

Universidad Acción Pro Educación y Cultura UNAPEC



**DECANATO DE INGENIERIA E INFORMATICA
ESCUELA DE TECNOLOGIA**

“Reflectómetro de dominio de tiempo (TDR) virtual como módulo didáctico desarrollado en LabView utilizando micro controladores para el Laboratorio de Telecomunicaciones de UNAPEC en R.D.”

Sustentantes:

Br. Carlos Alfredo Olalla Báez
Matricula 2001-1511

Br. Donovan Joel Rodríguez Peguero
Matricula: 2002-0887

Br. Rogelio Sebastián Tejeda Méndez
Matricula: 2003-1291

Asesores:

Ing. Santo Navarro

Ing. Luís Pérez Méndez

Ing. Porfirio Sánchez Ureña

**MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
ELECTRONICO EN COMUNICACIONES**

DISTRITO NACIONAL, REPUBLICA DOMINICANA 2009

“La Universidad no se hace responsable de las opiniones emitidas por los sustentantes”

DEDICATORIAS

Para mi Dios que me ha acompañado en estos años de mi vida, el cual me ha dado fortaleza espiritual y física.

Con mucho cariño principalmente a mis padres que me dieron la vida y han cuidado de mí. Gracias por darme una carrera para mi futuro, por creer en mí, por ver que su último fruto llega a alcanzar una de sus metas más importantes. Los quiero de corazón y este trabajo también es de ustedes.

Para mi adorada hija Camila, mi tesoro; ella ha representado un mundo lleno de alegría en mi vida.

A mi hermano mayor José Francisco quien me dio un gran apoyo para terminar mis estudios. A mis demás hermanos Alma Marítza, Mariano, Luis, Solange, Rosy, quienes de una u otra manera también contribuyeron dándome ánimo para que termina los estudios.

A mis vecinos Miguel Aurelio y Domingo Silvestre que siempre me han apoyado y soportado. A todos mis amigos y compañeros, que de alguna u otra manera contribuyeron con esta investigación.

Finalmente a mis compañeros de investigación, por darme el privilegio de integrar este gran equipo y por haber logrado entendernos.

Carlos Alfredo Olalla Báez

DEDICATORIAS

A Dios por sobre todas las cosas, que siempre nos ha acompañado durante todo el trayecto de la carrera y el desarrollo de este proyecto.

A mi madre Rogelia Yokasta, y mi padre Arsenio Rodríguez, a los cuales no tendré nunca en la vida forma alguna de pagarles todo lo que por ellos he logrado y obtenido en esta vida. Por su apoyo incondicional, y amor que me han brindado durante toda mi vida.

A mis hermanos, Tyron Nelson, Noelia Yokasta y Ronny Alexander, que de alguna forma directa o indirecta me ayudaron a que este proyecto sea realizado.

A mis compañeros de proyecto Rogelio Sebastián y Carlos Olalla quienes pusieron de todo el empeño posible para poder realizar este proyecto.

A mis amigos, Angel Gonzales, Ovaldo Piñeiro, Edwin Corporan Sánchez, Francisco C. Francisco y a todos los demás amigos.

Donovan Joel Rodríguez Peguero

DEDICATORIAS

En primer y más importante orden al señor DIOS, por permitirme siempre encontrar la ruta hacia el camino del éxito.

En segundo y bien establecido lugar a mi madre María I. Méndez Mancebo, por su apoyo incondicional y por ser siempre la columna principal sobre la cual puedo apoyarme sin temor a derrumbarse. A mi padre que de donde quiera que se encuentre seguro está pendiente a mis pasos.

Mi hermana y demás familiares que intervinieron de una forma u otra brindándome sus apoyos esperanzados en que si podía. En especial a mi primo el puní que siempre ha estado muy pendiente.

Mi esposa e hijo quienes me recargan de fuerzas para seguir persiguiendo mis sueños y alcanzar mis metas.

Mis compañeros de carrera, sobre todo a los integrantes de mi grupo, Donovan Rodríguez y Carlos Olalla que sin su ayuda se hubieran dificultado más las cosas.

Amigos y compañeros de trabajo, Eymer, Heyson, Jp, Arriga, Frank, Tito, Aurora, que supieron comprender mi ausencia para con ellos y mi entrega para con esto.

Rogelio Sebastián Tejeda Méndez

AGRADECIMIENTOS

A DIOS

Agradecer en primer lugar al Dios todo poderoso que nos ha conservado con vida, con salud, que nos dio inteligencia, y nos ha guiado y cuidado hasta el día de hoy.

Ing. Santo Navarro

Por su asesoramiento continuo y ser un excelente maestro e instructor. Fue la clave y guía para la estructuración, formulación y presentación de las ideas e informaciones de la investigación.

Ing. Porfirio Sánchez Ureña

Por su asesoría completa en el desarrollo del proyecto. Profesor de vocación, excelente catedrático y amigo incondicional. Sus aportes fueron la base para llevar a cabo la realización de este trabajo.

Ing. Luis Pérez Méndez

Por permitirnos sacar provecho de sus experiencias y conocimientos en el área de estudio aplicada.

Br. Sterlín Alexander De Jesús

Por su apoyo y ayuda en la creación del mismo, haciendo aportes necesarios para la aplicación de micro controladores PIC.

RESUMEN

El siguiente trabajo de investigación se basa en el desarrollo de un Reflectómetro en el Dominio del Tiempo (TDR) virtual, desarrollado en LabVIEW implementando micro controladores, destinado como módulo didáctico para ser utilizado en el laboratorio de telecomunicaciones de la universidad APEC. Este proyecto tiene como objetivo principal ayudar los estudiantes de ingeniería electrónica en comunicaciones para el fortalecimiento práctico de asignaturas claves de la carrera como es el caso de sistemas de transmisión y radio frecuencias TEC-634. Este módulo basa su funcionamiento principal en la reflectometría del dominio de tiempo cuya técnica consiste en enviar una señal eléctrica por un cable y luego medir el tiempo que tarda la señal reflejada de acuerdo a las imperfecciones o variaciones de impedancia del cable. La información obtenida por el módulo de adquisición de datos es luego representada en un instrumento virtual o herramienta desarrollada en LabVIEW para ser procesada y realizar los cálculos que por último se presentan en pantalla. Los datos se consiguen a través de la etapa de adquisición de datos la cual se desarrolla utilizando micro controladores y convertidores análogos digitales A/D; esta se comunica mediante el puerto USB al computador, facilitando así que el elemento bajo prueba o EBP, que en este proyecto es un cable de tipo coaxial RG-59, por el cual viaja el pulso incidente que es reflejado de acuerdo a las condiciones que se sometan.

La metodología apropiada para la elaboración de este proyecto son las de tipo explicativo y descriptivo.

Llega a ser descriptiva basándose en la forma en la cual se analizan cuidadosamente las informaciones colectadas en nuestro campo de estudio en este caso el cable de tipo coaxial RG-59 en el cual se describen las manifestaciones ocurridas a través del mismo.

Por otro lado consideramos también la metodología explicativa por la minuciosa forma en la cual se van detallando todos los detalles encontrados a lo largo del desarrollo de este proyecto ya que todos comprenden los fuertes eslabones que nos llevan a complementar el mismo.

INDICE

Dedicatoria	III
Agradecimientos	VI
Resumen	VIII
Introducción	1
Ubicación del área de estudio	3
CAPITULO 1: Reflectometría de Dominio de Tiempo	
1.1 Reflectometría	4
1.1.1 Líneas de Transmisión de comunicaciones	5
1.1.1.1 Antecedentes de las líneas de transmisión	6
1.1.2 Definición de la línea de transmisión	15
1.1.3 Fundamento de las líneas de transmisión	16
1.1.4 Tipos de línea de transmisión	16
1.1.4.1 Líneas de transmisión de conductor paralelo	19
1.1.4.2 Cable de par trenzado	22
1.1.4.3 Par de cables protegido con armadura	22
1.1.4.4 Líneas de transmisión coaxial o concéntrica	23
1.1.4.5 Balunes	25
1.2 Reflectometría de dominio de tiempo	27
1.2.1 Teoría de la Reflectometría de dominio de tiempo	30
1.2.1.1 Propagación en una línea de transmisión	33
1.2.1.2 TDR prueba del escalón de reflexión	36
1.2.1.3 Localización de fallas	39
1.2.1.4 Análisis de reflexión	40
1.2.1.5 Discontinuidad de una línea de transmisión	46
1.2.1.6 Evaluación de pérdida del cable	48
1.2.1.7 Múltiples discontinuidades	52
1.3 ¿Qué es el Reflectómetro de dominio de tiempo?	55
1.3.1 Características	57
1.3.2 Principios de operación	58

CAPITULO 2: Instrumentación Electrónica

2.1	Generalidades	59
2.2	Efecto Hall	63
2.2.1	Explicación cualitativa del efecto Hall Clásico	64
2.2.2	Explicación cuantitativa del efecto Hall Clásico	65
2.2.3	La física clásica del efecto Hall	66
2.2.4	Técnicas de medición	68
2.2.5	Aplicación del efecto Hall	68
2.3	Efecto Seebeck	69
2.3.1	Fenómeno físico y Eléctrico relacionados al Efecto Seebeck	70
2.3.2	Aplicaciones relacionadas al Efecto Seebeck	73
2.4	Acondicionamiento de Señal	76
2.4.1	Generalidades	76
2.4.2	Tipos de señales	77
2.4.2.1	Señales analógicas	78
2.4.2.2	Señales digitales	80
2.4.2.3	Señales unipolares y señales diferenciales	80
2.4.2.4	Señales de alta y baja impedancia	83
2.4.3	Operaciones con señales	84
2.4.3.1	Operaciones con señales analógicas	85
2.4.3.2	Operaciones con señales digitales	88
2.4.4	Errores en el acondicionamiento de señal	90
2.4.4.1	Errores estáticos	91
2.4.4.2	Errores dinámicos	92
2.4.5	Amplificación	92
2.4.5.1	Amplificadores diferenciales	93
2.4.5.2	Amplificador inversor	94
2.4.5.3	Amplificador no inversor	96
2.4.5.4	Amplificador logarítmico	96
2.4.5.5	Amplificador integrador	97
2.4.5.6	Amplificador comparador	99
2.4.5.7	Amplificador usado para instrumentación	100
2.4.6	Filtrado	103
2.5	Instrumentación Electrónica	104
2.5.1	Breve Historia sobre Instrumentación Electrónica	104

2.5.2	Polímetros y Medidores de impedancia	1111
2.5.2.1	Polímetros	112
2.5.2.1.1	Polímetro eléctrico	112
2.5.2.1.2	Polímetros electrónicos	115
2.5.2.1.3	Polímetros digitales	116
2.5.2.1.4	Precauciones en la utilización de los polímetros	119
2.5.3	Voltímetro de continua	121
2.5.4	Óhmetro	123
2.5.5	Medidas de tensiones y corrientes alternas	125
2.5.6	Medidores de impedancia	127
2.5.6.1	Puentes de medida en alterna	127
2.5.6.2	Puente Maxwell	127
2.5.6.3	Puente Hay	129
2.5.6.4	Puente de Schering	130
2.5.7	Medidor analógico universal de impedancias	131
2.5.8	Medidor Digital Universal de Impedancias	132
2.6	Sensores	132
2.6.1	Tipos y características de los sensores	133
2.6.2	Clasificación de los sensores según la energía	135
2.6.3	Clasificación de los sensores según la magnitud a medir	135
2.6.4	Clasificación de los sensores según el principio de Funcionamiento	136
2.6.4.1	Sensores primarios	137
2.6.4.2	Sensores resistivos	138
2.6.4.3	Sensores electromagnéticos	140
2.6.4.4	Sensores generadores	141
2.6.4.5	Sensores digitales	143
2.7	Transductores	144
2.7.1	Transductores de parámetro variable	147
2.7.1.1	Capacitivos	147
2.7.1.2	Resistivos	147
2.7.1.3	Inductivos	152
2.7.2	Transductores activos	152
2.7.2.1	Electromagnéticos	152
2.7.2.2	Fotovoltaicos	153

2.7.2.3	Fotoeléctrico	152
2.7.2.4	Termoeléctrico	153
2.7.2.5	Piezoeléctrico	155
2.7.3	Otros Transductores	155
2.7.3.1	Transductores digitales	156
2.7.3.2	Codificadores incrementales	156
2.7.3.3	Codificadores ópticos	157
2.7.3.4	Codificadores absolutos	158
2.7.4	Transductores de alcance	160
2.7.5	Bloques terminales	161
2.7.6	Hardware de acondicionamiento de señal	162
2.7.7	Hardware de adquisición de datos	162
2.7.8	Cables de conexión	162
2.7.9	Computador	163
2.7.10	Software	164
2.7.11	Programación grafica	165
2.8	Instrumentación Virtual	167
2.8.1	Que es la instrumentación Virtual	167
2.8.2	Cómo construir un instrumento virtual	169
2.8.3	Hacia dónde va encaminada la Instrumentación Virtual	171
2.8.4	Componentes de un sistema basado en instrumentación virtual	172
CAPITULO 3: Sistema de adquisición de datos		173
3.1	Conceptos generales	174
3.2	Funciones en la adquisición y distribución de señales	177
3.2.1	Transducción	178
3.2.2	Conversión analógica-digital Aislamiento	180
3.2.3	Acondicionamiento de señales	185
3.3	Arquitecturas para la distribución y adquisición de señales	187
3.4	Sistemas de bajo y alto nivel	187
3.4.1	Sistemas centralizados, descentralizados y distribuidos	192
3.4.2	Sistemas unibus y multibus	194
3.5	Los sistemas de ensayos: estímulo y medida	200
3.6	Sistemas en línea y fuera de línea	201

3.7	Sistemas integrados para adquisición de señales	203
3.8	Diseño de sistemas de adquisición y distribución de señales	204
3.8.1	Diseño sistemático	206
3.8.2	Realización del diseño	209
3.8.3	Verificación y corrección del diseño	211
Capitulo 4: Herramientas de Programación		212
4.1.1.	Introducción al software para el control de instrumentación y el diseño de instrumentos virtuales.	212
4.1.2.	Interfaz Grafica	213
4.1.3.	Programa de Control	214
4.1.4.	Adquisición de Datos	214
4.1.5.	Análisis de Datos	215
4.2.1.	Herramientas de Programación	215
4.2.2.	Labwindows/CVI	215
4.2.2.1.	Historia	217
4.2.2.2.	Programación de Labwindows/CVI	219
4.2.2.3.	User interface events	220
4.2.2.4.	Control de interfaz grafica GUI	222
4.2.2.5.	Conexión con el código fuente	222
4.2.2.6.	Librerías y drivers de instrumentos en labwindows/CVI	223
4.2.3.	HPVEE (Hp Visual Engineering Environment)	226
4.2.3.1.	Programación HPVEE	228
4.2.3.2.	Librería de prueba	230
4.2.3.3.	Program Shell (Interface del usuario al momento de la ejecución)	232
4.2.3.4.	Controladores de instrumento	234
4.2.4.	Lab View (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)	237
4.2.4.1.	Principales usos	238
4.2.4.2.	Características principales	239
4.2.4.3.	Historial	241
4.2.4.4.	Como trabaja LabView	242
4.2.4.4.1.	Panel Frontal	243
4.2.4.4.2.	Diagrama de bloques	244

4.2.4.4.3.	Paleta controles	246
4.2.4.4.4.	Paleta de funciones	248
4.2.4.5.	Programación en LabVIEW	252
4.2.4.6.	Ejecución de un VI	253
4.2.4.7.	Requerimientos del sistema	255
 Capítulo 5: Microcontroladores		256
5.1.1.	¿Qué es un Microcontrolador?	256
5.1.2.	Historia del PIC	258
5.1.3.	Características	259
5.1.3.1.	Arquitectura	260
5.1.3.2.	Segmentación	262
5.1.3.3.	Formato de las instrucciones	263
5.1.3.4.	Arquitectura basada en un banco de registro	264
5.1.3.5.	Modelos de arquitectura	265
5.1.4.	Características generales de los microcontroladores PIC	266
5.1.5.	Programación del PIC	267
5.1.6.	Las pilas en los PIC	269
5.1.7.	Alimentación y corrientes de salida	271
5.1.8.	Manera de clasificar los PICs	271
5.2.1.	Familia de Microcontroladores PIC	272
5.2.1.1.	La familia baja: PIC12C(F)XXX 8 pines	274
5.2.1.2.	La familia baja básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits	275
5.2.1.3.	Familia media: PIC16CXX con instrucciones de 14 bits	278
5.2.1.4.	Familia alta: PIC17CXX con instrucciones de 16 bits	281
5.2.2.	Familia de Microcontroladores PIC18	282
5.2.2.1.	Características especiales	285
5.2.2.2.	Conexión USB	286
5.2.2.3.	Funciones analógicas	289
5.2.2.4.	Puertas de entrada / salida	289
5.2.3.	PICs modernos	290

Marco Metodológico	
Capitulo 6: Desarrollo y fabricación del TDR virtual	291
6.1. Explicación y limitaciones	291
6.2. Arquitectura del TDR Virtual	296
6.3. Diagrama en bloques	296
6.4. Fabricación del módulo de adquisición de datos	298
6.5. Implementación del Circuito	302
6.5.1. Esquemático PIC	302
6.5.2. Circuito eléctrico del TDR	303
6.5.3. Firmware de Micro controlador	306
6.5.4. Calibración	308
6.6. Comunicación del módulo de adquisición de datos	315
6.6.1. Fundamentos	316
6.6.2. Teoría	317
6.6.3. Comunicación módulo de adquisición de datos y LabVIEW	318
6.7. Interfaz Grafica en LabVIEW	320
6.8. Análisis Financiero	322
Capitulo 7: Marco Jurídico	323
7.1 Licencias Departamentales, de Facultad y de Campo	323
7.2 ¿Con que frecuencia se distribuyen las versiones más recientes de los conjuntos de software?	324
Conclusión	326
Líneas Futuras	328
Bibliografía	329
Glosario	332
Anexos	334

INTRODUCCION

Hoy en día el desarrollo de la electrónica tiene importantes campos de aplicación. Uno de ellos es poder medir y saber diagnosticar un equipo o materiales de uso estratégico. Una herramienta que permita adquirir estos datos y una aplicación que lo despliegue en formato gráfico, sería de gran importancia para instruir como también aplicarlo al campo laboral de un técnico.

Uno de los problemas que esto engloba es que los equipos de medición en el mercado son muy caros para su adquisición y uso. La universidad como institución educadora podría hacer una inversión para adquirir estos equipos, los cuales servirían para instruir en el área de Telecomunicaciones. Además, del costo del equipo también existe la plataforma o software para representar gráficamente, lo cual también es caro adquirir.

Pero si construimos estos equipos a un costo asequible y logramos que tenga una interfaz de comunicación con la computadora, podríamos de manera grafica representar la magnitud de medida del equipo utilizando una plataforma o software. Con ello lograríamos tener la herramienta educativa.

Este equipo es llamado Reflectómetro de Dominio de Tiempo (TDR), y es utilizado para medir cables de comunicación, el cual se hablara en el presente

trabajo. Además, hablaremos de la interfaz que utilizaremos para poder representarlo gráficamente lo cual utilizamos LabVIEW y un circuito de adquisición de datos.

El capítulo I se presenta la reflectometría, las líneas de transmisión, teoría de dominio de tiempo y principios de operación del reflectómetro. En el capítulo II se presenta la Instrumentación, la cual contiene las señales, los efectos, los sensores y transductores. En el capítulo III se presenta el sistema de adquisición de datos, como se realiza y sus resultados. En el capítulo IV se presenta las herramientas de programación, ya esta parte es para representar la medida adquirida del módulo. En el capítulo V se presenta los micro controladores, los cuales son de gran ayuda en el circuito de adquisición de datos. En el capítulo VI se presenta el marco metodológico, en el cual se desarrollan los métodos y procedimientos para construir el módulo de adquisición de los datos como la programación gráfica en la herramienta utilizada. Por último el capítulo VII marco jurídico, el cual presenta las leyes que rigen una patente para un hardware y un software en República Dominicana.

Ubicación del área de estudio

El estudio de esta monografía está delimitado al laboratorio de telecomunicaciones de la universidad APEC. Que es el escenario principal para la formación académica práctica de los estudiantes de ingeniería electrónica en comunicaciones donde además, será puesto en práctica el desarrollo de este proyecto de investigación.

El mismo está ubicado en la tercera planta del edificio II del campus II (CAFAM) de la universidad APEC Santo Domingo R, D, situado en la avenida 27 de febrero esquina Caonabo.

Capítulo 1 Reflectometría de Dominio de Tiempo

1.1 Reflectometría

El método general para evaluar cualquier sistema electromagnético implica la resolución de las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo. El planteo de tal problema tendría en cuenta todos los efectos de las propiedades eléctricas y geométricas del sistema incluyendo los efectos de la línea de transmisión. Todo este método sería complicado para evaluar un simple conector por ejemplo, y aun más si se quiere evaluar una estructura más compleja.

Por esta razón se han desarrollado varios tipos de métodos para analizar la integridad de la señal a través de un elemento bajo prueba (EBP).

Estos métodos comprenden el uso de instrumental complejo como analizadores de redes o métodos de barrido de frecuencias que vuelven tediosa la operación. Por esto, se prefiere el método de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR, por sus siglas en inglés), cuando se lo compara con otras técnicas, este método provee una mirada más directa e intuitiva a las características del EBP.

La Reflectometría del dominio de tiempo es la técnica que consiste en enviar una señal eléctrica por un cable y luego medir el tiempo que tarda la señal reflejada desde el extremo del cable.

1.1.1 Líneas de Transmisión de comunicaciones

En las comunicaciones, las líneas de transmisión llevan señales telefónicas, datos de computadoras en redes de Área Local (LAN, Local Area Network), señales de televisión en sistemas de televisión por cable y señales de un transmisor a una antena o de una antena a un receptor. Las líneas de transmisión son enlaces importantes en cualquier sistema. Son más que tramos de alambre o cable. Sus características eléctricas son sobresalientes, y se deben igualar a las del equipo para obtener comunicaciones adecuadas.

Las líneas de transmisión también son circuitos. En frecuencias muy altas donde las longitudes de onda son cortas, las líneas de transmisión actúan como circuitos resonantes y aun como componentes reactivos en VHF y UHF, y frecuencias de microondas, la mayor parte de los circuitos sintonizados y filtros se utilizan con líneas de transmisión.

1.1.1.1 Antecedentes de las líneas de transmisión

El primer cable submarino. Thomson y Heaviside.

En la década de 1830 Samuel Morse había establecido la posibilidad práctica de enviar mensajes mediante corrientes eléctricas a lo largo de hilos conductores, enviando un mensaje desde Baltimore a Washington. Poco a poco gran parte de los países europeos y Estados Unidos tendieron redes de telegrafía que comunicaron las grandes ciudades. El siguiente paso sería establecer una comunicación intercontinental, para lo cual se requería instalar un cable submarino. En 1851 se estableció una conexión entre Inglaterra y Francia.

En 1856 se creó la Atlantic Telegraph Company con un capital de £ 350.000 (entonces equivalentes a unos US\$ 1.400.000), presidida por el empresario norteamericano Cyrus Field, cuyo único propósito era tender el primer cable trasatlántico. Uno de sus diecisiete directores era el profesor de filosofía natural de la Universidad de Glasgow, William Thomson.

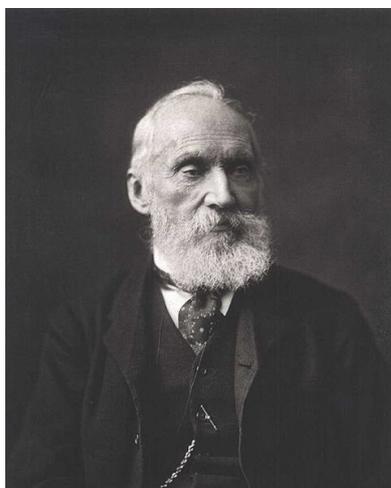


Imagen obtenida de Wikimedia Free

Figura 1-1 William Thomson, Lord Kelvin

En 1854 Thomson había aplicado el método de Fourier quien había resuelto el problema de la transmisión del calor a la propagación de los impulsos eléctricos en un cable largo. El modelo de Thomson era equivalente al que hemos propuesto para una línea con pérdidas, pero sin considerar los efectos inductivos ($L = 0$) ni pérdidas dieléctricas ($G = 0$). Llegaba así a ecuaciones del tipo:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RGv + (RC + LG) \frac{\partial v}{\partial t} + LC \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \rightarrow \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} = RC \frac{\partial v}{\partial t}$$

Ecuación 1-1

Que es una ecuación de difusión del tipo de la transmisión del calor. No existe para una perturbación que siga esta ecuación diferencial una velocidad

definida. Ante un estímulo en forma de escalón la respuesta es una función error:

$$i(z, t) = \sqrt{\frac{C}{\pi R t}} \exp\left(-\frac{RCz^2}{4t}\right) \quad \text{Ecuación 1-2}$$

Para una línea de longitud L, el máximo de corriente se da para:

$$t_{\max} = \frac{1}{2} RCL^2 \quad \text{Ecuación 1-3}$$

Esta es, la famosa “ley de cuadrados” que encontró Thomson. Significa que, si se aplica un pulso telegráfico a la entrada de la línea, el tiempo que tarda en llegar al otro extremo es proporcional al cuadrado de la longitud de la línea. La tarea de colocar el cable se dividió entre dos barcos, la fragata norteamericana Niágara y el buque de guerra británico Agamenón.

El plan era navegar hasta el punto medio del tendido y desde allí el Niágara colocaría el cable hacia Norteamérica y el Agamenón colocaría el cable hacia Inglaterra. El tendido comenzó el 30 de julio de 1857. Luego de muchas rupturas, la colocación se completó finalmente en el quinto intento más de un año después, el 5 de agosto de 1858. Los dos puntos extremos del tendido eran

Valentía Harbour, en Irlanda, y Trinity Bay en Newfoundland. El 16 de agosto se estableció la primera comunicación, con el mensaje: "*Glory to God in the highest, and on earth, peace, good will to men*". Sin embargo, el cable dejó de funcionar tres semanas después. El "electricista" a cargo, un aficionado llamado O. E. W. Whitehouse, era en realidad un médico retirado que se había dedicado a la electricidad y la telegrafía y no tenía una comprensión acabada de los fenómenos involucrados.

Por ejemplo, dijo sobre el modelo teórico de Thomson y su ley de cuadrados:

"Con toda honestidad, estoy obligado a responder que creo que la naturaleza no conoce tal Aplicación de esa ley, y la puedo solamente considerar como una ficción de las escuelas, una forzada y violenta adaptación de un principio en Física, bueno y verdadero bajo otras circunstancias, pero mal aplicado aquí."

Para lograr detectar la muy débil señal telegráfica, en lugar de usar instrumentos más sensibles, Whitehouse optó por aumentar la tensión aplicada al cable, lo que causó que el cable se cortocircuitara en puntos débiles del aislante de gutapercha. Luego de un estudio de las causas de la salida de funcionamiento del cable transatlántico, Whitehouse fue despedido.

En un segundo intento se tomaron en cuenta los estudios de Thomson. Se utilizó cable de cobre de la mejor calidad disponible y con una sección casi tres veces mayor del cable original, lo que disminuía la resistencia por unidad de longitud, mejorando el rendimiento. También Thomson insistió en lograr una mayor fortaleza y mejorar el aislamiento para evitar la acción del agua de mar, así como disminuir las tensiones de trabajo, para lo cual desarrolló un nuevo instrumento, *el galvanómetro de espejo*, que podía medir corrientes muy pequeñas. El segundo intento de colocar el cable submarino, realizado entre el 14 de julio de 1865 y el 28 de julio de 1866, fue exitoso y se pudieron establecer comunicaciones transatlánticas permanentes. En la figura se muestra la estación de recepción del telégrafo trasatlántico en Valentía, Irlanda 4.

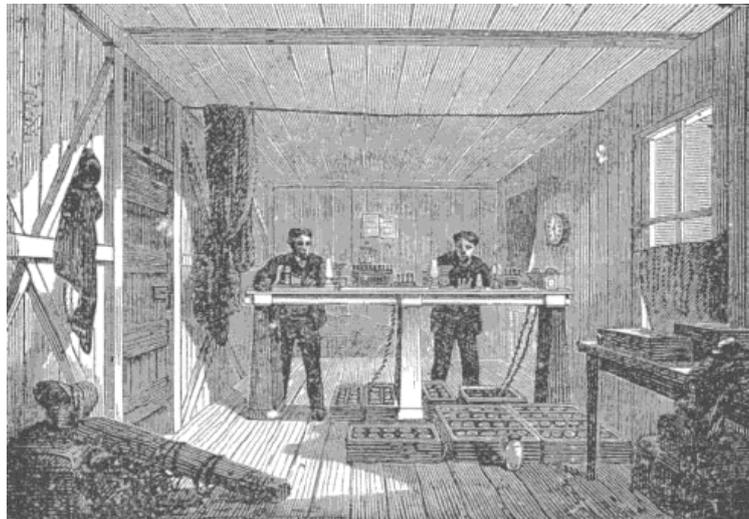


Figura 1-2 Estación de recepción del telégrafo trasatlántico en Valentía, Irlanda 4.

El primer mensaje enviado fue:

"A treaty of peace has been signed between Austria and Prussia". Relatos de la época hablan de la fascinación de los operadores porque los mensajes se recibían horas antes de que fueran enviados, debido a la diferencia de huso horario entre los extremos del cable). Casi inmediatamente, el uso del cable fue abierto comercialmente pero sólo los muy ricos podían utilizarlo: las tarifas iniciales eran desde US\$ 1 por carta, pagables en oro, en una época en que el salario mensual de un trabajador era del orden de US\$ 20. El cable original colocado en 1866 dejó de operar en 1872, pero ya había otros cuatro cables transatlánticos en uso para esa fecha. Para valorar la importancia de este desarrollo de la ingeniería, debe señalarse que para 1890 había ya más de 150 mil kilómetros de cables submarinos comunicando todo el mundo, y que recién en la década de 1960 el lanzamiento de los primeros satélites de comunicaciones presentó una alternativa a los cables submarinos.

En noviembre de 1866 Thomson fue elevado a la categoría de par del reino británico bajo el título de Lord Kelvin of Largs por sus logros en relación al cable submarino.

El Kelvin es el río que atraviesa el terreno de la universidad de Glasgow y Largs es el pueblo sobre la costa escocesa donde Thomson construyó su

residencia. Dentro de la investigación en el electromagnetismo, Thomson introdujo en 1850 las nociones de susceptibilidad y permeabilidad magnética, junto con los conceptos de B, H y M, en 1853 usó la teoría magnética de Poisson para encontrar las ecuaciones de la energía magnética en términos de los campos, por una parte, y de la corriente circulante y la inductancia, por otra. Ese mismo año halló la ecuación del circuito RLC, lo que dio una descripción matemática a observaciones experimentales de Henry y Savery. Ya hemos hablado de su modelo mecánico del electromagnetismo que inspiró los primeros modelos de Maxwell.

En 1857 Gustav Kirchhoff encontró las ecuaciones del telegrafista para una línea coaxial. También halló que, si la resistencia del cable es pequeña, estas ecuaciones llevan a la ecuación de ondas con una velocidad $v = 1/\sqrt{LC}$ que para un cable coaxial da un valor muy cercano a la velocidad de la luz. Kirchhoff se da cuenta de esta coincidencia y es así el primero en hallar que las señales electromagnéticas viajan a la velocidad de la luz.

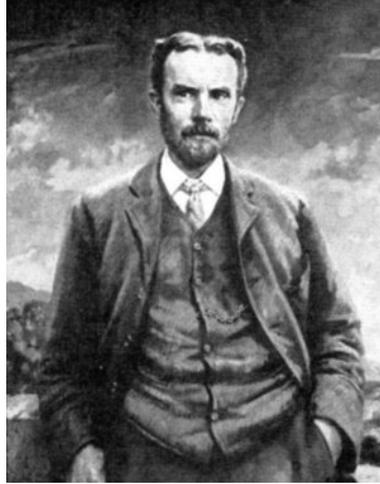


Imagen obtenida de Wikimedia Free
Figura 1-3 Oliver Heaviside

Las ideas de la propagación de ondas en cables fueron retomadas y completadas, usando el método operacional que él mismo inventó, por Oliver Heaviside (foto).

Heaviside no tuvo educación formal, ya que abandonó sus estudios a los 16 años. Aprendió el código Morse y se dedicó a ser operador telegráfico. A pesar de su falta de rigor matemático, Heaviside estudió el Treatise de Maxwell y consiguió reducir las veinte ecuaciones (escalares) con veinte incógnitas halladas por Maxwell a sólo dos ecuaciones (vectoriales) con dos incógnitas en el vacío. Logró esta hazaña inventando el análisis vectorial.

Por este motivo las actuales ecuaciones de Maxwell deberían llamarse de Maxwell-Heaviside. Por su falta de rigor, la idea revolucionaria de Heaviside tuvo pocos seguidores. Los físicos que trabajaban con las ecuaciones de Maxwell estaban influenciados por el modelo de cuaterniones, desarrollado por el mismo Maxwell y Tait. Sólo Heinrich Hertz, que iba a alcanzar fama mundial por su comprobación experimental de que las ondas electromagnéticas se propagan a la velocidad de la luz, entendió la importancia de los trabajos de Heaviside y Gibbs y en 1892 publicó un trabajo riguroso donde llega a la notación actual de las ecuaciones del electromagnetismo.

Entre 1880 y 1887 Heaviside desarrolló el cálculo operacional para estudiar los circuitos eléctricos, que permite pasar de modelos basados en ecuaciones diferenciales a ecuaciones algebraicas. Este es el método de la transformada de Laplace que hoy en día es el método normal de análisis de circuitos. A pesar del evidente éxito de este método, la falta de rigor matemático de las presentaciones de Heaviside hizo que no tuviera aceptación amplia hasta 1906 en que su fundamentación rigurosa fue establecida por el matemático inglés Thomas Bromwich.

Heaviside también se dedicó a la propagación de ondas en las líneas telegráficas. Redescubrió las ecuaciones del telegrafista que ya había hallado Kirchhoff. Heaviside se dio cuenta que el efecto de la inductancia de la línea

puede llevar a la condición de propagación sin distorsión por lo que sugirió aumentar la inductancia agregando inductores a lo largo de la línea.

En 1883 comienza a analizar la propagación de ondas electromagnéticas en conductores. En forma independiente en 1885 Heaviside y el físico Horace Lamb describieron por primera vez el efecto pelicular en conductores, que hace que la distribución de corriente a altas frecuencias no sea uniforme y haya una concentración de corriente sobre la periferia del conductor, modificando así su resistencia.

En 1902 y en forma casi simultánea Heaviside y el ingeniero norteamericano Arthur Kennelly anunciaron la probable existencia de una capa atmosférica de gas ionizado que afectaría la propagación de las ondas electromagnéticas. La capa de Heaviside-Kennelly es una de las capas de la ionosfera, cuya existencia fue corroborada experimentalmente en 1923.

1.1.2 Definición de línea de transmisión

Una línea de transmisión es un sistema conductor metálico que se utiliza para transferir energía eléctrica de un lugar a otro. Más específicamente, una línea de transmisión son dos o más conductores separados por un aislante, como un par de cables o un sistema de par de hilos. Una línea de transmisión puede ser tan corta como unas cuantas pulgadas o puede extenderse por varios

miles de millas. Las líneas de transmisión se pueden utilizar para propagar energía de baja frecuencia (como energía eléctrica de 60 ciclos y señales de audio); también se pueden utilizar para propagar frecuencias muy altas (como señales de frecuencias de radio e intermedias). Al propagar las señales de baja frecuencia, es bastante sencillo y predecible el comportamiento de la línea de transmisión. Sin embargo, al propagar las señales de alta frecuencia las características de las líneas de transmisión se vuelven más complicadas.

