 2010 y que corre en el computador anfitrión; y el segundo que esta grabado en la memoria del microcontrolador y esta realizado en lenguaje C.

4.2.1. Interfaz gráfica

La interface gráfica de usuario, que fue diseñada en el *programa visual basic 2010* (Anexo C), es el programa encargado de interactuar directamente con el usuario, creando un ambiente agradable y seguro para la manipulación del instrumento, la figura 4.3 muestra el panel de control virtual diseñado. La interface recibe los valores de rango, ganancia, tiempo de muestreo (se ingresa un valor numerico, se escoje el tiempo entre cada muestras y la cantidad de muestras a tomar) y guardar en la eeprom, según sea lo deseado por el usuario, en la parte izquierda de la pantalla del panel virtual. Esta aplicación tiene rutinas para despliegue gráfico y almacenamiento de los mismos en hojas de **EXCEL**.

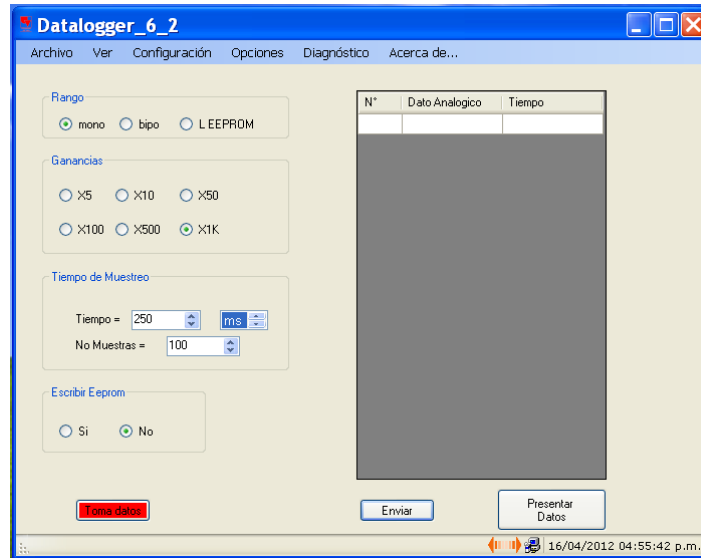


Figura 4.3: *Interfaz gráfica.*

El valor obtenido a la salida del datalogger puede ser visualizado en la parte derecha de la pantalla del panel. Estos datos son recibidos y enviados al microcontrolador a través del puerto de comunicación serial por medio del protocolo de comunicación RS-232 el cual es configurado como se ve en la figura 4.4, donde se muestra la manera como se configura el puerto serial.

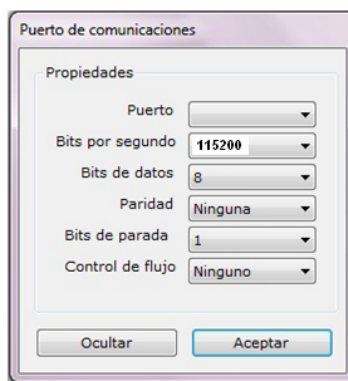


Figura 4.4: *Interfaz gráfica.*

4.2.2. Software del Microcontrolador

El programa que se ejecuta en el microcontrolador (Anexo D) fué desarrollado en lenguaje C, y se encargará de recibir los datos que llegan desde el puerto seriado RS-232, suministrados por el usuario en la herramienta gráfica; estos datos corresponden al tipo de señal, valor de ganancia, tiempo de muestreo, numero de muestras; luego registra la entrada analógica, realiza un promedio y escribe en la eeprom ó envía por puerto serial el valor promedio de la entrada analógica según sea el caso, como se observa en las figuras C.1, C.2, C.3.

4.2.3. Calibración

Se tendrán en cuenta los siguientes conceptos:

- **Precisión:** En ingeniería, ciencia, industria y estadística, se denomina precisión a la capacidad de un instrumento de dar el mismo resultado en mediciones diferentes realizadas en las mismas condiciones. Esta cualidad debe evaluarse a corto plazo. No debe confundirse con exactitud ni con reproducibilidad. La precisión refleja la proximidad de distintas medidas entre sí, y es función exclusiva de los errores accidentales. Es un parámetro relevante, especialmente en la investigación de fenómenos físicos, ámbito en el cual los resultados se expresan como un número más una indicación del error máximo estimado para la magnitud. Es decir, se indica una zona dentro de la cual está comprendido el verdadero valor de la magnitud.
- **Resolución:** Cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento.
- **Calibración:** Conjunto de operaciones que establecen, en condiciones específicas, la relación entre los valores de magnitud indicadas por un instrumento de medida

o un sistema de medida, a los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizada por patrones.

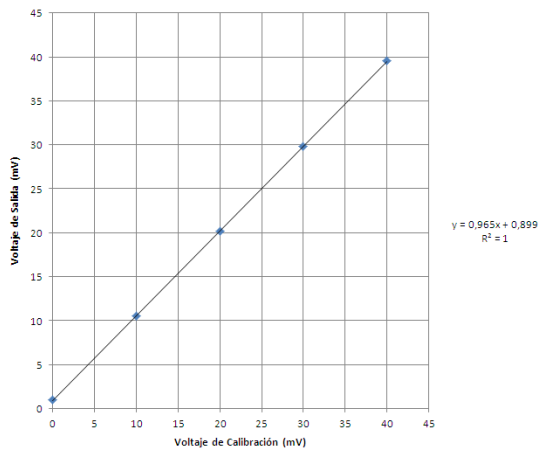
- **Trazabilidad:** Propiedad del resultado de una medición o de un patrón tal que pueda relacionarse con referencia determinada, generalmente a patrones nacionales o internacionales, por medio de una cadena ininterrumpida de comparaciones teniendo todos las incertidumbres determinadas.

La calibración del instrumento es el procedimiento mediante el cual se establece la relación existente entre el voltaje de entrada y el voltaje esperado de acuerdo a la ganancia seleccionada. Para dicha calibración se utilizó un multímetro de 6 1/2 dígitos marca KETHLEY 2100.

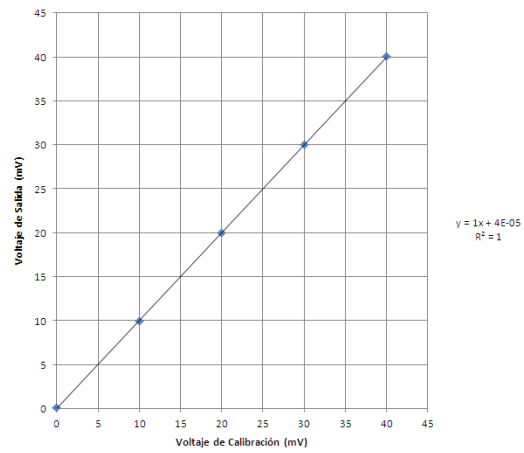
Con el cual se midieron diferentes voltajes que se mantuvieran dentro del rango 0 a 4,096 *VDC* para cada una de las ganancias, graficando el voltaje de entrada contra el voltaje entregado y luego haciendo una regresión lineal para obtener la pendiente y el termino independiente como se muestra en la gráfica 5.2 para la ganancia X100 en sus dos modos, este procedimiento se repitió para cada una de las ganancias con las cuales se obtuvo el error porcentual de cada una de ellas, para poder hacer las respectivas correcciones por software a cada una como se muestra en la tabla 4.3. Como el proceso que se hizo para calibrar es muy similar al hecho en la Corporación Metrocalidad se sugiere ver capítulo 5.2.

4.3. Configuración y puesta en marcha

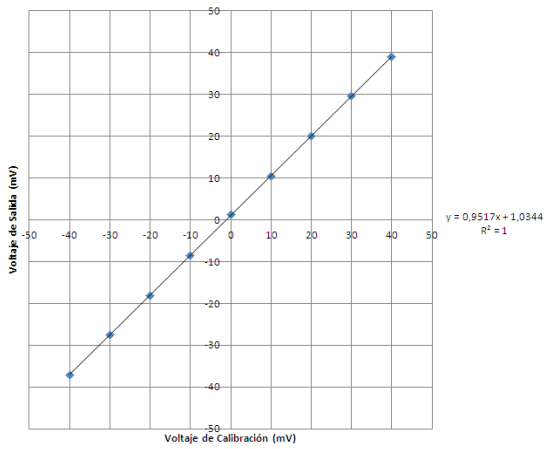
Cuando se enciende el equipo el sistema inmediatamente hace una configuración en defecto y empieza la toma de datos sobre el voltaje que se encuentre a su entrada. Cuando el usuario toma la decisión de lo que quiere hacer procede a hacer la configuración. Esta configuración se puede hacer de dos formas:



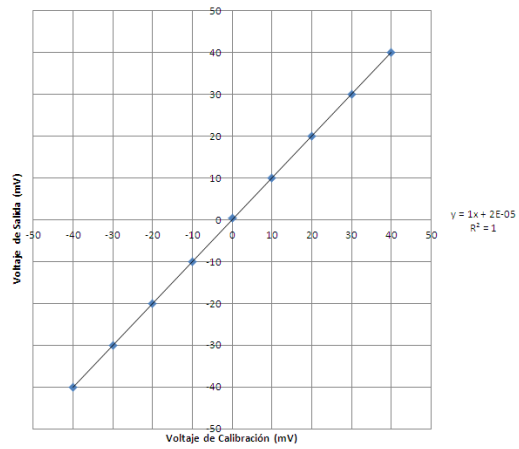
(a) Monopolar sin corrección



(b) Monopolar con corrección



(c) Bipolar sin corrección



(d) Bipolar con corrección

Figura 4.5: En las figuras se muestran las correcciones que se hacen para el modo Monopolar y Bipolar, para la ganancia por 100.

Mediante la interfaz diseñada para que el usuario tenga un manejo mucho más fácil, y la otra ingresando por el HyperTerminal.

4.3.1. Interfaz

La configuración de uso por la interfaz se da de la siguiente forma:

	Error	Pendiente	T. Ind.	R^2
GX5B	$-1,26e^{-2}$	1	$8e^{-6}$	1
GX5M	$-2,24e^{-2}$	1	$4e^{-5}$	1
GX10B	$-6,5e^{-3}$	1	$-4e^{-5}$	1
GX10M	$-2,23e^{-2}$	1	$-4e^{-5}$	1
GX50B	$1,84e^{-2}$	1	$-4e^{-5}$	1
GX50M	$3,4e^{-3}$	1	$-3e^{-5}$	1
GX100B	$4,83e^{-2}$	1	$2e^{-5}$	1
GX100M	$3,5e^{-2}$	1	$4e^{-5}$	1
GX200B	$3,37e^{-2}$	0,9999	$-2e^{-5}$	1
GX200M	$2,5e^{-2}$	1	$-4e^{-5}$	1
GX500B	$1e^{-4}$	0,9999	$1,02e^{-1}$	0,9999
GX500M	$-4,9e^{-3}$	1	$-5e^{-5}$	0,9999

Tabla 4.3: Correspondencia de correcciones respecto a cada ganancia, Para mayor información ver la carpeta anexos-Excel-calibración con kethley en el CD.

1. Lo primero que se debe hacer es ir a opciones y luego a conectar, hecho esto empezaran a aparecer cada uno de los pasos a seguir.
2. Se configura el rango de trabajo que puede ser de dos formas monocanal ó, bicanal.
3. En esta parte se hace la selección de la ganancia con la cual se desea trabajar que pueden ser 5, 10, 50, 100, 200, 500.
4. Se ingresa el valor numérico que habrá entre muestra y muestra.
5. Se ingresa el valor de tiempo con que se quiere trabajar que puede ser minutos, segundo ó milisegundos. Representados de la siguiente manera:

* milisegundos = ms

* segundo = s

* minutos = Min

6. Se ingresa numéricamente el número de muestras a tomar.
7. Por último se escoge si guardar o no en la memoria eeprom externa y se da click en enviar.

Mientras se estén tomando datos aparecerá un cuadro de color rojo, que cuando se cumplan las condiciones ingresadas cambiara de color a verde.

4.3.2. HyperTerminal

Se ejecuta el HyperTerminal y una vez abierto se debe configurar como se muestra en la figura 4.4 hecho esto:

* Se debe de presionar enter una vez, luego se ingresa por teclado el rango

- Monopolar una M ó m

- Bipolar una B ó b

con el cual se desea trabajar y nuevamente enter.

* Se ingresa el valor de la ganancia 5, 10, 50, 100, 200, 500 seguido de enter.

* Se ingresa el valor que se quiera que haya entre muestra y muestra seguido de un enter.

* Se ingresa la letra m, s ó M para definir las unidades de tiempo seguido de la tecla enter

- milisegundos = m

- segundos = s

- minutos = M

para que con la instrucción anterior y esta definan cuanto es el tiempo que habrá entre muestra y muestra.

- * Se ingresa el número de muestras que se desean tomar seguido de un enter.
- * Por último se ingresa un 1 si se desea guardar en la eeprom externa ó un 2 si no se quiere, seguido de un enter.

Al finalizar la toma de datos se enviara un 7FFF.

4.3.3. Lectura EEPROM

Para la lectura de la memoria eeprom externa, se encuentra la opción en el mismo sitio donde se escoge el rango solo que en vez de colocar una m ó b se escribe una l, la cual nos despliega en la interfaz la opción de cuantas muestras son las que se quieren leer, cuando se utiliza el HyperTerminal se introduce una l seguida de un enter y luego la cantidad de valores que se quieren leer.