1.1.3 Fundamento de las líneas de transmisión

Hay dos requerimientos principales en una línea de transmisión: 1) la línea deberá introducir la mínima atenuación y distorsión a la señal y 2) la línea no deberá radiar señal alguna como energía radiada. Todas las líneas de transmisión y sus conectores se diseñan con estos requerimientos.

1.1.4 Tipos de línea de transmisión

Las líneas de transmisión pueden clasificarse generalmente como balanceadas o desbalanceadas. Con líneas balanceadas de dos cables, ambos conductores llevan una corriente; un conductor lleva la señal y el otro es el regreso. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal diferencial o balanceada. La señal que se propaga a lo largo del cable se mide como la

diferencia potencial entre los dos cables. La figura 1-4 muestra un sistema de transmisión balanceada. Ambos conductores, en una línea balanceada, llevan la corriente de la señal, y las corrientes son iguales en magnitud con respecto a la tierra eléctrica pero viajan en direcciones opuestas. Las corrientes que fluyen en direcciones opuestas por un par de cables balanceados se les llaman corrientes de circuito metálico. Las corrientes que fluyen en las mismas direcciones se llaman corrientes longitudinales. Un par de cables balanceado tienen la ventaja que la mayoría de la interferencia por ruido (a veces llamada el voltaje de modo común) se induce igualmente en ambos cables, produciendo corrientes longitudinales que se cancelan en la carga. Cualquier par de cables puede operar en el modo balanceado siempre y cuando ninguno de los cables esté con el potencial a tierra. Esto incluye el cable coaxial que tiene dos conductores centrales y una cubierta metálica. La cubierta metálica generalmente se conecta a tierra para evitar interferencia estática al penetrar a los conductores centrales.

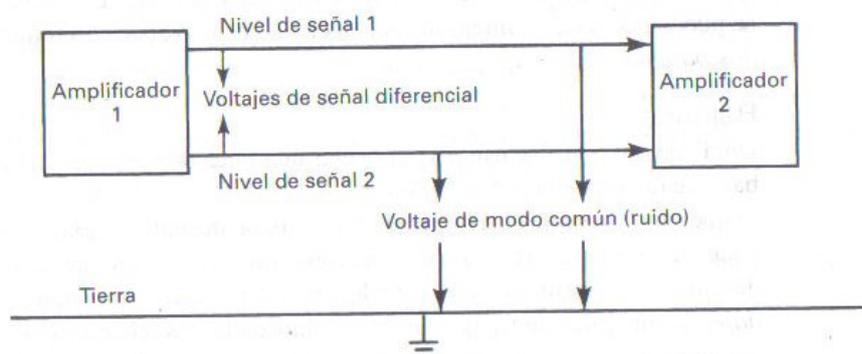


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi
Figura 1-4 Sistema de transmisión diferencial o balanceada

La figura 1-5 muestra el resultado de las corrientes metálicas y longitudinales en una línea de transmisión balanceada. Puede verse que las corrientes longitudinales (frecuentemente producidas por la interferencia estática) se cancelan en la carga.

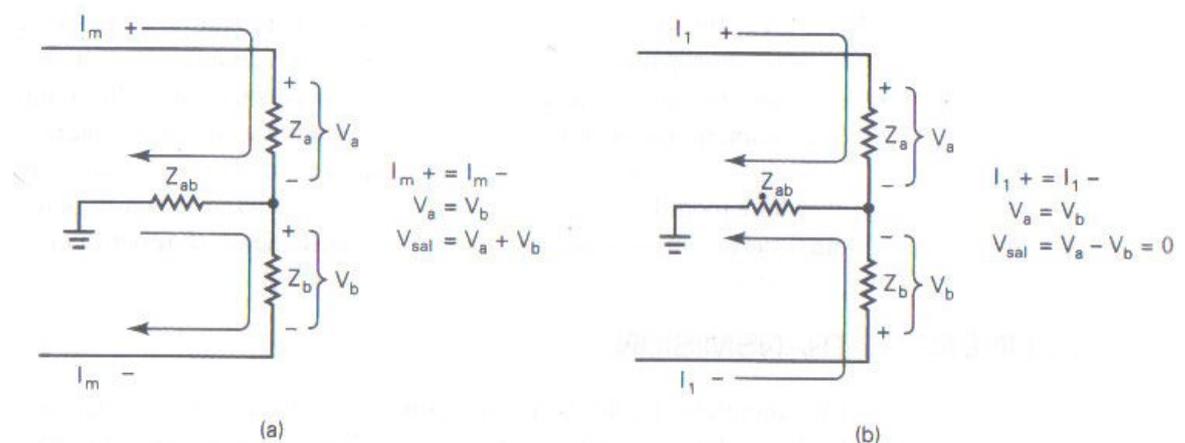


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi

Figura 1-5 Resultados de las corrientes metálicas y longitudinales, en una línea de transmisión balanceada: (a) corrientes metálicas debido a voltajes de señal; (b) corrientes longitudinales debido a los voltajes de ruido.

Con una línea de transmisión desbalanceada, un cable se encuentra en el potencial de tierra, mientras que el otro cable se encuentra en el potencial de la señal. Este tipo de transmisión se llama transmisión de señal desbalanceada o de terminación sencilla. Con la transmisión de señal desbalanceada, el cable de tierra también puede ser la referencia a otros cables que llevan señales. Si éste es el caso, el cable a tierra debe ir en donde va cualquiera de los cables de

señal. A veces esto crea un problema porque una longitud de cable tiene resistencia, inductancia, y capacitancia, por lo tanto, puede existir una pequeña diferencia de potencial, entre cualquiera de los dos puntos, en el cable de tierra. En consecuencia, el cable de tierra no es un punto de referencia perfecto y es capaz de inducir un ruido en él. Un cable coaxial estándar de dos conductores es una línea desbalanceada. El segundo cable es la cubierta, que generalmente se conecta a tierra.

La figura 1-6 muestra dos sistemas de transmisión desbalanceada. La diferencia de potencial en cada cable de señal se mide, desde ese cable de tierra. Las líneas de transmisión balanceadas pueden conectarse a líneas desbalanceadas, y viceversa, por medio de transformadores especiales llamados *balunes*.

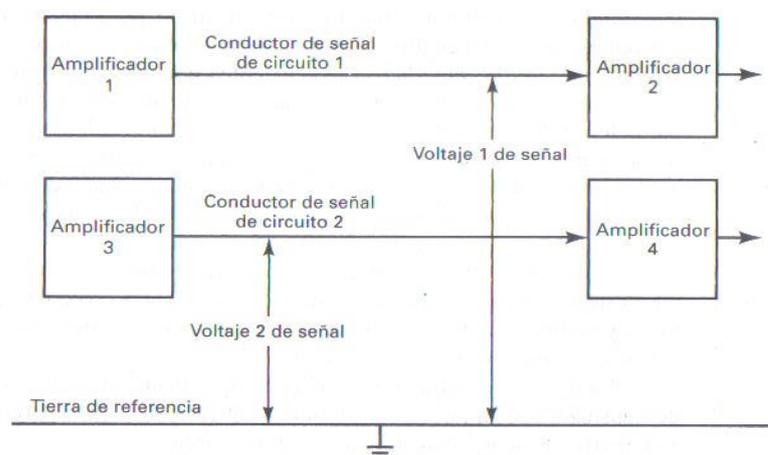


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi
Figura 1-6 Sistema de transmisión desbalanceado o de terminación sencilla.

1.1.4.1 Líneas de transmisión de conductor paralelo

Línea de transmisión de cable abierto. Una línea de transmisión de cable abierto es un conductor paralelo de dos cables, y se muestra en la figura 1-7a. Consiste simplemente de dos cables paralelos, espaciados muy cerca y sólo separados por aire. Los espaciadores no conductivos se colocan a intervalos periódicos para apoyarse y mantenerse a la distancia, entre la constante de los conductores. La distancia entre los dos conductores generalmente está entre 2 y 6 pulgadas. El dieléctrico es simplemente el aire, entre y alrededor de los dos conductores en donde se propaga la onda transversal electro magnética (TEM por sus siglas en ingles). La única ventaja real de este tipo de línea de transmisión es su construcción sencilla. Ya que no hay cubiertas, las pérdidas por radiación son altas y es susceptible a recoger ruido. Estas son las desventajas principales de una línea de transmisión de cable abierto. Por lo tanto, las líneas de transmisión de cable abierto normalmente operan en el modo balanceado.

Cables gemelos (doble terminal). Los cables gemelos son otra forma de línea de transmisión para un conductor paralelo de dos cables, y se muestra en la figura 1-7b. Los cables gemelos frecuentemente son llamados cable de cinta.

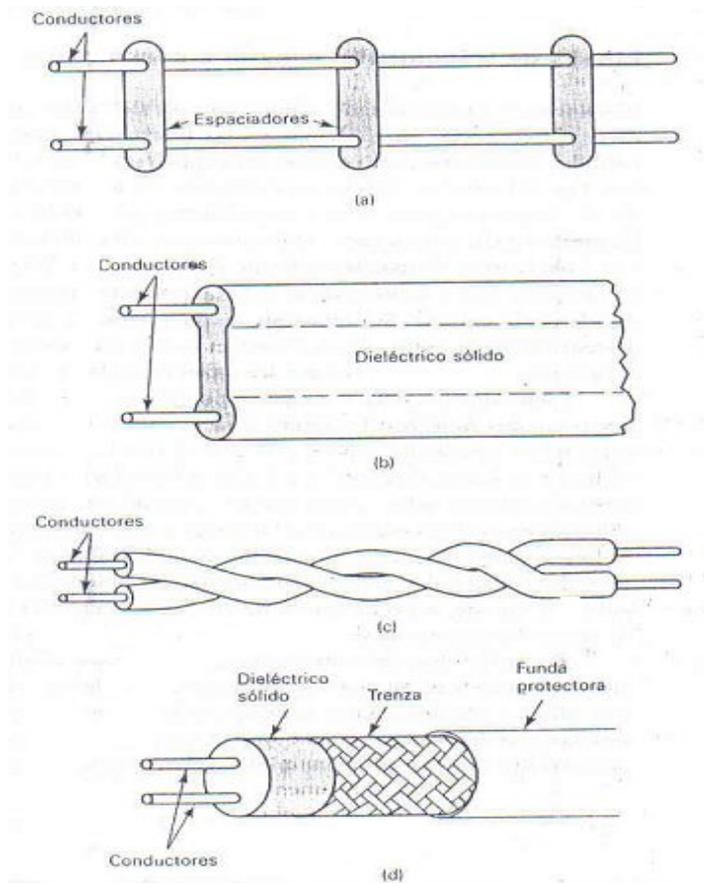


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi

Figura 1-7 Líneas de transmisión: (a) cable abierto; (b) cables gemelos; (c) par trenzado; d) par protegido

Los cables gemelos esencialmente son igual que una línea de transmisión del cable abierto, excepto que los espaciadores que están entre los dos conductores se reemplazan con un dieléctrico sólido continuo. Esto asegura los espacios uniformes a lo largo de todo el cable, que es una característica deseable. Típicamente, la distancia entre los dos conductores es de $5/16$ de

pulgada, para el cable de transmisión de televisión. Los materiales dieléctricos más comunes son el teflón y el polietileno.

1.1.4.2. Cable de par trenzado

Un cable de par trenzado se forma doblando ("trenzado") dos conductores aislados juntos. Los pares se trenzan frecuentemente en *unidades*, y las unidades, a su vez, están cableadas en el núcleo. Estas se cubren con varios tipos de *fundas*, dependiendo del uso que se les vaya a dar. Los pares vecinos se trenzan con diferente inclinación (el largo de la trenza) para poder reducir la interferencia entre los pares debido a la inducción mutua. Las constantes primarias del cable de par trenzado son sus parámetros eléctricos (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia), que están sujetas a variaciones con el ambiente físico como temperatura, humedad y tensión mecánica, y que dependen de las variaciones en la fabricación. En la figura 1-7c se muestra un cable de par trenzado.

1.1.4.3 Par de cables protegido con armadura

Para reducir las pérdidas por radiación e interferencia, frecuentemente se encierran las líneas de transmisión de dos cables paralelos en una malla metálica conductiva. La malla se conecta a tierra y actúa como una protección.

La malla también evita que las señales se difundan más allá de sus límites y evita que la interferencia electromagnética llegue a los conductores de señales. En la figura 1-7d se muestra un par de cables paralelos protegido. Consiste de dos conductores de cable paralelos separados por un material dieléctrico sólido. Toda la estructura está encerrada en un tubo trenzado conductivo y luego cubierto con una capa protectora de plástico.

1.1.4.4 Líneas de transmisión coaxial o concéntrica

Las líneas de transmisión de conductores paralelos son apropiadas para las aplicaciones de baja frecuencia. Sin embargo, en las frecuencias altas, sus pérdidas por radiación y pérdidas dieléctricas, así como su susceptibilidad a la interferencia externa son excesivas. Por lo tanto, los conductores coaxiales se utilizan extensamente, para aplicaciones de alta frecuencia, para reducir las pérdidas y para aislar las trayectorias de transmisión. El cable coaxial básico consiste de un conductor central rodeado por un conductor exterior concéntrico (distancia uniforme del centro). A frecuencias de operación relativamente altas, el conductor coaxial externo proporciona una excelente protección contra la interferencia externa. Sin embargo, a frecuencias de operación más bajas, el uso de la protección no es costeable. Además, el conductor externo de un cable coaxial generalmente está unido a tierra, lo que limita su uso a las aplicaciones desbalanceadas.

Esencialmente, hay dos tipos de cables coaxiales: líneas rígidas llenas de aire y líneas sólidas flexibles. La figura 1-8a muestra una línea coaxial rígida de aire. Puede verse que el conductor central está rodeado en forma coaxial por un conductor externo tubular y el material aislante es el aire. El conductor externo físicamente está aislado y separado del conductor central por un espaciador, que generalmente está hecho de Pires, polietileno, o algún otro material no conductor. La figura 1-8b muestra un cable coaxial sólido flexible. El conductor externo está tréncalo, es flexible y coaxial al conductor central. El material aislante es un material de polietileno sólido no conductor que proporciona soporte, así como aislamiento eléctrico entre el conductor interno y el externo. El conductor interno es un cable de cobre flexible que puede ser sólido o hueco.

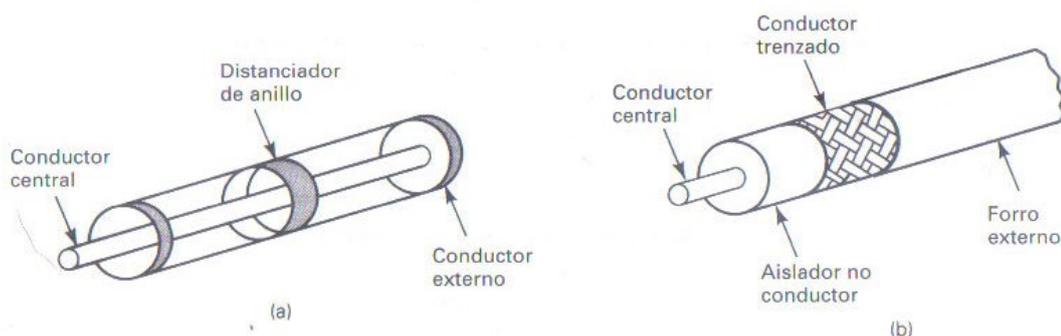


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi

Figura 1-8 Líneas de transmisión concéntrica o coaxial (a) rígidas llenas de aire; (b) línea sólida flexible

Los cables coaxiales rígidos llenos de aire son relativamente caros de fabricar, y el aislante de aire tiene que estar relativamente libre de humedad para minimizar las pérdidas. Los cables coaxiales sólidos tienen pérdidas menores y son más fáciles de construir de instalar, y de dar mantenimiento. Ambos tipos de cables coaxiales son relativamente inmunes a la radiación externa, ellos en si irradian muy poca, y pueden operar a frecuencias más altas que sus contrapartes de cables paralelos. Las desventajas básicas de las líneas de transmisión coaxial es que son caras y tienen que utilizarse en el modo desbalanceado.

1.1.4.5 Balunes

Un dispositivo de circuitos que se utiliza para conectar una línea de transmisión balanceada a una carga desbalanceada se llama *balun* (balanceado a desbalanceado). O más comúnmente, una línea de transmisión desbalanceada, como un cable coaxial, se puede conectar a una carga balanceada, como una antena, utilizando un transformador especial con un primario desbalanceado y un bobinado secundario con conexión central. El conductor externo (protector) de una línea de transmisión coaxial desbalanceada generalmente se conecta a tierra. A frecuencias relativamente bajas, puede utilizarse un transformador ordinario para aislar la tierra de la carga, como se

muestra en la figura 1-9a. El balun debe tener una protección electrostática conectada a tierra física para minimizar los efectos de capacitancias dispersas.



Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi
Figura 1-9 Balunes: (a) balun de transformador; (b) balun de bazuca

Para las frecuencias relativamente altas, existen varios tipos diferentes de *balunes* para las líneas de transmisión. El tipo más común es un balun de *banda angosta*, llamado a veces balun *choque*, *camisa* o balun de *bazuca*, como se muestra en la figura 1-9b. Se coloca alrededor una camisa de un cuarto de longitud de onda y se conecta al conductor externo de un cable coaxial. En consecuencia, la impedancia que se ve, desde la línea de transmisión, está formada por una camisa y el conductor externo y es igual a infinito (o sea, que el conductor externo ya no tiene una impedancia de cero a tierra). Así que, uno de los cables del par balanceado se puede conectar a la camisa sin hacer un cortocircuito a la señal. El segundo conductor se conecta al conductor interno del cable coaxial.

1.2. Reflectometría de dominio de tiempo

Los cables metálicos, como todos los componentes, dentro de un sistema de comunicación electrónica, pueden desarrollar problemas que inhiben su habilidad de funcionar como se espera. Los problemas con los cables frecuentemente crean situaciones únicas, porque los cables con frecuencia se extienden sobre distancias largas, a veces, hasta varios miles de pies, o más. Los problemas con los cables se atribuyen frecuentemente a la emisión química, en puntos con conexiones cruzadas, y a fallas mecánicas. Cuando ocurre un problema con un cable, puede consumirse mucho tiempo y, en consecuencia, puede ser bastante costoso, para determinar el tipo y el lugar exacto donde ocurre el problema.

Una técnica que puede utilizarse para localizar el deterioro de un cable metálico se llama Reflectometría del Dominio del Tiempo (TDR). Con TDR, los deterioros en la línea de transmisión pueden localizarse en un radio de varios pies, en distancias de 10 millas. TDR hace uso de la teoría, bien establecida, que dice que el deterioro de las líneas de transmisión, como cortos y abiertos, hace que una porción de la señal incidente regrese a la fuente. Cuanto regresa, depende del tipo de la magnitud del deterioro. El punto en la línea donde el deterioro se localiza representa una discontinuidad de la señal. Esta

discontinuidad hace que una parte de la señal transmitida sea reflejada, en lugar de que continúe a lo largo del cable. Si no regresa la energía (o sea, que la línea de transmisión y la carga están perfectamente acopladas), la línea esta infinitamente larga o está terminada en una carga resistiva con una impedancia igual a la impedancia característica de la línea. TDR opera de forma similar a un radar. Un pulso de corta duración con un rápido tiempo de elevación se propaga a lo largo del cable; luego se mide el tiempo para que una porción de esa señal regrese a la fuente. Esta señal de retorno se llama, a veces eco. Conociendo la velocidad de propagación en el cable, puede determinarse la distancia exacta entre el deterioro y la fuente utilizando las siguientes relaciones matemáticas:

$$d = \frac{v \times t}{2} \qquad \text{Ecuación 1-4}$$

En donde d = distancia a la discontinuidad (metros)

v = velocidad (metros/segundo)

$v = k \times c$ (metros/segundo)

k = factor de velocidad (v/c)

$c = 3 \times 10^8$ metros/segundo

t = tiempo transcurrido (segundos)

El tiempo transcurrido se mide del borde delantero del pulso transmitido a la recepción de la señal reflejada, como se muestra en la figura 1-10a. Es importante que el pulso transmitido sea tan angosto como sea posible. De otra forma, cuando se localice el deterioro cerca de la fuente, la señal reflejada podría regresarse, mientras que el pulso este transmitiendo todavía (figura 1-0b), dificultando su detección. Para las señales que viajan a la velocidad de la luz (c), la velocidad de propagación es 3×10^8 m/s o aproximadamente 1 ns/pie. En consecuencia, un ancho de pulso de varios microsegundos limitaría la utilidad de la TDR a solo los deterioros del cable que ocurrieran a varios miles de pies de distancia o más. Uno de los factores que limitaban el desarrollo de la TDR era producir un pulso extremadamente angosto para localizar las fallas de los cables en cortos.

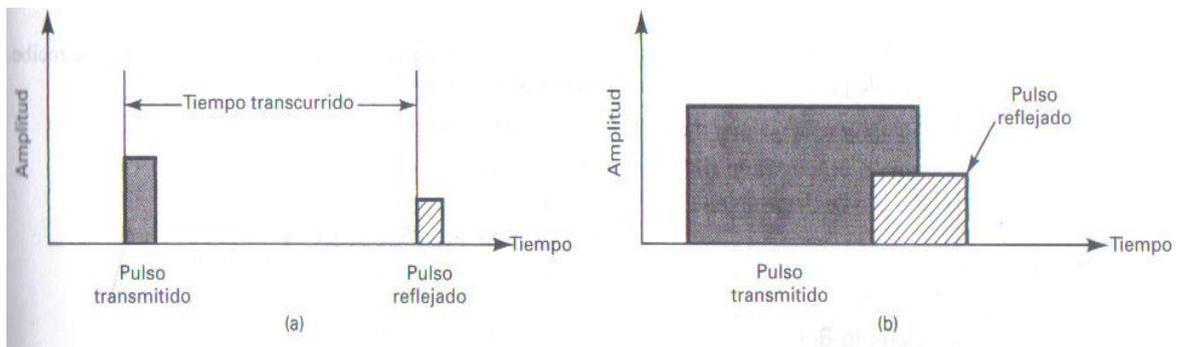


Imagen obtenida del libro COMUNICACIONES ELECTRONICAS por Wayne Tomasi

Figura 1-10 Reflectometría del dominio del tiempo: (a) tiempo transcurrido; (b) pulso transmitido demasiado largo.

1.2.1. Teoría de la Reflectometría de dominio de tiempo

El acercamiento más general para evaluar la respuesta del dominio de tiempo de cualquier sistema electromagnético es solucionar las ecuaciones del maxwell en el dominio de tiempo. En este procedimiento se tendrán en cuenta todos los efectos del sistema de geometría y propiedades eléctricas, incluyendo efectos de línea de transmisión. Sin embargo, esto sería más bien involucrados, incluso para un simple conector y aún más complicado para una estructura como una backplane multicapa de alta velocidad. Por esta razón, los varios métodos de prueba y de medida se han utilizado para asistir al ingeniero electrónico para analizar la integridad de señal.

El método más común para la evaluación de una línea de transmisión y de su carga tradicionalmente ha implicado la aplicación de una onda sinusoidal a un sistema y el medir la resultante de las discontinuidades en la línea. A partir de estas mediciones, la relación de ondas (σ) se calcula y se utiliza como factor de mérito para el sistema de transmisión. Cuando el sistema incluye varias discontinuidades, sin embargo, la medida de la razón de onda estacionaria (SWR: Standing wave Ratio por sus siglas en ingles) falla al aislarlas. Además, cuando la calidad del ancho de banda de un sistema de transmisión debe ser determinada, las medidas de SWR se deben hacer en muchas frecuencias. Este método pronto llega a consumir tiempo y se torna tedioso.

Otro instrumento común para evaluar una línea de la transmisión es el analizador de red. En este caso, un generador de señales produce una senoide cuya frecuencia de barrido es para estimular el dispositivo bajo prueba (DBP). El analizador de red mide las señales reflejadas y transmitidas del DBP. La forma de onda reflejada se puede exhibir en varios formatos, incluyendo SWR y coeficiente de reflexión. Un formato equivalente de TDR puede ser exhibido solamente si el analizador de red se equipa del software apropiado para realizar una transformada rápida de Fourier inversa (IFFT). Este método funciona bien si el usuario se siente cómodo al trabajar con los parámetros en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, si el usuario no está familiarizado con estas herramientas orientadas a microondas, la curva de aprendizaje es bastante inclinada. Además, la mayoría de los diseñadores digitales prefieren trabajar en el dominio del tiempo con analizadores lógicos y osciloscopios de alta velocidad.

Cuando está comparado a otras técnicas de medida, la Reflectometría del Dominio de Tiempo proporciona una mirada más intuitiva y más directa en las características del DBP. Usando un generador de escalón y un osciloscopio, un borde rápido se lanza en la línea de la transmisión bajo investigación. La señal incidente y las ondas reflejadas del voltaje son supervisadas por el osciloscopio en un punto particular en la línea.

Esta técnica de eco (véase la Figura 1-11) muestra de un vistazo la impedancia característica de la línea, y muestra tanto la posición y la naturaleza (resistiva, inductiva o capacitiva) de cada discontinuidad en la misma línea. En esta nota de aplicación se demuestra también si las pérdidas en un sistema de transmisión de la serie son las pérdidas o pérdidas de derivación. Toda esta información está disponible de inmediato de la pantalla del osciloscopio. En el mismo contexto también da más información significativa acerca de la respuesta de ancho de banda de un sistema de transmisión que cualquier otra técnica de medición.

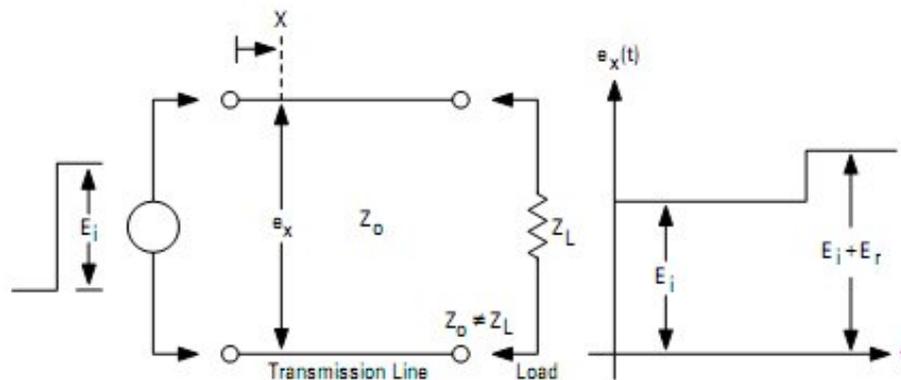


Figura 1- 11 Voltaje vs el tiempo en un punto particular de la misma línea de transmisión.

1.2.1.1. Propagación en una línea de transmisión

La línea de transmisión clásica se supone que constan de una estructura de R's, L's y C's, como se muestra en la Figura 1-12. El estudio de este circuito equivalente, varias características de la línea de transmisión se puede determinar.

Si la línea es infinitamente larga y R, L, G, y C se definen por unidad de longitud y, a continuación,

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Ecuación 1-5

Donde Z_0 es la impedancia característica de la línea. Una tensión introducida en el generador requerirá un tiempo finito para viajar por la línea hasta el punto x. La fase del voltaje que baja la línea se retrasará detrás del voltaje introducido en el generador por una cantidad β por longitud de unidad. Además, la tensión será atenuada por una cantidad por unidad de longitud de la serie de resistencia y conductancia de derivación de la línea. El cambio de fase y la atenuación son definidos por la propagación constante γ , cuando

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Ecuación 1-6

y α = atenuación por unidad de longitud en nepers

β = cambio de fase en radianes por unidad de longitud

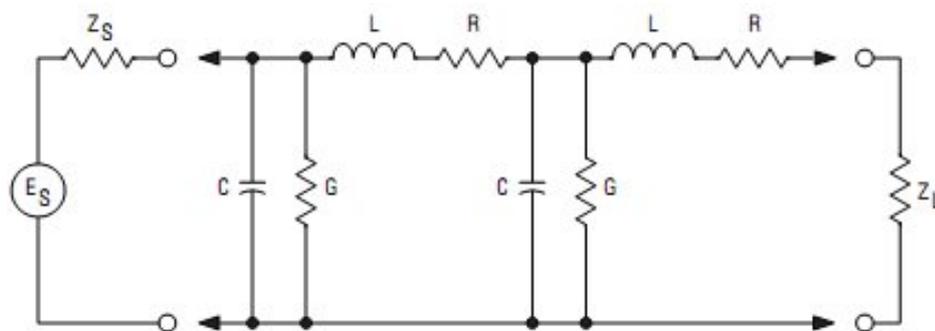


Figura 1-12 El clásico modelo de línea de transmisión

La velocidad a la que viaja por el voltaje de la línea se puede definir en términos de β :

Donde $v_p = \frac{\omega}{\beta}$ unidad de longitud por segundo

Ecuación 1-7

La velocidad de propagación se aproxima a la velocidad de la luz, v_c , para líneas de transmisión con aire como dieléctrico. Para el caso general, donde ϵ_r es la constante dieléctrica:

$$v_p = \frac{v_c}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Ecuación 1-8

La constante de propagación γ se puede utilizar para definir el voltaje y la corriente en cualquier distancia x en una infinitamente larga línea por las relaciones

$$E_x = E_{in} e^{-\gamma x} \text{ and } I_x = I_{in} e^{-\gamma x}$$

Ecuación 1-9

Dado que el voltaje y la corriente están relacionadas en cualquier punto de la impedancia característica de la línea

$$Z_0 = \frac{E_{in} e^{-\gamma x}}{I_{in} e^{-\gamma x}} = \frac{E_{in}}{I_{in}} = Z_{in}$$

Ecuación 1-10

Donde E_{in} = voltaje incidente

I_{in} = corriente incidente

Cuando la línea de transmisión es limitada en longitud y termina en una carga cuya impedancia característica coincide con la impedancia de la línea, la tensión actual y las relaciones están satisfechas por las anteriores ecuaciones.

Si la carga es diferente de la Z_0 , estas ecuaciones no se cumplen a menos que una segunda ola se considere que se originan en la carga y para propagar copias de seguridad de la línea hacia la fuente. Esta onda reflejada es la energía que no se entrega a la carga. Por lo tanto, la calidad del sistema de transmisión se indica por la relación de esta onda reflejada a la onda incidente en la fuente originaria. Esta proporción se denomina coeficiente de reflexión de la tensión, ρ , y está relacionada con la impedancia de línea de transmisión por la ecuación:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Ecuación 1-11

La magnitud de la de estado de voltaje sinusoidal a lo largo de una línea terminada en una carga que no sea Z_0 varía periódicamente en función de la distancia entre un valor máximo y mínimo. Esta variación, llamado onda estacionaria, es causada por la relación de fase entre ondas incidentes y ondas reflejadas. La proporción de los valores máximo y mínimo de esta tensión se llama el coeficiente de onda de tensión permanente, σ , y está relacionado con el coeficiente de reflexión por la ecuación

$$\sigma = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|}$$

Ecuación 1-12

Como se ha dicho, por encima de cualquiera de los coeficientes se pueden medir con equipos de prueba disponibles actualmente. Pero el valor de la relación de onda estacionaria (SWR) de medición es limitada. De nuevo, si un sistema se compone de un conector, una breve línea de transmisión y una carga, la medida de relación de ondas estacionarias indica sólo la calidad global del sistema. No dicen cual de los componentes del sistema es la causa de la reflexión. No sabe si la reflexión es de un componente de esa fase como para cancelar el reflejo de otro. El ingeniero debe hacer mediciones detalladas en muchas frecuencias antes de que él pueda saber lo que debe hacerse para mejorar la calidad ancho de banda de transmisión del sistema.

1.2.1.2. TDR prueba del escalón de reflexión

Un la configuración de un Reflectómetro de dominio se muestra en la figura 1-13.

El generador produce un paso positivo de la onda incidente que se aplica a la red de transmisión bajo prueba. El escalón se desplaza bajo línea de transmisión a la velocidad de propagación de la línea. Si la impedancia de carga es igual a la impedancia característica de la línea, no se refleja la onda y todo lo que se verá en el osciloscopio es el incidente registrado el escalón de tensión

como la onda que pase por el punto de la línea monitoreada por el osciloscopio. Consulte la Figura 1-13.

Si existe un desequilibrio en la carga, parte de la onda incidente se refleja. La onda reflejada de tensión aparecerá en la pantalla del osciloscopio algebraicamente añadida a la onda incidente. Consulte la Figura 1-14.

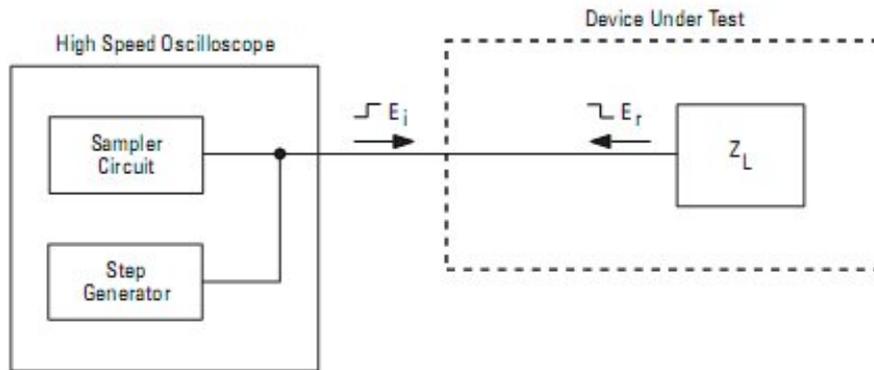


Figura 1-13 Diagrama en bloque de la funcionalidad del reflectómetro en dominio del tiempo

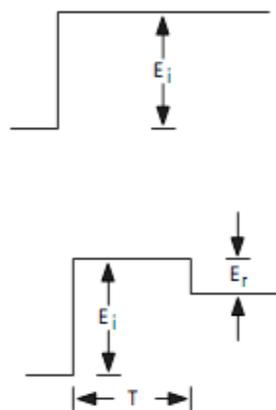


Figura 1-14 Pantalla del osciloscopio

1.2.1.3. Localización de fallas

La onda reflejada es fácilmente identificada ya que se separa en el tiempo de la onda incidente. Este tiempo también es valioso en la determinación de la longitud del sistema de transmisión del punto de control a la misma. La letra D denota esta duración:

$$D = v_p \cdot \frac{T}{2} = \frac{v_p T}{2} \quad \text{Ecuación 1-13}$$

Donde v_p = velocidad de propagación

T = tiempo de tránsito desde el punto de monitoreo hasta la falla y vuelta, como la medida en el osciloscopio (Figura 1-14).

La velocidad de propagación puede determinarse a partir de un experimento en una longitud conocida del mismo tipo de cable (por ejemplo, el tiempo necesario para que la onda incidente viaje por la línea y la onda reflejada viaje de vuelta en una terminación en circuito abierto al final de un piezo de 120 cm RG-9A / U es 11,4 ns dando $v_p = 2,1 \times 10^8$ cm /seg. Conociendo v_p y la lectura por el osciloscopio de T se determina el valor D. Se encuentra entonces

una falla bajo la línea. La mayoría de los TDR calculan esta distancia automáticamente para el usuario.