- Nota: Cuando se leen los datos de la eeprom los primeros 10 bytes contienen la información respecto al Rango, Ganancia, Tiempo entre muestras, Unidades de Tiempo, Muestras totales. Como se muestra en la siguiente tabla.

	HyperTerminal	Interfaz	Significado
Rango	4D	77	M
Ganancia	64	100	100
Tiempo entre muestras	FA	250	250
Unidades de tiempo	6D73	28019	ms
Muestras a tomar	A	10	10

Tabla 4.4: *Correspondencia de configuración de los primeros 10 Bytes leídos de la EEPROM*

Práctica Experimental

Para la aplicación práctica del datalogger se utilizaron dos experimentos de los laboratorios de física fundamental que realizan los estudiantes de física e ingenierías de la Universidad del Valle los cuales se denominan: Ley del enfriamiento de Newton y una realizada en metrocalidad. Son seleccionados ya que en estos lo que se busca es encontrar la variación de la temperatura en el tiempo y como varia un voltaje.

5.1. Ley de enfriamiento de Newton

Este experimento consiste de dos sistemas A y B con temperaturas T_A y T_B respectivamente. los sistemas A y B interaccionan termodinámicamente. La ley cero de la termodinamica dice que: “Si dos sistemas A y B están en equilibrio térmico con un tercer sistema C, entonces A y B están en equilibrio térmico entre si.”

Se midio el decaimiento de la temperatura con respecto al tiempo para un horno de Franck Herz el cual se encontraba a una temperatura inicial de $160^{\circ}C$, y se hicieron las medidas con un termometro de mercurio y con el datalogger como se muestra en la gráfica 5.1.

Se puede observar que la temperatura esta decaiendo respecto al tiempo, y que alcanza una temperatura estable de $25.5^{\circ}C$ despues de 1 hora 11 minutos.

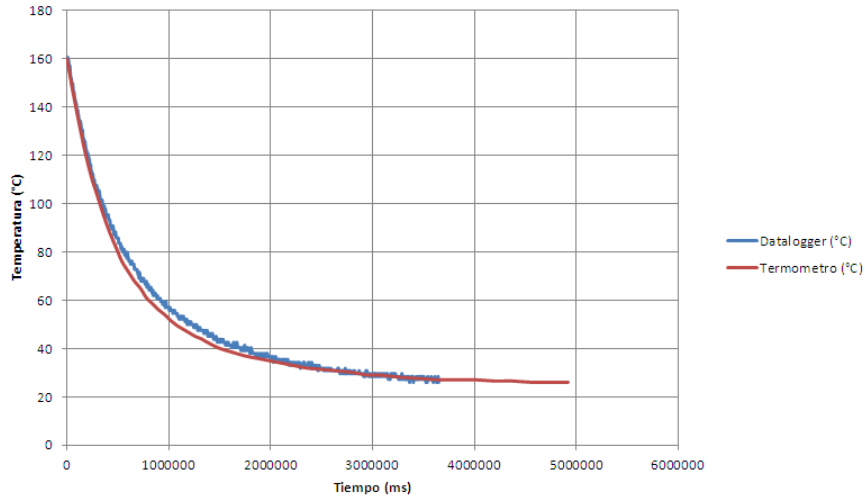


Figura 5.1: *Grafica de enfriamiento del horno de Franck Hertz.*
Con una ganancia de 100 cada 4 segundos.

5.2. Practica en Corporación Metrocalidad

En el laboratorio de Metrología Univalle Corporación Metrocalidad se tomaron datos utilizando una fuente de +5 VDC y un divisor de tensión que se realizo con resistencias de metal film con un 1 % de tolerancia y un potenciómetro de precisión de 10 vueltas de 987.5 ohmios con una tolerancia nominal del 1 % obteniéndose la gráfica 5.2, los equipos y su respectiva conexión se pueden ver en el anexo A.1, este proceso se realizo durante tres días. El procedimiento consistió en comparar los datos capturados por el datalogger con los capturados con un multímetro digital de 6 $\frac{1}{2}$ dígitos de marca Agilent 34401A calibrado por EPM *informe de calibración N° CM-14389-0385* anexo F.3, ambos programados para tomar datos cada segundo durante tiempos de 30 minutos; el Agilent capturaba los datos y los enviaba a una hoja de Excel, de donde posteriormente se utilizaron para ser comparados con los arrojados por el datalogger, obteniéndose un 2 % de error cuando se hizo la comparación dato a dato; Para obtener cada uno de estos valores se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$Error \% = \left(\frac{Datalogger - Agilent}{Agilent} \right) * 100 \quad (5.1)$$

Y

$$\mathbf{U} = 2 * \sqrt{\left(\frac{S_D}{n}\right)^2 + \left(\frac{S_A}{n}\right)^2 + \left(\frac{R_D}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{R_A}{2\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{E_A}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{U_A}{2}\right)^2} \quad (5.2)$$

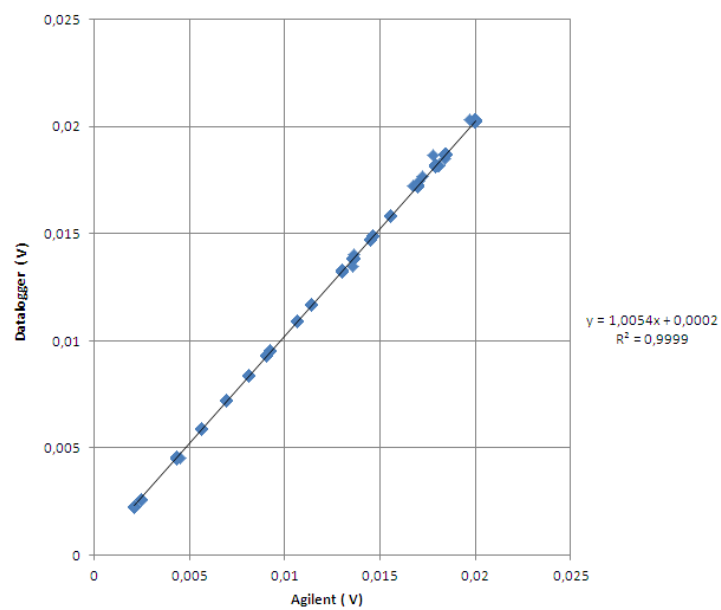
Donde:

- S_D Desviación estándar Datalogger.
- S_A Desviación estándar Agilent.
- N Numero de muestras.
- R_D Resolución Datalogger 0,01.
- R_A Resolución Agilent 0,0001.
- E_A Error Agilent 0,0005.
- U_A Incertidumbre calibración Agilent $6,5e^{-8}$.
- U Incertidumbre Calibración Datalogger.

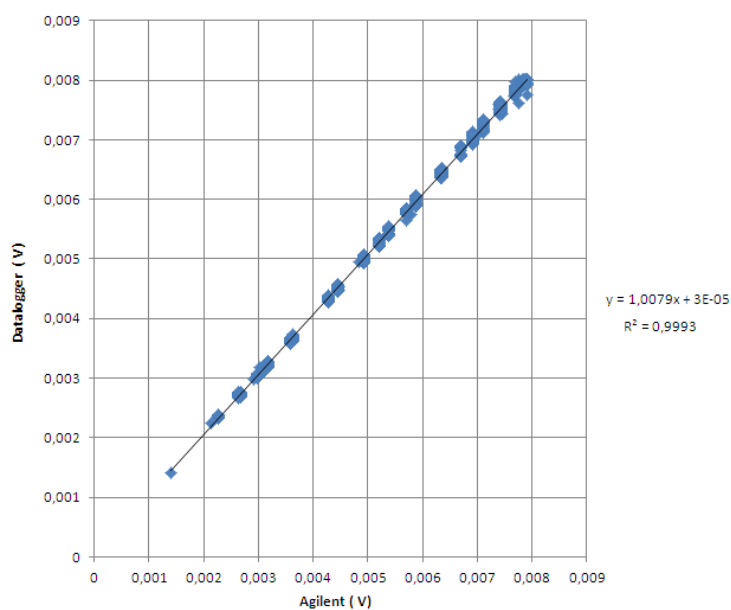
ver anexo A.1. Este error se vio incrementado a un 5 % cuando el valor leído se acercaba a los valores límites de resolución del datalogger.

El software utilizado en la Corporación Metrocalidad (Evaluación de Medidas data.xls) el cual fue diseñado por el Ingeniero **Libardo Antonio Muñoz Daza**.

En el cual el valor de referencia utilizado se tomó haciendo un promedio de las medias del Agilent “50 datos” y comparando este promedio contra el valor que se obtuvo para este rango de valores en el Datalogger. Esto se hizo para un total de 19 valores diferentes de voltaje, con los cuales se obtuvieron los siguientes valores de medida figura 5.3. teniéndose como guía un artículo escrito en Diciembre de 2007. Universidad Tecnológica de Pereira. ISSN 0122-1701 para un mejor entendimiento ver anexo G.



(a) Ganancia por 200



(b) Ganancia por 500

Figura 5.2: En las figuras se muestran los valores obtenidos para las ganancias de 200 y 500 en su modo Monopolar.

ANÁLISIS DE LA MEDICIÓN	% VARIACIÓN TOTAL (TV)	VALORES DE INDICACIÓN
Repetibilidad – Variación del Equipo $EV = 5,15 * \sqrt{MSE}$ $EV = 0,00015$	Repetibilidad – Variación del Equipo $\%EV = 100 * (EV/TV)$ $\%EV = 0,52 \%$	$\%EV \gg \%AV$ esto significa que el instrumento requiere de mantenimiento o que no es el adecuado para realizar dicha medición.
Reproducibilidad – Variación del Técnico (AV) $AV = 5,15 * \sqrt{\frac{MSA - MSAB}{bn}}$ $AV = 0,0000$	Reproducibilidad – Variación del Técnico (AV) $\%AV = 100 * (AV/TV)$ $\%AV = 0,0000 \%$	$\%AV \gg \%EV$ esto indica que es necesario entrenar al operador tanto en el manejo del instrumento como en la toma de los datos.
Interacción $I = 5,15 * \sqrt{\frac{MSA - MSAB}{n}}$ $I = 0,000024$	Interacción $\%I = 100 * (I/TV)$ $\%I = 0,08 \%$	
Repetibilidad y Reproducibilidad $R\&R = \sqrt{EV^2 + AV^2 + I^2}$ $R\&R = 0,0001$	Repetibilidad y Reproducibilidad $\%R\&R = 100 * (R\&R/TV)$ $\%R\&R = 0,52 \%$	$\%R\&R \leq 10$ Optimo $10 < \%R\&R \leq 30$ Aceptable $\%R\&R > 30$ No Aceptable
Variación de las Muestras (PV) $PV = 5,15 * \sqrt{\frac{MSA - MSAB}{an}}$ $PV = 0,028$	Variación de las Muestras (PV) $\%PV = 100 * (PV/TV)$ $PV = 100,00 \%$	
Variación Total (TV) $TV = \sqrt{PV^2 + R\&R^2}$ $TV = 0,028$	Capacidad de Discriminación (ndc) $ndc = 1,41 * (PV/R\&R)$ $ndc = 269,00$	$ndc > 5$ Aceptable

Figura 5.3: En la tabla se muestra los valores obtenidos por el método ANOVA para la ganancia de 200, Para mayor información ver a la carpeta anexos-Excel-Evaluación de Mediciones data en el CD.

Conclusiones

- En la toma de datos se observaron unas diferencias entre el Agilent y el Datalogger las mas apreciables se observan cuando se encuentran valores por debajo de 8 microvoltios ya que el agilent presenta una mejor resolución en estos datos y el error porcentual se vuelve mucho mayor que la medida para el caso de la ganancia por 500.
- Cuando se registra un cambio se puede observar que el datalogger lo hace un poco mas rápido que el agilent por lo cual se necesita un tiempo de espera prudente para que se pueda hacer la toma de una medida estable.
- Los objetivos marcados se han cumplido satisfactoriamente.

Perspectivas

1. Cambiar los trimer por una resistencia de precisión y un trimer de menor resistencia pero del mismo numero de vueltas o mejor aun si son mas vueltas, para así poder mejorar la resolución.
2. En cuanto a los multiplexores analogicos se recomienda que los que se compren preferiblemente sean todos del mismo lote y fabricante, ya que aun sea el mismo fabricante las resistencias internas varian de un lot a otro.
3. Mirar multiplexores de Analogas Divice que dicen tener resistencias como máximo de 3Ω .
4. Cambiar los potenciómetros analógicos por digitales e implementar código de tal manera que la variación de offset y ganancia se pueda hacer desde el computador anfitrión.
5. Cambiar la conexión RS232 del computador con el datalogger por comunicación USB que es lo que se está utilizando en la actualidad.