1.2.1.4. Análisis de reflexión

La forma de la onda reflejada también es valiosa, ya que pone de manifiesto tanto la naturaleza y la magnitud de la falla. Figura 1-15 muestra cuatro típicas muestras de osciloscopio, la impedancia de carga es responsable de cada uno. Figuras 1-16a y 1-16b muestran capturas de pantalla reales de un TDR Agilent 86100^a Infiniium DCA. Estas pantallas son fáciles de interpretar recordando:

$$\rho = \frac{E_r}{E_i} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad \text{Ecuación 1-14}$$

El conocimiento de E_i y E_r , como medidas en el osciloscopio, permite Z_L que se determina en términos de Z_0 , o viceversa. En la Figura 1-15, por ejemplo, podemos comprobar que son realmente las reflexiones de las terminaciones especificadas.

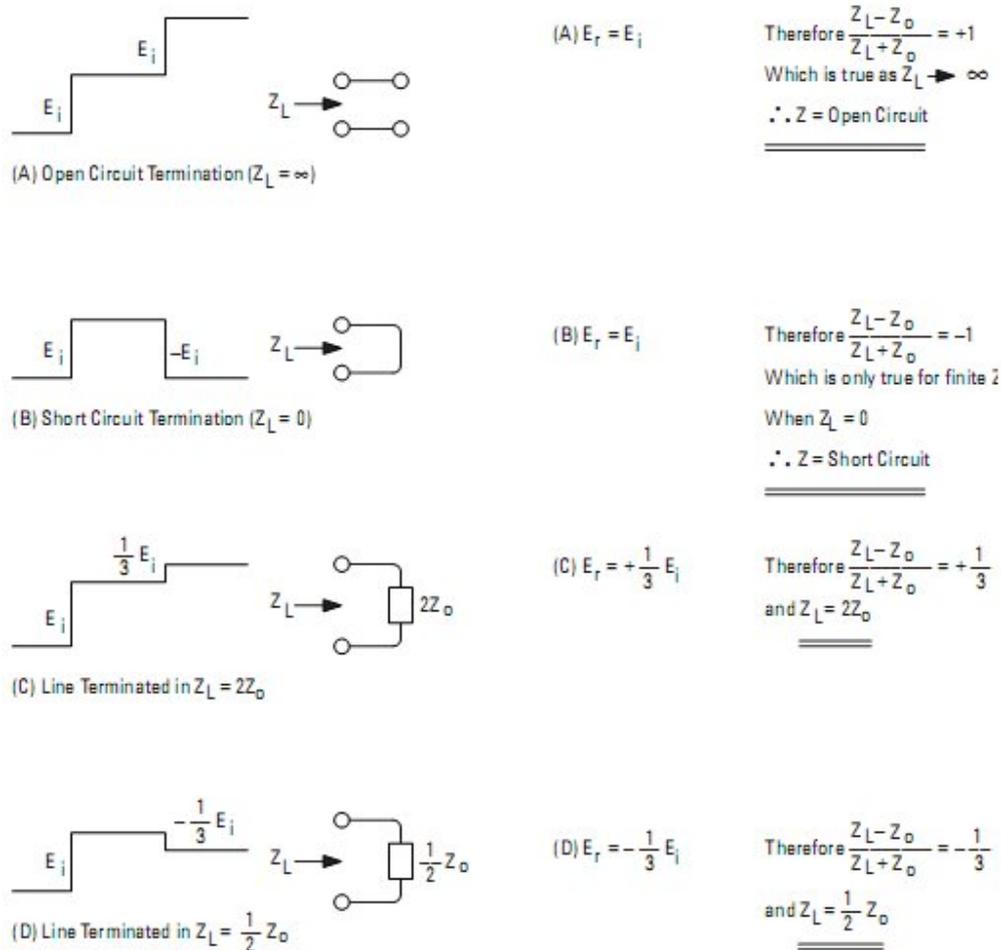


Figura 1-15 Pantalla de un TDR para cargas típicas

Suponiendo que Z_0 es real (aproximadamente verdadero para el caso de cable de alta calidad comercial), se observa que las uniones resistivas mal hechas reflejan un voltaje de la misma forma que el voltaje de conducción, con la magnitud y la polaridad de E_r determinado por los valores relativos de Z_0 y R_L .

También de interés son los reflejos producidos por las cargas de impedancias complejas. Cuatro ejemplos de estas reflexiones se muestran en la Figura 1-17.

Estas formas de onda pueden ser verificadas escribiendo la expresión de ρ (s) en términos de Z_L para cada ejemplo:

$$\left(\text{i.e., } Z_L = R + sL, \frac{R}{1 + RC_s}, \text{ etc. } \right),$$

Ecuación 1-15

Multiplicando ρ (s) por $\frac{E_i}{s}$ la transformada de un escalón en función de E_i , y entonces la transformación de este producto nuevo en el dominio del tiempo para encontrar una expresión para $e_r(t)$. Este procedimiento es útil, pero un simple análisis es posible sin recurrir a la transformada de Laplace. La más directa consiste en el análisis de la evaluación de la tensión reflejada en $t = 0$ y en $t = \infty$ y asumiendo toda la transición entre estos dos valores que será exponencial. (Para simplificar, el tiempo es elegido para ser cero cuando la onda reflejada llega de vuelta en el punto de control.) En el caso de la combinación serie R-L, por ejemplo, en $t = 0$ la tensión reflejada es de $+E_i$. Esto se debe a que el inductor no aceptará un cambio repentino en la corriente, que inicialmente parece una impedancia infinita, y $\rho = +1$ en $t = 0$. Entonces la corriente en L se

acumula exponencialmente y su impedancia desciende hacia cero. En $t = \infty$, por lo tanto $e_r(t)$ se determina sólo por el valor de R.

$$\left(\rho = \frac{R - Z_0}{R + Z_0} \text{ When } \tau = \infty \right)$$

Ecuación 1-16

La transición exponencial de $e_r(t)$ tiene una constante de tiempo determinada por la resistencia efectiva vista por el inductor. Dado que la impedancia de salida de la línea de transmisión es Z_0 , se considera que el inductor Z_0 en serie con R, y

$$\gamma = \frac{L}{R + Z_0}$$

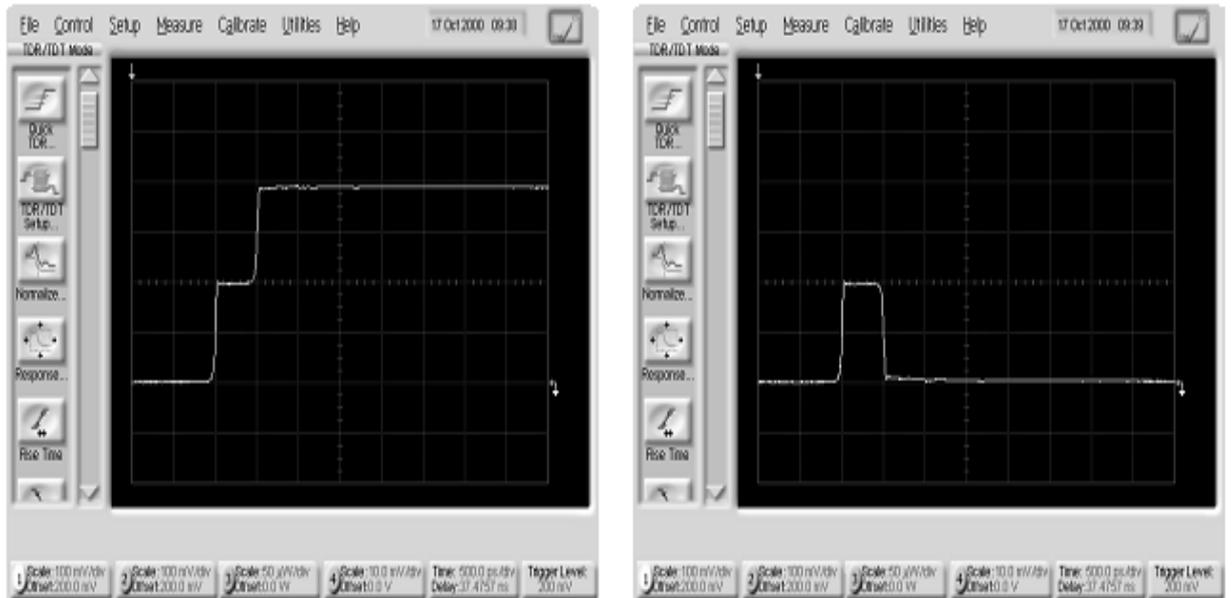
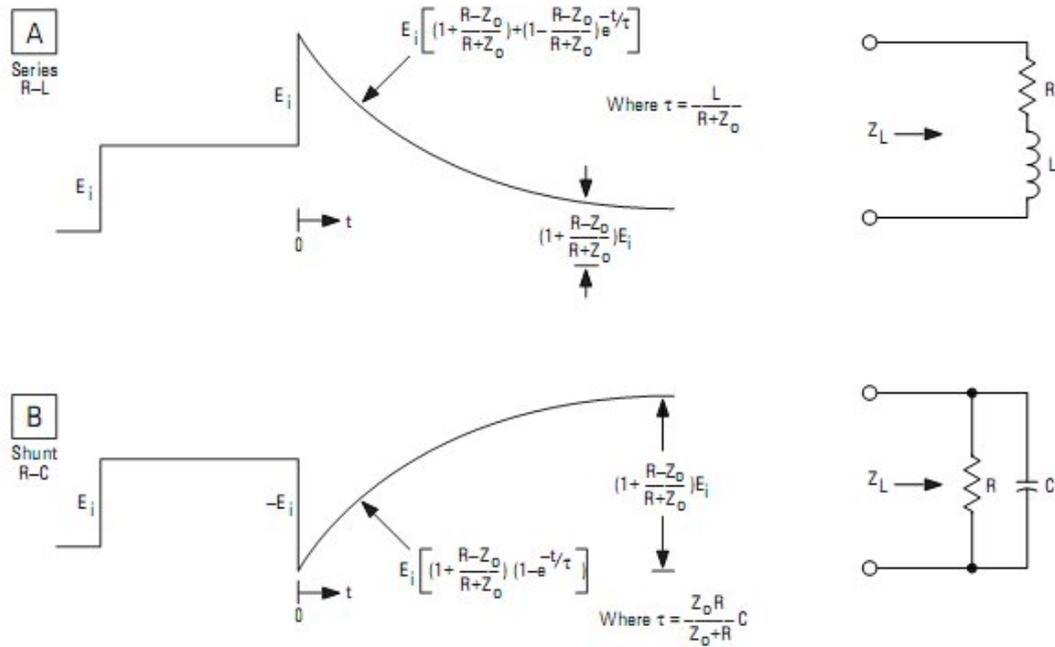


Figura 1-16 (a) Pantalla de captura reales de un TDR Agilent 86100^a Infiniium DCA. (b) Pantalla de captura de un circuito cerrado desde la terminal.



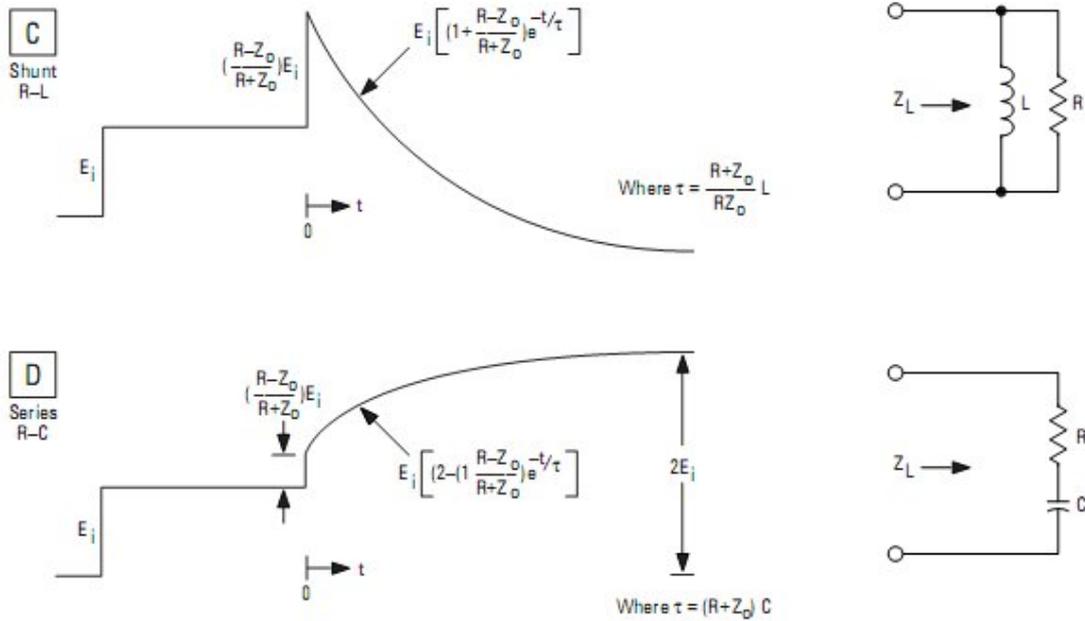


Figura 1-17 Pantalla de un osciloscopio para cargas complejas Z_L

Un análisis similar es posible para el caso de la R-C en terminación paralelo. En el momento cero, la carga aparece como un cortocircuito ya que el condensador no va a aceptar un cambio repentino en el voltaje. Por lo tanto, $\rho = -1$ cuando $t = 0$. Después de algún tiempo, sin embargo, la tensión se acumula en C y aumenta su impedancia. En $t = \infty$, el condensador es realmente un circuito abierto:

$$Z_L = R \quad \text{and} \quad = \frac{R - Z_0}{R + Z_0}$$

Ecuación 1-17

La resistencia vista por el condensador es Z_o en paralelo con R, y por lo tanto, la constante de tiempo de la transición exponencial de $e_r(t)$ es:

$$\frac{Z_o R}{Z_o + R} C$$

Ecuación 1-18

Los dos casos restantes pueden ser tratados exactamente de la misma manera. Los resultados de este análisis se resumen en la Figura 1-17.

1.2.1.5. Discontinuidad de una línea de transmisión

Hasta ahora, se ha hecho mención sólo sobre el efecto de una carga que no coincide al final de una línea de transmisión. A menudo, sin embargo, no se trate sólo con lo que está ocurriendo en la carga, sino también en posiciones intermedias a lo largo de la línea. Considere el sistema de transmisión en la Figura 1-18.

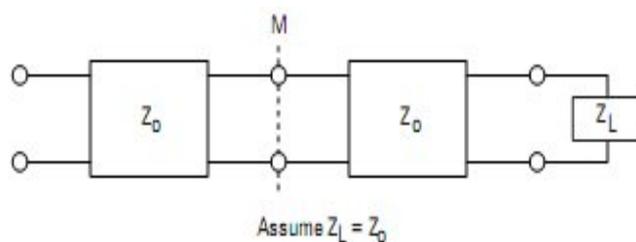


Figura 1-18 Posición intermedia de una línea de transmisión.

La unión de las dos líneas (ambas con la misma impedancia característica Z_o) emplean un conector de algún tipo. Vamos a suponer que el conector añade un pequeño inductor en serie con la línea. Analizando esta discontinuidad en la línea no es muy diferente de un análisis de mala terminación. En efecto, todo lo que uno trata a la derecha de M en la figura como una impedancia equivalente en serie con el pequeño inductor y, luego, llama a esta combinación serie la impedancia efectiva de carga para el sistema en el punto M. Desde entonces la impedancia de entrada a la derecha de M es Z_o , una representación equivalente se muestra en la Figura 1-19.

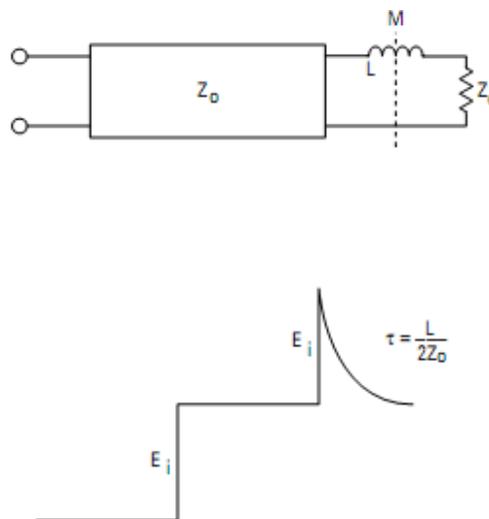


Figura 1-19 Caso especial de circuitos en serie R-L

1.2.1.6. Evaluación de pérdida del cable

La Reflectometría de dominio de tiempo también es útil para comparar las pérdidas en las líneas de transmisión. Cables donde predomina una serie pérdidas reflejan una onda de tensión con una característica de aumento exponencial, mientras que las pérdidas de derivación en el que predominan una onda de tensión reflejan un decaimiento exponencial característico. Esto puede entenderse mirando a la impedancia de entrada de la línea con pérdidas.

Suponiendo que la pérdida es infinitamente larga, la impedancia de entrada es igual a:

$$Z_{in} = Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}$$

Ecuación 1-19

El tratamiento de la primera serie de casos en que predominan las pérdidas, G es tan pequeño en comparación con ωC que puede ser descuidado:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 + \frac{R}{j\omega L} \right)^{1/2}}$$

Ecuación 1-20

Recordando a la aproximación $(1+x)^a \approx (1+ax)$ para $x \ll 1$, Z_{in} puede ser aproximada por:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{L}{C} \left(1 + \frac{R}{j2\omega L} \right)} \text{ When } R \ll \omega L$$

Ecuación 1-21

Puesto que el borde principal del paso incidente está compuesto casi en su totalidad de componentes de alta frecuencia, R es ciertamente inferior a ωL para $t = 0^+$. Por lo tanto, la aproximación por encima de la línea con pérdidas, que se parece a una simple red R-C serie, es válida por un corto tiempo después de $t = 0$. Resulta que este modelo es todo lo que es necesario determinar la pérdida de la línea de transmisión.

En términos de un circuito equivalente válido en $t = 0^+$, la línea de transmisión con pérdidas serie se muestra en la Figura 1-20.

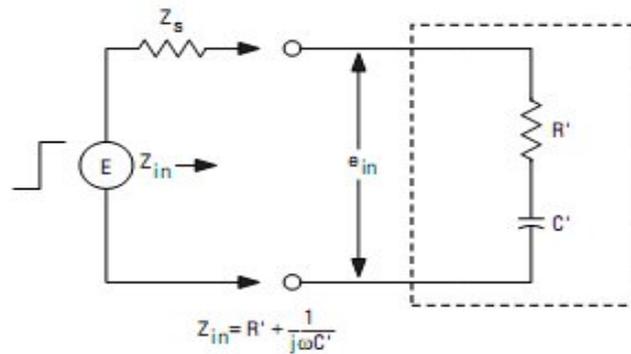


Figura 1-20 Modelo de una línea de transmisión con pérdidas serie.

La serie de resistencia de la línea de pérdidas (R) es una función de la profundidad de la piel y, por tanto, el conductor no es constante con la frecuencia. Como resultado de ello, es difícil relacionar la inclinación inicial con un valor real de R . Sin embargo, la magnitud de la pendiente es útil en la comparación de los conductores de las distintas pérdidas.

Un análisis similar es posible para un conductor donde predominan las pérdidas por derivación. Aquí la entrada de admisión de la pérdida de cable está dada por:

$$Y_{in} = \frac{1}{Z_{in}} = \sqrt{\frac{G + j\omega C}{R + j\omega L}} = \sqrt{\frac{G + j\omega C}{j\omega L}}$$

Ecuación 1-22

Dado que R se supone pequeño, se vuelve a escribir la expresión para Y_{in} :

$$Y_{in} = \sqrt{\frac{C}{L} \left(1 + \frac{G}{j\omega C} \right)}^{1/2}$$

Una vez más la aproximación polinómica bajo el signo de raíz cuadrada:

$$Y_{in} = \sqrt{\frac{C}{L} \left(1 + \frac{G}{j\omega C} \right)}^{1/2}$$

Un circuito equivalente (Figura 1-21) válido en $t = 0^+$,

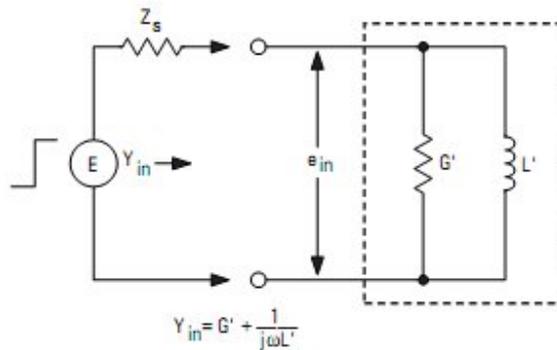


Figura 1-21 Un simple modelo de una línea en paralelo con pérdidas

Una interpretación cualitativa de por qué $e_{in}(t)$ se comporta como lo hace es bastante simple en ambos casos. Por serie de pérdidas, la línea se ve más y

más como un circuito abierto con el paso del tiempo, porque la onda de voltaje que viajan por la línea se acumula más y más resistencia a la serie para forzar al corriente a través de ella. En el caso de pérdidas por derivación, el tiempo de entrada se parece a un cortocircuito debido a que la corriente viaja por la línea ve más y más conductancia acumulada en derivación a desarrollar a través de la tensión.

1.2.1.7. Múltiples discontinuidades

Una de las ventajas del TDR es su capacidad para manejar los casos de más de una discontinuidad. Un ejemplo de ello es la Figura 1-22

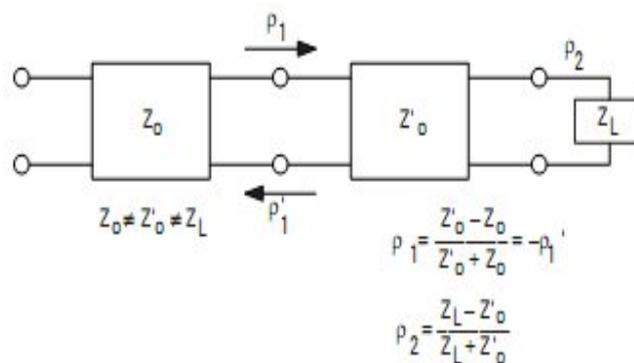


Figura 1-22 Cables con múltiples discontinuidades

La pantalla del osciloscopio para esta situación sería similar a la del diagrama en la Figura 1-23 (preparado para el caso en que $Z_L < Z_0 < Z'_0$):

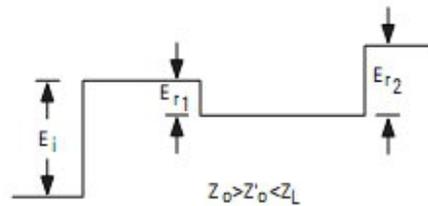


Figura 1-23 Reflexiones de varias discontinuidades.

Se considera que las dos reflexiones producidas por los desajustes que pueden ser analizados por separado. El desajuste en el cruce de las dos líneas de transmisión genera una onda reflejada, E_r , donde

$$E_r = \rho_1 E_i = \left(\frac{Z'_0 - Z_0}{Z'_0 + Z_0} \right) E_i$$

Ecuación 1-23

Del mismo modo, el desfase en la carga también crea un reflejo debido a su coeficiente de reflexión

$$\rho_2 = \frac{Z_L - Z'_0}{Z_L + Z'_0}$$

Ecuación 1-24

Dos cosas deben ser consideradas antes del aparente reflejo de Z_L , como se muestra en el osciloscopio, se utiliza para determinar ρ_2 . En primer lugar, la

tensión de paso en Z_L incidente es $(1 + \rho_1) E_i$, no sólo E_i . En segundo lugar, la reflexión de la carga es

$$E_{r_2} = (1 + \rho_1') E_{r_L} = (1 + \rho_1') [\rho_2 (1 + \rho_1) E_i] \quad \text{Ecuación 1-25}$$

Dado que $\rho_1' = \rho$, E_{r_2} puede reescribirse como:

$$E_{r_2} = E_{r_L} [\rho_2 (1 - \rho_1^2)] E_i \quad \text{Ecuación 1-26}$$

La parte E_{r_L} reflejada desde la unión de

$$E_{r_L} \quad Z'_o \text{ and } Z_o \text{ (i.e., } \rho_1' E_{r_L} \text{)} \quad \text{Ecuación 1-27}$$

es de nuevo reflejada en la carga y las cabezas de vuelta al punto de control sólo se refleja parcialmente en la unión de Z'_o y Z_o .

Esto continúa indefinidamente, pero después de algún tiempo la magnitud de las reflexiones se aproxima a cero.

1.3. ¿Qué es el Reflectómetro de dominio de tiempo?

Los Reflectómetro de Dominio de Tiempo han existido por muchos años y siguen siendo la manera más rápida y exacta forma de señalar el punto de problemas en el cableado. Históricamente, el TDR se ha reservado sólo para grandes empresas y de ingenieros de alto nivel. Esto se debió a la complejidad de la operación y el alto costo de instrumentos. El TDR ha sido muy bajo utilizado. Riser-Bond Actos reconoció las deficiencias y desarrollo el primer "TDR Pequeño" a principios del 1980.

El TDR digital simplificado se ha convertido en una herramienta estándar para el técnico de primer nivel. Riser-Bond Instruments, completa línea de productos ha sido permeada por el concepto de que los equipos de ensayo deben ser sencillos, precisos, fáciles de usar, resistentes y de gran valor por el costo.

Debido a los avances en la tecnología actual, el funcionamiento y la interpretación de un TDR se han simplificado. Por su capacidad para identificar problemas de cables, el TDR está recuperando rápidamente popularidad en toda la industria de comunicaciones.

Si es un cable de metal y tiene por lo menos dos conductores, puede ser probado por un TDR. TDR verifica y mide todos los tipos de par trenzado y cables coaxiales, tanto aéreos como subterráneos.

Los TDR se utilizan para localizar e identificar las fallas en todos los tipos de cable de pares metálicos. TDR puede localizar los principales problemas de cableado o menor entre ellos, la falla de envoltura, los conductores rotos, daños por agua, conectores sueltos, no haya cortes, rompieron los cables, conductores en cortocircuito, los componentes del sistema, y una variedad de otras condiciones de fallo. Además, el TDR se puede utilizar para probar las bobinas de cable dañados para la navegación, la escasez de cable, el cable usado y gestión del inventario.

La velocidad y precisión del Reflectómetro de Dominio de Tiempo es hoy el método preferido para la localización de fallas en un cable. Aunque hoy en día son más los instrumentos de uso fácil, una buena comprensión de los principios básicos y las aplicaciones de un TDR es esencial para el éxito de la solución de problemas. Al igual que todos los nuevos equipos, para conocer el instrumento y su funcionamiento hace que el TDR una herramienta más valiosa.

1.3.1. Características

Hay dos maneras una TDR puede mostrar la información que recibe. La primera y más tradicional es el método para mostrar la forma de onda o "firma" del cable. La pantalla, que es un monitor CRT o LCD, se mostrará el saliente (de transmisión) de impulsos generados por el Informe y las reflexiones que son causados por discontinuidades de impedancia a lo largo de la longitud del cable.

El segundo tipo de visualización es simplemente un número que facilite la lectura de indicación a distancia en pies o metros a la primera gran reflexión causado por un cambio de impedancia o discontinuidad. Algunos de los instrumentos también se mostrarán si el fallo es un abierto o cortocircuito de alta impedancia que indica un cambio o un cambio de baja impedancia, respectivamente.

TDR supe la tradicional forma de onda más información que hace la versión digital numérico. Sin embargo, la simplificación de los modelos digitales es menos costosa y más fácil de operar. Cuesta sólo una fracción de los TDR, muchos TDR simplificados digitales son tan precisos y pueden localizar la mayoría de las principales fallas de cable.

1.3.2. Principios de operación

El TDR trabaja sobre el mismo principio que el radar. Un pulso de energía se transmite por un cable. Cuando pulso que llega al final del cable, o una falla en el cable, todo o parte del pulso de la energía es reflejada en el instrumento.

El TDR mide el tiempo que tarda la señal en viajar por el cable, ve el problema, y lo refleja de vuelta. El TDR, posteriormente, convierte esta vez a distancia y muestra la información como una forma de onda y / o la distancia de lectura.

Con este método se realiza el envío de un pulso rápido a través de la línea de transmisión. Luego se monitorean las ondas incidentes y reflejadas mediante un osciloscopio. Mediante esta técnica de ecos se puede determinar la impedancia característica de la línea de transmisión y muestra la naturaleza (resistiva, inductiva o capacitiva) y posición de cada discontinuidad a lo largo de la línea. TDR también da información sobre el tipo de pérdidas (series o paralelas) y también proporciona más información relacionada a las características de banda ancha del EBP que cualquier otra técnica de medición.

CAPITULO 2: Instrumentación Electrónica

2.1. Generalidades

La ciencia y la tecnología se caracterizan por la necesidad de generar y medir variables físicas reciben el nombre de instrumentos los equipos tecnológicos que tienen como misión determinar la magnitud de una variable, visualizarla , generarla, o convertirla en otra diferente.

La electrónica aplicada es el área de la tecnología que estudia las características de los dispositivos electrónicos y la forma de interconectarlas para realizar circuitos y sistemas que captan información en forma de señales eléctricas, la procesan para obtener otras señales que se transmiten a distancia (comunicación), controlan la energía eléctrica y a través de ella otras manifestaciones de la energía (térmica, mecánica, etc.) o convierten la energía eléctrica de una forma a otra.

Para el análisis y la síntesis de los circuitos y sistemas electrónicos es necesaria:

- Medir los parámetros de las señales eléctricas presentes en diferentes puntos de los mismos.
- Aplicar determinadas señales eléctricas en ciertos puntos, para comprobar su comportamiento.

Por otra parte, la facilidad de modificación y transmisión a distancia de las señales eléctricas ha provocado el interés por convertir en eléctricas las señales no eléctricas (distancia, posición, velocidad, temperatura, densidad, etc.) generadas por numerosos sistemas físicos. Además, a ello se ha unido el progreso del área de la electrónica aplicada denominada microelectrónica, dedicada al estudio de los métodos y procesos de fabricación de circuitos integrados, lo cual ha abaratado el coste elevado y la capacidad de los sistemas electrónicos.

Por todo lo expuesto se ha incrementado enormemente el interés por la instrumentación electrónica que es el área de la tecnología que estudia los equipos realizados mediante circuitos y sistemas electrónicos, destinados a la medición, visualización, generación y conversión de señales eléctricas, así como los dispositivos o circuitos electrónicos que convierten una señal no eléctrica (temperatura, presión, etc.) en una señal eléctrica, que suelen recibir el nombre de sensores. De acuerdo con esto los instrumentos electrónicos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

A) Instrumentos de medida y visualización: son sistemas electrónicos que realizan la evaluación de uno o varios parámetros de una señal eléctrica y los presentan de forma gráfica, numérica o alfanumérica. La presentación se realiza en la unidad de medida adecuada al parámetro a medir y de acuerdo con el

sistema de unidades de medida adoptado. El osciloscopio es un ejemplo de este tipo de instrumento.

B) Instrumentos generadores de señales: son sistemas electrónicos que tienen como misión generar señales eléctricas de características determinadas. Un ejemplo de este tipo de instrumento es el generador de señales.

C) Instrumentos convertidores de señales: son dispositivos o circuitos electrónicos que convierten una señal eléctrica o no eléctrica, en otra señal eléctrica de unas características y rango determinados, en uno de cuyos parámetros está contenida toda la información correspondiente a la primera. Estos instrumentos forman parte de un área más amplia de la tecnología que incluye:

- Los dispositivos que situados en un cierto medio generan una señal (función de alguna característica de dicho medio) de una determinada forma física (presión, temperatura, nivel, etc.), convertible en otra señal de una forma física diferente. Estos dispositivos reciben el nombre de sensores.

- Los elementos que realizan la conversión antes citada que suelen recibir el nombre de transductores.

Cada vez es más usual denominar sensor al conjunto formado por el dispositivo sensor, anteriormente descrito, y el transductor acoplado a él.

Las variables o magnitudes físicas susceptibles de ser transformadas en señales eléctricas son muy numerosas y ello da lugar, a que también sean muy variadas las tecnologías o principios de transducción (inductivo, piezoeléctrico, extensiométrico, capacitivo, etc.), que se emplean actualmente.

La naturaleza del principio de medida empleado determina una primera clasificación de los sensores:

-Activos: cuando la magnitud física a detectar, proporciona la energía necesaria para la generación de la señal eléctrica de salida, como por ejemplo, el efecto piezoeléctrico o el termoelectrónico.

-pasivos: cuando la magnitud a medir se limita a modificar alguno de los parámetros eléctricos característicos del sensor, tales como resistencia, capacidad, etc. Necesitan una tensión de alimentación externa.

Es necesario además destacar que, en general, una determinada magnitud física, puede ser convertida mediante sensores que utilizan principios de medida distintos.

Existen diversas formas de representar la información mediante señales eléctricas. Tanto los instrumentos de medida como los generadores. Por ello,

antes de estudiar los diferentes tipos de instrumentos electrónicos es conveniente analizar las diferentes formas de representar la información mediante señales eléctricas.

2.2. Efecto Hall

El efecto Hall consiste en la aparición de un campo eléctrico en un conductor cuando es atravesado por un campo magnético. A este campo eléctrico se le llama campo Hall. Llamado efecto Hall en honor a su descubridor Edwin Duntley Hall.

En épocas contemporáneas (1985) el físico alemán Klaus von Klitzing y colaboradores descubrieron el hoy conocido como efecto Hall cuántico le valió el premio Nobel de física en 1985. En 1998, se otorgo un nuevo premio Nobel de Física a los profesores Laughlin, Strömer y Tsui por el descubrimiento de un nuevo fluido cuántico con excitaciones de carga fraccionarias. Este nuevo efecto ha traído grandes problemas a los físicos teóricos y hoy en día, constituye uno de los campos de investigación de mayor interés y actualidad en toda la física del estado sólido.

2.2.1. Explicación cualitativa del efecto Hall Clásico

Cuando por un material conductor o semiconductor, circula una corriente eléctrica, y estando este mismo material en el seno de un campo magnético, se comprueba que aparece una fuerza magnética en los portadores de carga que los reagrupa dentro del material, esto es, los portadores de carga se desvían y agrupan a un lado del material conductor o semiconductor, apareciendo así un campo eléctrico perpendicular al campo magnético y al propio campo eléctrico generado por la batería (F_m). Este campo eléctrico es el denominado campo Hall (EH), y ligado a él aparece la tensión Hall, que se puede medir mediante el voltímetro de la figura 2-1.

En el caso de la figura 2-1, tenemos una barra de un material desconocido y queremos saber cuáles son sus portadores de carga. Para ello, mediante una batería hacemos circular por la barra una corriente eléctrica. Una vez hecho esto, introducimos la barra en el seno de un campo magnético uniforme y perpendicular a la tableta.

Aparecerá entonces una fuerza magnética sobre los portadores de carga, que tenderá a agruparlos a un lado de la barra, apareciendo de este modo una tensión Hall y un campo eléctrico Hall entre ambos lados de la barra. Dependiendo de si la lectura del voltímetro es positiva o negativa, y conociendo el sentido del campo magnético y del campo eléctrico originado por la batería,

podemos deducir si los portadores de carga de la barra de material desconocido son las cargas positivas o las negativas.

En la figura 2-1 vemos como el material tiene dos zonas: la de la izquierda y la de la derecha. En una zona, los portadores son huecos y en los otros electrones.