Referencias

- [1] A. Sánchez, A. Simar, O. Vergara: Electrónica para no especialistas, Universidad del Valle, Departamento de Física.
- [2] Boylestad, Nashelsky: Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos, octava edición, Pearson Practice Hall, 2003
- [3] A. Simar, *Diseño de un sistema de medición y automatización para prácticas de laboratorio de física*, Tesis, Magister en Ciencias, Física, Universidad del Valle, Departamento de Física, 1997.
- [4] J. J. Brophy: Basic Electronic for Scientist, McGraw-Hill Book Company.
- [5] K. Charles, M. Sadiku, Fundamentals of electric circuits 3-ed, McGraw-Hill (2009).
- [6] Paul Horowitz y Winfield Hill, The Art of Electronics. EEUU: Cambridge University Press, edición del 1991.
- [7] PIC18F25xx datasheet, Microchip Corporation
- [8] <http://users.ece.utexas.edu/~valvano/Datasheets/AD620.pdf>
- [9] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15609/PHILIPS/74HC4051.html>
- [10] <http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/philips/74HC4053.pdf>
- [11] http://www.ece.ucsb.edu/courses/courses/ECE146/146A_W11Madhow/LF353.pdf
- [12] http://www.datasheetcatalog.org/datasheets/185/49455_DS.pdf

- [13] <http://www.huarpe.com/electronica/ao1/aoicmrr6.html>
- [14] <http://www.omega.com/temperature/z/pdf/z198-201.pdf>
- [15] <http://www.eetimes.com/electronics-news/4043577/Remembering-the-PROM-knights-of-Intel>
- [16] <http://www.rohm.com/products/lsi/eprom/faq.html>
- [17] <http://www.radiomaster.ru/articles/view/100/>
- [18] http://en.wikipedia.org/wiki/File:ADC_voltage_resolution.svg
- [19] <http://www.pablin.com.ar/electron/cursos/i2c/index.htm>
- [20] http://robots-argentina.com.ar/Comunicacion_busI2C.htm
- [21] <http://forum.mcontrollers.com/viewtopic.php?p=11710&sid=2675643cfee8be6943ead55bb2ce2c6e>
- [22] <http://www.ld-didactic.de/ga/5/532/53213/53213FS.PDF>
- [23] http://fisica.unav.es/~angel/smad_2005_c.pdf
- [24] Harry L. Stiltz (1961). Aerospace Telemetry. Prentice-Hall.
- [25] An Introduction to Sampling Theory. Retrieved 17 April 2010.
- [26] Jonathan M. Blackledge (2003). Digital Signal Processing: Mathematical and Computational Methods, Software Development and Applications. Horwood Publishing. ISBN 1-898563-48-9.
- [27] Paulo Sergio Ramirez Diniz, Eduardo A. B. Da Silva, Sergio L. Netto (2002). Digital Signal Processing: System Analysis and Design: Cambridge University Press. ISBN 0-521-78175-2.

Anexo A

Calibración

	Datalogger (V)	Agilent 34401A (V)	Error %	U
1	0,020249551	0,01998526	1,322431042	
1	0,020248269	0,01998537	1,315458412	
1	0,02024867	0,0199854	1,317310996	
1	0,020249952	0,01998535	1,32397943	
1	0,020250433	0,01998565	1,324864051	
$\bar{x}$	0,020249375	0,019985406	1,320808786	
S	$1,46048e^{-07}$	$8,94785e^{-07}$	0,004183029	
				0,017330993
2	0,017209006	0,01697488	1,379252226	
2	0,017248109	0,016975	1,608889392	
2	0,017213494	0,01697524	1,403535913	
2	0,017246587	0,01697514	1,599082767	
2	0,017208606	0,01697532	1,374264339	
$\bar{x}$	0,016975116	0,01722516	1,473004928	
S	$1,77989e^{-07}$	$2,03521e^{-05}$	0,120130581	
				0,017331003
3	0,01387367	0,01360264	1,992479929	
3	0,013826474	0,01360207	1,649780945	
3	0,013873109	0,01360277	1,987381793	
3	0,013829199	0,01360245	1,666969685	
3	0,013863734	0,01360318	1,915390183	
$\bar{x}$	0,013853237	0,013602622	1,842400507	
S	$2,35407e^{-05}$	$4,0862e^{-07}$	0,170842887	
				0,017331006
4	0,009512532	0,00924678	2,87399561	
4	0,009483446	0,00924643	2,563319171	

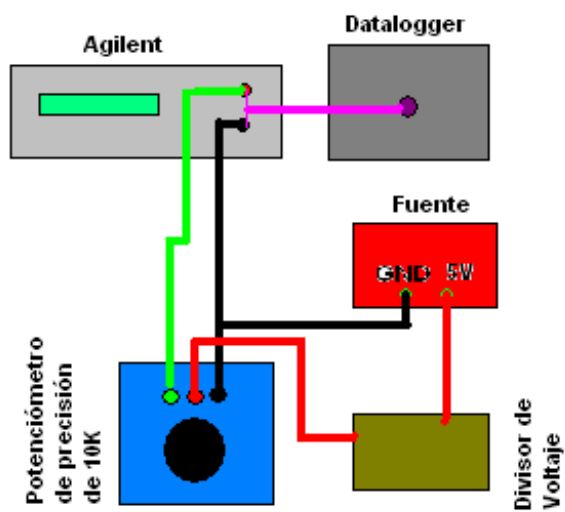
Sigue en la página siguiente.

	Datalogger (V)	Agilent 34401A (V)	Error %	U
4	0,009511571	0,00924666	2,864931909	
4	0,009485288	0,00924646	2,582917804	
4	0,009508926	0,00924659	2,837113812	
$\bar{x}$	0,009500353	0,009246584	2,744455661	
S	$1,46669e^{-05}$	$1,44326e^{-07}$	0,157150855	
				0,017330998
5	0,004539455	0,00435824	4,157988734	
5	0,004537131	0,00435857	4,096788861	
5	0,004532404	0,00435807	4,000253464	
5	0,004537372	0,00435813	4,112814323	
5	0,004521587	0,004358	3,753706711	
$\bar{x}$	0,00453359	0,004358202	4,024310419	
S	$7,18911e^{-06}$	$2,23763e^{-07}$	0,161834067	
				0,017330995

Tabla A.1: Para mayor información remitirse a la carpeta anexos-Excel-medidas con Agilent en el CD.



(a) Equipos Utilizados



(b) Conexión

Figura A.1: Equipos y como se conectaron prueba en Metrología Univalle
Corporación Metrocalidad.

Anexo B

Esquemáticos de Circuitos Eléctricos

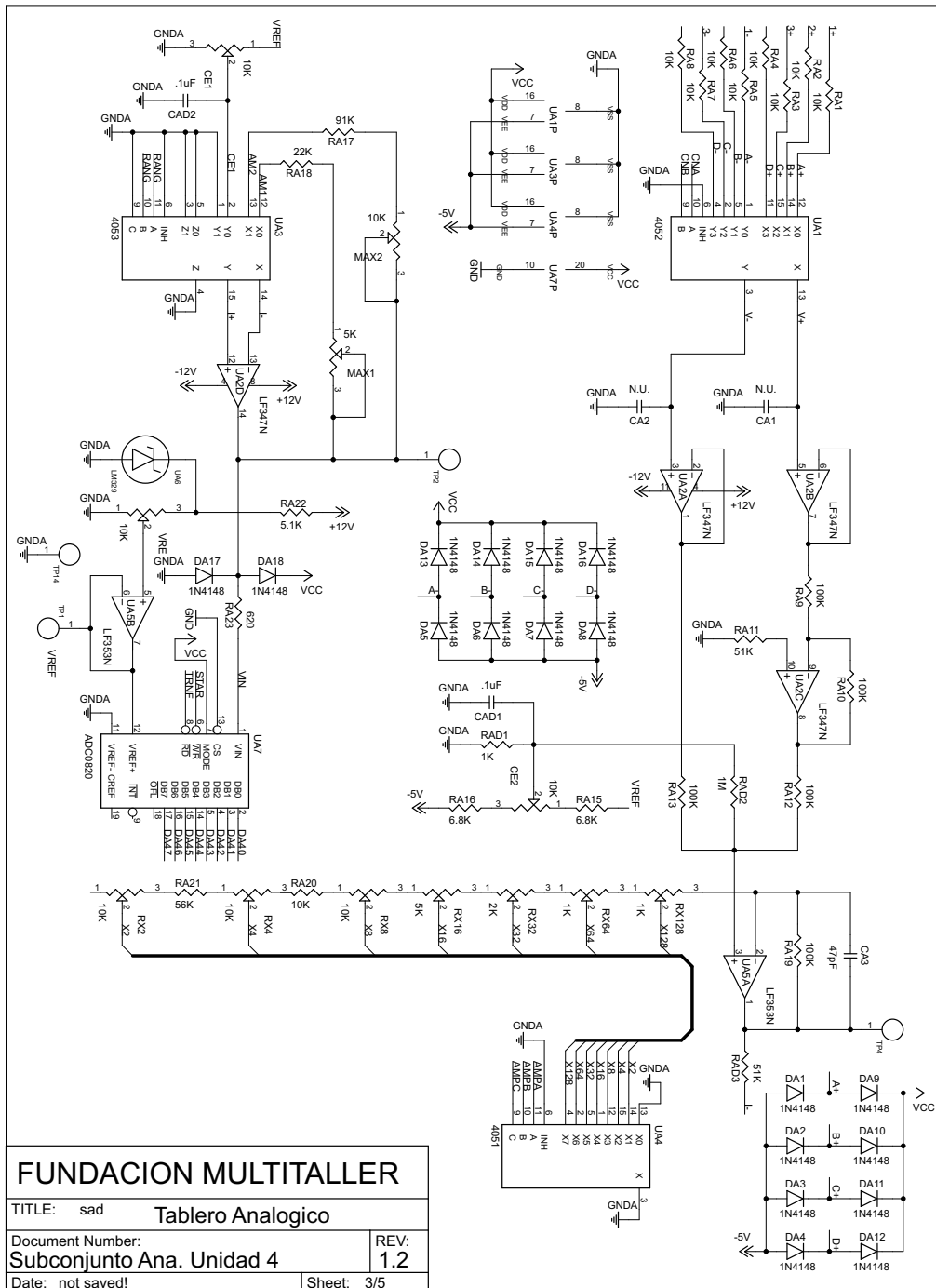
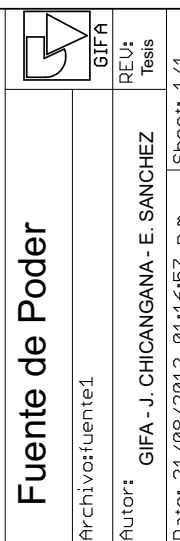


Figura B.1: Esquema de amplificador SAD



69

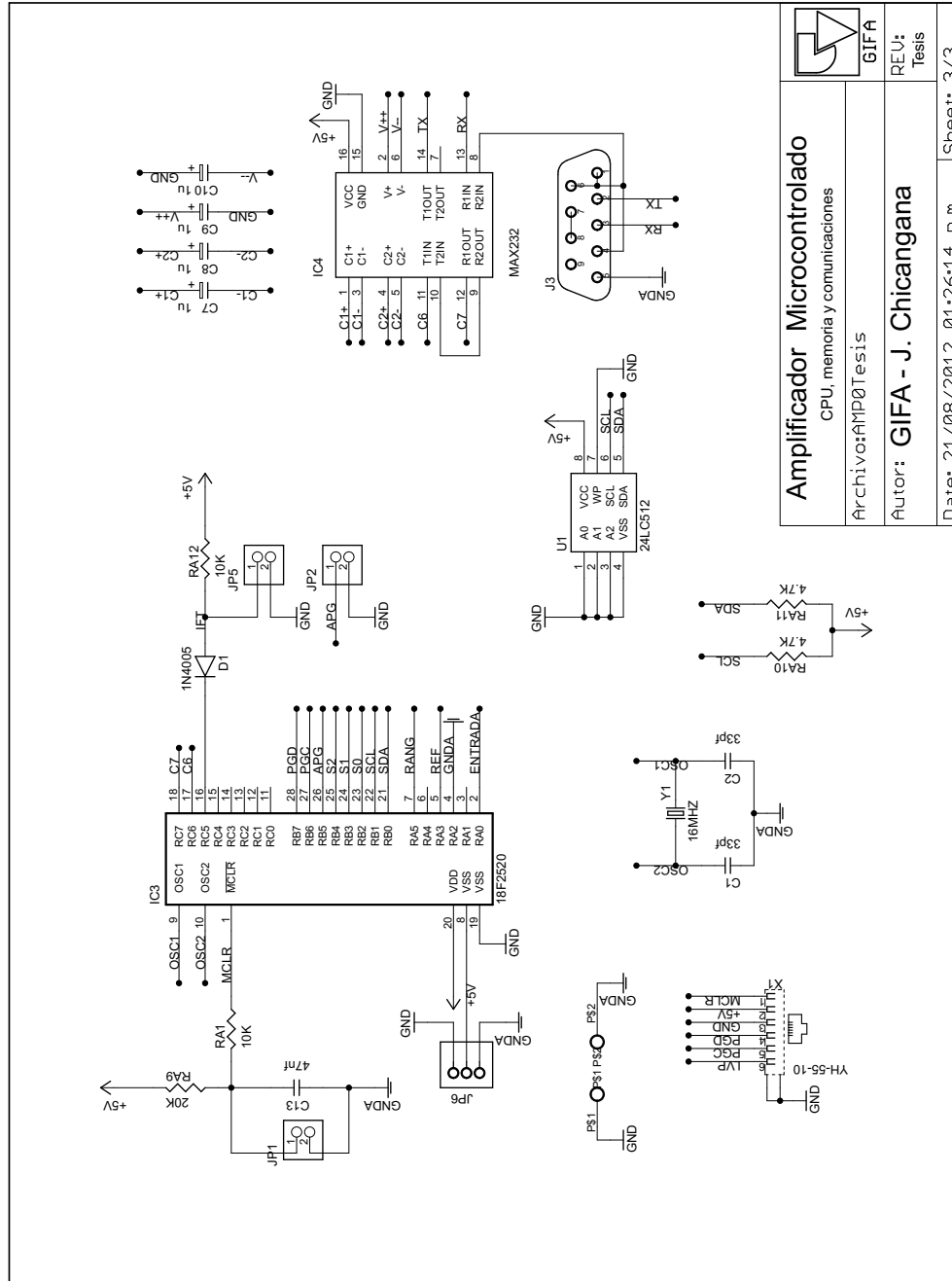
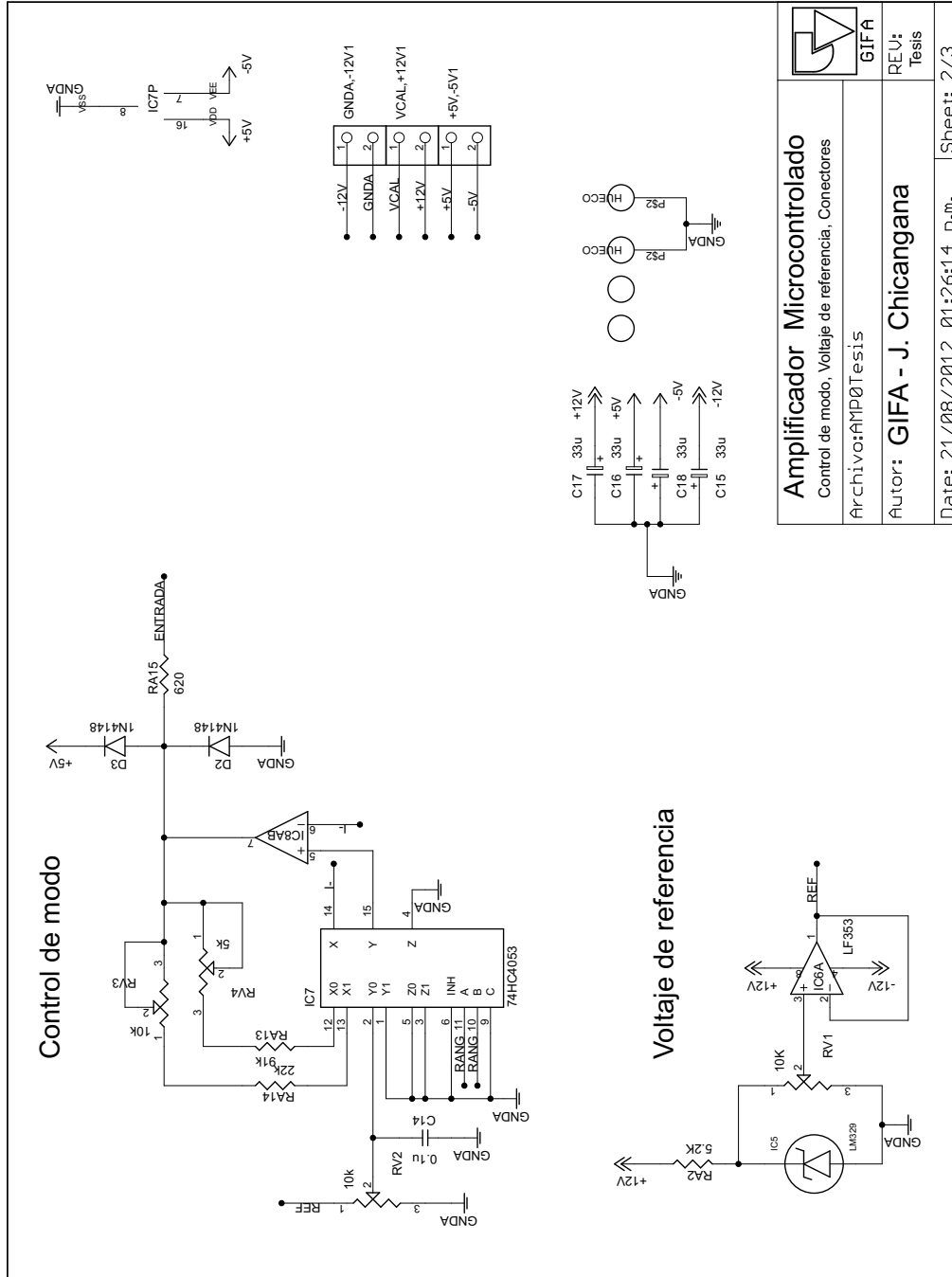


Figura B.4: Etapa de Microcontrolador (Esquemático).



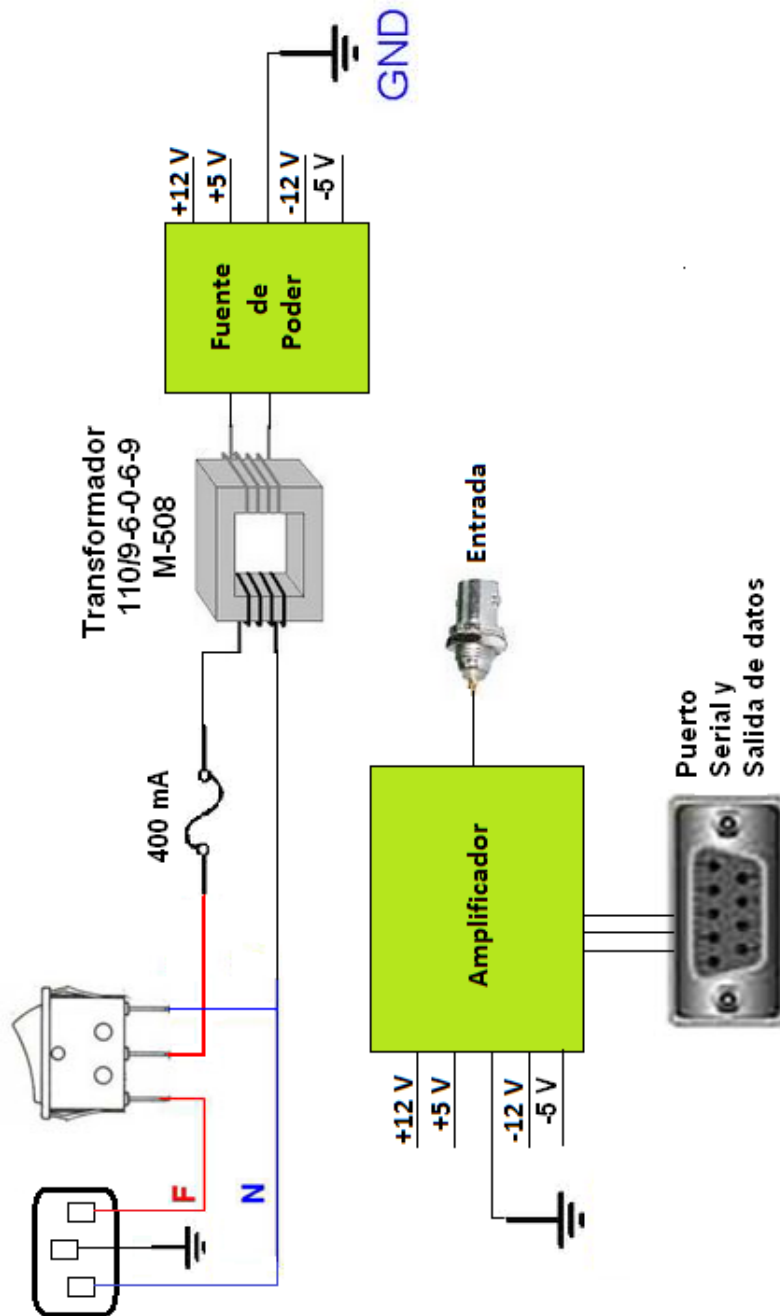


Figura B.6: Cableado caja del instrumento, Partes y cableado.

Anexo C

Diagramas de flujo

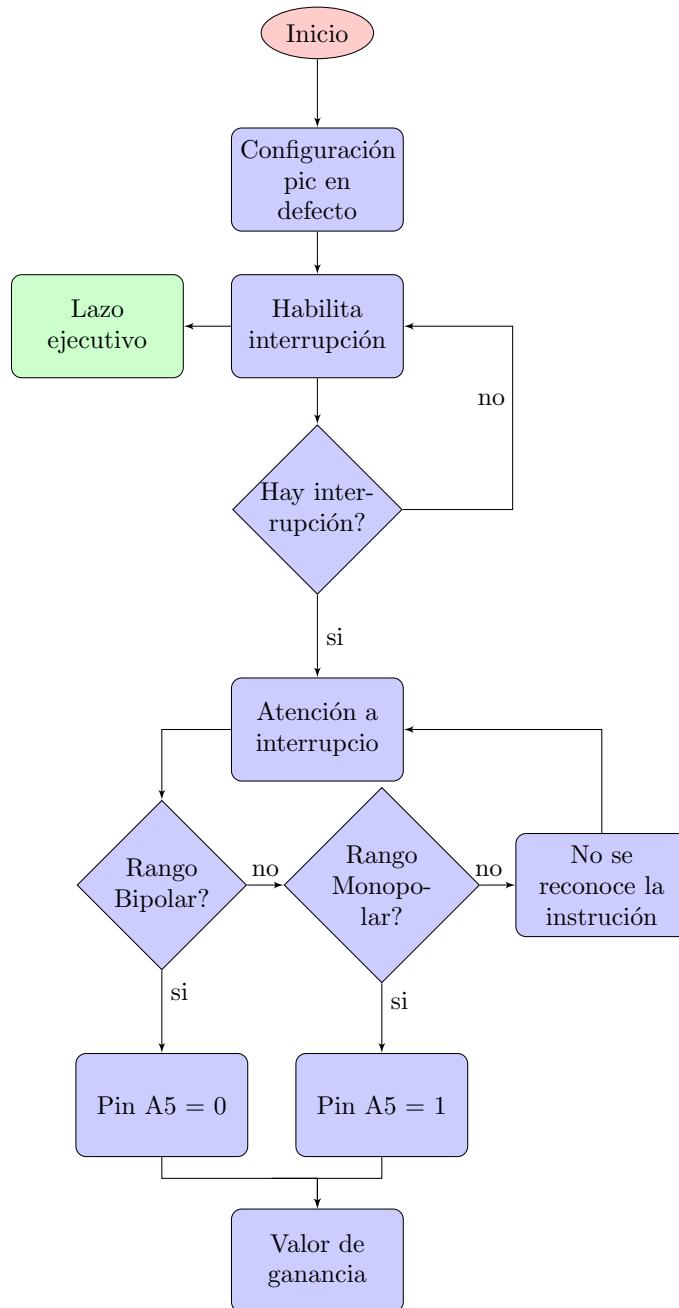


Figura C.1: Diagrama de flujo de programa en el Microcontrolador.

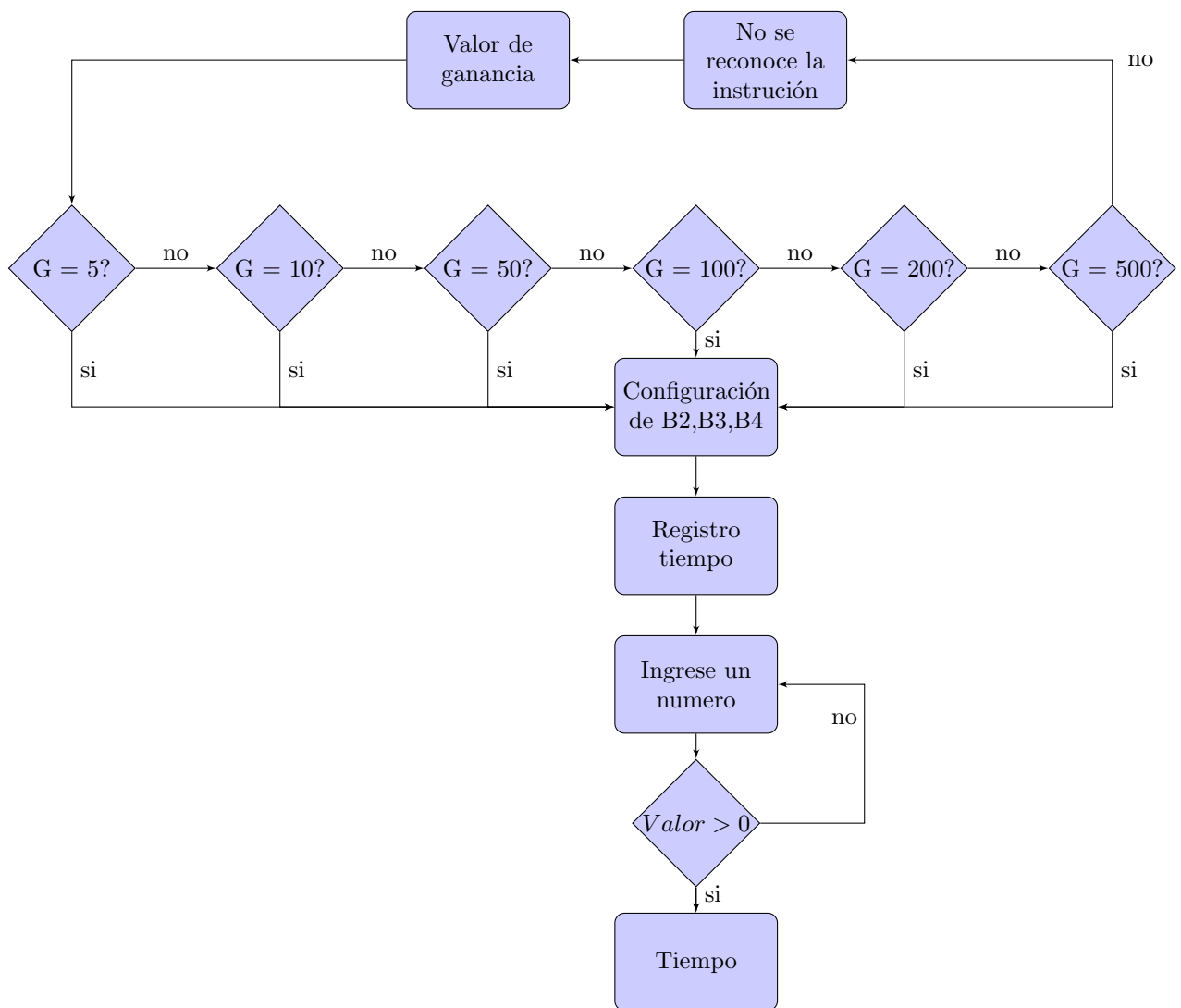


Figura C.2: Diagrama de flujo de programa en el Microcontrolador.