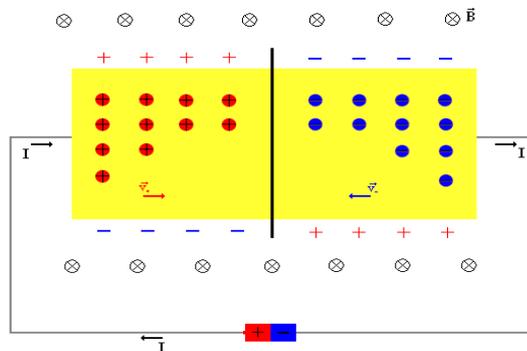


Imagen obtenida en http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Hall_effect-comparison.png

Figura 2-1 Portador de carga de una barra

2.2.2. Explicación cuantitativa del efecto Hall Clásico

Sea el material por el que circula la corriente con una velocidad v al que se le aplica un campo magnético B . Al aparecer una fuerza magnética F_m , los portadores de carga se agrupan en una región del material, ocasionando la aparición de una tensión V_H y por lo tanto de un campo eléctrico E en la misma dirección. Este campo ocasiona a su vez la aparición de una fuerza eléctrica F_e con la misma dirección pero sentido opuesto a F_m . Cuando estas dos fuerzas llegan a un estado de equilibrio se tiene la siguiente situación:

$$F_e = F_m \Rightarrow q \cdot E = q \cdot v \cdot B \Rightarrow E = v \cdot B \Rightarrow V_H/d = v \cdot B \Rightarrow V_H = v \cdot B \cdot d$$

Ecuación 2-1

2.2.3. La física clásica del efecto Hall

Sabemos que un campo magnético actúa sobre las cargas en movimiento (Fuerza de Lorentz).

Una corriente I que atraviesa un material consiste en cargas (electrones) que se desplazan (en sentido contrario a la corriente) con una velocidad que denominaremos v .

Si sumergimos esa corriente de electrones en un campo magnético B , cada uno de los electrones que forman la corriente estará sometidos a la fuerza de Lorentz $F_m = -e \cdot v \cdot B$. Donde $-e$ corresponde a la carga de un electrón, v el vector velocidad del electrón y B el vector campo magnético aplicado.

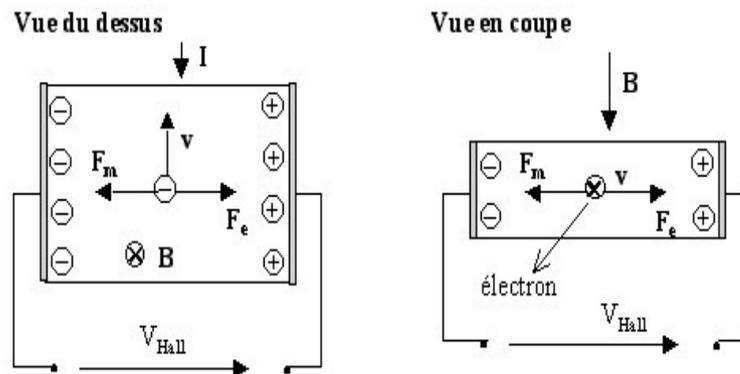


Imagen obtenida en http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Effet_Hall_-_explications.jpg
Figura 2-2 Explicación del efecto Hall.

La dirección de la fuerza será perpendicular al plano formado por v y B (ya que es resultado del producto vectorial de ambos) y provocará un desplazamiento de electrones en esa dirección.

Como consecuencia tendremos una concentración de cargas negativas sobre uno de los lados del material y un déficit de cargas negativas en el lado opuesto. Esta distribución de cargas genera una diferencia de potencial entre ambos lados, la tensión de Hall V_H , y un campo eléctrico E_H .

Este campo eléctrico que genera a su vez una fuerza eléctrica sobre los electrones dada por la Ley de Coulomb, $F_e = -e \cdot E_H$, que actúa en la misma dirección que la fuerza de Lorentz pero en sentido contrario a esta. El equilibrio se alcanzará cuando la suma de las dos fuerzas sea nula, de lo cual deducimos que en el equilibrio el valor del campo Hall es: $E_H = -v \wedge B$.

2.2.4. Técnicas de medición

Sin duda, la técnica de medición más utilizada para la determinación de los portadores de carga y resistividad en un semiconductor es la técnica de Van Der Paw. Utilizada para la determinación de resistividad y portadores de carga en semiconductores. Es llamada también técnica de cuatro puntas o técnica de cuatro esquinas. Por lo general, esta técnica se aplica en muestras en forma de películas delgadas.

2.2.5. Aplicación del efecto Hall

Los sensores de Efecto Hall permiten medir:

- La movilidad de una partícula cargada eléctricamente (electrones, lagunas, etc.).
- Los campos magnéticos (Tslámetros)
- La intensidad de corrientes eléctricas (sensores de corriente de Efecto Hall)
- También permiten la elaboración de sensores o detectores de posición sin contacto, utilizados particularmente en el automóvil, para detectar la posición de un árbol giratorio (caja de cambios, paliers, etc.).
- Encontramos también sensores de efecto Hall bajo las teclas de los teclados de los instrumentos de música modernos (órganos, órganos

digitales, sintetizadores) evitando así el desgaste que sufren los contactos eléctricos tradicionales.

- Encontramos sensores de efecto Hall en el codificador de un motor de CD.
- Los motores de Efecto Hall (HET) son aceleradores de plasma de gran eficacia.

2.3. Efecto Seebeck

El efecto Seebeck, descubierto por el físico alemán Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831), se refiere a la emisión de electricidad en un circuito eléctrico compuesto por conductores diferentes, mientras estos tienen diferentes temperaturas. Los conductores se conectan en serie. La diferencia de temperatura causa un flujo de electrones en los conductores, se dice que el flujo inicia directamente desde el área de mayor temperatura hacia la de menor temperatura. En el punto de contacto de los conductores se presenta una diferencia de potencial. La magnitud de la termoelectricidad depende del tipo de material de los conductores, la temperatura de contacto y no depende de la temperatura que se distribuye a lo largo del conductor. La termoelectricidad permite evaluar los termopares por el coeficiente de Seebeck para diferentes materiales con un rango desde +43 hasta –38 mV/grado.

El producto que más utiliza este fenómeno son los denominados “termopares” que sirven como sensores de temperatura, también las llamadas termopilas que son un arreglo de varios termopares en serie para medir temperatura básicamente.

2.3.1. Fenómeno físico y Eléctrico relacionados al Efecto Seebeck

La termoelectricidad consiste en la conversión directa del calor en energía eléctrica o viceversa. El término es generalmente restringido a la conversión irreversible de electricidad en calor descrita por el físico inglés James P. Joule y el efecto reversible nombrado por Seebeck, Peltier y Thomson. De acuerdo con la ley de Joule un conductor transporta cierta corriente generando calor proporcionalmente a la resistencia del mismo por el cuadrado de la corriente. El físico alemán Thomas J. Seebeck descubrió en 1820 que si se cierra el circuito por la unión de dos materiales distintos y esta unión tiene contacto físico con un objeto la temperatura de este se ve como una diferencia de potencial que se genera en la unión de los metales. Al circuito de este tipo se llama “termopar” y un número de ellos conectados en serie es llamado termopila. En 1834 el físico francés Jean C. A. Peltier descubrió un efecto inverso al de Seebeck: Si una corriente pasa a través del termopar, la temperatura de la unión se incrementa y la temperatura en otras secciones se decrementa, así que el calor es transferido desde una unión a otra. La cantidad de calor transferido es proporcional a la

corriente y la dirección de transferencia se invierte si la corriente cambia de dirección. El científico escocés William Thomson (más tarde Lord Kelvin) descubre en 1854 que la diferencia de temperatura que existe entre dos puntos cualesquiera de un conductor que transporta corriente puede absorber o sacar calor dependiendo del material y la dirección de la corriente en el conductor. Esto muestra que el efecto Seebeck es un resultado de la combinación de los efectos de Peltier y Thomson. Los campos magnéticos pueden demostrar la influencia de todos estos fenómenos. Muchos dispositivos basados en los efectos termoeléctricos son usados para medir temperatura, transferir calor o generar electricidad.

La unión de dos aleaciones diferentes entregan un voltaje de directa, propiedad eléctrica muy importante. La polaridad de esta depende de la química de la aleación.

Un termopar ideal consiste en un par de conductores homogéneos y de una sola pieza de distintos materiales, aleaciones, conectados y unidos en el extremo que servirá para tocar o acercar al objeto del cual queremos averiguar su temperatura (figura 2-4).

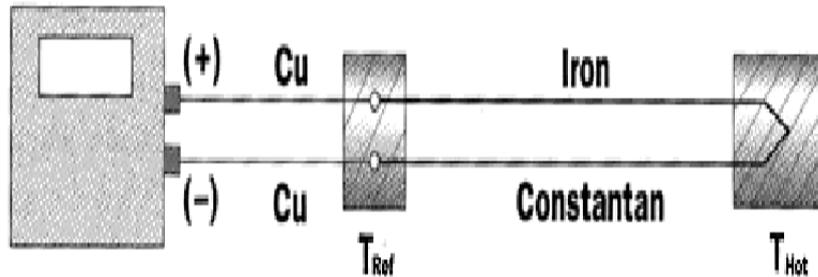


Figura 2-4 Termopar ideal para medir temperatura.

Las cargas en los conductores pueden moverse con cierta libertad. La corriente eléctrica constituye un movimiento continuado de las cargas libres. La cantidad de carga que circula por un conductor en la unidad de tiempo es la intensidad de corriente. Los responsables de mantener la corriente en un circuito eléctrico son los generadores eléctricos, los cuales suministran al circuito la energía precisa para ello. Dos leyes de naturaleza experimental descubiertas por Ohm y Joule respectivamente aportan algunas relaciones que facilitan el estudio científico de la corriente eléctrica.

La característica esencial de los conductores, sean éstos sólidos, líquidos o gaseosos, consiste en que disponen de partículas cargadas que pueden moverse con bastante libertad bajo la acción de campos eléctricos. Cuando un conductor descargado se pone en contacto con un cuerpo cargado se produce un desplazamiento de la carga del uno a otro por efecto de las fuerzas eléctricas. Si ambos están aislados, el movimiento de las cargas libres durará unos instantes entre tanto el sistema de cargas encuentra una configuración de

equilibrio en la cual las fuerzas eléctricas que se ejercen sobre cada una de las cargas se compensan mutuamente. Esto es lo que sucede cuando un hilo metálico se conecta por uno de sus extremos a uno solo de los bornes de una pila. Sin embargo, cuando se conecta el otro extremo del conductor al segundo borne, se produce un movimiento continuado de cargas en el conductor. Se tiene en tal caso una corriente eléctrica. La parte de la física que se ocupa del estudio de este tipo de movimiento de las cargas eléctricas a través de un conductor recibe el nombre de electrocinética.

2.3.2. Aplicaciones relacionadas al Efecto Seebeck

Una de las aplicaciones más usadas con este fenómeno es la construcción de sensores de temperatura llamados “termopares”. En la industria están muy difundidos y son relativamente baratos además de soportar rangos de temperatura, dependiendo de la unión de las aleaciones, de hasta 1450°C.

Un termopar es un generador termoeléctrico que transforma calor en electricidad. Se produce cuando dos hilos conductores unidos entre sí por sus extremos respectivos se someten a una diferencia de temperatura, sumergiendo una de las soldaduras en hielo fundente y aplicando a la otra la llama de un mechero. Entre ambos puntos se genera una diferencia de potencial que aumenta con la temperatura y puede detectarse con un aparato de medidas

eléctricas. Dicho efecto generador de electricidad conocido como efecto Seebeck se emplea principalmente en la medida de temperaturas.

La siguiente tabla 2-1 muestra los tipos habituales del termopar, aleaciones y el rango de temperatura en el que puede operar.

Tipo de Termopar	Materiales	Rango de aplicación en °C
B	Platino 30%, Rodio (+) Platino 6%, Rodio (-)	1370 a 1700
C	W5Re Tungsteno 5% Rhenium (+) W26Re Tungsteno 26% Rhenium	1650 a 2315
E	Cromo (+) Constantano (-)	95 a 900
J	Acero (+) Constantano (-)	95 a 760
K	Cromo (+) Alumel (-)	95 a 1260
N	Nicrosil (+) Nisil (-)	650 a 1260
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	870 a 1450
S	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	980 a 1450
	Cobre (+)	-200 a 350

T	Constantano (-)	
Tabla 2-1 Tipos de Termopar.		

Estos termopares son de tipo estándar y tienen los siguientes códigos de colores de acuerdo al tipo descrito en la tabla 1 para su fácil conexión a los instrumentos o dispositivos de medición de temperatura.

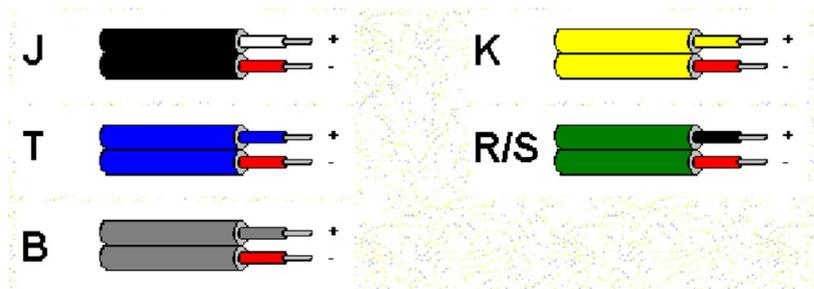


Imagen Obtenida en <http://www.desi.iteso.mx/elec/instru/seebeck.doc>

Figura 2-5 Códigos de colore de los termopares

Para seleccionar el tipo adecuado de termopar a usar en la aplicación es necesario observar los siguientes puntos básicos:

1. Rango de temperatura a medir.
2. Tolerancia y cantidad de error que permite la aplicación

3. ¿Es posible que el termopar toque al objeto sin que este sea invasivo y altere al objeto?

4. ¿Qué tipo de contacto físico se requiere para sensar la temperatura?

2.4. Acondicionamiento de Señal

2.4.1. Generalidades

La señal de salida de un sistema de medición en general se debe procesar de una forma adecuada para la siguiente etapa de la operación. La señal puede ser por ejemplo, demasiado pequeña, y sería necesario amplificarla; podría contener interferencias que eliminar; ser no lineal y requerir su linealización; ser análoga y requerir su digitalización; ser digital y convertirla en análoga; ser un cambio de voltaje y convertirla a un cambio en corriente de magnitud adecuada, etc. A todas estas modificaciones se les designa por lo general con el término “Acondicionamiento de Señales”.

Los elementos que conectan un sistema electrónico con su entorno, sensores y actuadores, no están previstos en general para ser conectados directamente al núcleo del sistema, normalmente un procesador digital. Las etapas de acondicionamiento de señal hacen compatibles dichas conexiones.

Los sistemas de instrumentación se pueden clasificar en dos clases principales: analógicos y digitales. Los sistemas analógicos tratan en forma

analógica la información de mediciones, se pueden definir como una función continua. Los sistemas digitales manejan la información en forma digital. Una cantidad digital puede consistir en un número de pulsos discretos y discontinuos cuya relación de tiempo contiene información referente a la magnitud o naturaleza de la cantidad.

Los siguientes son algunos de los procesos que se pueden presentar en el acondicionamiento de una señal:

- a) Protección para evitar el daño al siguiente elemento.
- b) Convertir una señal en un tipo de señal adecuado. Sería el caso de cuando es necesario convertir una señal a un voltaje de cd, a una corriente o presión.
- c) Obtención del nivel adecuado de la señal. En muchos casos es necesario amplificar una señal para que esta pueda ser leída.
- d) Eliminación o reducción de ruido. La forma más común es utilizar filtros.
- e) Manipulación de la señal. Por ejemplo, convertir una variable en una función lineal.

2.4.2. Tipos de señales

Denominamos aquí señal a toda magnitud eléctrica cuyas variaciones llevan información sobre un proceso o magnitud física. Según el parámetro utilizado y sus características, las señales eléctricas se utilizan para representar información

se clasifican de acuerdo con lo indicado en la figura 2-6. A continuación se analiza cada uno de los tipos allí indicados.

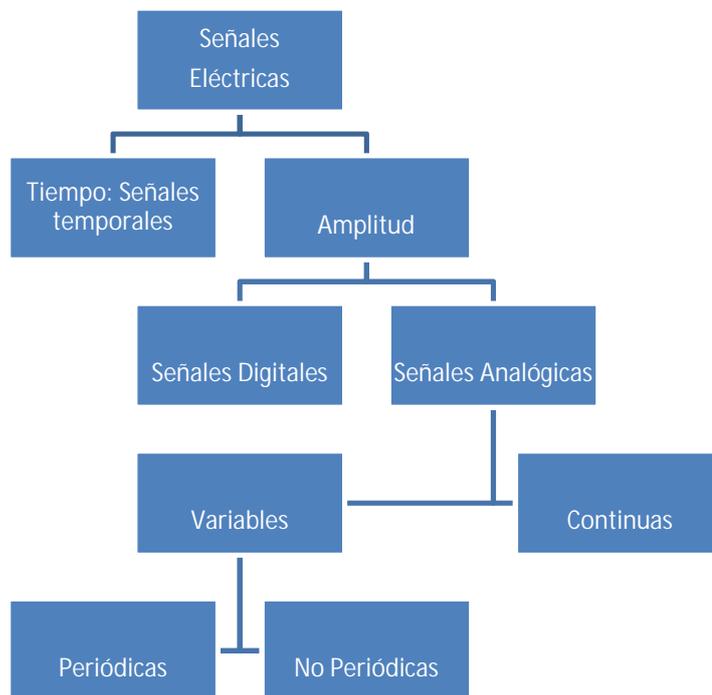


Figura 2-6 Clasificación de las señales eléctricas.

2.4.2.1. Señales analógicas

Las señales analógicas son aquellas que pueden tomar cualquier valor dentro de unos determinados márgenes y que llevan la información en su amplitud. Las señales analógicas se pueden a su vez clasificar en variables o continuas (figura 2-6).

Las señales analógicas variables son aquellas que equivalen a la suma de un conjunto de senoides de frecuencia mínima f mayor que cero.

Un caso típico son las señales senoidales de frecuencia constante que representan la información mediante su amplitud (figura 2-7a), y constituyen un ejemplo de señal analógica periódica.

Las señales analógicas continuas son aquellas que se pueden descomponer en una suma de senoides cuya frecuencia mínima es cero. Se trata de señales que tienen un cierto nivel fijo durante un tiempo indefinido (figura 2-7b), y que representan también la información mediante su amplitud.

El mundo físico es en general analógico y la mayoría de los sensores proporcionan señales analógicas.

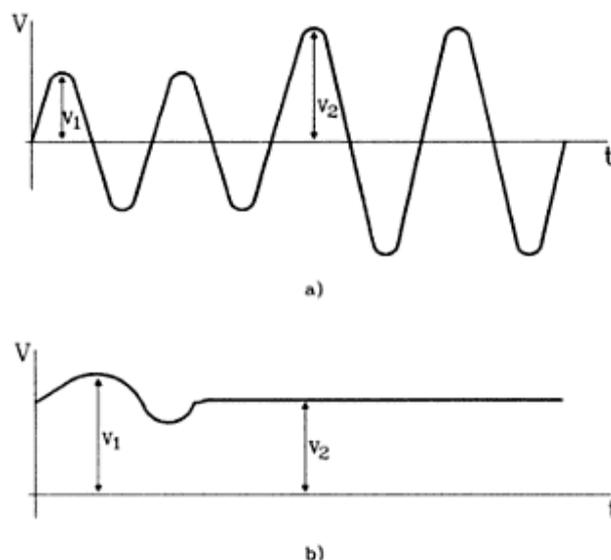


Figura 2-7 Señales analógicas: a) Senoidal de frecuencia constante. b) Continua.

2.4.2.2. Señales digitales

Las señales digitales son aquellas que solo toman un número finito de niveles o estados entre un máximo y un mínimo. Las más utilizadas son las binarias que solo pueden tener dos niveles que se asignan a los números binarios 0 y 1. Una variable binaria recibe el nombre de bit.

2.4.2.3. Señales unipolares y señales diferenciales

De acuerdo con la disposición física de los terminales en los que se presentan, las señales pueden ser unipolares o bipolares diferenciales (figura 2-8). Las señales unipolares se miden entre un terminal y otro de referencia. Se denominan señales unipolares puestas a tierra aquellas cuyo terminal de referencia está conectado a tierra. (La superficie del planeta es eléctricamente conductora en distintos grados y las instalaciones eléctricas están conectadas a ella por razones de protección.) Si el terminal de referencia es independiente de tierra, se tiene una señal flotante; los terminales se pueden invertir, o uno de ellos se puede conectar a tierra sin que se altere el circuito. Si entre el terminal de referencia y tierra existe una tensión, se dice de ésta que es una tensión en modo común y no se puede conectar a tierra ninguno de los terminales de la señal; la impedancia equivalente del generador de modo común puede tener valores muy dispares según el caso.

Un termopar conectado a la carcasa de una turbina de vapor para medir su temperatura ofrece una señal unipolar puesta a tierra por estarlo la turbina. El mismo termopar pero encerrado dentro de una vaina de acero y aislado de ella, ofrece una señal, en principio, flotante. Si en vez de estar montado sobre la turbina lo está sobre un cable de alta tensión, esta alta tensión aparece en modo común a los dos terminales del termopar, y en serie con una impedancia (alta) determinada por el acoplamiento capacitivo entre el cable y tierra.

Las señales bipolares, o diferenciales, aparecen entre dos terminales que son independientes del terminal de referencia, que a su vez puede estar o no conectado a tierra. La impedancia entre cada uno de los dos terminales de señal y el de tierra es similar. La polaridad con que se tome la señal es irrelevante: sólo cambia el signo. Hay también tres posibilidades: señal diferencial puesta a tierra, flotante, o con tensión en modo común, que es lo más frecuente.

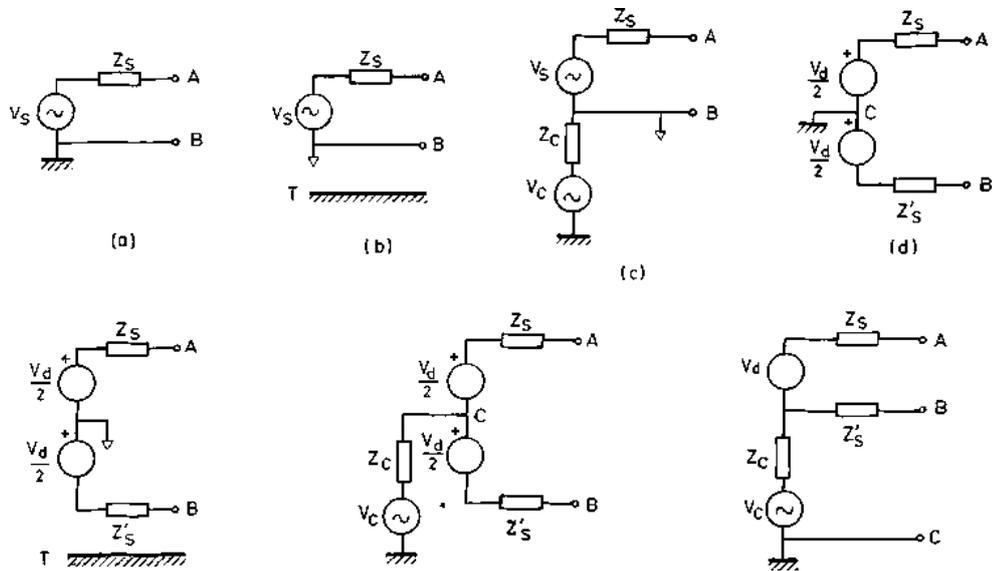


Figura 2-8 Tipos de señales según sus terminales, (a) Unipolar puesta a tierra, (b) Unipolar flotante, (c) Unipolar con tensión en modo común, (d) Diferencial puesta a tierra, (e) Diferencial flotante, (f) Diferencial con tensión en modo común, (g) Diferencial con tensión en modo común.

El punto de referencia para las señales flotantes, o uno cualquiera de los dos terminales de señal, puede conectarse a tierra; para las señales con tensión de modo común, no se puede conectar a tierra ningún terminal, ni siquiera el de referencia. Se puede, sin embargo, invertir la polaridad de la salida.

Las señales diferenciales se distinguen porque las diferencias de potencial respectivas entre cada terminal y el de referencia varían simultáneamente en la misma magnitud pero en sentido opuesto. Sin embargo, muchas veces se emplea un circuito equivalente como el de la figura 2-8g, donde esta propiedad no queda patente; obsérvese que aquí el terminal C no coincide con el punto C de la figura 2-8. Un caso frecuente de señales diferenciales es el de un sensor dispuesto en un puente de impedancias

alimentado por una fuente de tensión o de corriente que tiene un terminal puesto a tierra.

Obviamente, mientras una señal unipolar puede darse con dos terminales (alto, A, y bajo, B), una señal diferencial necesita siempre al menos tres terminales para su representación: alto, A, bajo, B, y común, C. La compatibilización de los terminales de la señal con los terminales de entrada del dispositivo siguiente es una de las funciones del acondicionamiento de señales, y tiene gran repercusión en la reducción de interferencias. La consideraremos de nuevo una vez analizadas las opciones para la amplificación.

2.4.2.4. Señales de alta y baja impedancia

Además de la configuración de terminales en que se presentan, es importante también la impedancia de salida de las señales. Se habla, en consecuencia, de señales de alta impedancia y de baja impedancia. Desde este punto de vista, al conectar dos elementos de un sistema electrónico hay dos situaciones posibles: o bien se desea que la tensión o corriente de entrada de un elemento coincida con la correspondiente a la salida del elemento precedente, o bien se desea transferir la máxima potencia de un elemento al siguiente. En ambos casos hay que adaptar la impedancia y esta es otra de las funciones del acondicionamiento de señal. En el primer caso, para evitar la

atenuación de la señal (efecto de «carga»), la impedancia de entrada debe ser mucho mayor que la de salida, si se mide tensión, o mucho menor, si se mide corriente. Con la notación la tensión medida será

$$V_m = V_0 \frac{Z_{IN}}{Z_o + Z_{IN}} \quad \text{Ecuación 2-2}$$

2.4.3. Operaciones con señales

La información de una señal está en el valor de alguno de sus parámetros, definidos en el dominio de las amplitudes o en el dominio de las frecuencias. En SAS lo habitual es que la información esté en la amplitud. El primer aspecto que se contempla entonces, antes incluso que el formato y la impedancia, es obtener a partir de la señal de entrada otra cuyo margen de amplitudes se corresponda con el requerido por el elemento que va a recibir la señal, y de manera que el valor inferior del margen (en módulo) se pueda medir con la resolución deseada.

Pero, además, cuando las señales se consideran en su contexto, surge la necesidad de otras operaciones. Por ejemplo: para medir la temperatura media del aire en un recinto se puede partir de la señal respectiva de varios sensores de temperatura y calcular su media; para calcular la velocidad de una aeronave se puede integrar la señal de un sensor que mida su aceleración; para medir la

potencia en un circuito eléctrico se pueden multiplicar dos tensiones que sean, respectivamente, proporcionales a la tensión y a la corriente en el circuito.

Todas estas operaciones se pueden describir mediante los símbolos matemáticos correspondientes. Hay otras operaciones que pueden describirse de la misma forma y que, sin embargo, muchas veces se describen empíricamente, o empleando un lenguaje no matemático. Aunque esta práctica puede ser aceptable en algunas situaciones, la descripción de las etapas de acondicionamiento de señal mediante términos matemáticos facilita su diseño y el análisis de sus errores.

El diseño resulta también más fácil si la descripción de las operaciones va acompañada de la descripción de las conversiones entre dominios de información (tensión, corriente, frecuencia-tiempo) que conllevan. Esto permite detectar redundancias (es decir, conversiones innecesarias) y aprovechar mejor las cualidades de cada circuito. Es más fácil, por ejemplo, restar tensiones que restar frecuencias, pero es más fácil contar (que es una forma de integrar) que integrar una tensión.

2.4.3.1. Operaciones con señales analógicas

Las operaciones sobre señales analógicas se clasifican en lineales y no lineales. En las primeras se cumple el principio de la superposición, mientras

que en las segundas no. En la tabla 2-1 se relacionan algunas de las operaciones más frecuentes en el acondicionamiento de señales analógicas. Otras operaciones habituales son simples casos particulares de las descritas. La inversión (de signo), por ejemplo, equivale a multiplicar por la constante -1 . Además, en muchas operaciones se multiplica el resultado final por una constante (se amplifica), para tener el valor de fondo de escala deseado.

La realización física de las operaciones de la tabla 2-2 presupone que el elemento que sigue al que realiza la operación no le carga. Dicho de otra forma, en la realización de operaciones complejas que requieran varias etapas hay que adaptar las impedancias.

Por otra parte, no hay que olvidar que en las señales complejas la información está no sólo en la amplitud de sus componentes sino también en su fase. En consecuencia, en las operaciones que se efectúen con ellas hay que cuidar ambos aspectos; si se desea que la señal conserve su forma, la operación no sólo debe ser lineal (es decir, no debe modificarse la frecuencia), sino que además el posible desfase introducido por la operación debe ser proporcional a la frecuencia.

Suma	$Z(t) = x(t) + y(t)$ $Z(t) = X(t) + b$	Polarización, b constante
Promedio	$Z(t) = \frac{x_1(t) + x_2(t) + \dots + x_n(t)}{n}$	n entero
Resta	$Z(t) = x(t) - y(t)$	
Producto	$Z(t) = x(t) y(t)$ $Z(t) = k x(t)$	Modulación de amplitud Si y(t) es senoidal Amplificación por k
División	$Z(t) = x(t) / y(t)$	
Potencia	$Z(t) = x^n(t)$	n < 1, radicación
Logaritmo	$Z(t) = \ln x(t)$	
Integración	$z(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt$	
Derivación	$z(t) = \frac{dx(t)}{dt}$	
Comparación	$Z(t) = 1 \text{ si } x(t) > y(t)$ $= 0 \text{ si } x(t) < y(t)$	Los valores 1 y 0 se representan Con dos niveles de tensión distintos
Limitación De amplitud	$z(t) = x(t) \text{ si } x(t) < V$ $= V \text{ si } x(t) \geq V$	Recorte

Limitación De velocidad	$z(t) = x(t) \text{ si } \left \frac{dx(t)}{dt} \right < S$ $z(t) \neq x(t), \frac{dz}{dt} = S \text{ si } \left \frac{dx(t)}{dt} \right $	
Valor absoluto	$Z(t) = x(t) $	Rectificación de onda completa
Valor máximo	$Z(t) = \max \{ x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \}$ $Z(t) = \max \{ x(t) \}$	Detección de pico
Valor mínimo	$Z(t) = \min \{ x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t) \}$ $Z(t) = \min \{ x(t) \}$	Detección de valle

Tabla 2-2 Algunas operaciones habituales en el acondicionamiento de señales analógicas.

2.4.3.2. Operaciones con señales digitales

Dado que la mayoría de los sensores ofrecen señales analógicas, el acondicionamiento de señales digitales es menos común que el de señales analógicas. Se podría incluso pensar que las operaciones con señales digitales están supeditadas a lo que se pueda hacer programando un μP . Sin embargo, de la misma forma que muchas de las funciones periféricas de un μP son tan frecuentes que se comercializan varios circuitos integrados para realizarlas, también los hay para otras operaciones comunes con señales digitales. En la

tabla 2-3 se presentan algunas de dichas operaciones; el significado de la mayoría de los términos es inmediato, salvo quizás la «eliminación de rebotes».

Distinguimos entre las operaciones sobre la información representada por las señales digitales y las operaciones sobre sus parámetros físicos. Las primeras se pueden realizar todas con un μP mientras que la mayoría de las segundas no. En el primer caso, la decisión sobre el uso de un μP o de componentes específicos depende, entre otros factores, de la velocidad deseada, de la memoria disponible, del abanico de entrada y salida necesario, y de la finalidad de la operación a realizar.

El uso de un μP reduce el número de componentes y no tiene limitaciones de abanico de entrada o salida (para las operaciones; el componente sí las tiene), pero a costa de una menor velocidad y una mayor ocupación de memoria.

1) sobre la información representada por el código	
- Aritmética decimal o binaria:	Sumar / restar Con tar/ descontar Multiplicar dividir
- Operaciones lógicas:	AND OR NOT EX -OR
- Almacenar (registros)	
	Serie/paralelo

- Conversiones:	Codificar/decodificar Complementar a 9 Cambio de estado (biestables)
2) sobre los parámetros físicos	
- sobre la frecuencia:	Multiplicar Dividir osciladores
- sobre la fase:	Comparadores de fase (EX - OR)
- sobre el tiempo:	Retardo Monoestables Diferenciar Integrar
- sobre la amplitud:	Conversión de niveles de tensión Recuadrar (disparador schmitt) Inhibir cambios estado (eliminar rebotes)

Tabla 2-3 Operaciones habituales con señales digitales que se pueden realizar con circuitos integrados.

2.4.4. Errores en el acondicionamiento de señal

En el caso de las operaciones con señales analógicas, toda discrepancia entre la salida real y la esperada se denomina error. Por supuesto que dicha discrepancia es también un indicio de error en el caso de las señales digitales, pero dada la mayor inmunidad a errores propia de estas operaciones, en caso de discrepancias al operar con señales digitales se habla de fallos más que de errores. En las operaciones analógicas hay siempre errores, debidos cuando menos a las limitaciones físicas intrínsecas a los elementos con que se realizan.

Para el estudio de los errores se puede considerar, por una parte, el comportamiento cuando la entrada es de muy baja frecuencia ($f < 0,01$ Hz), errores estáticos, y, por otra, el comportamiento frente a las otras entradas, errores dinámicos.

2.4.4.1. Errores estáticos

Errores aditivos y errores multiplicativos. Los errores estáticos pueden ser constantes con respecto a la magnitud de entrada, o puede que varíen con ésta. En el primer caso se denominan errores aditivos; en el segundo caso se denominan multiplicativos, si son directamente proporcionales a la entrada, y no tienen nombre específico si no lo son. Otros nombres equivalentes son, respectivamente, errores de cero y errores de ganancia (o de factor de escala). En cualquier caso, el error total puede expresarse como error absoluto, $e = \text{valor obtenido} - \text{valor ideal}$ o como error relativo; $e = \text{valor ideal}$.

El error absoluto se puede expresar respecto a un valor de referencia, por ejemplo el valor de fondo de escala. Se habla entonces de error «relativo al fondo de escala», pero no deja de ser un error absoluto. Sólo cuando la entrada sea el valor de fondo de escala, coincidirán el error absoluto referido al fondo de escala y el error relativo.

2.4.4.2. Errores dinámicos

En la respuesta de un sistema a una señal de entrada, se puede distinguir entre dos etapas o fases: la transitoria y la estacionaria. La primera es la que media desde que se aplica la entrada hasta que la salida alcanza su valor final, mientras que la segunda se cuenta a partir de dicho momento. Cuando se habla de error dinámico suele sobreentenderse en la fase estacionaria, pero antes de medir la salida hay que asegurarse de que ha acabado la fase transitoria.

El error dinámico depende de la forma concreta de la entrada aplicada, si bien en el acondicionamiento de señal suelen considerarse entradas sinodales. No hay que olvidar entonces que la función de transferencia no recoge la respuesta transitoria a dichas entradas.