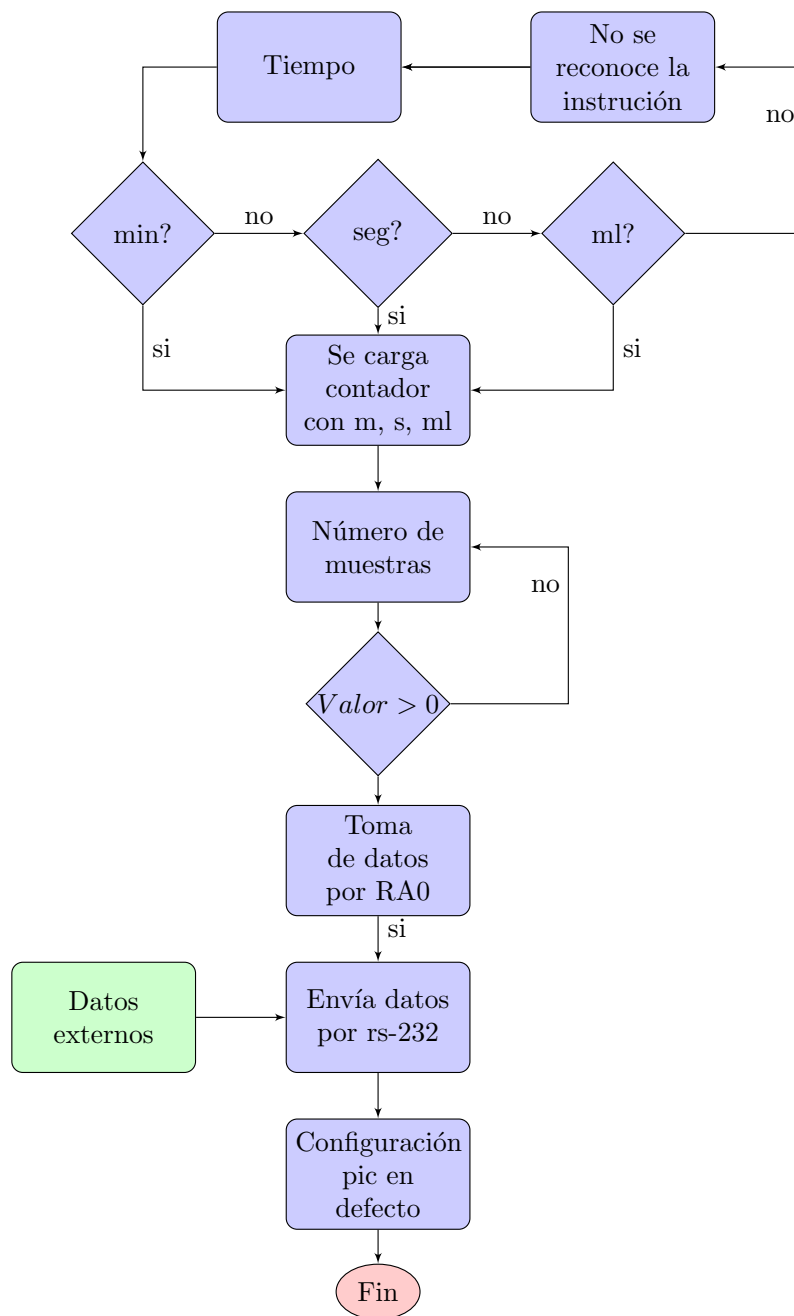


Figura C.3: Diagrama de flujo de programa en el Microcontrolador.

Anexo D

Códigos computacionales en Visual Basic

```

Public Class Datalogger_6
    Public Ganancia As Integer
    Public Eeprom As Char
    Public Time As Double
    Public R As Char
    Private Sub ExitToolStripMenuItem2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ExitToolStripMenuItem2.Click
        End
    End Sub
    Private Sub TerminalToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles TerminalToolStripMenuItem.Click
        Terminal.Show()
    End Sub
    Private Sub ComunicacionesToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles ComunicacionesToolStripMenuItem.Click
        PuertoCOM.WindowState = FormWindowState.Normal
        PuertoCOM.Show()
    End Sub
    Private Sub tmrNow_Tick(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
tmrNow.Tick
        lblNow.Text = Now
    End Sub
    Private Sub DesConectarComunicaciones()
        Try
            PuertoCOM.SerialPort1.Close()
            TerminalToolStripMenuItem.Enabled = False
            GraficaToolStripMenuItem.Enabled = False
            ConectarToolStripMenuItem.Enabled = True
            DesconectarToolStripMenuItem.Enabled = False 'Label de desconectarse
            tsDesconectado.Visible = True
            tsAE.Visible = False
            tsCE.Visible = False
            tsAE.Enabled = True
            tsCE.Enabled = True
            RadioButton1.Visible = False
            RadioButton2.Visible = False
            RadioButton3.Visible = False
            RadioButton4.Visible = False
            RadioButton5.Visible = False
            RadioButton6.Visible = False
            RadioButton7.Visible = False
            RadioButton8.Visible = False
            RadioButton9.Visible = False
            RadioButton10.Visible = False
            Tiempo.Visible = False
            Tiempo1.Visible = False
            RangoT.Visible = False
            datDesConectadoAlas = Now
            NotifyIcon1.BalloonTipText = "Cerrado."
            NotifyIcon1.BalloonTipIcon = ToolTipIcon.Info
            NotifyIcon1.BalloonTipTitle = PuertoCOM.SerialPort1.PortName & ":"
            NotifyIcon1.ShowBalloonTip(2000)
            ComunicacionesToolStripMenuItem.Visible = False
        Catch ex As Exception
            Referencia = "Error al desconectar Comunicaciones" & Err.Number & ":" & vbCrLf &
ex.Message
        End Catch
    End Sub
End Class

```

```

        MuestrePasoCatch(Referencia)
    End Try
End Sub
Private Sub DesconectarToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles DesconectarToolStripMenuItem.Click
    DesConectarComunicaciones()
End Sub
Private Sub RadioButton9_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs)
    Ganancia = 1
End Sub
Private Sub RadioButton1_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton1.CheckedChanged
    Ganancia = 5
End Sub
Private Sub RadioButton2_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton2.CheckedChanged
    Ganancia = 10
End Sub
Private Sub RadioButton3_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton3.CheckedChanged
    Ganancia = 50
End Sub
Private Sub RadioButton4_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton4.CheckedChanged
    Ganancia = 100
End Sub
Private Sub RadioButton5_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton5.CheckedChanged
    Ganancia = 500
End Sub
Private Sub RadioButton6_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton6.CheckedChanged
    Ganancia = 1000
End Sub
Private Sub RadioButton7_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton7.CheckedChanged
    R = "L"
End Sub
Private Sub RadioButton9_CheckedChanged_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton9.CheckedChanged
    R = "M"
End Sub
Private Sub RadioButton10_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As
System.EventArgs) Handles RadioButton10.CheckedChanged
    R = "B"
End Sub
Private Sub Enviar_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles
Enviar.Click
    Array.Clear(ntiempo, 0, 10000)
    numero = 1
    datos.Rows.Clear()
    Array.Clear(dataArray, 0, 100000)
    If RangoT.Text = "ms" Then Time = Tiempo1.Value
    If RangoT.Text = "s" Then Time = Tiempo1.Value * 1000
    If RangoT.Text = "Min" Then Time = Tiempo1.Value * 60 * 1000

```



```

Try
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(R & vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(Ganancia & vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(Tiempo1.Value & vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(RangoT.Text & vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
    PuertoCOM.SerialPort1.Write(Muestra.Value & vbCr)
    Threading.Thread.Sleep(200)
Catch
    MsgBox("No se ha realizado una conexión", MsgBoxStyle.Information, "ERROR DE COMUNICACIÓN")
End Try
End Sub
Private Sub ConectarToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ConectarToolStripMenuItem.Click
    Try
        PuertoCOM.SerialPort1.Open()
        PuertoCOM.Show()
        PuertoCOM.Hide()
        TerminalToolStripMenuItem.Enabled = True
        GraficaToolStripMenuItem.Enabled = True
        ConectarToolStripMenuItem.Enabled = False
        DesconectarToolStripMenuItem.Enabled = True
        tsAE.Visible = True
        tsCE.Visible = True
        tsDesconectado.Visible = False
        NotifyIcon1.BalloonTipText = "Abierto."
        NotifyIcon1.BalloonTipIcon = ToolTipIcon.Info
        NotifyIcon1.BalloonTipTitle = PuertoCOM.SerialPort1.PortName & ":"
        NotifyIcon1.ShowBalloonTip(2000)
        ComunicacionesToolStripMenuItem.Visible = False
    Catch ex As Exception
        Referencia = "Error al conectar Comunicaciones" & Err.Number & ":" & vbCrLf & ex.Message
        MuestrePasoCatch(Referencia)
    End Try
End Sub
Private Sub Datalogger_2_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load
    Comunes.numero = 0
End Sub
Private Sub GraficaToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles GraficaToolStripMenuItem.Click
    Grafico.Show()
    Grafico.graficar()
End Sub
Private Sub ExcelToolStripMenuItem_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ExcelToolStripMenuItem.Click
    ExcelGrafico()
End Sub
Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)

```

```

        Handles Button1.Click
            ExcelGrafico()
        End Sub
    End Class

Module Comunes
    Public EnStr As String
    Public strError As String
    Public ErrorMsj As String
    Public Comando As String
    Public InStr As String
    Public Referencia As String
    Public Referror As Integer
    Public Evento As Integer
    Public dtFecha As Date = Now
    Public datConectadoAlas As Date
    Public datDesConectadoAlas As Date
    Public Hoy As Integer = Now.Day
    Public strColor As Color
    Public AutorizacionMensajes As Boolean = True
    Public Corresponsalenlínea As Boolean = False
    Public CommPortOK As Boolean = False
    Public HayArchConf As Boolean = False
    Public CommPortNombre As String
    Public BaudRateStr As String
    Public DataBitsStr As String
    Public StopBitsStr As String
    Public paridad As String
    Public ControlFlujo As String
    Public TestStr1 As String
    Public TestStr As String
    Public SolDatosStr As String
    Public TiempoEspera As String
    Public TiempoMuestreo As String
    Public ModoPrograma As String
    Public FormatoAbierto As Boolean = False
    Public LineIn As String
    Public ntiempo(0 To 10000) As Integer
    Public numero As Integer
    Public Dato As Double
    Public dataArray(100000) As Double
    Public N As Integer
    Public Max As Integer = 1
    Public Sub LeeArchConf()
        Dim Response As Integer
        Try
            Dim oRead As System.IO.StreamReader
            oRead = IO.File.OpenText("C:\sad1.ini")
            LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 1
            CommPortNombre = oRead.ReadLine()    'Línea 2
            LineIn = oRead.ReadLine()             'Línea 3
            BaudRateStr = oRead.ReadLine()        'Línea 4
            LineIn = oRead.ReadLine()             'Línea 5
            DataBitsStr = oRead.ReadLine()        'Línea 6
            LineIn = oRead.ReadLine()             'Línea 7
            paridad = oRead.ReadLine()            'Línea 8

```

```

LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 9
StopBitsStr = oRead.ReadLine()       'Línea 10
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 11
ControlFlujo = oRead.ReadLine()      'Línea 10
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 11
TestStr1 = oRead.ReadLine()         'Línea 12
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 13
SolDatosStr = oRead.ReadLine()       'Línea 14
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 15
TiempoEspera = oRead.ReadLine()      'Línea 16
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 17
TiempoMuestreo = oRead.ReadLine()    'Línea 18
LineIn = oRead.ReadLine()           'Línea 19
oRead.Close()
HayArchConf = True
Catch ex As Exception
    Select Case Err.Number
        Case 53
            Referencia = "Error " & Err.Number & ":" & vbCrLf & ex.Message
            Referencia = Referencia & vbCrLf & "Pulse el botón 'Si' para crearlo."
            Referencia = Referencia & "Con el botón 'No' abandona el programa."
            Response = MsgBox(Referencia, vbQuestion + vbYesNo, " ")
            Select Case Response
                Case vbNo
                    End
                Case vbYes
                    PuertoCOM.Show()
            End Select
        Case Else
            Referencia = "Error " & Err.Number & ":" & vbCrLf & ex.Message
            MuestrePasoCatch(Referencia)
    End Select
    Referror = Err.Number
End Try
End Sub
Public Sub MensajeError(ByVal Errornr As Integer, ByVal strError As String)
    Referror = Errornr
    Select Case Errornr
        Case 1
            ErrorMsj = strError           'Resincronizacion
        Case 2
            ErrorMsj = strError           'CRC Invalido
        Case 3
            ErrorMsj = strError           'Fuera de secuencia
        Case 4
            ErrorMsj = strError           'Mensaje desconocido
    End Select
End Sub
Public Sub MuestrePasoCatch(ByVal EstaRef As String)
    If AutorizacionMensajes Then
        MsgBox(EstaRef, MsgBoxStyle.Information, "Paso por Catch")
    End If
End Sub
Public Sub ProceseInSrt(ByVal cad As String)
    Terminal.TxtEntrada.Text = Terminal.TxtEntrada.Text & cad
    Select Case Datalogger_6.R

```

```

Case "M"
    Select Case Datalogger_6.Ganancia
        Case 5
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
        Case 10
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
        Case 50
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato - 12) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
        Case 100
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato - 15) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
        Case 500
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato - 13) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
        Case 1000
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato) * 5 / 1023), 3)
            If Max < Dato Then Max = Dato
            If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
            Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
            ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
            numero = numero + 1
    End Select
Case "B"
    Select Case Datalogger_6.Ganancia
        Case 5
            Dato = Val("&H" + cad)
            Dato = FormatNumber(((Dato - (55 / 10)) * 5 / 1023), 3)

```

```

Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

Case 10
Dato = Val("&H" + cad)
Dato = FormatNumber(((Dato - (65 / 10)) * 5 / 1023), 3)
Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

Case 50
Dato = Val("&H" + cad)
Dato = FormatNumber(((Dato - (135 / 10)) * 5 / 1023), 3)
Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

Case 100
Dato = Val("&H" + cad)
Dato = FormatNumber(((Dato - (145 / 10)) * 5 / 1023), 3)
Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

Case 500
Dato = Val("&H" + cad)
Dato = FormatNumber(((Dato - (135 / 10)) * 5 / 1023), 3)
Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

Case 1000
Dato = Val("&H" + cad)
Dato = FormatNumber(((Dato - 1) * 5 / 1023), 3)
Dato = FormatNumber((Dato * 2 - 5), 3)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato
Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
numero = numero + 1

End Select
Case "L"
Dato = Val("&H" + cad)
If Max < Dato Then Max = Dato
If numero < 100000 Then dataArray(numero) = Dato

```

```

        Datalogger_6.datos.Rows.Add(numero, Dato, ntiempo(numero - 1))
        ntiempo(numero) = ntiempo(numero - 1) + Datalogger_6.Time
        numero = numero + 1
    End Select
End Sub
End Module

Imports Microsoft.Office.Core
Imports Microsoft.Office.Interop.Excel
Imports Microsoft.Office.Interop
Module excelx
    Public Sub ExcelGrafico()
        Dim xlApp As Microsoft.Office.Interop.Excel.Application
        Dim xlBook As Microsoft.Office.Interop.Excel.Workbook
        Dim xlSheet As Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet
        Dim objRango As Excel.Range
        xlApp = CType(CreateObject("Excel.Application"),
        Microsoft.Office.Interop.Excel.Application)
        xlBook = CType(xlApp.Workbooks.Add, Microsoft.Office.Interop.Excel.Workbook)
        xlSheet = CType(xlBook.Worksheets(1), Microsoft.Office.Interop.Excel.Worksheet)
        Dim objExcelChart As Excel.Chart
        Dim xlsSeries As Excel.SeriesCollection
        Dim xlsAxisCategory, xlsAxisValue As Excel.Axes
        For x = 0 To Datalogger_6.Muestra.Value
            xlSheet.Range("A" & x + 1).Value = ntiempo(x) - Datalogger_6.Time
        Next x
        For x = 1 To Datalogger_6.Muestra.Value
            xlSheet.Range("B" & x + 1).Value = dataArray(x)
        Next x
        For x = 1 To Datalogger_6.Muestra.Value
            xlSheet.Range("C" & x + 1).Value = dataArray(x) / Datalogger_6.Ganancia
        Next x
        For x = 1 To Datalogger_6.Muestra.Value '+ 1
            xlSheet.Range("D" & x + 1).Value = 0 + (2508355 / 100000000) * (dataArray(x) /
            Datalogger_6.Ganancia) * 1000000 + (7860106 / 100000000000000) * ((dataArray(x) /
            Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 2 - (2503131 / 10000000000000000) * ((dataArray(
            x) / Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 3 + ((831527 / 100000000000) * (1 /
            10000000000)) * ((dataArray(x) / Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 4 - ((1228034 /
            100000000000000) * (1 / 1000000000000)) * ((dataArray(x) / Datalogger_6.Ganancia) *
            1000000) ^ 5 + ((9804036 / 1000000000000000) * (1 / 100000000000000)) * ((dataArray(x)
            ) / Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 6 - ((441303 / 1000000000000000) * 1 /
            10000000000000000) * ((dataArray(x) / Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 7 + ((
            1057734 / 1000000000000000000) * 1 / 1000000000000000000) * ((dataArray(x) /
            Datalogger_6.Ganancia) * 1000000) ^ 8 - ((1052755 / 100000000000000) * (1 /
            1000000000000000) * (1 / 100000000000000)) * ((dataArray(x) / Datalogger_6.Ganancia) *
            1000000) ^ 9
        Next x
        xlSheet.Range("A1:D1").Font.Bold = True
        xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlDiagonalDown).LineStyle =
        XlLineStyle.xlLineStyleNone
        xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlDiagonalUp).LineStyle =
        XlLineStyle.xlLineStyleNone
        With xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlEdgeLeft)
            .LineStyle = XlLineStyle.xlContinuous
            .ColorIndex = 0
            .TintAndShade = 0
        End With
    End Sub
End Module

```

```

        .Weight = 4
    End With
    With xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlEdgeTop)
        .LineStyle = XlLineStyle.xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = 4
    End With
    With xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlEdgeBottom)
        .LineStyle = XlLineStyle.xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = 4
    End With
    With xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlEdgeRight)
        .LineStyle = XlLineStyle.xlContinuous
        .ColorIndex = 0
        .TintAndShade = 0
        .Weight = 4
    End With
    xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlInsideVertical).LineStyle =
    XlLineStyle.xlLineStyleNone
    xlSheet.Range("A1:D1").Borders(XlBordersIndex.xlInsideHorizontal).LineStyle =
    XlLineStyle.xlLineStyleNone
    With xlSheet.Range("A1:D1").Interior
        .Pattern = XlPattern.xlPatternSolid
        .PatternColorIndex = XlPattern.xlPatternAutomatic
        .ThemeColor = XlThemeColor.xlThemeColorDark1
        .TintAndShade = -0.24997711117893
        .PatternTintAndShade = 0
    End With
    xlSheet.Range("A1").Value = "Tiempo (ms)"
    xlSheet.Range("B1").Value = "Lectura voltaje"
    xlSheet.Range("C1").Value = "Voltaje real"
    xlSheet.Range("D1").Value = "Temperatura (°C)"
    xlSheet.Columns("A:D").AutoFit()
    objExcelChart = xlBook.Charts.Add
    objRango = xlSheet.Range("A2", "B" & Datalogger_6.Muestra.Value) 'rango aqui se
    marca la cantidad con sus respectivos nombres revisar la hoja 1 en el excel creado.
    objExcelChart.ChartType = Excel.XlChartType.xlXYScatterSmooth 'tipo de grafico
    xlsSeries = objExcelChart.SeriesCollection 'nose
    objExcelChart.SetSourceData(objRango) 'se ingresa el
    rango al el grafico
    xlsAxisCategory = objExcelChart.Axes(, Excel.XlAxisGroup.xlPrimary) 'nose
    xlsAxisCategory.Item(Excel.XlAxisType.xlCategory).HasTitle = True ' el nombre de la
    categoria caso es activo o no
    xlsAxisCategory.Item(Excel.XlAxisType.xlCategory).AxisTitle.Characters.Font.Name =
    "arial"
    xlsAxisCategory.Item(Excel.XlAxisType.xlCategory).AxisTitle.Characters.Text = "Tiempo
    (ms)" 'txto en el eje x
    xlsAxisCategory.Item(Excel.XlAxisType.xlCategory).AxisTitle.Characters.Font.Size = 16
    ' tamaño de la letra
    xlsAxisValue = objExcelChart.Axes(, Excel.XlAxisGroup.xlPrimary)
    xlsAxisValue.Item(Excel.XlAxisType.xlValue).HasTitle = True
    ' se abilita el titulo para agregar cantidad
    xlsAxisValue.Item(Excel.XlAxisType.xlValue).AxisTitle.Characters.Text = "Voltaje (V)" '

```

```
        xlsAxisValue.Item(Excel.XlAxisType.xlValue).AxisTitle.Orientation =  
        Excel.XlOrientation.xlVertical  
        xlsAxisValue.Item(Excel.XlAxisType.xlValue).HasMajorGridlines = True  
        xlSheet.Application.Visible = True  
    End Sub  
End Module
```

Anexo E

Códigos computacionales en lenguaje C

```

//!*****//
//!*****JAIVER CHICANGANA CIFUENTES*****//
//!*****INSTRUMENTACION Y FÍSICA APLICADA*****//
//!*****UNIVERSIDAD DEL VALLE*****//
//!***** Dir. Otto Vergara García Dr. Rer. Nat.*****//
//!*****PROGRAMA PARA CONTROL DE DATALOGGER*****//

#include <18f2550.h>
#fuses HS //!CRISTAL DE 16MHZ
#fuses MCLR //!MASTERCLEAR ACTIVO
#fuses NOWDT //!WADOTAIMER OFF
#device adc=10 //!Resolucion a 10 bits
#use standard_io(b)
#use delay(clock=16000000)
#use rs232(baud=9600,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
//!#use rs232(baud=115200,parity=N,xmit=PIN_C6,rcv=PIN_C7,bits=8)
#use i2c(Master,sda=PIN_B0,scl=PIN_B1,Force_sw)
#byte porta = 0xF80
#byte portb = 0xF81
#byte portc = 0xF82
#byte RegTareas = 0x80
//*****Definiciones de librerias*****//
#include <float.h>
#include <math.h>
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <string.h>
#include <ctype.h>
//*****Definición de Constantes*****//
int32 tiempo,promedio = 0;
int16 valor=0,J,address=0,x,d,dato,p,e;
int m,s,n;
char CarRcbRS[5], Muestra[4],tiempo_R[10],y[1],z[1];
long sample,A,c;
//*****Rutinas*para*escribir*y*leer*eprom*externa*****//
#define EEPROM_ADDRESS long int
void write_ext_eprom(long int address, byte data){
    short int status;
    i2c_start(); //inicializa transmision
    i2c_write(0XA0);
    i2c_write(address>>8);
    i2c_write(address);
    i2c_write(data);
    i2c_stop();
    i2c_start();
    status=i2c_write(0XA0);
    while(status==1)
    {
        i2c_start();
        status=i2c_write(0XA0);}}
BYTE read_ext_eprom(long int address){
    byte data;
    i2c_start();
    i2c_write(0XA0);
    i2c_write(address>>8);
    i2c_write(address);
    i2c_start();
    i2c_write(0XA1);

```

```

        data=i2c_read(0);
        i2c_stop();
        return(data);}

//*****Rutinas*para*escribir*y*leer*eprom*externa*int16*****//
void write_int16_ext_eprom(EEPROM_ADDRESS address, int16 data){
    int8 i;
    for(i = 0; i < 2; ++i){
        write_ext_eprom(address + i, *((int8 *)&data) + i);}}
int16 read_int16_ext_eprom(EEPROM_ADDRESS address){
    int8 i;
    int16 data;
    for(i = 0; i < 2; ++i){
        *((int8 *)&data) + i = read_ext_eprom(address + i);}
    return(data);}

//*****Configuración Inicial del PIC*****//
void config(void){
    output_low(PIN_B2);           //!ganancia x1
    output_low(PIN_B3);
    output_low(PIN_B4);
    output_low(PIN_A5);
    m = 0;
    s = 0;
    n = 0;
    dato=0;}

//*****información*de*muestras*****//
void info(void){
    dato = d;
    WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
    address = address+2 ;
    dato = x;
    WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
    address = address+2;
    dato = tiempo;
    WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
    address = address+2 ;
    dato = e;
    WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
    address = address+2;
    dato = sample;
    WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
    address = address+2 ;}

//*****Inicio de proceso*****//
void adc(void){
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);           //!Usar reloj para el ADC 16MHZ/35 = 500KHZ
    setup_adc_ports(AN0|VSS_VREF);         //!configurando An0 como entrada analoga,el resto
    digital.
    set_adc_channel(0);                     //!Usar canal 0 del ADC
    For(A=1; A<=sample;++A){
        dato=0;
        promedio = 0;
        for(J=1; J<=256; ++J){
            valor = read_adc();
            delay_us (5);
            promedio=promedio+valor;}
        valor = promedio/256;
        printf("%d\\r\\n", valor);}