Cuando la operación realizada es lineal, los errores se pueden dividir en aditivos y multiplicativos, aparte del posible error de linealidad. El ruido de un amplificador es una fuente de error aditivo típica, mientras que la limitación del ancho de banda produce un error multiplicativo. El error total puede expresarse también como error absoluto o como error relativo.

2.4.5. Amplificación

El margen de entrada habitual en un CAD es de 0 a 5 V o de 0 a 10 V. En consecuencia, las señales procedentes de los sensores generadores de tensión,

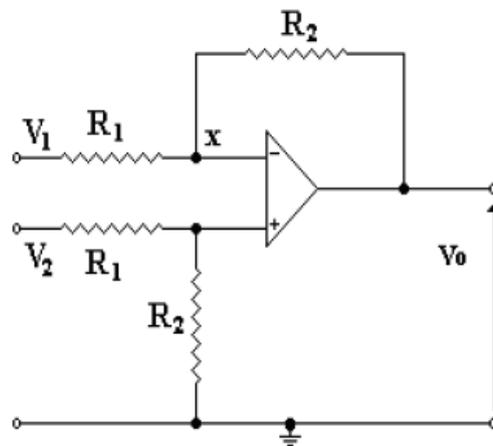
de los divisores de tensión y de los puentes, hay que amplificarlas, y a veces hay que desplazar su valor mínimo para que sea cero. Además, la entrada del CAD es unipolar, es decir, un terminal está conectado al de referencia (incluso en el caso de admitir tensiones positivas y negativas), de manera que si la señal disponible es diferencial, el amplificador debe convertirla en unipolar. Si el sensor, o su circuito inmediato, no producen una tensión continua, que es el único tipo de señal que admite el CAD, hay que efectuar una conversión de dominio previa o simultánea a la amplificación.

Las señales procedentes de los sensores suelen ser de baja frecuencia (< 10 Hz), si bien en el caso de sensores de reactancia variable la portadora es de hasta 100 Khz. En consecuencia, los circuitos de interfaz suelen estar basados en AO. Solo en algunos sensores capacitivos e inductivos y con sensores de fibra óptica se trabaja a frecuencias superiores a 1 MHz, y se obtienen principalmente señales moduladas en frecuencia.

2.4.5.1. Amplificadores diferenciales

Las señales en forma de tensión unipolar se pueden amplificar en principio mediante un amplificador elemental (inversor o no inversor) basado en un AO. Ahora bien, dado que muchas veces hay una tensión de interferencia v , que aparece en modo común entre los terminales de referencia del sensor y del amplificador, éste suele ser de tipo diferencial (AD) (figura 2-9). El origen de v ,

es muchas veces la diferencia de potencial entre tomas de tierra físicamente distinta: las corrientes de fugas de la instalación y de los equipos conectados a ella hacen que entre dos puntos alejados exista siempre una diferencia de potencial, incluso si la impedancia eléctrica entre ellos es pequeña.



La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $V_o = \frac{R_2}{R_1}(V_2 - V_1)$

Figura 2-9 Amplificador diferencial.

2.4.5.2. Amplificador inversor

Se denomina inversor ya que la señal de salida es igual a la señal de entrada (en forma) pero con la fase invertida 180 grados.

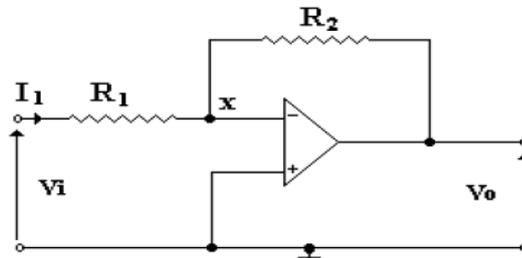


Figura 2-10 Amplificador inversor.

El análisis de este circuito es el siguiente:

$$V_+ = V_- = 0$$

Definiendo corrientes: $\frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = -\frac{V_{out} - 0}{R_f}$ y de aquí se despeja

$$V_{OUT} = -V_{in} \frac{R_f}{R_{in}}$$

Para el resto de circuitos el análisis es similar.

$$Z_{in} = R_{in}$$

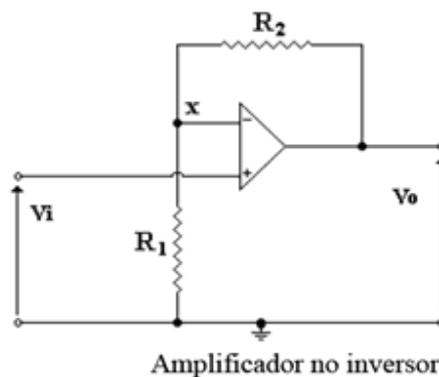
Por lo cual podemos controlar la impedancia de entrada mediante la elección de R_{in} .

Esta configuración es una de las más importantes, porque gracias a esta configuración, se puede elaborar otras configuraciones, como la configuración

del derivador, integrador, sumador. En sistemas microelectrónicos se puede utilizar como buffer, poniendo 2 en cascada.

2.4.5.3. Amplificador no inversor

Este circuito es muy parecido al inversor, la diferencia es que la señal se introduce por el terminal no inversor, lo cual va a significar que la señal de salida estará en fase con la señal de entrada y amplificada.



La ganancia en voltaje del circuito es la siguiente: $\frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

Figura 2-11 Amplificador no inversor.

2.4.5.4. Amplificador logarítmico

Los circuitos logarítmicos y antilogarítmicos son utilizados para efectuar la multiplicación de señales Analógicas, proporcionar compresión de señales y obviamente obtener logaritmos y exponenciales.

Para producir una respuesta logarítmica del opam, hay que disponer de un mecanismo con características logarítmicas. La unión pan de los semiconductores es un dispositivo con esas características. Al conectar un diodo, tal como se indica en la figura 2-12, se obtiene un amplificador logarítmico.

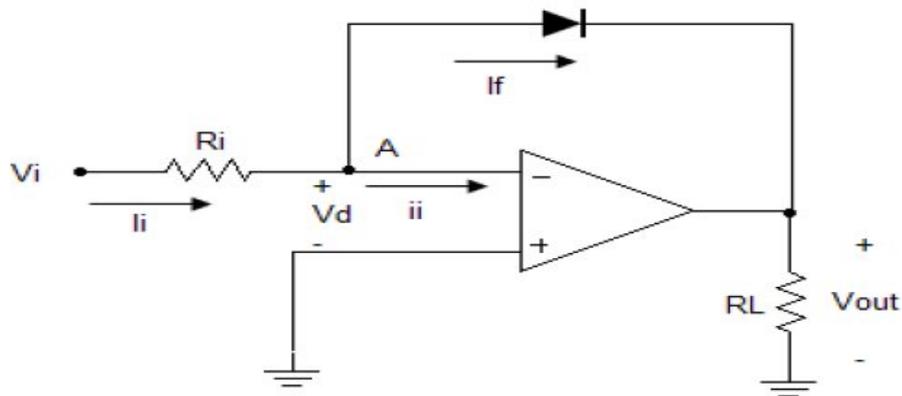


Figura 2-12 Amplificador Logarítmico.

2.4.5.5. Amplificador integrador

Si se conecta un capacitor en el circuito de retroalimentación de un amplificador inversor en vez de una resistencia, se obtiene como resultado un amplificador integrador. La ventaja de los circuitos tipo integrador es que el capacitor de retroalimentación, se carga por una corriente constante, que puede ser controlada fácilmente. En la figura 2-13 se muestra el circuito básico de un integrador realizado con un opam.

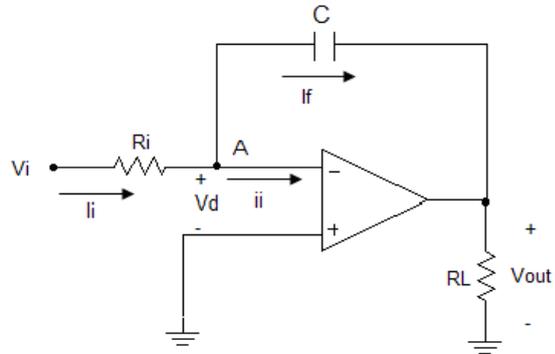


Figura 2-13 Amplificador integrador.

$$i_i = V_i / R_i \quad (1)$$

Donde:

q = carga del capacitor

C = valor del capacitor en Faradios

V = voltaje del capacitor. Al derivar (1), se obtiene la corriente que circula por el capacitor:

$$dq/dt = c \cdot dv/dt \quad (3)$$

Donde:

Dq/dt : corriente que circula por el capacitor

Dv/dt : derivada del voltaje en las terminales del capacitor

Redefiniendo la ec. (2) podemos decir que:

$$I_c = C \cdot dv/dt \quad (4)$$

Donde, I_c representa la corriente que circula por el capacitor.

Haciendo un análisis de corrientes de Kirchhoff en el nodo A, se obtiene:

$$I_c = I_i + I_f \quad (5)$$

Despreciando I_i y estableciendo la ec. (5) en función de voltajes se obtiene:

$$V_i - 0/R_i = C \cdot dv_{out}/dt \quad (6)$$

Por lo que el voltaje de salida está dado por la ecuación:

$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int V_i \cdot dt$$

Ecuación 2-3

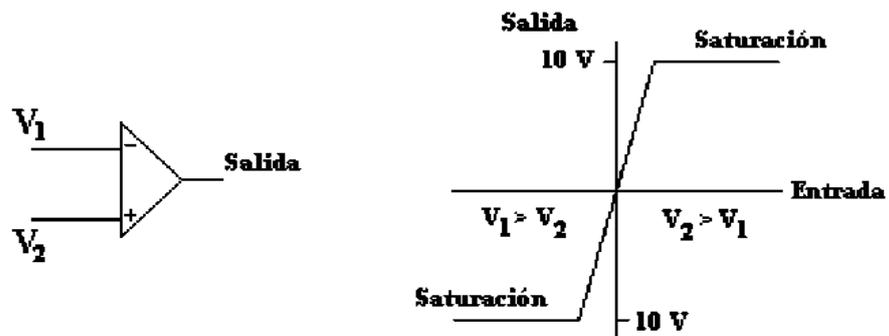
2.4.5.6. Amplificador comparador

En un circuito electrónico, se llama comparador a un amplificador operacional en lazo abierto (sin realimentación entre su salida y su entrada) y suele usarse para comparar una tensión variable con otra tensión fija que se utiliza como referencia.

Como todo amplificador operacional, un comparador estará alimentado por dos fuentes de corriente continua (+V_{cc}, -V_{cc}). El comparador hace que, si la tensión de entrada en el borne positivo (en el dibujo, V₁) es mayor que la

tensión conectada al borne negativo (en el dibujo, V_2), la salida (V_{out} en el dibujo) será igual a $+V_{cc}$. En caso contrario, la salida tendrá una tensión $-V_{cc}$.

Un comparador indica cuál de dos voltajes es mayor, y con este fin se puede utilizar un amplificador sin retroalimentación u otras componentes. Uno de los voltajes se aplica a la entrada inversora y el otro a la no inversora. Cuando dos entradas son iguales, no hay salida.



(a) (b)
 Figura 2-14 Comparador (a) Símbolo. (b) Curva característica.

2.4.5.7. Amplificador usado para instrumentación

Los voltajes y corrientes de salida de muchos transductores son señales muy pequeñas. Además de los bajos niveles, a menudo es necesario transmitir la salida del transductor hacia el equipo de adquisición de datos o de control. En el arreglo de problemas, sobre todo en un ambiente industrial donde hay mucha maquinaria eléctrica, el ruido eléctrico puede causar serias dificultades en

circuitos de bajo nivel. Estos ruidos pueden ser radiados, como un campo electromagnético, o inducidos en el cableado de la planta, como circuitos a tierra, y picos producidos por la fuente de alimentación de ca. A pesar de las fuentes de ruido, las señales de bajo nivel se deben transmitir con cuidado de un lugar a otro.

Un método efectivo para combatir el ruido es incrementar la intensidad de las señales de bajo nivel antes de su transmisión a través de los alambres. Esto se realiza frecuentemente con un amplificador llamado “*amplificador de instrumentación*”.

Varias características de un amplificador de instrumentación lo distinguen de los amplificadores operacionales.

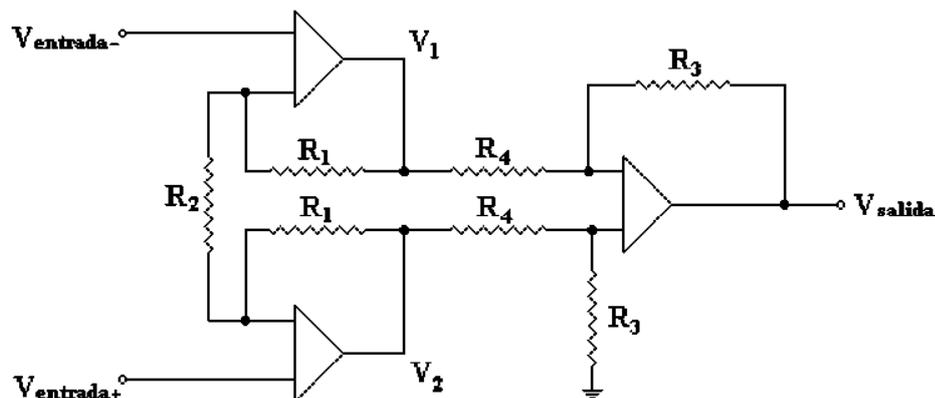


Figura 2-15 Amplificador de instrumentacion

$$\text{Si } R_2=R_3 \text{ tenemos: } V_{o2} - V_{o1} = \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)(V_{i1} - V_{i2})$$

Los amplificadores de instrumentación tienen ganancia finita. Un amplificador operacional tiene una ganancia muy grande, la cual es infinita en el caso ideal. El amplificador operacional se suele utilizar con realimentación externa para proporcionar una ganancia finita, o con otros elementos de circuito con el fin de generar otras funciones, como integradores, diferenciadores, filtros, etc. Además, de una ganancia finita el amplificador de instrumentación no proporciona estas funciones.

El amplificador de instrumentación tiene una entrada diferencial de alta impedancia. El amplificador operacional también la tiene, sin embargo, cuando los elementos de realimentación se adicionan alrededor del amplificador operacional, la impedancia de entrada disminuye considerablemente.

El amplificador de instrumentación tiene un rango de voltaje alto y un rechazo en modo común también alto. Aunque los amplificadores operacionales tienen rechazo y rango de voltaje en modo común, el amplificador de instrumentación es superior a la mayoría de los amplificadores operacionales.

2.4.6. Filtrado

El término filtrado se refiere al proceso de eliminación de cierta banda de frecuencias de una señal y permite que otras se transmitan. El rango de frecuencias que pasa un filtro se conoce como *banda de paso*, y el que no pasa *banda de supresión*; la frontera entre lo que se suprime y lo que pasa se conoce como *frecuencia de corte*. Los filtros se clasifican de acuerdo a los rangos de frecuencia que transmiten o rechazan.

Un *filtro pasa bajas* (figura 2-16a) tiene una pasa bandas que acepta la transmisión de todas las frecuencias desde cero hasta cierto valor. El *filtro pasa altas* (figura 2-16b) tiene una pasa bandas que acepta la transmisión de todas las frecuencias a partir de un determinado valor hasta el infinito. El *filtro pasa bandas* (figura 2-16c) permite la transmisión de todas las frecuencias que están dentro de una banda especificada. El *filtro supresor de banda* (figura 2-16d) rechaza e impide la transmisión de todas las frecuencias de cierta banda en todos los casos la frecuencia de corte se define como aquella para la cual el voltaje de salida es 70.7% del de la pasa banda.

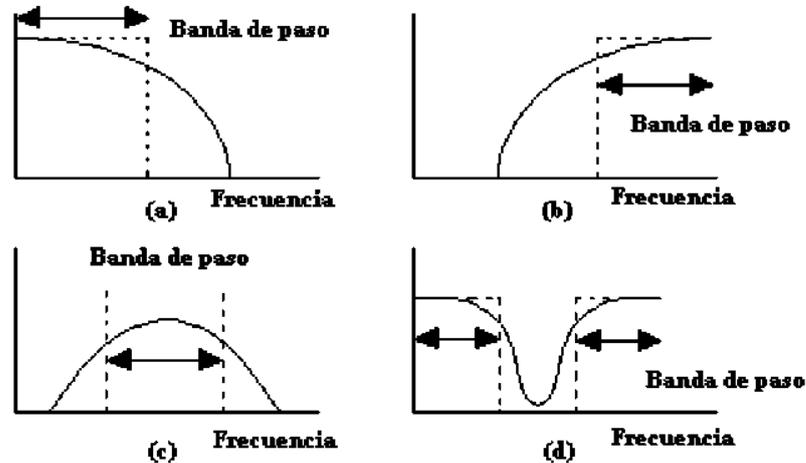


Figura 2-16. Características de los filtros ideales. a) Pasa bajas, b) Pasa altas, c) Pasa bandas, d) Supresor de banda.

2.5. Instrumentación Electrónica

2.5.1. Breve Historia sobre Instrumentación Electrónica

Para hacer un compendio de la historia de la instrumentación hay que partir del invento de la pila electroquímica, realizado por volta en el año 1800. Este es el revulsivo que acelera el progreso de la ciencia en este campo, y en la instrumentación electrónica en particular.

A pesar de que, algunos años antes, diferentes investigadores habían observado la existencia de la electricidad en formas diferentes que la proporcionada por los generadores electrostáticos, no se produjo un avance importante hasta que volta construyó la célula electroquímica a partir de papeles húmedos con agua salada situados consecutivamente entre placas de plata y

zinc. El dispositivo era fácil de construir, con materiales comunes y razonablemente baratos, y producía una corriente eléctrica de una duración de algunos minutos.

El resultado inmediato del descubrimiento fue que mucha gente pudo experimentar con el nuevo tipo de energía y aplicarla en la investigación de circuiterías muy básicas formadas por hilos y bobinas. En torno a 1830, la necesidad de tener mejores comunicaciones y más rápidas acelera la invención del telégrafo, mediante el cual podía transmitirse información a distancias considerables conmutando una corriente que circulaba por una malla formada por un par de hilos. Este fue uno de los primeros ejemplos de proceso digital, que utilizaba información binaria y que requería la definición de códigos, el más famoso de los cuales fue el que invento Samuel Morse. El desarrollo de las comunicaciones, entre otros, es el que impulsa la industria de construcción de componentes eléctricos simples, como relés, conmutadores, etc. Cincuenta años más tarde aparece el teléfono, capaz de convertir las ondas sonoras en señales eléctricas analógicas.

Paralelamente a este desarrollo, los instrumentos eléctricos de medida progresan desde los electroscopios de láminas de oro hasta sofisticados galvanómetros, voltímetros electrostáticos, vatímetros y los modernos galvanómetros de bobina móvil.

Gradualmente se va conociendo la naturaleza del electrón y de otras partículas y la observación de otros fenómenos que permiten establecer nuevos modelos y patrones. Todo eso conduce a la aparición de la llamada física moderna, al comienzo del siglo XX. De hecho, fue durante el siglo anterior cuando se observaron y estudiaron una serie de fenómenos físicos que tuvieron un significado importante en el desarrollo de sensores y de la instrumentación. Estos fenómenos constituyen la base de los sensores y actuadores de hoy en día. Podemos hablar del efecto termoeléctrico (termopares), el efecto piezoeléctrico, la interacción entre la deformación mecánica y la variación de resistencia (galgas extensiométricas), etc. Al final del siglo XIX, ya se utilizaban muchos transductores que eran capaces de medir variables del espectro electromagnético y la radiación infrarroja.

El desarrollo de la instrumentación durante el siglo XX ha continuado de una manera acelerada. Ha habido dos influencias importantes en este desarrollo. Primero, la aparición y la emergencia de la ingeniería electrónica y, después, el rápido desarrollo de la tecnología de la información.

La ingeniería electrónica tiene sus orígenes en los sistemas de comunicación por radio marítimos. La necesidad de establecer buenas comunicaciones entre barcos hizo que se desarrollaran mejores detectores, amplificadores y generadores de señales de radiofrecuencia. Así aparecen el diodo termoiónico (1904) y el tríodo (1907). A partir de este momento, el

desarrollo radio-comunicaciones fue rápido y espectacular y, por otra parte, la instrumentación empezó a ser tal como la vemos nosotros ahora. El uso de los tubos de vacío (válvulas) para la instrumentación se extendió a la telemetría de trenes de carga, la instrumentación naval y aeronáutica, los rayos X médicos e industriales, los electrocardiógrafos, entre otros.

La conveniencia y después el bajo coste de sistemas electrónicos desplazaron rápidamente los sistemas de instrumentación mecánicos. La invención del transistor de estado sólido el año 1947 abriría un abanico muy grande de posibilidades de procesar información.

Los conflictos militares han contribuido al incentivo y al esfuerzo para encontrar nuevas ideas y nuevas tecnologías. La primera guerra mundial (1914-1918) precipitó el desarrollo de las radiocomunicaciones, y durante la segunda guerra mundial (1939-1945) se desarrollaron los sistemas de radar, los controladores de vuelo de aeronaves y otros dispositivos en los cuales la instrumentación era una parte muy importante.

La variedad de efectos e interacciones físicas que se descubrieron durante el siglo XIX encontraron su aplicación como sensores cuando se dispuso de los amplificadores electrónicos en torno a 1920. La variación de resistencia de los metales sometidos a una deformación se usó en medidas de esfuerzo (galgas extensiométricas) en 1930, y la sensibilidad a la luz del selenio se usó en el control de la intensidad de la luz en estos mismos años. Los

termopares y las resistencias de platino para el diseño de termómetros se estaban usando en procesos de control desde la primera década del siglo.

A medida que la ingeniería electrónica fue progresando, se pudieron detectar y amplificar señales de nivel más bajo. Se desarrollaron técnicas sofisticadas de medida en presencia de altos niveles de ruido.

Las características de los semiconductores se utilizan en muchas aplicaciones, galgas extensiométricas, termómetros, detectores de radiación y finalmente, la superconductividad se utiliza en la detección de variaciones extremadamente bajas de pequeños campos magnéticos.

El desarrollo de técnicas de construcción de circuitos integrados ha permitido disponer de un rango importante de sensores de silicio. La tecnología láser y la fibra óptica desarrolladas en el campo de la comunicación se utilizan para la construcción de giróscopos sin ninguna parte en movimiento y otros sensores capaces de operar en lugares hostiles con alta radiación a altos voltajes.

Evidentemente, una de las aplicaciones más espectaculares de la electrónica ha sido la construcción de máquinas de cálculo. De hecho, no fue hasta los setenta que los computadores soportaron, almacenaron y procesaron información propiamente dicha (no solo números), y que los ordenadores, las interfaces y las intercomunicaciones se convirtieron en aspectos reales de la

tecnología de la información. Los humanos pudieron comunicarse con los computadores inicialmente con tarjetas perforadas, después con teclados alfa numéricos y recientemente con unidades de video (VDU, video display units).

Los sensores se han podido conectar a los ordenadores utilizando los convertidores analógicos-digitales (ADC). Así nace la instrumentación moderna.

La utilización de la electrónica digital para los instrumentos de medida se restringió a tareas inherentes digitales, como los circuitos de cálculos para medidas de frecuencia y de partículas nucleares. Durante los años setenta, la aparición de diodos emisores de luz (LED) y de los visualizadores de cristal líquido (LCD) permitió el abaratamiento de los voltímetros digitales (DVM), que fueron utilizados rápidamente como paneles digitales de medida (DPM, digital panel meters), que desplazaron a los tradicionales galvanómetros de bobina móvil. El diseño interno de los DVM y los DPM permite una salida digital que puede ser transmitida a otros dispositivos. De esta manera las interfaces digitales entre el equipamiento de test y los sistemas digitales se han hecho comunes.

Un paso más se produjo cuando, a partir de los años setenta, aparecieron los microprocesadores. Tanto los microprocesadores como los microcomputadores se incorporaron rápidamente a los instrumentos, de manera que con programas adecuados facilitaban la realización de sofisticadas funciones al usuario, como el autorrango, la autocalibración, la medida, la detección de picos, etc.

A partir de los años ochenta los ordenadores personales incrementaban sus prestaciones en velocidad y potencia de cálculo. Rápidamente se hacen indispensables en diferentes procesos industriales de todos los ámbitos. El control de instrumentos por ordenadores se generaliza y se desarrollan sistemas cada vez más complejos y potentes.

De hecho, el control de la instrumentación por ordenador no es una novedad. Durante los años setenta ya se utilizaban los ordenadores en los sistemas de medida mediante el uso de la interfaz IEEE-488.

Durante los años noventa, los procesadores de 16 y 32 bits se incorporaban en equipos asequibles que, de esta manera, han podido obtener altas velocidades y grandes capacidades de memoria. La popularización de los ordenadores de altas prestaciones ha supuesto un fuerte desarrollo de herramientas muy potentes de programación, que han simplificado la creación de aplicaciones.

Otro desarrollo importante para la instrumentación en la década de los noventa es la aparición de nuevos estándares y la revitalización de algunos ya existentes.

2.5.2 Polímetros y Medidores de impedancia

De acuerdo a lo expuesto anteriormente sobre los tipos de señales, dos de los tipos de señales analógicas más utilizados son:

- a) Las señales continuas que poseen un valor constante a lo largo del tiempo o cuya velocidad de variación es muy pequeña.
- b) Las señales alternas senoidales de frecuencia fija del orden de la red de alterna (50c/seg.).

Ambos tipos de señales pueden consistir en una corriente o una tensión.

La constancia de los parámetros citados hace que para medirlas no sea necesaria una observación de la forma de la señal sino simplemente su conversión en otra como por ejemplo un desplazamiento fácilmente observable.

Además es necesario en muchos circuitos, medir la resistencia, la inductancia o la capacidad de determinados componentes.

Se pueden utilizar aparatos independientes para cada una de las medidas antes citados pero la necesidad de realizar varias de ellas en muchos circuitos produjo el desarrollo de dos tipos de instrumentos:

- Los polímetros que miden tensiones, corrientes y resistencias.
- Los medidores de impedancia que miden resistencias, inductancias y capacidades.

En sucesivos apartados se estudia cada uno de ellos.

2.5.2.1 Polímetros

2.5.2.1.1 Polímetro eléctrico

Los polímetros eléctricos no poseen ningún amplificador y su elemento básico es un galvanómetro de cuadro móvil que consiste en un imán permanente que crea un campo magnético en cuyo interior puede girar una bobina a través de la que circula la corriente continua cuyo valor se desea medir. La circulación de esta corriente crea un par que tiende a hacer girar la bobina que está mecánicamente unida a un muelle o resorte que genera un par antagónico. Por ello para cada valor de la corriente la bobina gira el ángulo adecuado para que ambos pares se igualen. La bobina está unida a una aguja que se desplaza sobre una escala graduada e indica en ella el valor de la corriente.

Mediante las leyes del electromagnetismo se demuestra que el ángulo θ que gira la bobina viene dado por:

$$\theta = \frac{n \cdot B \cdot A}{s} \cdot I$$

Ecuación 2-4

Siendo:

n: numero de espiras de la bobina.

B: inducción magnética creada por el imán.

A: área de la espira.

S: constante del muelle.

Si se hace:

$$\frac{n \cdot B \cdot A}{s} = K$$

$$\theta = K \cdot I$$

Resulta: analizando n, B, A y s se comprueba que todos ellos poseen un valor fijo para un galvanómetro determinado, y por lo tanto K es una constante que establece una proporcionalidad entra la corriente I y el ángulo θ .

La característica más importante de un galvanómetro es su sensibilidad (S) definida como la corriente que ha de pasar por él para que la aguja alcance el fondo de escala. Analizando los componentes de K se comprueba la existencia de un compromiso. Para elevar K es necesario que s tenga un valor reducido y por el contrario n, B y A tengan un valor elevado. Una reducción de s supone un resorte más delicado y frágil y hace necesaria una bobina ligera y

pequeña. Pero además una elevación de n y A hace que se incrementen el peso, el tamaño y la inercia de la bobina lo cual se opone a su ligereza y reducidas dimensiones. Por otra parte, una elevación de B implica la utilización de materiales magnéticos de mayor calidad o un mayor volumen del imán que elevan su precio y su peso.

La importancia de la sensibilidad viene dada por el hecho de que de ella depende la impedancia que ha de tener el instrumento por cada voltio que se le aplique. Por ello en lugar de la sensibilidad se suele dar como dato su inverso que tiene como unidad el inverso de una intensidad.

Por ejemplo, si un galvanómetro tiene una sensibilidad S de $50 \mu\text{A}$, su inverso será:

$$\frac{1}{50\mu\text{A}} = \frac{1}{50 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = \frac{10^6}{50} \Omega / \text{V} = 20 \text{ K}\Omega / \text{V}$$

Ecuación 2-5

La sensibilidad de los galvanómetros utilizados en los polímetros de uso corriente se mide en microamperios y por ello estos aparatos se suelen llamar micro amperímetros.

En sucesivos aparatos se analiza el montaje adecuado para convertir el galvanómetro en voltímetro, amperímetro y óhmetro.

2.5.2.1.2. Polímetros electrónicos

Se denominan así aquellos polímetros en los que existe un circuito electrónico que amplifica la señal a medir antes de aplicarla a un aparato de medida. La ventaja más importante de este tipo de polímetros es la de que su impedancia de entrada es mucho mayor que la de los descritos anteriormente.

Los polímetros electrónicos se clasifican en dos categorías:

A) Polímetros analógicos que poseen como elemento de visualización un galvanómetro. Estos aparatos tienen como elemento básico un voltímetro constituido por un amplificador de tensiones continuas cuya salida se conecta al galvanómetro. Este amplificador fue realizado inicialmente con válvulas y en la actualidad con semiconductores (Fig. 2-17).

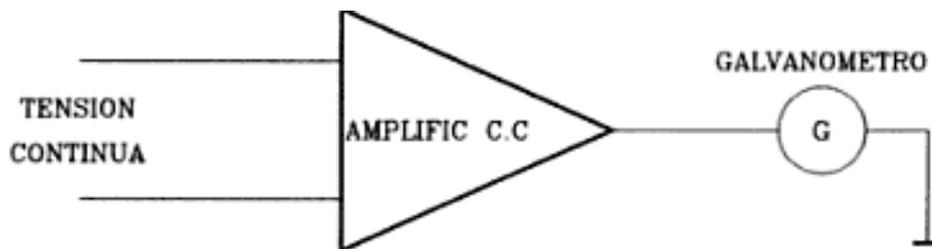


Figura 2-17 Diagrama de bloques de un voltímetro electrónico analógico de tensiones continuas.

B) Polímetros digitales que utilizan como elemento de visualización un indicador numérico de estado sólido. Estos polímetros se han desarrollado gracias al progreso de los circuitos electrónicos con semiconductores.

En el apartado siguiente se describe este último tipo de polímetro electrónico que es cada vez más utilizado.

2.5.2.1.3. Polímetros digitales

Los polímetros analógicos tanto eléctricos como electrónicos basan su funcionamiento en la utilización de un galvanómetro u otro elemento que visualice señales analógicas.

Los polímetros digitales, por el contrario, utilizan como visualizador un indicador numérico, en general de estado sólido, que proporciona a un observador información en el sistema de numeración decimal. El elemento básico de todo polímetro digital es un convertidor analógico digital que es un sistema electrónico que convierte una tensión continua presente en su entrada en una combinación binaria de n bits a su salida representada por otros tantos transistores que pueden encontrarse en estado de saturación o de corte.

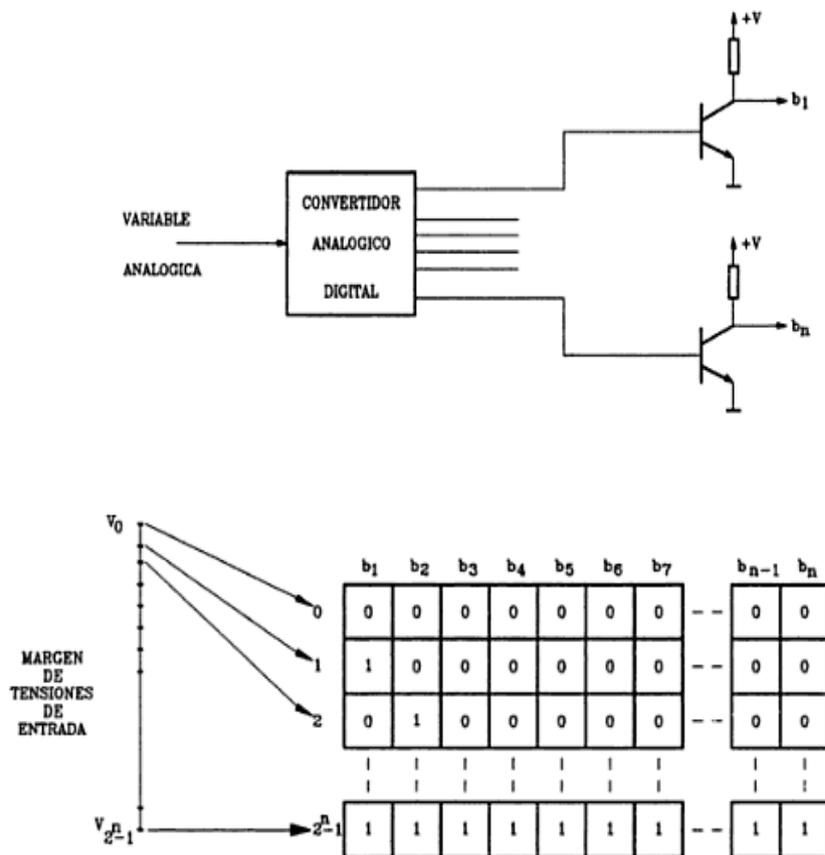
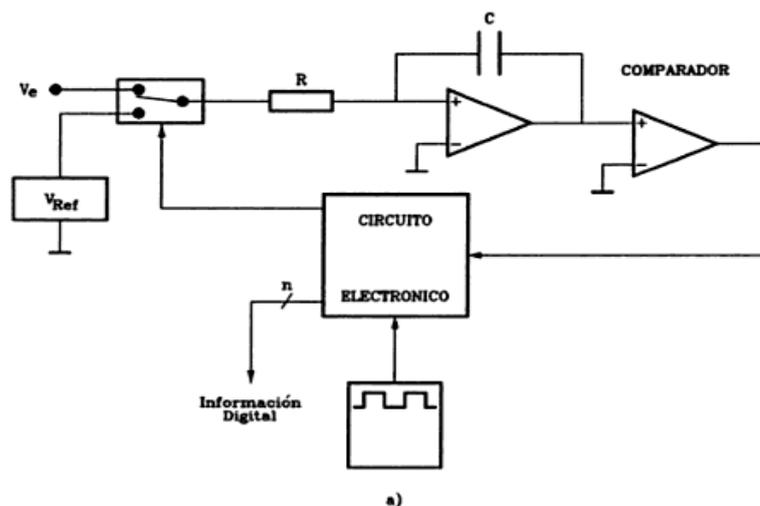


Figura 2-18 Diagrama de bloque de un convertidor análogo digital

Los polímetros digitales son sistemas que no necesitan una gran rapidez de respuesta y por ello los convertidores analógicos-digitales incluidos en ellos suelen utilizar métodos de conversión lentos. Uno de los métodos más utilizados es el de doble rampa porque presentan una gran linealidad y en él la precisión de la conversión es independiente de la tolerancia de los componentes pasivos utilizados. Este método se basa en la integración de la señal analógica de

entrada mediante la carga de un condensador durante un intervalo de tiempo fijo, y su descarga mediante una fuente de referencia de signo opuesto al de la señal de entrada.

En la figura 2-19a se representa el diagrama de bloques simplificado del convertidor de doble rampa y en la figura 2-19b la evolución en el tiempo de la señal a la salida del comparador para dos señales de entrada V_{e1} y V_{e2} diferentes.



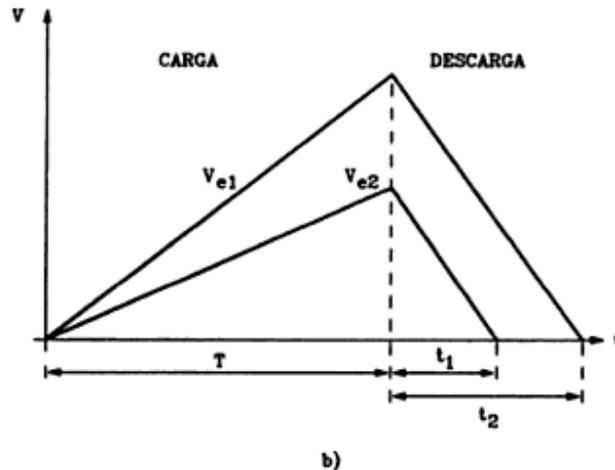


Figura 2-19 (a) Diagrama en bloque del convertidor de doble rampa. (b) Evolución de la señal en el tiempo en la salida

2.5.2.1.4. Precauciones en la utilización de los polímetros

Los polímetros se pueden realizar físicamente en dos formas:

- a) Con un número reducido de terminales (en el caso extremo de dos) y un conmutador con tantas posiciones como sean necesarias para las distintas escalas.
- b) Con tantos terminales como escalas de medida tenga el polímetro.

En el primer caso el usuario ha de colocar el conmutador en la escala adecuada y en el segundo los cables de medida en el terminal adecuado. Tanto en un caso como en otro es necesario asegurarse, antes de hacer una medida,

que el conmutador o los cables de medida están colocados en las posiciones correctas.

Aunque algunos polímetros poseen elementos de protección (como fusibles rápidos por ejemplo) la aplicación de tensiones elevadas en las escalas de medida de intensidad y ohmios puede deteriorar el galvanómetro (en el caso del polímetro eléctrico) o los componentes del convertidor de entrada (en el caso del polímetro digital.) por ello se hacen las siguientes recomendaciones en el uso de los polímetros.

- a) Verificar que el conmutador o los cables de medida están en una posición adecuada al tipo de medida a realizar.

- b) En el caso de medida de intensidades o tensiones cuyo orden de magnitud sea desconocido, se debe iniciar la medida por la escala superior e ir descendiendo paulatinamente. Para obtener la máxima precisión en la medida, esta debe realizarse finalmente en aquella escala en la que la aguja quede en el último tercio (polímetro eléctrico).

- c) No se debe medir nunca una resistencia conectada en un circuito. En primer lugar porque la medida puede ser totalmente errónea y además porque según el tipo de circuito pueden existir condensadores cargados que introduzcan

tensiones elevadas capaces de deteriorar alguno de los componentes del aparato.



Figura 2-20 Polímetro digital

2.5.3. Voltímetro de continua

La aguja del galvanómetro alcanza el fondo de la escala al hacer pasar una corriente muy pequeña a través de su bobina, que a su vez produce una caída de tensión reducida en la misma.

Para realizar mediciones de tensiones elevadas se coloca en serie una resistencia R con el galvanómetro tal como se indica en la figura 2-21. El valor de R ha de ser tal que se cumpla:

$$\frac{V}{R + R_g} = \frac{1}{S}$$

Ecuación 2-6

Siendo: V: máxima tensión a medir.

R_g: resistencia del galvanómetro.

S: sensibilidad del galvanómetro.

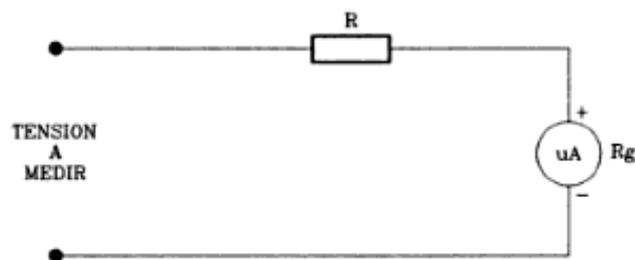


Figura 2-21 Voltímetro de continua.

Si se requiere medir una gama amplia de tensiones es posible hacerlo con una sola escala.

Por ello se utiliza el circuito de la figura 2-22 en el que se tienen diferentes escalas con valores máximos de tensión V₁, V₂, V₃, y V₄. Las resistencias R₁, R₂, R₃, y R₄ deben cumplir la ecuación indicada anteriormente.

Es interesante ahora analizar la influencia de la sensibilidad del galvanómetro. Cuando mayor es E, mayor resulta la suma R+ R_g. Por ejemplo si

se quiere tener una escala de tensión máxima de 10 v, y la sensibilidad es de 50μA resulta:

$$R + R_x = \frac{10 \text{ V}}{50 \mu\text{A}} = 10 \text{ V} \cdot 20 \text{ k}\Omega / \text{V} = 200 \text{ K}\Omega$$

Ecuación 2-7

Es decir la resistencia interna del voltímetro es de 200 KΩ.

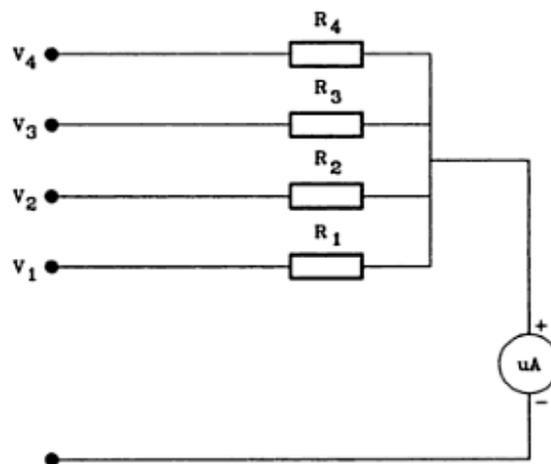


Figura 2-22 Voltímetro de continua con diferentes escalas.

2.5.4. Óhmetro

Un Ohmetro es un instrumento para medir la resistencia eléctrica. El diseño de un óhmetro se compone de una pequeña batería para aplicar un voltaje a la resistencia bajo medida, para luego mediante un galvanómetro medir la corriente que circula a través de la resistencia.

La escala del galvanómetro está calibrada directamente en ohmios, ya que en aplicación de la ley de Ohm, al ser el voltaje de la batería fija, la intensidad circulante a través del galvanómetro sólo va a depender del valor de la resistencia bajo medida, esto es, a menor resistencia mayor intensidad de corriente y viceversa.

Existen también otros tipos de óhmetros más exactos y sofisticados, en los que la batería ha sido sustituida por un circuito que genera una corriente de intensidad constante I , la cual se hace circular a través de la resistencia R bajo prueba. Luego, mediante otro circuito se mide el voltaje V en los extremos de la resistencia. De acuerdo con la ley de Ohm el valor de R vendrá dado por:

$$R = \frac{V}{I}$$

Ecuación 2-8

Para medidas de alta precisión la disposición indicada anteriormente no es apropiada, por cuanto que la lectura del medidor es la suma de la resistencia de los cables de medida y la de la resistencia bajo prueba. Para evitar este inconveniente, un óhmetro de precisión tiene cuatro terminales, denominados contactos Kelvin, 2 terminales llevan la corriente constante desde el medidor a la resistencia, mientras que los otros dos permiten la medida del voltaje directamente entre terminales de la misma, con lo que la caída de tensión

en los conductores que aplican dicha corriente constante a la resistencia bajo prueba no afecta a la exactitud de la medida.

2.5.5. Medidas de tensiones y corrientes alternas

El galvanómetro utilizado en los polímetros permite solamente la medida de tensiones o corrientes de polaridad constante. Por ello la medida de tensiones alternas implica la colocación de un rectificador entre el galvanómetro y la resistencia en serie tal como se indica en la figura 2-23. EL galvanómetro responde al valor medio de la forma de onda.

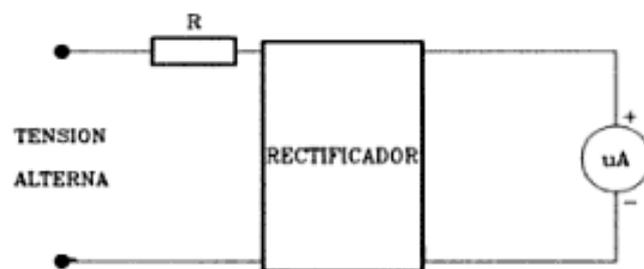


Figura 2-23 Circuito básico de un voltímetro de alterna

En la figura 2-24 se representa un voltímetro de alterna realizado con rectificador de media onda. El diodo D1 realiza la rectificación y el D2 impide que la corriente de fugas de D1 influya en la medida.

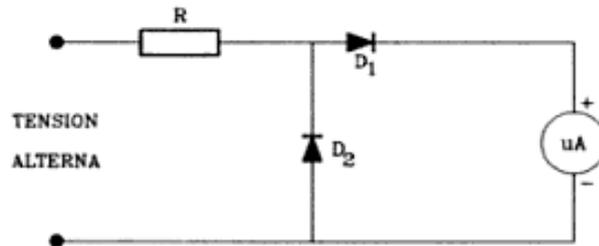


Figura 2-24 Voltímetro de alterna

La escala del galvanómetro se suele graduar en voltios eficaces. Pero la relación entre el valor medio de salida y el valor eficaz de la tensión de entrada de un rectificador de media onda es aproximadamente 0.45; por ello, la sensibilidad del voltímetro en continua se multiplica por 0.45 para obtener la de alterna. Ello implica que para tener la misma indicación de fondo de escala en alterna y en continua, la resistencia R debe ser 0.45 veces menor. Naturalmente la graduación en voltios eficaces se hace suponiendo que la tensión alterna es perfectamente senoidal y por ello solo se puede medir con el polímetro en la escala de alterna este tipo de señales.

La frecuencia puede ser superior a 50c/seg. Pero viene limitada por las características mecánicas del galvanómetro y suele ser indicada por el fabricante del polímetro. La medición de corriente alterna se puede realizar con el rectificador de media onda conectado al secundario de n transformador de intensidad cuyo primario se conecta en serie en el circuito cuya intensidad se desea medir.

2.5.6. Medidores de impedancia

El polímetro digital mencionado anteriormente, es un instrumento que permite realizar la medida de tensiones, corrientes y resistencias. Pero en muchas aplicaciones se necesita medir la capacidad de un condensador, la inductancia de una bobina, o los componentes resistivo y reactivo de un montaje serie, de un montaje paralelo o de una combinación de ambos.

El instrumento de permite realizar la medida de resistencias, capacidades e inductancias recibe el nombre de “Medidor de Impedancias”.

2.5.6.1. Puentes de medida en alterna

Existen diversos puentes de medida en alterna que se diferencian por el tipo de impedancias con que están realizados. A continuación veremos los mas utilizaos.

2.5.6.2. Puente Maxwell

El puente de Maxwell de la figura 2-25, se utiliza para medir una inductancia desconocida en términos de una capacitancia conocida. Una de las ramas de relación tiene la resistencia y una capacitancia en paralelo; ahora se

puede probar que es más fácil escribir las ecuaciones de balance usando la admitancia de la rama 1 en vez de su impedancia.

El reajuste de la ecuación general para el equilibrio del puente, también se puede expresar de la siguiente forma:

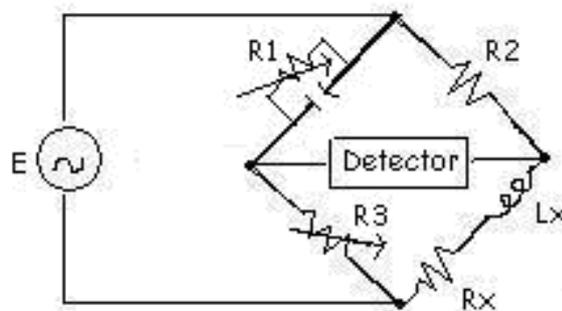


Figura 2-25 Puente Maxwell para medición de inductancias.

El puente de Maxwell se limita a la medición de bobinas de Q medio ($1 < Q < 10$). Esto puede mostrarse si se considera la segunda condición de equilibrio, la cual establece que la suma de sus ángulos de fase de un par de ramas opuestas debe ser igual a la suma de los ángulos de fase del otro par. Puesto que los ángulos de fase en los elementos resistivos de las ramas 2 y 3 suma 0° , y la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 también será de 0° . El ángulo de fase de una bobina de Q alto será muy cercano a 90° (positivos), lo cual requiere que el ángulo de fase de la rama capacitiva esté cerca de 90° (negativos). Esto

significa que la resistencia de R_1 ha de ser grande, lo cual es poco práctico. Las bobinas de alto Q se miden generalmente con el puente de Hay.

2.5.6.3. Puente Hay

El puente Hay figura 2-26 difiere del de Maxwell porque tiene una resistencia R_1 en serie con el capacitor patrón C_1 y no en paralelo. Es evidente que para ángulos de fase grandes, R_1 debe tener un valor muy bajo; por consiguiente, el puente Hay es más conveniente para mediciones de bobinas de Q alto.

Las ecuaciones de equilibrio se derivan de la sustitución de los valores de las impedancias de las ramas del puente en la ecuación general para el equilibrio del puente.

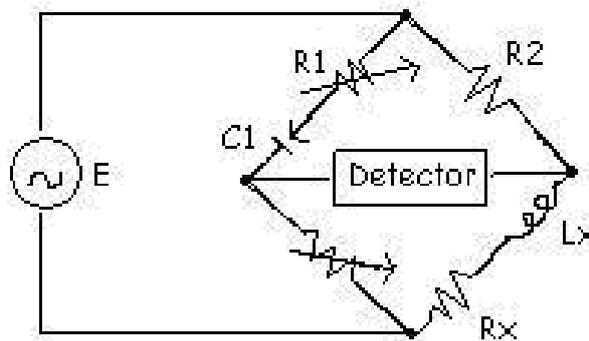


Figura 2-26 Puente Hay para medición de inductancias.

2.5.6.4. Puente de Schering

El puente de Schering, es uno de los más importantes puentes de ca, se usa ampliamente para la medición de capacitores. Aunque se utiliza para la medición de capacitancias en sentido general, es particularmente útil para la medición de algunas propiedades de aislamiento, como ángulos de fase muy cercanos a los 90. El circuito básico se muestra en la figura 2-27, y por una inspección general al circuito se observa muy parecido al puente de comparación. Nótese que ahora la rama patrón sólo contiene un capacitor.

Las condiciones de equilibrio requieren que la suma de los ángulos de fase de las ramas 1 y 4 sea igual a la suma de los ángulos de fase de las ramas 2 y 3. Puesto que el capacitor patrón está en la rama 3, la rama de los ángulos de fase de ramas 3 y 3 será $0 \text{ grados} + 90 \text{ grados} = 90 \text{ grados}$. Con el fin de obtener el ángulo de fase de 90 grados que se necesita para el equilibrio, la suma de los ángulos de las ramas 1 y 4 debe ser igual a 90 grados. Puesto que en la realización general de mediciones la cantidad desconocida tiene un ángulo de fase menor de 90 grados, es necesario dar a la rama 1 un ángulo capacitivo pequeño por medio de la conexión del capacitor C1 en paralelo con el resistor R1. Un ángulo capacitivo pequeño es muy fácil de obtener; sólo se requiere un capacitor pequeño a través de R1.

Las ecuaciones de equilibrio se derivan como es habitual; por la sustitución de los valores correspondientes de impedancia y admitancia en la ecuación general, se obtiene. $Z_x = Z_2 Z_3 Z_{sub}$.

$$R_x - \frac{j}{\omega C_x} = R_2 \left(\frac{-j}{\omega C_3} \right) \left(\frac{1}{R_1} + j\omega C_1 \right)$$

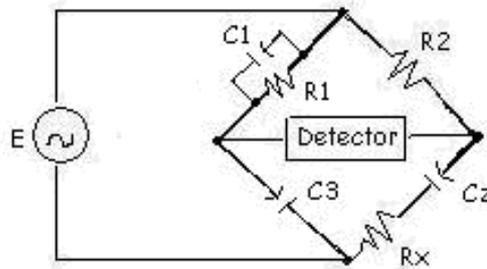


Figura 2-27 Puente Schering para la medición de capacitancia.

2.5.7. Medidor analógico universal de impedancias

El medidor analógico de impedancias universal es un instrumento que puede medir los valores de los resistores, en continua y alterna, de los condensadores (capacidad C y factor de disipación D) y de los inductores (inductancia L y factor de calidad Q) dentro de un amplio rango de valores. Para ello consta de un conjunto de conmutadores que, colocados en las posiciones adecuadas, configuran un mínimo de cuatro puentes de medida entre los que se incluyen los tres indicados en el apartado anterior.

2.5.8. Medidor Digital Universal de Impedancias

La reducción del coste de los microcomputadores permite que puedan ser utilizados para realizar los cálculos necesarios para la medida de impedancias. Para ello es necesario convertir en digitales las señales de salida de los puentes de medida. Este tipo de técnica es utilizada como medidor digital de impedancias.

2.6. Sensores

Un sensor es un dispositivo que permite transformar un estímulo o fenómeno en una señal medible, para que posteriormente ésta pueda ser analizada y procesada (figura 2-28). Por lo general la transformación se realiza partiendo de un fenómeno físico o químico, hacia una señal eléctrica. Desde el punto de vista de la robótica “los sensores permiten al robot percibir su medio ambiente y su estado interno” y comúnmente están inspirados en los sentidos biológicos, tales como la audición, vista, tacto, olfato y gusto.

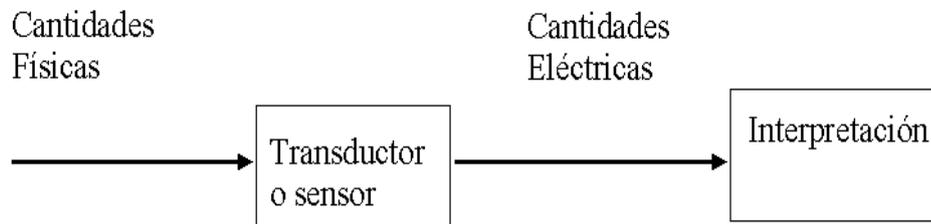


Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf
Figura 2-28 Transformación y procesamiento de una cantidad física.

Antes de optar por un determinado sensor, se debe pensar primero en el acondicionamiento de la señal, es decir, la forma en la cual el procesador leerá la información procedente de ese sensor. Si la señal a ser procesada es de tipo analógica, lo más común es que se requiera de un convertidor analógico digital (ADC), el mismo que convierte una señal eléctrica analógica en un código binario equivalente.

2.6.1. Tipos y características de los sensores

Un aspecto importante en el momento de diseñar un determinado sistema, es conocer las características de los sensores, para así elegir el que se acople mejor a nuestras necesidades. Entre los aspectos a tener en cuenta mencionamos:

Principio de funcionamiento y magnitud entrada/salida.

- Linealidad.
- Estabilidad.
- Precio.
- Impedancia de salida.
- Rango de operación.
- Exactitud y resolución.
- Velocidad (operación en tiempo real).
- Requerimientos computacionales.
- Potencia, peso y tamaño.

2.6.2. Clasificación de los sensores según la energía

Los sensores pueden ser:

Activos.- Emiten energía a partir de la transformación realizada. Dentro de este tipo de sensores podemos citar a las termocuplas, cristales piezoeléctricos, etc.

Pasivos.- Reciben energía para realizar la transformación. En este grupo están los termistores, micrófonos de condensador, los fotodiodos, etc.

2.6.3. Clasificación de los sensores según la magnitud a medir

Esta clasificación está directamente relacionada con el fenómeno o estímulo que se desea sensar. Los sensores pueden ser de:

- Temperatura.
- Desplazamiento, velocidad, aceleración.
- Magnitudes eléctricas y magnéticas.
- Luminosidad y radiación.

- Deformación, presión, fuerza.
- Sonido, etc.

2.6.4. Clasificación de los sensores según el principio de funcionamiento

Dentro de esta categoría los sensores se pueden clasificar en:

Sensores primarios.

Sensores resistivos.

Sensores de reactancia variable y electromagnética.

Sensores generadores.

Sensores digitales

2.6.4.1. Sensores primarios

Los sensores primarios convierten una magnitud física en otra más fácil de medir, pero no ofrecen una salida en forma de señal eléctrica, tal como muestra la figura 2-29.

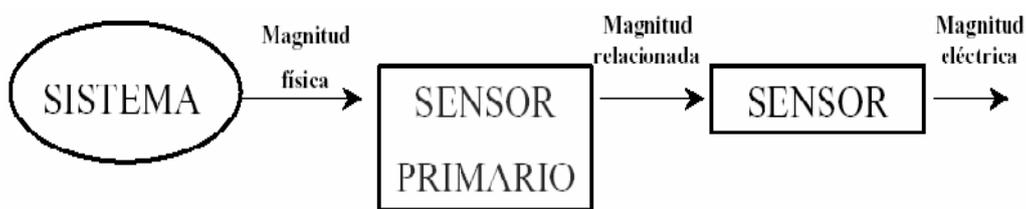


Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf

Figura 2-29 Sensor primario.

Un ejemplo de sensor primario de temperatura es el bimetálico, que es una pieza formada por 2 metales con distinto coeficiente de dilatación térmica, unidos firmemente, por ejemplo, mediante soldadura autógena y sometida a la misma temperatura.

Cuando se produce un cambio de temperatura, la pieza se deforma según un arco circular uniforme, realizándose una transformación de temperatura a desplazamiento.



Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf

Figura 2-30 Sensor primario de temperatura.

La desventaja de este sensor primario es su lentitud. Puede ser usado para abrir o cerrar contactos (termostatos) o como protección en circuitos eléctricos (interruptores térmicos por bimetal).

Otro sensor primario es el manómetro, que convierte presión en desplazamiento.

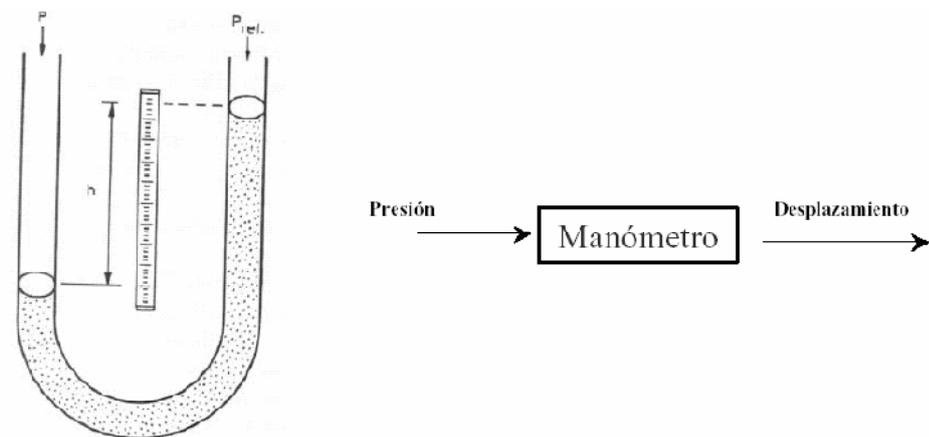


Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf

Figura 2-31 Manómetro.

2.6.4.2. Sensores resistivos

Este tipo de sensores varían su resistencia en función de una determinada medida física. Por lo general, el comportamiento de los sensores resistivos está regido por curvas de operación. En la figura 2-32 se muestra la curva característica de un termistor (sensor de temperatura) PTC (Coeficiente de temperatura positivo).

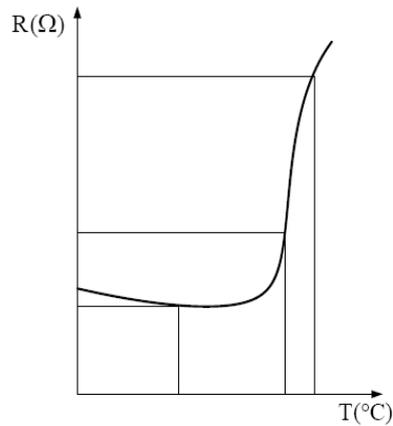


Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf

Figura 2-32 Curva característica de un PTC

Entre algunos de los sensores resistivos, se puede mencionar:

Potenciómetros: Varían su resistencia en función al desplazamiento angular o lineal.

Galgas extensiométricas: Su resistencia está en función de las deformaciones a las cuales están sometidas.

Termistores: Su resistencia varía en función de la temperatura. Los termistores se dividen en NTC (Coeficiente de temperatura negativo), en los cuales la resistencia disminuye conforme aumenta la temperatura y PTC (Coeficiente de temperatura positivo), en los que la resistencia aumenta ante un incremento de temperatura.

Magneto resistencias: Su resistencia es dependiente del campo magnético.

Fotorresistencias (LDR).- Son resistencias dependientes de la intensidad de luz incidente.

2.6.4.3. Sensores electromagnéticos

Los sensores electromagnéticos son aquellos en los que una magnitud física puede producir una alteración de un campo magnético o de un campo eléctrico, sin que se trate de un cambio de inductancia o de capacidad. Se tienen dos tipos:

Sensores basados en la ley de Faraday. Estos sensores se utilizan en tacó generadores o tacómetros de AC (generadores de energía eléctrica) para medir la velocidad angular ω . La ley de Faraday dice: "En un circuito magnético o bobina con N espiras con un flujo magnético $\phi=f(t)$ se induce una tensión:"

$$V = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

Ecuación 2-9

Sensores basados en el efecto Hall. Son empleados en la medida de campos magnéticos (gaussímetros), medida de corriente (amperímetros) y medida de potencias (vatímetros). El voltaje Hall es la diferencia de potencial

que se crea en las superficies de una barra conductora, cuando por ésta fluye una corriente y está sometida a un campo magnético. En la siguiente gráfica se muestra un ejemplo de medición de corriente en donde, I_{in} crea B , a su vez B crea V_H que es proporcional a I_{in} ($I_{bias} = \text{constante}$).

2.6.4.4. Sensores generadores

Son aquellos que generan una señal eléctrica a partir de la magnitud que miden, sin necesidad de una alimentación eléctrica externa. Dentro de este tipo de generadores destacamos:

Sensores termoelectricos, termopares / termocuplas. Están basados en el efecto Seebeck, que manifiesta que en un circuito con dos metales homogéneos, cuyas uniones están a diferentes temperaturas, aparece una corriente eléctrica o se produce una fem (fuerza electromotriz – voltaje) tal como muestra la figura 2-33. El voltaje del sensor está dado por la siguiente fórmula (alfa es el coeficiente de Seebeck, el cual es no constante y no lineal, razón por la cual se utilizan tablas):

$$V = \alpha \cdot (T_1 - T_2)$$

Ecuación 2-10

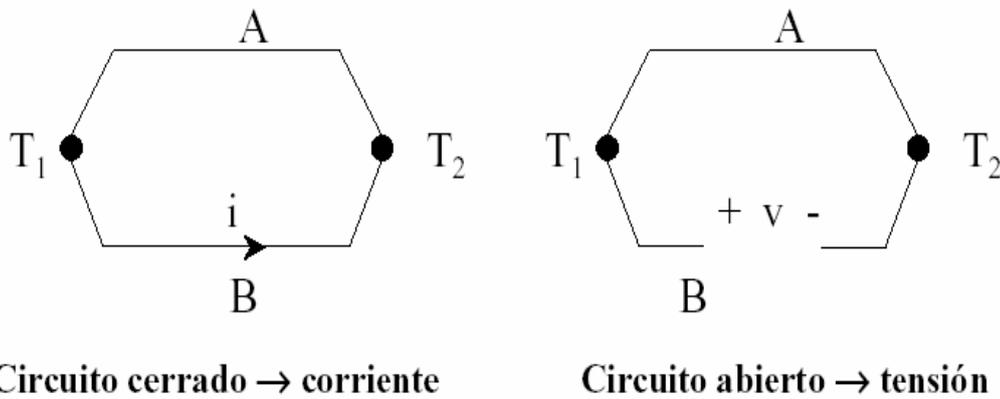


Imagen obtenida en http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf
Figura 2-33 Termopares.

Sensores piezoeléctricos. Se basan en la aparición de una polarización eléctrica en un material al deformarse bajo la acción de un esfuerzo. Es un efecto reversible, al aplicar una diferencia de potencial entre 2 caras de un material piezoeléctrico, aparece una deformación. Entre las aplicaciones del sensor piezoeléctrico están la medición de presión, aceleración y en biomedicina como sensor de esfuerzos respiratorios, cardiovasculares.

Sensores piro eléctricos. Análogos a los piezoeléctricos, pero en lugar de la aparición de cargas cuando se deforma el material, aquí se trata de la aparición de cargas superficiales en una dirección determinada cuando el material experimenta un cambio de temperatura. Estas cargas son debidas al cambio de su polarización espontánea al variar la temperatura. Son utilizados en pirómetros para mediciones de temperatura a distancia, radiómetros para medidas de radiación, etc.

Sensores fotovoltaicos. Su fundamento está en el efecto fotoeléctrico en la zona de una unión p-n, entonces permite obtener una tensión eléctrica que es función de la intensidad de la radiación incidente. Entre estos sensores tenemos a las células solares mono cristalinas, poli cristalinas y de película fina.

Sensores electroquímicos. Los sensores electroquímicos potenciométricos generan una señal eléctrica (voltaje) en respuesta al cambio de concentración de una determinada especie química en una muestra determinada.

2.6.4.5. Sensores digitales

Estos sensores ofrecen la medida en valores discretos, o sea codificada en un número determinado de bits. Los codificadores de posición son sensores digitales y pueden ser incrementales o absolutos.

Codificador de posición incremental. Un sensor de este tipo consiste en una regla lineal o en un disco, el cual es movido por la parte cuya posición o velocidad va a ser determinada. Este elemento incluye dos tipos de regiones o sectores. Los sectores son ordenados de una manera alternada y equidistante;

si esta propiedad cambiante es sensada por un dispositivo de lectura se obtiene un cambio de salida ante un incremento en posición.

Codificador de posición absoluto. Similares a los incrementales pero con marcas en círculos concéntricos, cada uno de menor resolución. Cada círculo posee un sensor y la posición queda codificada como un número formado unos y ceros.

2.7. Transductores

Un transductor es, simplemente, un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir. Generalmente se trata de un dispositivo utilizado para convertir un fenómeno físico en una señal eléctrica.

Los transductores se conocen con nombres diferentes en las distintas disciplinas técnicas: sensores (de presión, de fuerza, de temperatura), detectores, galgas, captadores, sondas, etc.

En el caso de los transductores que proporcionan como salida una señal eléctrica, se pueden distinguir genéricamente las siguientes partes:

- sensor (o sonda), en contacto con la magnitud física.
- mecanismos auxiliares.

- captador, que proporciona una cierta señal eléctrica.
- preamplificador o acondicionador de la señal.

La descripción de un transductor se basa generalmente en la mayoría o todas de las consideraciones siguientes:

- 1) ¿Qué se intenta medir? (magnitud).
- 2) ¿Cuál es el principio operativo de la porción eléctrica del transductor con el que se origina la salida? (principio de transducción).
- 3) ¿Qué elemento del transductor responde directamente a la magnitud que se mide? (elemento sensor).
- 4) ¿Qué prestaciones o ventajas especiales se incorporan en el transductor?
- 5) ¿Cuáles son sus principales características?
 - rango de operación.
 - sensibilidad.
 - compatibilidad ambiental: temperatura, presiones, tamaño, restricciones de montaje...
 - robustez.
 - características eléctricas de la señal de salida.

A partir de la descripción anterior surge una primera clasificación de los transductores: según el método de transducción o según la variable que son

capaces de medir. A nivel introductorio, parece más apropiada una clasificación atendiendo al primero de los criterios.

El grupo más importante de transductores es quizás el de parámetro variable, que se caracterizan por proporcionar una salida relacionada con la variación de un determinado parámetro eléctrico pasivo, originada a su vez por la variación del fenómeno físico que se desea medir. Son de gran robustez y simplicidad de construcción.

Por otra parte, podemos definir los transductores llamados activos o autogeneradores, que son aquéllos que producen una señal eléctrica (sin necesidad de alimentación externa) cuando son estimulados por alguna forma física de energía: electromagnéticos, piezoeléctricos, fotovoltaicos, termoeléctricos. Aquéllos que necesitan de algún elemento adicional en la transducción, son los transductores pasivos.

2.7.1. Transductores de parámetro variable

2.7.1.1. Capacitivos

Convierten un cambio de la magnitud a medir en un cambio de capacidad.

Dado que la capacidad de un condensador de placas paralelas es aproximadamente proporcional a $(\epsilon \cdot A)/d$, variando cualquiera de estas cantidades se obtiene un cambio en la capacidad: por tanto, puede ocasionarse por el movimiento de uno de los electrodos, acercándose o alejándose del otro (variación de "d"); por la variación del área de las placas ("A") o por cambio del dieléctrico situado entre las dos placas (" ϵ "). Suelen emplearse para medir desplazamientos o como indicadores de nivel de líquido (dieléctrico variable).

2.7.1.2. Resistivos

Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la resistencia.

Los cambios en la resistencia pueden realizarse por diferentes medios, como por movimientos en el contacto móvil de un reóstato, por aplicación de esfuerzos mecánicos, por cambios de temperatura, etc.

Potenciométricos: convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la relación de tensiones (divisor de tensión), mediante un cambio en

la posición de un contacto móvil sobre un elemento resistivo en cuyos bordes se ha aplicado una excitación. Se utilizan para medir desplazamientos tanto lineales como angulares. Son pasivos.

Galgas extensiométricas: son un ejemplo de transductores pasivos que usan la variación de la resistencia eléctrica de los hilos como mecanismo capaz de detectar las fuerzas a que son sometidos.

Si a un hilo conductor se le somete a un esfuerzo de tracción, se alarga, aumentando su longitud proporcionalmente a la carga aplicada (mientras no se supere el límite elástico del material). Simultáneamente, con este aumento de longitud hay una ligera reducción de la sección transversal del hilo y dado que la resistencia de un conductor es $R = \rho \cdot L/S$ (donde ρ es la resistividad del material), ambos factores contribuyen al aumento de la resistencia del material. Habría que añadir también el efecto piezorresistivo.

Consisten normalmente en un hilo resistivo doblado en forma de rejilla, que se suele pegar al objeto en el que se van a medir esfuerzos y deformaciones. Las aplicaciones de las galgas son numerosas: puentes, grúas, vigas, edificios, etc. y las medidas se suelen hacer con algún tipo de puente de Wheatstone, en el que uno, dos o incluso los cuatro brazos son galgas. Como las variaciones de deformación son dinámicas, al puente se le hace trabajar en modo "no equilibrado", esto es, se obtiene una salida proporcional a la variación de resistencia de la galga.

Termorresistivos: todo este grupo de transductores se basan en el principio físico de variación de resistencia con la temperatura. Sin embargo, en función de que los materiales usados sean metales o semiconductores, el comportamiento de los mismos es bastante diferente.