```

```

        if(m==1){                                //*****rutina*milisegundos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_us (1000);}}
        else if(s==1){                            //*****rutina*segundos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_ms (1000);}}
        else if(n==1){                            //*****rutina*minutos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_ms(60000);}}
        else printf("No se ha identificado la instruccion de tiempo. \r\n");}
printf("7fff\n\r");
config();}
//*****Inicio*de*proceso*y*guardar*****//
void adc_e(void){
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);                //!Usar reloj para el ADC 16MHZ/35 = 500KHZ
    setup_adc_ports(AN0|VSS_VREF);              //!configurando An0 como entrada analoga,el resto
    digital.
    set_adc_channel(0);                        //!Usar canal 0 del ADC
    info();
    For(A=1; A<=sample;++A){
        dato=0;
        promedio = 0;
        for(J=1; J<=256; ++J){
            valor = read_adc();
            delay_us (5);
            promedio=promedio+valor;}
        valor = promedio/256;
        printf("%lX\r\n", valor);
        dato = valor;
        WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
        address = address + 2;
        if(m==1){                                //*****rutina*milisegundos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_us (1000);}}
        else if(s==1){                            //*****rutina*segundos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_ms (1000);}}
        else if(n==1){                            //*****rutina*minutos
        for(c=1; c<=tiempo;++c){
            delay_ms(60000);}}
        else printf("No se ha identificado la instruccion de tiempo. \r\n");}
printf("7fff\n\r");
dato = 32767;
WRITE_int16_EXT_EEPROM(address,dato);
address = address + 2;
config();}
//*****guardar*S/N*****//
void guardar(void){
    seis:
        gets(CarRcbRS);                        //!capturamos Caracter de RS
        p = atoe(CarRcbRS);
        if (p==2){
            adc();}
        else if (p==1){
            adc_e();}
        else{printf("No se ha identificado la instruccion 6. \r\n");}

```

```

        goto seis;}}
//*****Configuración Numero de muestras*****//
void muestra_n(void){
dos:
    gets(Muestra);                                //!capturamos Caracter de RS
    sample = atoi32(Muestra);
    if(sample){
        guardar();                                //!comienza el proceso
    }
    else {printf("No se ha identificado la instruccion 5. \r\n");
        goto dos;}}
//*****Configuración Tiempo en ms, s ó min*****//
void tiempo_et(void){
uno:
    gets(y);                                        //!capturamos Caracter de RS
switch(y[0])
{
    case 'm':                                     //!milisegundos;
        m = 1;
        e="sm";
        muestra_n();                               //!se ingresa valor numerico >=0
        break;
    case 's':                                     //!segundos;
        s = 1;
        e="s";
        muestra_n();                               //!se ingresa valor numerico >=0
        break;
    case 'M':                                     //!minutos;
        n = 1;
        e="nm";
        muestra_n();                               //!se ingresa valor numerico >=0
        break;
    default:
        printf("No se ha identificado la instruccion 4. \r\n");
        goto uno;
        break;}}
//*****Configuración Tiempo entre Muestra y Muestra*****//
void tiempo_nm(void){
uno:
    gets(tiempo_R);                                //!capturamos Caracter de RS
    tiempo = atoi32(tiempo_R);
    if(tiempo){
        tiempo_et();                                //!se esoe ms,s,m;
    }
    else {printf("No se ha identificado la instruccion 3. \r\n");
        goto uno;}}
//*****Configuración de la Ganancia*****//
void ganancia(){//! RB4 = PIN 25 a S0 = PIN 11; RB3 = PIN 24 a S1 = PIN 10; RB2 = PIN 23 a S2 =
PIN 9 74HC4051
lazo:
    gets(CarRcbRS);                                //!capturamos Caracter de RS
    x = atoi(CarRcbRS);
switch(x)
{
    case 5:                                       //!printf("G X5\r\n");
        output_high(PIN_B2);
        output_low(PIN_B3);
        output_low(PIN_B4);
        tiempo_nm();                               //!se ingresa un valor numerico >= 0
        break;
}
}

```

```

case 10:
    output_low(PIN_B2);
    output_high(PIN_B3);
    output_low(PIN_B4);
    tiempo_nm();
    break;
case 50:
    output_high(PIN_B2);
    output_high(PIN_B3);
    output_low(PIN_B4);
    tiempo_nm();
    break;
case 100:
    output_low(PIN_B2);
    output_high(PIN_B3);
    output_high(PIN_B4);
    tiempo_nm();
    break;
case 500:
    output_low(PIN_B2);
    output_low(PIN_B3);
    output_high(PIN_B4);
    tiempo_nm();
    break;
case 1000:
    output_high(PIN_B2);
    output_low(PIN_B3);
    output_high(PIN_B4);
    tiempo_nm();
    break;
default:
    printf("No se ha identificado la instruccion 2. \r\n");
    goto Lazo;
    break;}}
//*****Lectura de la Eeprom*****//
void EEprom_l(void){
    address=0;
    while(dato < 32767){
        dato = READ_int16_EXT_EEPROM(address);
        address = address + 2;
        printf("%LX\r\n",dato);}
    config();}
//*****Configuración del Rango ó lectura de EEPROM*****//
void rango(void){
    uno:
        gets(z);
        switch(z[0]){
            case 'b':case 'B':
                output_low(PIN_A5);
                d = 'M';
                ganancia();
                break;
            case 'm': case 'M':
                output_high(PIN_A5);
                d = 'B';
                ganancia();

```

```

        break;
    case 'L': case 'l':
        EEprom_l();
        break;
    default:
        printf("No se ha identificado la instruccion 1. \r\n");
        goto uno;
        break;}}

//*****Rtina de Interrupciones: RDA Recepción USART*****//
#include <avr/io.h>
void serial_isr() {                                //!Interrupción recepción serie USART
    char rcvchar=0x00;                             //!último caracter recibido
    gets(rcvchar);                                 //!se recibe caracter que produce interrupción
    rango();                                       //!se escoje el rango de trabajo
}
void main() {
    setup_adc(ADC_CLOCK_DIV_32);                  //!Usar reloj para el ADC 16MHZ/32 = 500KHZ
    setup_adc_ports(AN0|VSS_VREF);                //!configurando An0 como entrada analoga, el resto
    digital.
    set_adc_channel(0);                           //!Usar canal 0 del ADC
    config();                                     //!Configura ganancia
    enable_interrupts(int_rda);                    //!Habilita Interrupción RDA
    enable_interrupts(global);                    //!Habilita interrupciones
    do{
        valor = read_adc();
        delay_us(5);}
    while (true);}

```

Anexo F

Informe de Calibración

INFORME DE CALIBRACION

LABORATORIO LABORATORY	: PATRONAMIENTO E INSTRUMENTACION ELECTRICA
INSTRUMENTO APPARATUS	: MULTÍMETER
FABRICANTE MANUFACTURER	: AGILENT
MODELO MODEL	: 34401 A
NUMERO DE SERIE SERIAL NUMBER	: MY 45000277
RANGO DE MEDICION MEASUREMENT RANGE	: 0 - 1000 V DC 0 - 750 VAC 0 - 3 A DC/AC 0 - 100 MΩ
SOLICITANTE CUSTOMER	: METROCALIDAD
FECHA DE RECEPCIÓN DATE OF RECEPTION	: 2011 06 20
FECHA DE CALIBRACION DATE OF CALIBRATION	: 2011 06 29
NUMERO DE PAGINAS DEL INFORME INCLUYENDO ANEXOS: DIEZ (10) NUMBER OF PAGES OF THIS CERTIFICATE AND DOCUMENTS ATTACHED	

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas y no podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite.

This certificate is an accurate record of the performed measurements results, this certificate may not be partially reproduced, except with the prior written permission of the issuing laboratory.

Los resultados contenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones, el laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los perjuicios que puedan derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados.

The results of this certificate refer to the moment and conditions in which the measurements were made, the issuing laboratory assumes no responsibility for any ensuing damages due to the misuse of the calibrated instruments.

EPM
Calle 30 65-315 Tel (574) 3806148 Fax (574) 2659999
Correo: d-5090@epm.com.co Apartado Aéreo 940
Medellín - Antioquia - Colombia

SLO-EAT-FR-019:03

Figura F.1: Informe de calibración de EPM.

DESCRIPCION DEL INSTRUMENTO A CALIBRAR

El presente instrumento objeto de prueba fue probado y todas sus funciones de medición así como también sus especificaciones se encuentran descritas en su manual de instrucciones en el capítulo 8 página 216 a 219.

TRABAJO REALIZADO

Calibración del instrumento objeto de prueba, aplicando un nivel de referencia trazable para cada uno de los valores, de acuerdo con las diferentes funciones de medición que tiene el instrumento objeto de prueba y según las pruebas recomendadas por su fabricante para la calibración de este instrumento en su manual de servicio técnico.

La temperatura de la sala de medición fue de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y una humedad relativa de $50\% \pm 20\%$.

METODO DE MEDICION

Comparación de lecturas medidas con el equipo bajo prueba y comparadas con los valores nominales generados por el calibrador multifunción patrón marca FLUKE modelo 5520 A-SC.

EQUIPO UTILIZADO

Calibrador multipropósito marca FLUKE modelo 5520 A

RESULTADOS DE LA MEDICION

En el anexo 1 está la tabla de resultados obtenidos durante la calibración del presente instrumento objeto de prueba.

INCERTIDUMBRE DE MEDICION

La incertidumbre expandida de medición reportada en la tabla de resultados del anexo 1, fue calculada con un factor de cubrimiento de $k=2$, el que da una probabilidad o un nivel de confianza de aproximadamente el 95%.

Figura F.2: Informe de calibración de EPM.

INFORME DE CALIBRACIÓN No CM-14389-0385	
2011-06-29	HOJA 3 DE 10

TRAZABILIDAD

El laboratorio de Metrología del EATIC de las EPM, custodia y mantiene la trazabilidad de los patrones de trabajo utilizados en esta calibración, el cual es calibrado por el laboratorio primario de la FLUKE mediante certificado de calibración No 1605695-7820021 acreditado por A2LA con trazabilidad al National Institute of Standard and Technology NIST.

OBSERVACIONES

- Al presente instrumento se le colocó estampilla de calibración de las Empresas Públicas de Medellín, identificada con el No CM-14389-0385.
- En el anexo 2 se anexa copia de los certificados de calibración de los patrones usados en la calibración para garantizar la trazabilidad de la calibración a patrones internacionales o nacionales de referencia.
- Para la calibración se utilizó un sistema automático de calibración para la toma de datos del instrumento objeto de prueba.
- El usuario es responsable de mantener calibrado este instrumento a intervalos regulares de tiempo para garantizar la confiabilidad de las mediciones realizadas con este instrumento de medición.
- Las mediciones fueron realizadas por el profesional del Laboratorio de Metrología, ingeniero Oscar Germán Quiceno R.

Revisó y aprobó



OSCAR GERMAN QUICENO R.

Profesional Laboratorios

Laboratorio de Patronamiento e Instrumentación Eléctrica

EPM
Calle 30 65-315 Tel (574) 3806148 Fax (574) 2659999
Correo: d-5090@epm.com.co Apartado Aéreo 940
Medellín - Antioquia - Colombia

SLO-EAT-FR-019:03

Figura F.3: Informe de calibración de EPM.

Anexo G

Método ANOVA

MÉTODO ANOVA UTILIZADO PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD DENTRO DEL CONTROL DE CALIDAD DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN

ANOVA's method used to develop the study of repeatability and reproducibility inside of measure system.

RESUMEN

En este artículo se desarrolla paso a paso el método Anova utilizado para realizar el estudio de repetibilidad y reproducibilidad dentro de cualquier sistema de medición. Para ilustrar de una manera más clara la forma de realizar este estudio se hacen dos ejemplos de diferentes procesos en los cuales se utiliza el método mencionado.

PALABRAS CLAVES: Repetibilidad y reproducibilidad, varianza.

ABSTRACT:

In the present article is developing step by step the Anova's method used in the study of repeatability and reproducibility inside of any measure system. For a simple illustration of the way of how it has become, are introducing two different examples when this procedure was applied.

KEYWORDS: repeatability and reproducibility, variance.

MARCELA BOTERO ARBELÁEZ

Ingeniero Electricista
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
maboar@utp.edu.co

OSIEL ARBELÁEZ SALAZAR

Ingeniero en Control Electrónico e Instrumentación
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
osiel@utp.edu.co

JAIRO A. MENDOZA VARGAS

Ingeniero Electricista, M.Sc
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
jam@utp.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier tipo de proceso requiere dentro de su organización un sistema de medición apropiado que permita medir la calidad de las características de los productos que se fabrican.

Un sistema de medición está formado por el instrumento con el cual se mide y por las personas que lo utilizan. Tanto los operadores como el instrumento de medida producen dentro del sistema de medición dos tipos de variaciones: unas que se deben al azar y que son imposibles de eliminar y otras que se producen generalmente por descuido o accidente dentro del proceso y que pueden ser corregidas una vez que se detectan.

El estudio de repetibilidad y reproducibilidad (r&R) permite calcular la variabilidad dentro de cualquier tipo de proceso y determinar si esta variación es aceptable o no.

Existen varios métodos para realizar el estudio r&R, pero el método ANOVA es el más exacto para calcular la variabilidad dentro de un proceso.

2. CONTENIDO

2.1 DEFINICIONES: Los conceptos centrales para el estudio r&R son la repetibilidad y la reproducibilidad, dentro de un sistema de medición, el significado de estos parámetros de acuerdo con [1] es el siguiente:

2.1.1 Repetibilidad: Esta variación se presenta cuando el mismo instrumento es utilizado por una persona al

medir repetidas veces la misma parte, es decir, es la variación de las lecturas individuales que se han repetido con el mismo instrumento y la misma persona.