Los termómetros de resistencia se basan en el principio de que la resistencia de un metal varía con la temperatura de acuerdo con la ecuación:

$$R = R_0 (1 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + \dots + a_nT^n) \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Esta ecuación pasa a ser lineal si todos los términos en T^2 y de potencias superiores se hacen despreciables. Esto es cierto para algunos metales sobre un limitado rango de temperaturas, de modo que en esos casos, la relación funcional pasa a ser:

$$R = R_0 (1 + \alpha T) \text{ siendo } \alpha \text{ el coeficiente de temperatura.}$$

El platino es uno de los metales en que esta relación es más lineal, y ello permite su utilización como patrón internacional de temperaturas entre -190°C y 660°C . Otros metales usados en aplicaciones que requieren una menor exactitud son el cobre (-200 a 260°C) y el níquel (-200 a 430°C).

En el campo de los semiconductores se han desarrollado sensores de temperatura constituidos por óxidos metálicos de cromo, cobalto, hierro,

manganeso, níquel, etc. en los que la resistencia depende de la temperatura de acuerdo con la ecuación de Steinhart-Hart simplificada:

$$1/T = 1/(\ln R - A) - C$$

donde A y C son constantes del modelo, obtenidas por ajuste.

Como se puede observar en esta relación, existe un coeficiente de temperatura negativo, que da nombre a los dispositivos de este grupo, llamados NTC o termistores. Al tener un valor importante de este coeficiente de temperatura, se puede obtener una sensibilidad mayor que otros transductores.

Sus principales ventajas son su relativamente bajo coste y su pequeño tamaño. Como inconvenientes podíamos citar su bajo tiempo de respuesta, así como grandes tolerancias de fabricación. También señalar que la corriente que circula por la NTC debe ser baja para que la variación de la resistencia no sea debida a la disipación que genera la propia corriente (autocalentamiento).

Además de utilizarse en termometría, encuentran aplicaciones en circuitos de compensación térmica, para la estabilización de tensiones y corrientes.

Por otro lado, las PTC o resistencias de coeficiente de temperatura positivo, constituidas por elementos semiconductores de titanato de bario, se caracterizan por modificar su estructura cristalina a una cierta temperatura (50 a 140°C), correspondiéndole un cambio brusco en su resistencia. Por debajo de la

temperatura crítica, la resistencia es baja (del orden de centenares de ohmios), y por encima de la misma, la resistencia es muy alta (del orden de decenas de mega ohmios).

Este comportamiento las hace fundamentalmente útiles en la detección de umbrales de temperatura, es decir, se comportan como interruptores que se abren y se cierran en las proximidades de esa temperatura umbral.

Fotorresistivos o fotoconductores: convierten un cambio de la iluminación incidente sobre el material en un cambio de la resistencia (o conductancia) de dicho material.

Las LDR son elementos sensibles a la radiación de determinada longitud de onda, que disminuyen su resistencia conforme aumenta la luminosidad incidente sobre ellas, pasando por ejemplo desde 1000Ω hasta unos $100M\Omega$ (resistencia en la oscuridad). Encuentran aplicaciones en fotografía, aparatos de televisión, sistemas de iluminación, detectores de presencia, etc.

Son también sensores muy sensibles y como inconvenientes podíamos citar su gran dependencia con la temperatura para bajas iluminaciones y su lentitud de respuesta ante una fuerte variación de la radiación luminosa.

Dentro de este grupo se puede incluir también el fotodiodo, aunque se estudiará dentro del tipo de transductores activos como generador fotovoltaico.

2.7.1.3. Inductivos

Convierten un cambio de la magnitud en un cambio de la autoinductancia de un devanado único. La inductancia de una bobina depende de la manera en que las líneas de flujo magnético atraviesen sus arrollamientos.

Los cambios de inductancia pueden efectuarse mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado (permeancia variable) o mediante cambios de flujo introducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo (reluctancia variable). Estos cambios de inductancia se pueden medir como un cambio de amplitud en un puente de impedancias, o bien como un cambio de la frecuencia de resonancia de un circuito oscilante.

2.7.2. Transductores activos

2.7.2.1. Electromagnéticos

Convierten un cambio de la magnitud a medir en una fuerza electromotriz (tensión de salida) inducida en un conductor, debida a un cambio en el flujo magnético en ausencia de excitación (basados en la ley de inducción de Lenz). El cambio en el flujo magnético se realiza usualmente por un movimiento relativo entre el electroimán y un imán o porción de material magnético. Dos típicos ejemplos de este tipo de transductores son los tacómetros (o tacogeneradores) de continua y alterna, tal y como se puede observar en las figuras de abajo.

2.7.2.2. Fotovoltaicos

Son transductores activos que convierten un cambio de la iluminación incidente sobre una unión semiconductora en un cambio en la tensión generada en dicha unión. El ejemplo más típico es el de las células solares fotovoltaicas (fotodiodos).

2.7.2.3. Fotoeléctrico

Convierten la radiación incidente sobre algunos materiales (metales) en emisión de electrones, que pueden configurar una corriente eléctrica, añadiendo un generador externo y una resistencia.

2.7.2.4. Termoeléctrico

Convierten la diferencia de temperatura existente entre las uniones de dos materiales distintos seleccionados, en un cambio en la fuerza electromotriz generada (efecto Seebeck).

Este efecto se aplica en los termopares, que son quizás los elementos más utilizados en termometría. Estos transductores consisten en un par de barras o hilos de metales distintos unidos por uno de los extremos, que es el que se utiliza como unión caliente (sensora), mientras que el otro se utiliza como

unión fría o de referencia. La temperatura de la unión de referencia puede ser cualquiera, sin embargo, usualmente se mantiene al punto de hielo. Para algunas aplicaciones puede utilizarse satisfactoriamente como referencia, la temperatura ambiente. En este caso, hay que corregir el valor observado, sumándole una tensión igual a la que se obtendría mediante una diferencia de temperaturas igual a la que hay entre la unión de referencia y 0°C:

$$E_T = E_{\text{observada}} + E_{\text{ref.}}$$

En la práctica, pueden aparecer también potenciales termoeléctricos en los propios terminales del sistema de medida, (a través del cual se obtendrá una tensión como función de la temperatura), especialmente cuando la carga se localiza a cierta distancia. Para solucionar este problema, lo que se suele hacer es utilizar hilo de extensión de termopar, en lugar de los típicos terminales de cobre.

Un limitado número de combinaciones de metales han recibido aceptación internacional, de modo que los laboratorios de estándares se encargan de publicar tablas de los valores de las tensiones generadas como función de la temperatura, para cada tipo de termopar. Como podemos observar en la tabla adjunta, estas relaciones no son lineales.

2.7.2.5. Piezoeléctrico

Convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la carga electrostática o tensión generada por ciertos materiales (algunos cristales como el cuarzo y materiales cerámicos) cuando se encuentran sometidos a un esfuerzo mecánico (fuerzas de cizalla pura, tensión o compresión). También se da el fenómeno inverso, es decir, cuando se aplica una tensión eléctrica a un material piezoeléctrico, se obtiene una deformación. Se suelen utilizar en aplicaciones dinámicas (acelerómetros sísmicos), si bien este principio se puede utilizar en cualquier situación en la que la variable a medir se pueda convertir en una fuerza que resulte en la deformación de un cristal adecuado.

2.7.3. Otros Transductores

Dentro de este último apartado, vamos a describir algunos transductores que por su naturaleza no encajan en los grupos anteriormente estudiados, pero que por sus numerosas aplicaciones, interesa conocerlos.

2.7.3.1. Transductores digitales

En el sentido estricto, este tipo de transductores deberían medir una magnitud física y producir a la salida un código digital. Ya que pocos dispositivos dan una salida digital en respuesta a un fenómeno natural, es difícil encontrar transductores puramente digitales, quizás los codificadores digitales (encoders) serían la mejor excepción. Sin embargo, son más numerosos los transductores que producen un tren de pulsos digitales en respuesta a un determinado fenómeno físico, son los llamados transductores cuasi-digitales.

La medida de posiciones lineales y angulares (codificadores de posición) ha sido hasta el momento el campo con más desarrollos de transductores digitales, pudiendo distinguir entre los codificadores incrementales, que son del tipo cuasi-digital, y los codificadores absolutos, que son puramente digitales.

2.7.3.2. Codificadores incrementales

Un codificador incremental está basado en un elemento lineal o un disco que se desplaza solidario al objeto cuya posición se desea determinar. Dicho elemento está constituido por patrones de dos tipos (caracterizados por propiedades diferentes), dispuestos de forma alternativa y equidistante. De este modo, un incremento de posición produce un cambio definido en la salida, que se detecta mediante algún dispositivo sensor o cabeza de lectura, capaz de

discernir esa propiedad cambiante con la posición, tal y como se observa en la figura siguiente.

Las propiedades empleadas para la diferenciación de los patrones pueden ser magnéticas, eléctricas (codificadores de contacto) u ópticas. En cualquier caso, la salida básica es en forma de tren de pulsos con un ciclo de trabajo del 50%.

2.7.3.3. Codificadores ópticos

Son los más comunes debido a la exactitud que se consigue en su fabricación y al uso de LEDs, y encuentran aplicaciones en diferentes campos de la ingeniería: robótica, plotters, ratones, cabezales de lectura de discos magnéticos, máquinas-herramienta, etc.

Los codificadores suelen consistir en un par de discos, uno de los cuales es fijo mientras que el otro gira solidario al cuerpo cuyo desplazamiento queremos medir. Cada uno de los discos es básicamente opaco, pero se define una serie de ventanas en su interior. El fijo tiene una única ventana por donde pasa la luz emitida, y el segundo tiene dos pistas de ventanas equiespaciadas a lo largo del disco, de modo que la pista interna está desplazada (una anchura de media ventana) respecto de la externa. Dos detectores de luz están situados

detrás del segundo disco de forma que cada uno de ellos está alineado con una de las pistas.

Conforme el segundo disco gira, la luz alternativamente entra y deja de hacerlo en los detectores, coincidiendo con el paso de ventanas y regiones opacas, respectivamente. Los pulsos obtenidos son enviados a un contador que proporciona la cuenta correspondiente a la posición alcanzada relativa a una referencia inicial. El disco externo da información primaria referida a la magnitud de la rotación, pero no consigue ninguna información relativa al sentido de giro, que sí se puede obtener gracias a la existencia de la pista más interna.

En función del sentido de giro, los pulsos correspondientes a esta segunda pista están adelantados o atrasados respecto a los primeros. La salida de un sencillo circuito digital (por ejemplo, un biestable tipo D activado por flanco), que analiza la relación entre los dos trenes de pulsos, puede servir para controlar la entrada up/down de un contador bidireccional, determinándose una posición absoluta del movimiento.

2.7.3.4. Codificadores absolutos

Este tipo de codificadores, a diferencia de los incrementales, proporcionan una salida digital de un determinado número de bits, relacionada directamente con la posición absoluta del desplazamiento.

La apariencia de estos elementos es bastante similar al anterior, cambiando básicamente el diseño de los patrones de ventanas en el disco móvil, tanto en cuanto a su disposición como a su número de pistas (que suele ser de cuatro o mayor). Consecuentemente, se necesita un detector por pista, que da un "1" cuando la energía es detectada y un "0", en caso contrario. Las salidas digitales de cada uno de los detectores se combinan para dar un determinado código.

Mientras esta disposición es perfectamente válida en teoría, aparecen problemas en la práctica debido a dificultades de fabricación, especialmente cuando el número de pistas se hace grande, ya que es difícil conseguir que los límites de las ventanas en cada pista estén perfectamente alineados entre sí. Cualquier mala alineación significa que los detectores conmutarán en diferentes instantes de tiempo, dando lugar a códigos de salida erróneos (por ejemplo, en un codificador de 4 bits, puede producirse un 1111 en el tránsito entre 0111 y 1000).

Para superar esta dificultad, en la práctica se usan dos soluciones diferentes. La primera de ellas es añadir una pista externa adicional, conocida con el nombre de pista anti-ambigüedad, que junto con el detector correspondiente actúa como habilitador de la salida digital, evitando los posibles defectos en los límites de los sectores. La segunda es algo más simple y económica, ya que lo único que hace es utilizar un patrón de ventanas de

acuerdo a un código especial, conocido como código de Gray y que se caracteriza por cambiar un solo bit de una representación digital a la siguiente, esto es, de una posición angular a la contigua. La traducción de código Gray a binario debe ser realizado bien por una lógica externa o por un computador.

Los codificadores angulares, tanto los incrementales como los absolutos, pueden ser usados también para medir velocidades. Un método es observar la variación producida en la posición en un intervalo fijo de tiempo y a partir de ella, calcular la velocidad. El otro es fijar dos posiciones absolutas, y calcular la velocidad a partir del tiempo transcurrido entre ambas.

2.7.4. Transductores de alcance

Los transductores de alcance (range transducers) proporcionan una técnica muy usada de medidas de desplazamientos lineales de un cuerpo respecto de algún límite fijo. La característica común de estos sistemas es que cuentan con un emisor de energía, un detector de energía y un medio electrónico de medida del "tiempo de vuelo" de la energía entre el emisor y el detector. La forma de energía puede ser tanto ultrasonidos como luz.

En sistemas de ultrasonidos, la energía es transmitida en forma de trenes de pulsos de alta frecuencia (por encima de los 20KHz, límite de las audibles) y suelen emplear cerámicas piezoeléctricas, tanto para generadores como para

receptores. Normalmente se usan para medidas de hasta unos 5 ó 10 metros (en el aire). Debido a las dificultades en la medida del tiempo de vuelo con suficiente resolución, estos sistemas no son muy utilizados para distancias menores de 300mm.

Los ultrasonidos encuentran también aplicaciones en: detección de presencia, sonar, medida de nivel de líquidos, aplicaciones médicas, formación de imágenes, etc.

En sistemas ópticos suele trabajarse con una fuente de luz láser. La alta velocidad de la luz en el aire, permite obtener medidas de larga distancia con una resolución razonable (telémetro láser).

2.7.5. Bloques terminales

Estos elementos constituyen la interfaz de conexión entre los transductores y los Sistemas de adquisición y acondicionamiento de señal. Son simplemente bloques similares a las borneras, pero presentan características adicionales que los hacen muy útiles, como por ejemplo algunos incluyen RTD conectados a un canal de adquisición dedicado para realizar la compensación de cero cuando se mide temperatura con termocuplas. Otros Bloques tienen conjuntos de resistencias de precisión para realizar lectura de señales de corriente.

2.7.6. Hardware de acondicionamiento de señal

Las señales eléctricas generadas por los Transductores deben ser acondicionadas para poder ser adquiridas por el Hardware. Los accesorios de acondicionamiento permiten *Amplificar*, *Aislar* y *Filtrar* para realizar mediciones más exactas y además, *Multiplexar* y *Excitar* Transductores como Strain Gauges y RTD. Además permiten aumentar el número de canales para aplicaciones que así lo requieran.

2.7.7. Hardware de adquisición de datos

Estos dispositivos son fundamentales para implementar cualquier aplicación en *Instrumentación Virtual*, ya que permiten relacionar en forma directa el concepto *Virtual* desarrollado en el computador y el concepto *Instrumentación* que se desarrolla en terreno, ahí donde están los Sensores y Actuadores, transformándose así en una interfaz absolutamente necesaria.

2.7.8. Cables de conexión

La necesidad de conectar equipos entre sí es evidente, más aún cuando se trata de dispositivos de naturaleza distinta, por ejemplo PC y Hardware de Adquisición. Es por esto que cada etapa de la aplicación deberá ser cableada con un tipo de cable conector apropiado y que cumpla las condiciones mínimas

de compatibilidad para asegurar un correcto funcionamiento. Los cables conectores típicos son los que presentan aislación permitiendo tener mayor inmunidad al ruido y una conexión robusta y los cables planos que por lo general son de muy bajo costo, flexibles y menos robustos siendo de esta forma, más propensos al ruido.

2.7.9. Computador

El Computador, ya sea PC o Portátil puede afectar drásticamente el desempeño de un sistema, principalmente porque puede potenciar o limitar las aplicaciones de Software y de Adquisición de Datos. Hoy en día la Tecnología basada en procesadores Pentium y PowerPc, y agregando el alto desempeño de la arquitectura de los buses PCI, USB, y el tradicional bus ISA/EISA y Machintosh NuBus, entregan una herramienta poderosa, sobre todo, en velocidad. Además con la posibilidad de utilizar PCMCIA para PC portátiles, permiten desarrollar aplicaciones que entregan una mayor flexibilidad y movilidad. El desarrollo que ha tenido la transferencia de datos DMA en algunas arquitecturas de Computador, permite incrementar la tasa de transferencia y así la velocidad del sistema. De acuerdo a la arquitectura del computador y las características del Hardware se debe escoger el sistema operativo y el Software de aplicación que entreguen mayores beneficios a la hora de establecer aplicaciones.

2.7.10. Software

El Software transforma al PC, Hardware de Adquisición y Acondicionamiento de señales en un sistema completo de adquisición y generación de señales, análisis, procesamiento y visualización de datos, es decir, es el último y tal vez uno de los más importantes ingredientes para realizar una aplicación de *Instrumentación Virtual*. A la hora de elegir el Software adecuado se debe considerar entre otras cosas:

- Compatibilidad con el Hardware de Adquisición y Acondicionamiento.
- Funcionalidad expresada en Drivers para manejar un determinado Hardware.
- Sistema operativo bajo el cual opera.
- Potencialidad y Flexibilidad.
- Dificultad y complejidad en la programación.

De acuerdo a las características antes mencionadas, el usuario podrá implementar y desarrollar sistemas a la medida de sus necesidades, entregándote una poderosa herramienta para realizar expansiones, modificaciones y generación de nuevos sistemas y aplicaciones en Instrumentación, Control, Monitoreo y Automatización de Procesos Industriales.

2.7.11. Programación gráfica

Existen muchos lenguajes de programación en el mercado. Algunos de ellos utilizan la denominación “visual” en su nombre (Ej. Visual C, Visual Basic, etc.). Lo cierto es que la mayoría de estos lenguajes son no más del 50% visual, ya que están basados en una combinación de objetos gráficos y texto. Sin embargo, si existen lenguajes de programación 100% gráficos, es decir, lenguajes que permiten programar y desarrollar una aplicación sin utilizar texto, y este tipo de lenguaje de programación es el que permite el desarrollo de los *instrumentos virtuales*. El principio o paradigma de programación utilizado por este lenguaje gráfico se basa en cuatro (4) elementos básicos:

- El uso de íconos, cables gráficos y controles-indicadores.
- Programación en base a un diagrama de bloques
- El uso de dos ventanas de programación: panel de controles y panel del diagrama
- Ejecución del programa en base al flujo de datos, en forma paralela.

La programación con diagramas de bloques se basa en íconos o bloques gráficos que se interconectan entre sí a través de “cables gráficos” (ver figura 2-34). Los datos “fluyen” entre los bloques o funciones a través de los “cables gráficos”. Cada bloque o función cuenta con terminales de entrada en el lado

izquierdo, y terminales de salida, en el lado derecho. Cada bloque se ejecuta cuando todos los datos de entrada son recibidos en los terminales de entrada, permitiendo la ejecución paralela de más de un bloque en un mismo programa. Cada programa de este tipo se denomina “**Instrumento Virtual**” ó **VI** (según sus siglas en el idioma inglés), y puede incluir uno ó más sub-Vis como una especie de subrutina.

En estos ambientes de programación, a cada tipo de dato (entero, punto-flotante, cadena de caracteres, etc.) se le asigna un color específico, lo que permite su rápida identificación en el código fuente.

De esta forma, se puede desarrollar una aplicación completa, basada en un lenguaje de programación altamente intuitivo, fácil de aprender, pero a la vez, tan poderoso y rápido como cualquier otro lenguaje.

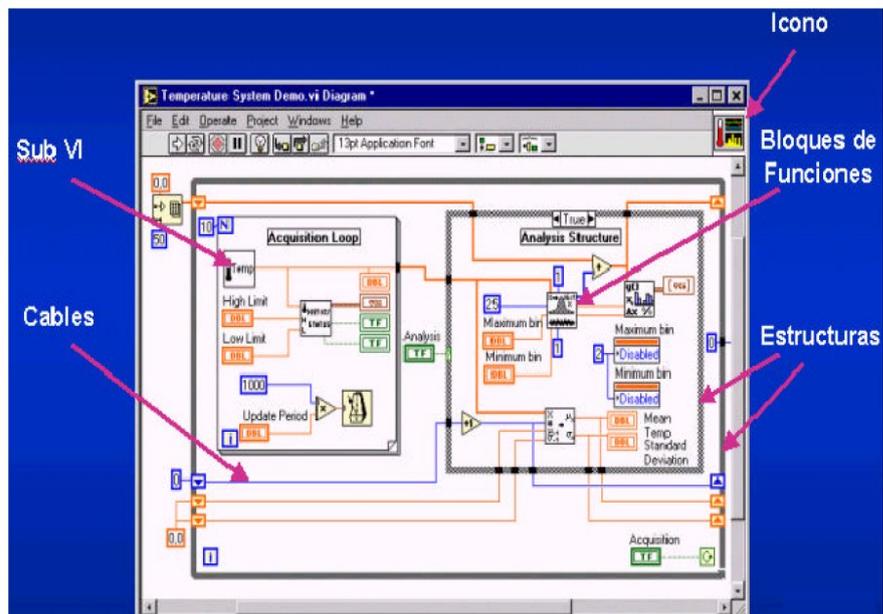


Figura 2-34 Aplicación desarrollada en programación grafica con software LabVIEW.

2.8. Instrumentación Virtual

2.8.1. Que es la instrumentación Virtual

Mucho hemos oído hablar sobre la "instrumentación virtual" y sus beneficios. El concepto de instrumentación virtual nace a partir del uso del computador personal (PC) como "instrumento" de medición de tales señales como temperatura, presión, caudal, etc.

Es decir, el PC comienza a ser utilizado para realizar mediciones de fenómenos físicos representados en señales de corriente (Ej. 4-20mA) y/o voltaje (Ej. (0-5Vdc). Sin embargo, el concepto de "instrumentación virtual" va más allá de la simple medición de corriente o voltaje, sino que también involucra el procesamiento, análisis, almacenamiento, distribución y despliegue de los

datos e información relacionados con la medición de una o varias señales específicas. Es decir, el instrumento virtual no se conforma con la adquisición de la señal, sino que también involucra la interfaz hombre-máquina, las funciones de análisis y procesamiento de señales, las rutinas de almacenamiento de datos y la comunicación con otros equipos.

Veamos un ejemplo; el osciloscopio tradicional tiene una funcionalidad ya predefinida desde la fábrica donde lo diseñan, producen y ensamblan. Es decir, la funcionalidad de este tipo de instrumento es definida por el fabricante del equipo, y no por el usuario mismo. El término "virtual" nace precisamente a partir del hecho de que cuando se utiliza el PC como "instrumento" es el usuario mismo quién, a través del software, define su funcionalidad y "apariencia" y por ello decimos que "virtualizamos" el instrumento, ya que su funcionalidad puede ser definida una y otra vez por el usuario y no por el fabricante.

El instrumento virtual es definido entonces como una capa de software y hardware que se le agrega a un PC en tal forma que permite a los usuarios interactuar con la computadora como si estuviesen utilizando su propio instrumento electrónico "hecho a la medida".

2.8.2 Cómo construir un instrumento virtual

Para construir un instrumento virtual, sólo requerimos de un PC, una tarjeta de adquisición de datos con acondicionamiento de señales (PCMCIA, ISA, XT, PCI, etc.) y el software apropiado, los tres elementos clave en la conformación de un instrumento virtual, teniendo un chasis de acondicionamiento de señales como elemento opcional.

Decimos que el "acondicionamiento de señales" es opcional, porque dependiendo de cada señal y/o aplicación, se puede o no requerir amplificación, atenuación, filtraje, aislamiento, etc. de cada señal. Si la señal está en el rango de los +/- 5Vdc y no se requiere de aislamiento o filtraje, la misma puede ser conectada directamente a la tarjeta de adquisición de datos.

En el instrumento virtual, el software es la clave del sistema, a diferencia del instrumento tradicional, donde la clave es el hardware. Con el sistema indicado anteriormente, podríamos construir un osciloscopio "personalizado", con la interfaz gráfica que uno desee, agregándole inclusive más funcionalidad. Sin embargo, este mismo sistema puede también ser utilizado en la medición de temperatura, o en el control de arranque/parada de una bomba centrífuga. Es allí donde radica uno de los principales beneficios del instrumento virtual, su flexibilidad. Este instrumento virtual no sólo me permite visualizar la onda, sino que a la vez me permite graficar su espectro de potencia en forma simultánea. ¿Podría hacer algo así con un instrumento convencional?

Para finalizar, la siguiente tabla 2-4 nos indica algunas de las principales diferencias entre el instrumento convencional o tradicional, y el instrumento virtual:

Instrumento Tradicional	Instrumento Virtual
Definido por el fabricante	Definido por el usuario
Funcionalidad específica, con conectividad limitada.	Funcionalidad ilimitada, orientado a aplicaciones, conectividad amplia.
Hardware es la clave.	Software es la clave
Alto costo/función	Bajo costo/función, variedad de funciones, reusable.
Arquitectura "cerrada"	Arquitectura "abierta".
Lenta incorporación de nuevas tecnologías.	Rápida incorporación de nuevas tecnologías, gracias a la plataforma PC.
Bajas economías de escala, alto costo de mantenimiento.	Altas economías de escala, bajos costos de mantenimiento.

Tabla 2-4 Instrumentos Tradicionales vs. Virtuales.

La instrumentación virtual puede también ser implementada en equipos móviles (laptops), equipos distribuidos en campo (RS-485), equipos a distancia (conectados vía radio, Internet, etc.), o equipos industriales (NEMA 4X, etc.). Existe una tarjeta de adquisición de datos para casi cualquier bus o canal de comunicación en PC (ISA, PCI, USB, serial RS-232/485, paralelo EPP, PCMCIA, CompactPCI, PCI, etc.), y existe un driver para casi cualquier sistema operativo (WIN 3.1/95/NT, DOS, Unix, MAC OS, etc.).

2.8.3 Hacia dónde va encaminada la instrumentación virtual

La Instrumentación Virtual está siendo utilizada actualmente por una gran cantidad de Industrias y está aumentando el número y la variedad de aplicaciones. Con respecto a los sistemas desarrollados con productos National Instruments, se pueden señalar algunas aplicaciones a nivel Industrial publicadas por dicho fabricante en Instrumentación Newsletter y AutomationVIEW:

- Monitoreo y Control de Reactor Nuclear en Comisión Chilena de Energía Nuclear.
- Sistema de supervisión de Plantas de Cemento.
- Automatización de Planta de Asfalto, Concreto y Gas Natural.
- Control y monitoreo de aplicaciones a través de Internet.
- Sistema de Predicción de Fallas en mantenimiento predictivo de aeronaves.

La lista de aplicaciones es muy extensa existiendo además implementaciones con Instrumentación Virtual en ambientes docentes de Universidades Mexicanas, Colombianas, Norteamericanas y Europeas, entre otras.

Así como National Instruments posee herramientas para desarrollar Instrumentación Virtual, existen otras empresas que también las proveen. Entre

las más conocidas están Advantech con su software GENIE y sus dispositivos de Adquisición de Datos, Cyber Tools y Cyber View que entregan software y Drivers para manejar una gran variedad de Hardware y toda la gama de empresas que disponen de herramientas similares para generar sistemas SCADA e interfaces MMI.

2.8.4 Componentes de un sistema basado en instrumentación virtual

Los sistemas basados en PC que permiten desarrollar aplicaciones con *Instrumentación Virtual*, tienen una estructura que se puede dividir en tres componentes fundamentales: Hardware de Adquisición de Datos y Acondicionamiento de Señal, Computador Personal y Software. Sin embargo, en cualquier aplicación con estos sistemas surgen otros elementos tales como: Transductores, Bloques Terminales, Cables conectores, etc. De esta forma el diagrama de bloques de una aplicación de *Instrumentación Virtual* como la disponible en el laboratorio de control automático del DIE, puede representarse de la siguiente forma:

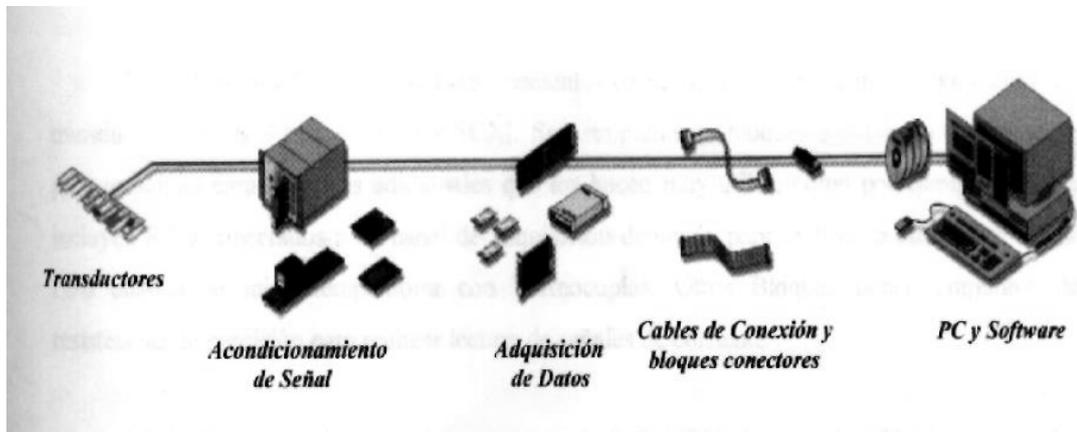


Figura 2-35 Diagrama de bloques de un Sistema basado en *instrumentación Virtual*.

La función de cada uno de estos componentes es fundamental para el desarrollo de aplicaciones en *Instrumentación Virtual*, es por esto que se detallan brevemente las características de cada uno de estos elementos.

Capítulo 3: Sistema de adquisición de datos

Los sistemas de adquisición y distribución de señales (SADS) son un tipo particular de sistema electrónico. Para comprender su funcionamiento hay que conocer las funciones que deben cumplir y las distintas formas en que se pueden realizar y organizar. La decisión sobre cuáles son los elementos a considerar como punto de partida para realizar cada función (qué comprar y qué diseñar) hay que tomarla tras analizar el coste de cada alternativa.

En este capítulo se estudian tres aspectos básicos de los SADS: las funciones a realizar, las distintas posibilidades para organizarlas y los conceptos de margen dinámico y relación señal-ruido. En el desarrollo del capítulo quedan implícitas la alternativa de poder realizar algunas funciones bien por hardware bien por software y la existencia de unas limitaciones físicas que no se pueden superar solamente por software. Se dan también unas ideas generales sobre el diseño de SADS que, aunque quizás puedan parecer prematuras, creemos necesarias para crear buenos hábitos de trabajo.

3.1 Conceptos generales

Un sistema es un conjunto de elementos o partes organizadas para realizar una función determinada. Un sistema electrónico es aquel cuyos elementos o partes realizan sus funciones respectivas por medios electrónicos.

En un SADS para medida y control, las entradas son en forma de variables físicas, eléctricas o no, y las salidas son en forma de variables físicas o de presentación visual o acústica. Los SADS suelen realizar una única tarea, aunque con grados de complejidad muy diversos. En los sistemas para tratamiento de datos y textos, en cambio, las entradas y salidas son directamente a través de equipos periféricos de ordenador (teclado, pantalla, impresora...), no hay interacción con otras variables físicas más que las propias

de interfaz con el usuario, y se pueden realizar tareas diversas pues son programables por el usuario.

Las dimensiones físicas y la complejidad de un SADS, evaluada por el número de elementos con una función diferenciada, pueden ser muy dispares. El diseño de un SADS implica considerar las partes que lo integran y sus tareas respectivas. La identificación de cada parte se hace desde una perspectiva determinada que puede ser a nivel de «transistor», de componente, de circuito o de subsistema.

El diseñador de circuitos integrados debe situarse en un momento u otro a nivel de transistor; su sistema final es un circuito integrado monolítico o híbrido. El diseñador de circuitos basados en elementos discretos se sitúa a nivel de componente; su sistema final típico es un circuito impreso. El diseñador de equipos electrónicos se sitúa a nivel de subsistemas en forma de circuitos impresos o modulares; su sistema final es el equipo o instrumento. En un nivel superior están los diseñadores de sistemas de tratamiento de datos, comunicación, medida o control, quienes emplean elementos en forma de equipos o tarjetas de circuito impreso para realizar su trabajo, que suele implicar la interconexión de elementos distantes.

Nuestros objetivos son el análisis y el diseño de SADS a nivel de componentes y de subsistemas, pero no de circuitos integrados. La elección de uno u otro nivel se hace en la práctica en función de criterios económicos.

Aunque aquí no vamos a entrar en el detalle de dichos criterios, cambiantes según evoluciona el mercado, tampoco los vamos a ignorar. No obstante, dado que distintos escenarios pueden resultar en distintas soluciones, nos situaremos con mayor frecuencia a nivel de componentes que a nivel de subsistemas, es decir, como usuarios de circuitos integrados más que de circuitos impresos. Inicialmente supondremos que cada función la realiza un elemento distinto, con independencia del grado de integración disponible.

Actualmente (1992), el coste estimado de un sistema electrónico de medida con complejidad media es: circuitos electrónicos, 35-15 %; software 45-55 %; cableado y conectores 15-20%; y mantenimiento 5-10%. La preponderancia del software es común a otros campos de las tecnologías de la información. Es conveniente recordar que para lograr un software de calidad son muy importantes la estructuración, la documentación y el mantenimiento.

La arquitectura o estructura de un sistema se refiere a la organización de sus partes. Para estudiarla se representa el sistema mediante un modelo que describe la función de cada una de sus partes y las interrelaciones entre ellas. Dicha descripción admite distintas opciones; puede ser meramente verbal, gráfica, matemática, física, o una combinación de ellas. Las descripciones matemáticas y físicas exigen un análisis detallado que será el objetivo de capítulos posteriores. Las descripciones verbales y gráficas son suficientes para introducir aquí el tema.

3.2 Funciones en la adquisición y distribución de señales

En un sistema de medida hay que adquirir la información (en forma de señales analógicas o digitales), procesarla y presentarla. A veces, además, hay que registrarlas. En un sistema de control hay que comparar el resultado de la medida con los objetivos establecidos, y actuar en consecuencia sobre el sistema físico o proceso para modificar el parámetro deseado. Ello requiere la generación de tensiones de salida analógica y digital, y el control de la potencia a aplicar. Para obtener un funcionamiento correcto hay que contar y temporizar simultáneamente varios eventos independientes. En la figura 3-1 se presenta la estructura general de un SADS para medida y control del que a continuación se describen tres de sus funciones.

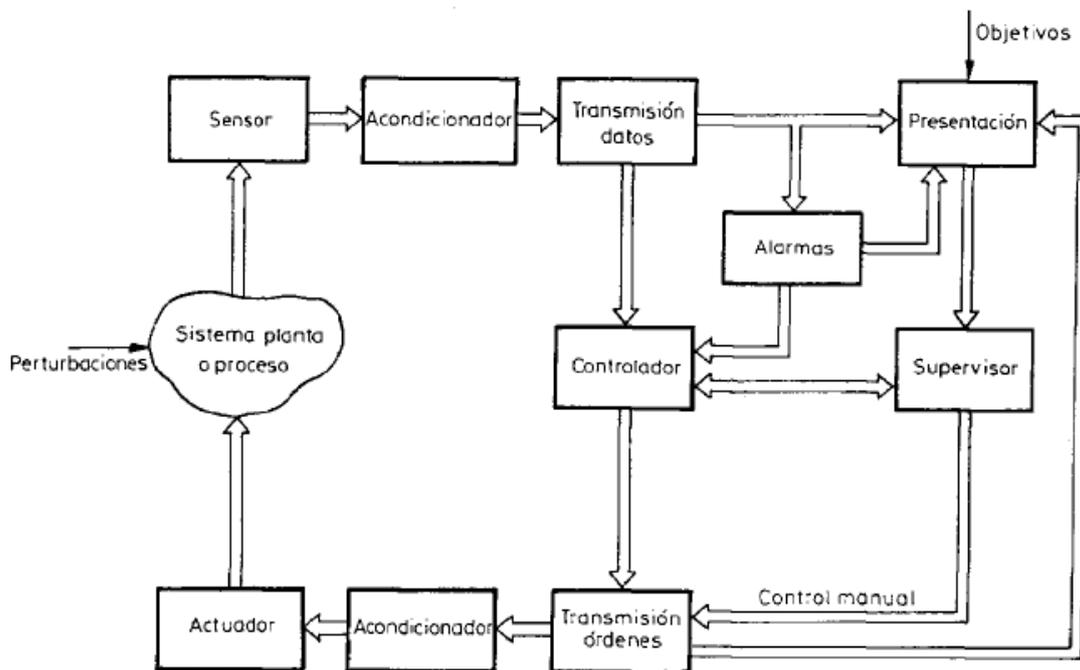


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.