2.1.2 Reproducibilidad: Se refiere a la variación observada entre los promedios de varios operadores, cuando cada operador realiza varias lecturas sobre la misma parte y usando el mismo instrumento.

2.1.3 Varianza: La varianza de los datos que se obtienen al realizar una medición, es un estimador de la dispersión que existe entre la característica de calidad medida y su promedio.

2.2. ESTUDIO DE REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD: El estudio de repetibilidad y reproducibilidad debe iniciarse realizando un experimento diseñado estadísticamente; cualquier tipo de experimento desarrollado dentro de un proceso debe contener dos elementos:

- Partes o unidades del producto las cuales son seleccionadas por medio de un muestreo aleatorio.
- Cierta número de operadores que se seleccionan aleatoriamente, estos operadores son los encargados de realizar las mediciones sobre las partes varias veces.

Una vez realizado el experimento y se tienen todas las medidas de la característica de interés se procede a calcular la variabilidad del proceso utilizando el método Anova (Análisis de varianza).

2.2.1 Método de Análisis de Varianza (ANOVA): El método Anova, conocido también como análisis de varianza es el método más exacto para calcular la variabilidad de un sistema de medición porque posee la ventaja de cuantificar la variación debida a la interacción entre los operadores y las partes. Este método está basado en la misma técnica estadística utilizada para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos.

Para un sistema de medición, el método Anova debe realizarse para estudiar simultáneamente los efectos de dos fuentes de variación: Operadores y Partes.

La Tabla de Anova para un sistema de medición es la que se muestra en la Tabla 1.

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	SSA	$a - 1$	$MSA = \frac{SSA}{a - 1}$
Partes	SSB	$b - 1$	$MSB = \frac{SSB}{b - 1}$
Interacción	$SSAB$	$(a - 1)(b - 1)$	$MSAB = \frac{SSAB}{(a - 1)(b - 1)}$
Error	SSE	$ab(n - 1)$	$MSE = \frac{SSE}{ab(n - 1)}$
Total	SST	$N - 1$	

Tabla 1. Anova para un sistema de medición con dos factores [3]

donde: a es el número de operadores
 b es el número de partes
 n es el número de medidas para cada parte por cada operador
 N es el número total de datos

Los pasos que se deben seguir para realizar la tabla del Anova de dos factores son [2]:

1. Se calcula la suma total de todos los datos, como lo muestra la ecuación 1.

$$T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (1)$$

donde x_{ijk} son cada uno de los datos del experimento.

2. Se calcula la suma del cuadrado de todos los datos por medio de la ecuación 2.

$$T_x^2 = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n x_{ijk}^2 \quad (2)$$

donde x_{ijk} son cada uno de los datos del experimento.

3. Se calcula la suma de los cuadrados totales de las combinaciones de factores dividido por el tamaño muestral respectivo como lo muestra la ecuación 3.

$$T_c^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b T_{ij}^2 \quad (3)$$

donde T_{ij} es la suma de los datos de cada i por cada operador.

4. Se calcula la suma de los totales para el factor 1 (Operadores) y se divide por su espacio muestral respectivo por medio de la ecuación 4.

$$T_1^2 = \frac{1}{bn} \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n T_{jk}^2 \quad (4)$$

donde T_{jk} es la suma de los datos de cada operador.

5. Se calcula la suma de los totales para el factor 2 (Partes) y se divide por su tamaño muestral respectivo por medio de la ecuación 5.

$$T_2^2 = \frac{1}{an} \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^n T_{ik}^2 \quad (5)$$

donde T_{ik} es la suma de los datos para cada parte.

6. Se calculan las sumas de los cuadrados necesarias por medio de las ecuaciones (6), (7), (8), (9) y (10).

$$SSA = T_1^2 - \frac{T^2}{N} \quad (6)$$

$$SSB = T_2^2 - \frac{T^2}{N} \quad (7)$$

$$SSAB = T_c^2 + \frac{T^2}{N} - T_1^2 - T_2^2 \quad (8)$$

$$SSE = T_x^2 - T_c^2 \quad (9)$$

$$SST = T_x^2 - \frac{T^2}{N} \quad (10)$$

Después de obtener la Tabla del Anova, se procede a calcular la variación del sistema de medida, siguiendo los siguientes pasos:

1. La repetibilidad del sistema de medida [3] está dada por la ecuación 11.

$$r = 5,15\sqrt{MSE} \quad (11)$$

2. El porcentaje de repetibilidad se calcula por medio de la ecuación 12.

$$\%r = \frac{r}{T} \times 100\% \quad (12)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida.

3. La reproducibilidad del sistema de medida [3] está dada por la ecuación 13.

$$R = 5,15 \sqrt{\frac{MSA - MSAB}{bn}} \quad (13)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, entonces la reproducibilidad es cero.

4. El porcentaje de reproducibilidad se calcula por medio de la ecuación 14.

$$\%R = \frac{R}{T} \times 100\% \quad (14)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida.

5. La interacción entre los operadores y las partes [3] se calcula por medio de la ecuación 15.

$$I = 5,15 \sqrt{\frac{MSAB - MSE}{n}} \quad (15)$$

Nota: Si en algún caso el término de la raíz es un número negativo, la interacción entre operadores y partes es cero.

6. El porcentaje de la interacción entre los operadores y las partes se calcula por medio de la ecuación (16).

$$\%I = \frac{I}{T} \times 100\% \quad (16)$$

donde T es la tolerancia de la característica medida.

7. La relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad está dada por la ecuación 17.

$$r \& R = \sqrt{(r)^2 + (R)^2 + I^2} \quad (17)$$

8. El porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad [3] está dada por la ecuación 18.

$$\%r \& R = \sqrt{(\%r)^2 + (\%R)^2 + (\%I)^2} \quad (18)$$

9. Se interpretan los resultados aplicando los siguientes criterios [4]:

- Si $\%r \& R < 10\%$ el sistema de medición es aceptable.
- Si $10\% \leq \%r \& R < 30\%$ el sistema de medición puede ser aceptable según su uso, aplicación, costo del instrumento de medición, costo de reparación.
- Si $\%r \& R > 30\%$ el sistema de medición es considerado como no aceptable y requiere de mejoras en cuanto al operador, equipo, método, condiciones, etc.

Ejemplo 1: En la Tabla 2 se tienen los datos del diámetro (en centímetros) de diez roscas fabricadas en un proceso industrial para cierto tipo de tornillo, estos datos fueron tomados por tres operadores con un mismo instrumento, repitiendo la medida dos veces. Si la tolerancia para este diámetro es de 4 cm, calcule el porcentaje de repetibilidad y reproducibilidad $\%r \& R$ utilizando el método Anova y diga si este sistema de medición es o no es aceptable.

Parte - Muestra	Operador A		Operador B		Operador C	
	1	2	1	2	1	2
1	0.65	0.60	0.55	0.55	0.50	0.55
2	1.00	1.00	1.05	0.95	1.05	1.00
3	0.85	0.80	0.80	0.75	0.80	0.80
4	0.85	0.95	0.80	0.75	0.80	0.80
5	0.55	0.45	0.40	0.40	0.45	0.50
6	1.00	1.00	1.00	1.05	1.00	1.05
7	0.95	0.95	0.95	0.90	0.95	0.95
8	0.85	0.8	0.75	0.70	0.80	0.80
9	1.00	1.00	1.00	0.95	1.05	1.05
10	0.60	0.70	0.55	0.50	0.85	0.80

Tabla 2. Datos del Diámetro de las roscas en centímetros para el Ejemplo 1 [4]

Solución: Utilizando las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, se obtienen los valores necesarios para realizar la Tabla de Anova:

$$T = 48,45$$

$$T_x^2 = 41,37$$

$$T_c^2 = 41,33$$

$$T_1^2 = 39,17$$

$$T_2^2 = 41,18$$

$$SSA = 0,048$$

$$SSB = 2,06$$

$$SSAB = 0,10$$

$$SSE = 0,039$$

Los datos del Anova para el Ejemplo 1 se encuentran en la Tabla 3.

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	0,048	2	0,024
Partes	2,06	9	0,23
Interacción	0,10	18	0,006
Error	0,04	30	0,001
Total	2,25	59	

Tabla 3. Tabla de Anova para el Ejemplo 1

Utilizando los valores de la Tabla 3 y las ecuaciones 11, 13 y 15, se tiene que la repetibilidad, la reproducibilidad y la interacción entre operadores y partes son:

$$r = 0,19 \text{ cm}$$

$$R = 0,16 \text{ cm}$$

$$I = 0,24 \text{ cm}$$

Utilizando las ecuaciones 12, 14 y 16, para expresar la repetibilidad, la reproducibilidad y la interacción entre operadores y partes en porcentaje, se tiene:

$$\% r = 47,5\%$$

$$R = 40\%$$

$$I = 60\%$$

Utilizando la ecuación 17, se tiene que la relación entre la repetibilidad y reproducibilidad es:

$$r \& R = 0,34$$

Utilizando la ecuación 18, se tiene que la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad en porcentaje es:

$$\% r \& R = 86,35\%$$

Al interpretar los resultados obtenidos utilizando los criterios de aceptación descritos anteriormente, se observa que el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad es mayor al 30%, ($\% r \& R > 30\%$) esto significa que el sistema de medición no es aceptable para este proceso y que deben buscarse alternativas dentro del mismo para mejorarlo.

Ejemplo 2: Un fabricante de anillos para cierta clase de motor, desea realizar un estudio de repetibilidad y reproducibilidad para saber si su proceso de fabricación es o no es aceptable. Para la realización de este estudio dos operadores midieron cinco veces los diámetros de tres anillos y los datos obtenidos son los que se encuentran en la Tabla 4.

La tolerancia de la característica de interés para este estudio es de 0,6 cm.

Parte-Muestra	Operador A			Operador B		
	1	2	3	1	2	3
1	0,57	0,58	0,58	0,57	0,56	0,58
2	0,58	0,58	0,56	0,57	0,58	0,58
3	0,56	0,58	0,57	0,59	0,57	0,58

Tabla 4. Datos en centímetros del diámetro de los anillos del Ejemplo 2

Solución: Utilizando las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, se obtienen los valores necesarios para realizar la Tabla de Anova:

$$T = 10,34$$

$$T_x^2 = 5,941$$

$$T_c^2 = 5,94$$

$$T_1^2 = 5,94$$

$$T_2^2 = 5,94$$

$$SSA = 0,00022$$

$$SSB = 0,00022$$

$$SSAB = 0,00024$$

$$SSE = 0,001$$

Los datos del Anova para el Ejemplo 2 se encuentran en la Tabla 5.

Fuente de variación	Suma cuadrados	Grados de libertad	Cuadrados medios
Operador	0,000022	1	0,00022
Partes	0,000022	2	0,00011
Interacción	0,00024	2	0,00012
Error	0,001	12	0,000083
Total	0,00168	17	

Tabla 5. Tabla de Anova para el Ejemplo 2

Utilizando los valores de la Tabla 5 y las ecuaciones 11, 13 y 15, se tiene que la repetibilidad, la reproducibilidad y la interacción entre operadores y partes son:

$$r = 0,047$$

$$R = 0,017$$

$$I = 0,018$$

Utilizando las ecuaciones 12, 14 y 16, para expresar la repetibilidad, la reproducibilidad y la interacción entre operadores y partes en porcentaje, se tiene:

$$\% r = 7,8\%$$

$$R = 2,8\%$$

$$I = 3\%$$

Utilizando la ecuación 17, se tiene que la relación entre la repetibilidad y reproducibilidad es:

$$r \& R = 0,053$$

Utilizando la ecuación 18, se tiene que la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad en porcentaje es:

$$\% r \& R = 8,8\%$$

Al interpretar los resultados obtenidos utilizando los criterios de aceptación descritos anteriormente, se observa que el porcentaje de la relación entre la repetibilidad y la reproducibilidad es menor al 10% ($\% r \& R < 10\%$), esto significa que el sistema de medición es aceptable.

3. CONCLUSIONES

En cualquier tipo de proceso un estudio de repetibilidad y reproducibilidad sirve para calcular su variabilidad y detectar cuando éste se encuentra funcionando en condiciones anormales, de esta manera, se pueden buscar estrategias correctivas que le permitan al proceso volver a trabajar en condiciones normales.

El método Anova es el método más exacto cuando se quiere calcular la variabilidad de un proceso puesto que éste es el único método que tiene en cuenta la variabilidad que se presenta por la interacción entre los operadores y las partes.

Cuando la reproducibilidad es mucho mayor a la repetibilidad, esto indica que el necesario entrenar al operador tanto en el manejo del instrumento como en la toma de los datos.

Cuando la repetibilidad es mucho mayor a la reproducibilidad esto significa que el instrumento requiere de mantenimiento o que no es el adecuado para realizar dicha medición.

4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ingeniería UC. Rivas C., Gerardo A. Escuela de Ingeniería Industrial. Universidad de Carabobo. Bárbula. Valencia. Venezuela. Jefe de la comisión coordinadora. (<http://servicio.cid.uc.edu.ve/ingenieria/revista/a5n2/5-2-2.pdf>).

[2] Bioestadística aplicada a bioquímica y farmacia. Azzimonti Renzo. (<http://www.bioestadistica.freesevers.com/tema20.pdf>).

[3] Engineered Software, Inc. Copyright 1999. (www.engineeredsoftware.com/pepers/msa_rr.pdf).

[4] Tecnológico de Monterrey. (<http://academia.gda.itesm.mx/~mdeluna/control/ryrmetodo.pdf>).