Figura 3-1 Estructura general de un sistema de adquisición y distribución de señales para medida y control.

3.2.1 Transducción

El primer elemento de un SADS es el que mide la magnitud de interés. Ésta puede ser mecánica, térmica, eléctrica, magnética, óptica o química. Salvo en el caso de que las magnitudes a controlar sean todas eléctricas (por ejemplo, en una fuente de alimentación), el elemento de medida es un transductor (de entrada) que convierte energía de una forma física en otra forma distinta; en nuestro caso en energía eléctrica. Un transductor se denomina también un «sensor» por la capacidad que ofrece de percibir, tras el procesamiento oportuno, fenómenos que de otra forma serían inaccesibles a nuestros sentidos.

La cantidad de energía convertida por un transductor es pequeña, de manera que la salida hay que acondicionarla para adaptarla a las etapas siguientes. Si la

cantidad de energía convertida y, por lo tanto, extraída del proceso, fuera grande, se podría llegar a perturbar el funcionamiento del proceso de una forma no deseada.

Los parámetros básicos de un sensor son: margen o campo de medida, sensibilidad, resolución y exactitud. La sensibilidad es la relación entre la magnitud de salida y la de entrada, en ausencia de errores. Si la sensibilidad es constante en todo el margen de medida, se dice que el sensor es lineal. La resolución es el menor cambio en la magnitud de entrada que se puede detectar a la salida; viene limitada en último término por las fluctuaciones aleatorias presentes en todo elemento (mecánico o eléctrico) que disipe energía, como es el caso de los sensores. La exactitud describe el grado de coincidencia entre el valor real de la entrada y su valor deducido a partir de la salida actual y de la sensibilidad. Su estudio detallado se expondrá más tarde.

Cuando interese controlar una magnitud física, una vez se tiene la información sobre el estado real y se compara con el objetivo, se toma una decisión (según un algoritmo de control) que debe acabar en una acción sobre el proceso. Si, por ejemplo, se desea mantener un reactor químico a temperatura constante y la temperatura medida es inferior a la deseada, hay que activar un calefactor; si se desea leer una zona concreta de un disco magnético, hay que desplazar el disco, el cabezal, o ambos, hasta que el cabezal quede sobre la zona deseada; si se desea que la tensión de salida de una fuente de

alimentación se mantenga en un valor constante, hay que regularla si cambia al hacerlo la carga; etc.

Si la magnitud controlada no es eléctrica, hay que convertir la señal eléctrica de control en una acción no eléctrica. (Los sistemas totalmente neumáticos son una excepción que no consideraremos aquí.) Hace falta una nueva transducción (de salida). Los elementos que dan una salida no eléctrica a partir de una entrada eléctrica se denominan accionamientos o actuadores (salida mecánica) y calefactores/refrigeradores —células Peltier— (salida térmica). Los elementos que dan una salida óptica o acústica, suelen formar parte de los subsistemas de presentación, aunque cada vez hay más aplicaciones industriales que emplean directamente las radiaciones ópticas (láser, por ejemplo) y mecánicas (ultrasonidos).

3.2.2 Conversión analógica-digital Aislamiento

La salida de los sensores es normalmente, aunque no exclusivamente, en forma de señal analógica (continua en cuanto a amplitud y en el tiempo). En algún punto del SADS dicha señal hay que convertirla en digital («binaria»: continua en el tiempo pero con sólo dos niveles de tensión), por cuanto los elementos de procesamiento y muchos de los de presentación requieren entradas digitales. En muchos casos, el procesador es un ordenador personal (PC).

La conversión de señales analógicas en señales digitales se realiza en dos etapas: primero se cuantifica la señal y luego se codifica. La cuantificación consiste en representar la amplitud (continua) de la señal mediante un número finito de valores distintos, en instantes determinados; si el convertidor es de n bits, hay 2^n valores o estados posibles. La codificación es la representación del valor asignado a la señal, mediante combinaciones de símbolos que se representan habitualmente con dos niveles de tensión («1» y «0»). La cuantificación y codificación las realiza el convertidor analógico-digital (CAD).

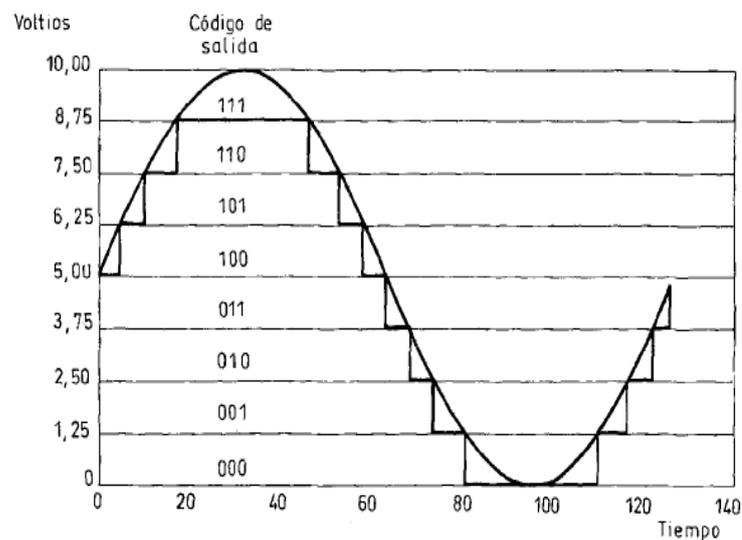


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.
Figura 3-2 Señal senoidal y su versión digital, con una resolución de 3 bits.

En la figura 3-2 se muestra una señal senoidal y su «versión digital» mediante un CAD de 3 bits (a modo de ejemplo; la resolución es habitualmente

mucho mayor). En este caso hay 8 estados de salida, representados por los códigos desde 000 hasta 111. Si el margen M de tensiones de entrada del CAD es de 0 a 10 V, cada código representa un intervalo de amplitudes de $10 \text{ V}/8 = 1,25 \text{ V}$.

Ejemplo. Un determinado CAD de 12 bits admite dos márgenes de entrada: 0 a 5 V y - 5 V a + 5 V. ¿Cuál es en cada caso la amplitud del intervalo de tensiones de entrada que corresponde a cada estado?

En el primer caso, $M = 5 \text{ V} - 0 \text{ V} = 5 \text{ V}$, y cada estado corresponde a un intervalo de

5V

$$= 1,22 \text{ mV}$$

212

En el segundo caso, $M = 5 \text{ V} - (- 5 \text{ V}) = 10 \text{ V}$, y cada estado corresponde a un intervalo de

10V

$$= 2,44 \text{ mV}$$

212

La conversión A/D lleva un cierto tiempo. Si durante este tiempo cambia la amplitud de la señal analógica de entrada, el resultado de la conversión corresponderá a alguno de los valores que haya tomado la entrada durante el tiempo que ha durado la conversión. Para que esta incertidumbre en la amplitud sea inferior a la discriminación que permite el CAD (valor del bit menos significativo, LSB, «Least Significant Bit») la velocidad máxima de cambio de la entrada, dV/dt , debe cumplir

$$\frac{dV}{dt} \leq \frac{M}{2^n t_c}$$

Ecuación 3-1

Donde M es el margen de tensiones de entrada del CAD, n su número de bits y t_c el tiempo entre conversiones (que incluye, además del tiempo de conversión propiamente dicho, cualquier tiempo muerto necesario en el CAD, por ejemplo para su puesta a cero).

En el caso de una señal senoidal de amplitud de pico A y frecuencia f , la máxima velocidad de cambio se produce en el paso por cero, de modo que si se acepta una incertidumbre máxima de 1 LSB la frecuencia de la señal no debe exceder de

$$f \leq \frac{M}{2\pi A 2^n t_c}$$

Ecuación 3-2

Si la señal se ha acondicionado previamente de tal modo que su amplitud (de pico a pico), $2A$, coincida con el margen del CAD, M , la máxima frecuencia admisible será

$$f \leq 1/(2^n \pi t_c)$$

Ecuación 3-3

En general, si el CAD tiene una exactitud elevada se puede hacer que los errores que dependen del tiempo sean debidos exclusivamente al S&H.

Para obtener una salida en forma de tensión analógica a partir de un controlador digital (que son los habituales), se emplea un convertidor digital-analógico (CDA). Su velocidad de conversión es también finita, de modo que puede hacer falta retener el valor (digital) a convertir, por ejemplo en un registro de desplazamiento.

3.2.3 Acondicionamiento de señales

Para aprovechar el margen dinámico de salida del CAD (2" valores correspondientes a un margen de tensiones de entrada M), el margen de amplitudes de la señal debe coincidir con el de entrada del convertidor (M). Para ello hay que amplificar la salida del sensor pero evitando la saturación del amplificador. Al mismo tiempo, hay que hacer compatible la salida del sensor con la entrada del CAD. Esta última suele ser unipolar y con impedancia de 1 a 10 kQ, mientras que la salida del sensor puede ser diferencial o de alta impedancia. Además, según el teorema del muestreo, el ancho de banda de la señal a convertir (incluidas las componentes no deseadas —ruido, interferencias—, si las hay) debe ser inferior a la mitad de la frecuencia con que se tomen las muestras en el proceso de cuantificación.

Los circuitos de acondicionamiento de la señal de entrada se encargan de la amplificación, filtrado y adaptación de la señal del sensor al CAD u otro tipo de etapa posterior. Deben estar protegidos frente a sobretensiones, en particular si están separados de los sensores. Pueden realizar también funciones de procesamiento como son la linealización de sensores, la diferenciación e integración de señales, la detección de fallos, la comparación con límites y otras más complejas. Todas estas operaciones hay que hacerlas manteniendo los errores dentro de márgenes aceptables. El procesamiento analógico es más rápido pero menos flexible, y más caro en componentes, que el procesamiento

por software. Si los sensores necesitan una señal de alimentación externa, los circuitos de acondicionamiento de señal deben proporcionársela.

Dado que manejan sólo señales eléctricas sin convertirlas en otras formas físicas, los acondicionadores de señal constituyen lo que se denomina una interfaz. Otras interfaces del sistema son las necesarias para enviar la información a través de los canales o líneas de comunicación. Su función y estructura dependen tanto del medio de comunicación como del código empleado para el mensaje.

Cuando hay que conectar dos elementos distantes, los puntos respectivos que se toman como referencia para medidas de tensión están a distinto potencial. Si dichos puntos se conectaran directamente, circularían por el circuito corrientes no relacionadas con la señal, que podrían enmascararla. Se hace necesario, pues, un aislamiento galvánico que interrumpa la continuidad óhmica a lo largo de todo el circuito de conexión, permitiendo el paso de la información. Este aislamiento, basado muchas veces en optoacopladores, puede ser necesario tanto a la entrada como a la salida.

Los actuadores requieren niveles de tensión y de corriente mayor de los que ofrece el CDA a su salida. Por ello la salida hay que acondicionarla antes del ac-tuador. Según la aplicación, en el acondicionamiento de la señal de salida pueden predominar los criterios de rendimiento y disipación de potencia sobre los de error. Suele ser necesaria además la protección frente a cortocircuitos.

3.3 Arquitecturas para la distribución y adquisición de señales

A partir de la estructura para un SADS para medida y control, se pueden considerar diversas alternativas de organización cuando hay varios canales de entrada o salida, o cuando se contempla la posibilidad de distribuir la capacidad de procesamiento (que determina, entre otras características, la velocidad del sistema). En este apartado se describen algunas de dichas alternativas.

3.4 Sistemas de bajo y alto nivel

Cuando hay varios canales de entrada, es frecuente que compartan un recurso común, por ejemplo el procesador digital, o varios recursos comunes, por ejemplo toda la cadena de medida salvo el sensor. Hace falta entonces un conmutador para ir asignando a cada canal, de forma secuencial o arbitraria, el recurso compartido. Normalmente se usa un multiplexor, que es un conjunto de interruptores que tienen uno de sus terminales común.

En la figura 3-3 se presenta un SAS donde el multiplexor permite que varios sensores compartan el resto de la cadena de medida. Dado que las señales de los sensores no han sido acondicionadas antes de multiplexarlas, su amplitud será pequeña, y por ello se habla de multiplexado de bajo nivel. Los errores que introduzca el multiplexor deberán ser, en consecuencia, muy pequeños. Además, si las características de las señales de salida de todos los sensores no

son similares, convendrá que la ganancia del amplificador y la frecuencia de corte del filtro previo al S&H sean programables (por software) para poderlas adaptar a cada canal. Por último, si la distancia entre sensores es apreciable, en su conexión a un multiplexor central puede que se capten interferencias, que pueden ser graves porque la señal aún no ha sido amplificada. Ello obliga a utilizar cables apantallados, mucho más caros.

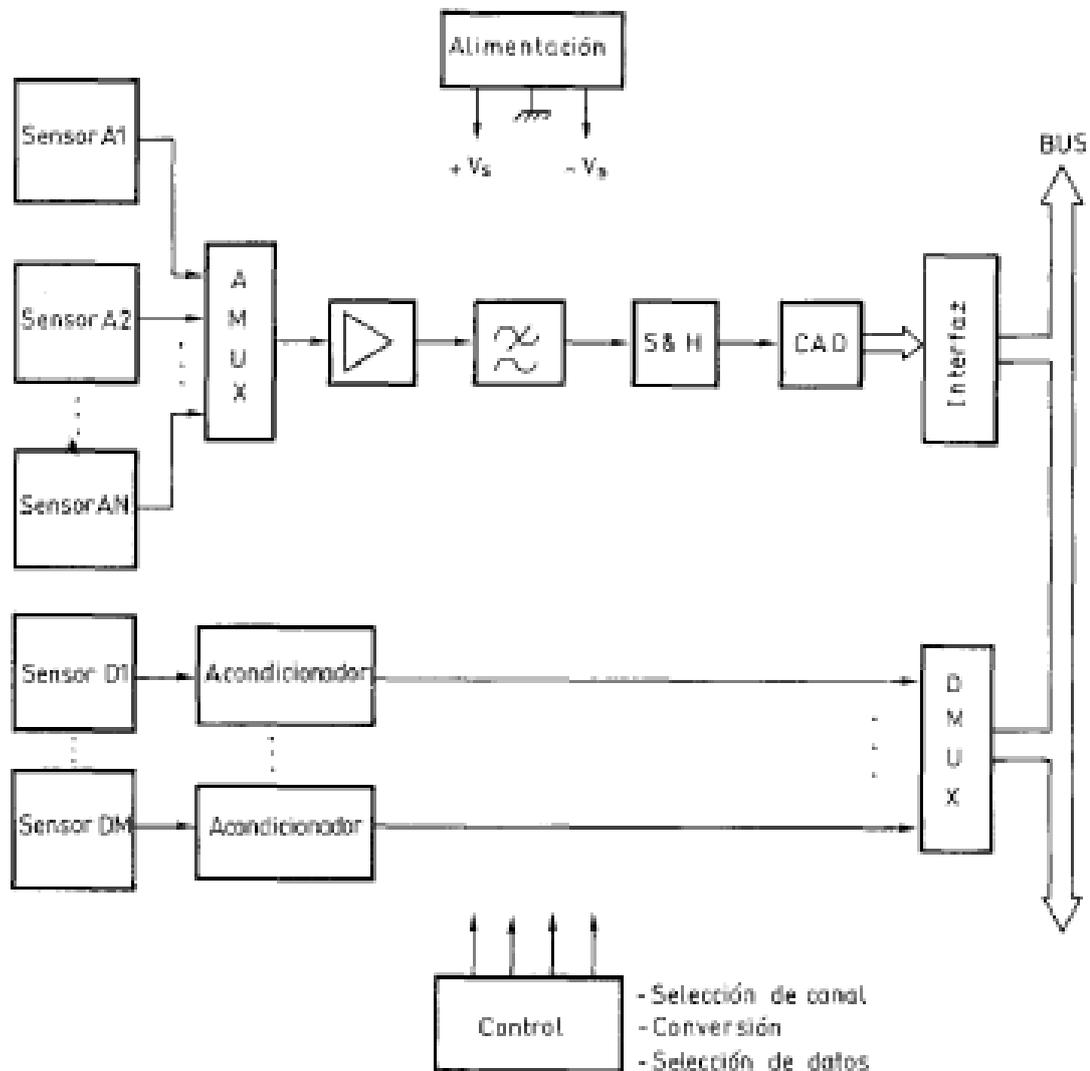


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.

Figura 3-3 Sistema de adquisición de señales con multiplexado de bajo nivel, las señales de salida de los sensores comparten directamente una cadena de medida común.

Para reducir el efecto de los errores del multiplexor y de las interferencias en la conexión entre sensor y multiplexor, y para acondicionar mejor la señal de cada canal, se pueden amplificar primero las señales individuales y luego multiplexarlas, tal como se muestra en la figura 3-4. Si la amplitud de las señales

multiplexadas es mayor de unos 100 mV, se habla de multiplexado de alto nivel. Si los amplificadores trabajan con ganancia constante, el sistema es entonces más rápido por cuanto no hay que esperar a que se estabilice el amplificador tras conmutar la ganancia.

Para el amplificador que sigue al multiplexor puede bastar una ganancia pequeña, constante. El reparto de la ganancia en dos etapas facilita el diseño de los amplificadores.

Una limitación de la estructura de la figura 3-4 es que no permite tomar muestras simultáneamente en todos los canales. Esto impide, por ejemplo, hacer medidas de fase precisas entre canales. Además, cuando hay muchos canales, tanto el multiplexor como los elementos compartidos deben ser muy rápidos, incluso si las señales de cada canal son lentas. Una solución al primer problema es poner un S&H (precedido del filtro pertinente) para cada canal, previo al multiplexor; entonces se comparten sólo el CAD y los elementos posteriores.

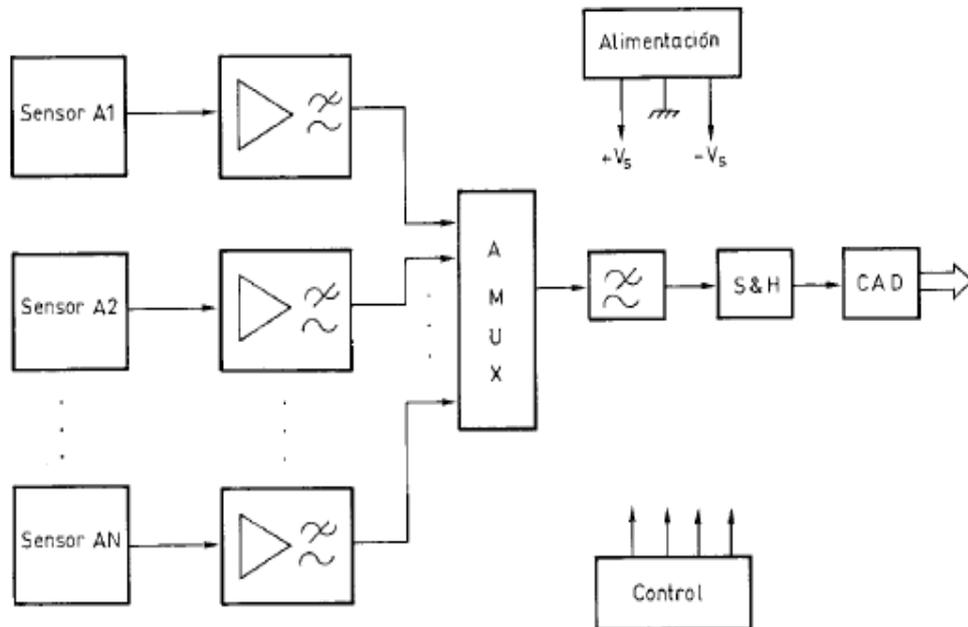


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.

Figura 3-4 Sistema de adquisición de señales con multiplexado de alto nivel, antes de multiplexar las señales de salida de los sensores se amplifican hasta obtener más de unos 100 mV.

Si se pone un CAD para cada canal, se puede elegir de forma que esté adaptado a las necesidades del canal respectivo. Normalmente no todos los canales necesitarán la misma resolución. Si las señales no tienen variaciones rápidas, se puede incluso prescindir del S&H. Si hay que transmitir las señales, es más fácil hacerlo ahora que están en forma digital. También el aislamiento, mediante opto-acopladores, es más simple. Si hay un solo procesador, las señales a multiplexar son las salidas digitales de cada CAD.

En un SDS con varios canales de salida se puede compartir también un recurso común mediante el uso de un demultiplexor o distribuidor, que puede ser también analógico o digital

3.4.1 Sistemas centralizados, descentralizados y distribuidos

En un sistema descentralizado, hay distintos procesadores coordinados, cada uno de los cuales se encarga de un sector o zona. En un sistema distribuido el número de procesadores es más elevado y cada uno de ellos cuida de una zona más pequeña, a la vez que se comunica con los otros procesadores mediante una red de interconexión. Estas mismas alternativas en la estructura física relativa a las señales, se encuentran en la alimentación eléctrica (fuentes de alimentación). En términos generales, los sistemas distribuidos tienen mayor fiabilidad y menores costes de cableado que los sistemas centralizados.

Atendiendo a su grado de integración, hay tres tipos básicos de SAS centralizados. El primero lo forman los SAS que consisten en la interconexión, vía bus, de varios instrumentos independientes. Puede tratarse de instrumentos completos conectados por el bus IEEE-488, o de instrumentos en «tarjeta» conectados al bus VXI; e incluso de instrumentos completos que se comunican por una interfaz EIA-RS-232-D o similar.

El segundo grupo de SAS centralizados lo forman las tarjetas de circuito impreso conectables a un bus. En particular, abundan las tarjetas para ordenadores personales, sobre todo para el IBM PC, XT, AT y compatibles.

El tercer grupo de SAS centralizados son circuitos integrados complejos, monolíticos o híbridos, que incorporan todas o la mayor parte de las funciones necesarias para adquirir señales analógicas.

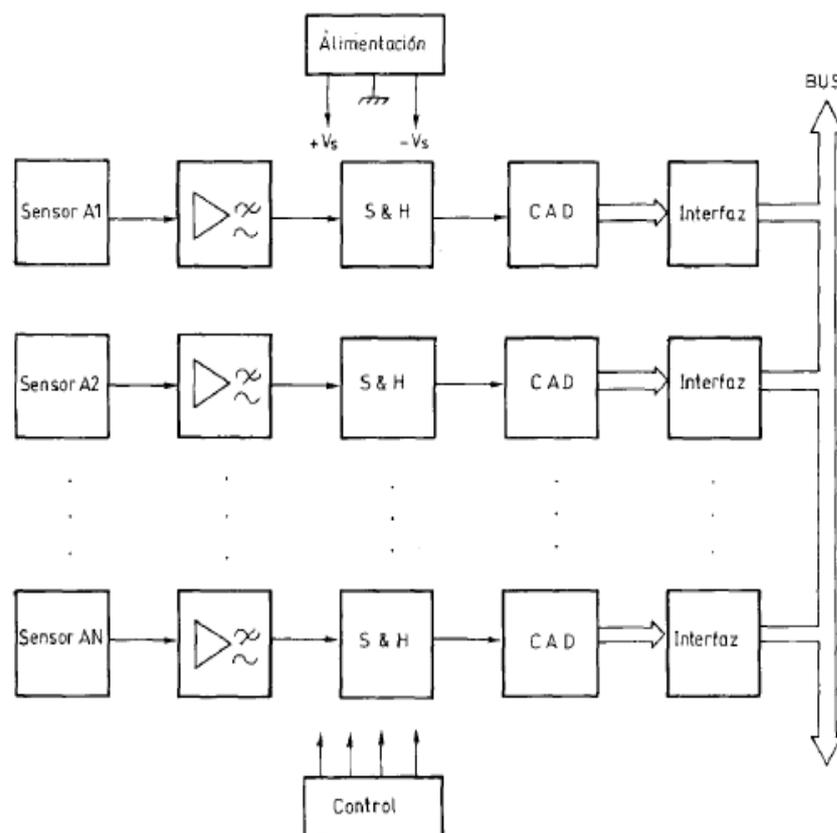


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.

Figura 3-5 Multiplexado digital mediante elementos con salidas de tres estados (tri-state).

3.4.2 Sistemas unibus y multibus

La transmisión, tratamiento y presentación de la información se realizan preferentemente con medios que trabajan con señales digitales. El elemento central en dichas funciones es entonces un microprocesador (μP), que es el conjunto —normalmente integrado— de ALU (Arithmetic and Logic Unit), circuito de control, algo de memoria volátil de lectura y escritura (RWM, Read-Write Memory) y, a veces, reloj; el conjunto de los elementos, salvo el reloj, constituye una CPU (Central Process Unit). Cuando se le añaden una memoria con el programa (ROM, Read Only Memory), memoria RWM adicional y componentes periféricos de in-terfaz externa, entonces se tiene un microcomputador (μC), que también puede estar integrado en una sola pastilla.

Los elementos de un μC están interconectados mediante un conjunto de líneas comunes que constituyen lo que se denomina el «bus» del sistema. Esta disposición afecta en gran manera la estructura y funcionamiento del sistema, cuyos elementos deben tener, además de los circuitos para su función específica, otros circuitos para la interfaz con el bus. Parte de las líneas del bus (bus de direcciones) especifican la dirección del elemento que debe transmitir un dato, que se pone en un conjunto de líneas (bus de datos). El sincronismo se logra mediante otro conjunto de líneas que constituye el bus de control. Cuanto mayor es el número de bits de direcciones, mayor es el número de elementos

(registros) que puede tener el sistema; cuantos más bits de datos se tengan, más rápidas son las transferencias u operaciones con los datos.

Cuando el μ C se conecta a otros elementos externos también mediante un bus, éste no tiene por qué ser igual que el bus interno del microcomputador. El bus del (sistema) IBM® PC, por ejemplo, es una extensión del bus del Intel 8088, que es la CPU interna. Cuando además se desea conectar el IBM® PC con otros dispositivos, la conexión puede ser también mediante un bus, por ejemplo el descrito en la norma IEEE-488 (GPIB, General Purpose Interface Bus), que es distinto al bus del IBM® PC.

Dado que para realizar las distintas funciones indicadas en la figura 3-1 se puede emplear más de un μ C, que puede ser distinto para cada función, y dada la variedad de buses disponibles a distintos niveles, resulta que el número y tipo de buses es una característica importante en la estructura de todo SADS. Todos los elementos que estén a un mismo nivel en un sistema basado en bus deben ser compatibles con dicho bus.

En la figura 3-6 se presenta un SAS con un solo bus, en este caso el del Intel 8085. La comunicación con otros sistemas se hace mediante una interfaz serie asincrónica que cumple la norma EIA-RS-232-C. Para ampliar el número de canales de entrada analógicos hasta 48, el bus está disponible para conectarlo a otras tarjetas que incluyan los acondicionadores de señal (preamplificación, escalado, multiplexado, aislamiento), en cuyo caso se comparte el CAD.

Obsérvese que la presencia de una interfaz de entrada/salida digital no significa necesariamente que sea tipo bus. En este ejemplo concreto se trata simplemente de ocho líneas de entrada optoaisladas compatibles TTL, y de ocho líneas de salida también compatibles TTL.

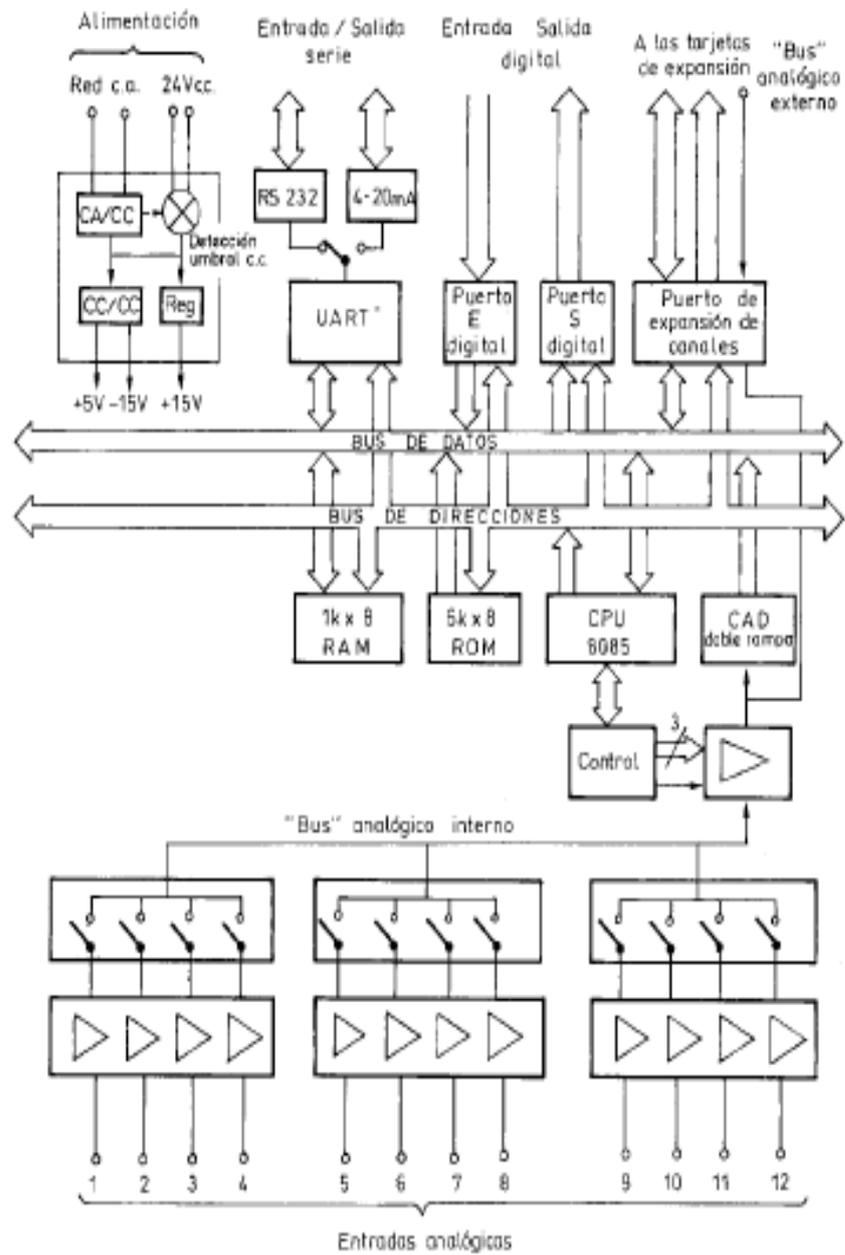


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.
Figura 3-6 Estructura de un sistema de adquisición de datos unibús.

Un SAS basado en un PC que incorpore la tarjeta descrita en la figura 3-7, es un ejemplo de sistema con dos buses: el del PC y el del procesador interno de la tarjeta. El ordenador queda libre de las tareas de control de la adquisición, pero presta su bus para la transferencia de datos a memoria, mediante acceso directo a memoria (DMA, Direct Memory Access). Se pueden conectar otras tarjetas al mismo bus para realizar otras funciones, por ejemplo la generación de señales analógicas o la comunicación a través de una línea telefónica. En general, si se emplea más de un bus, se reserva el más rápido para la conexión entre CPU y memoria.

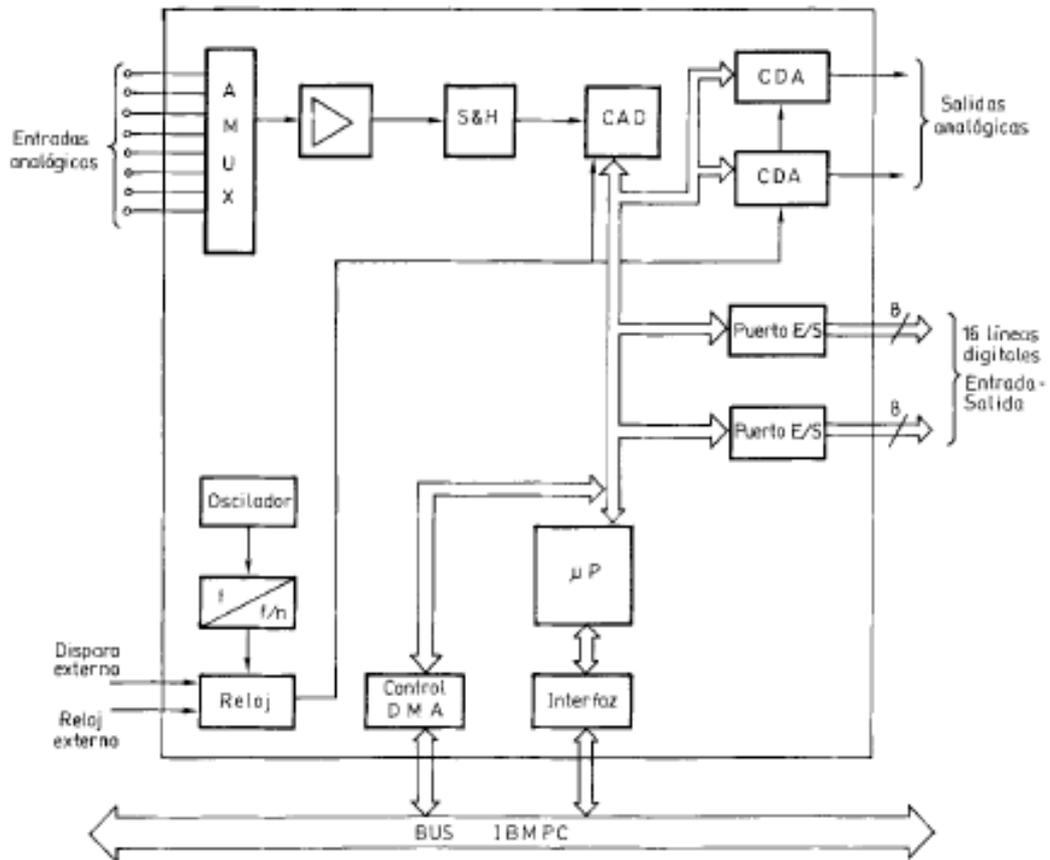


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.
Figura 3-7 Tarjeta de adquisición de señales que se puede conectar a un IBM pc.

A veces, al integrar un sistema alrededor de un bus se desconoce el tiempo de respuesta exacto de un elemento concreto, de forma que la puesta a punto final del sistema sólo puede hacerse una vez ha sido montado y puesto en marcha. En estos casos, dado que las modificaciones en el software suelen ser más fáciles que en el hardware, esta posible necesidad de ajustes hay que preverla al diseñar los programas.

3.5 Los sistemas de ensayos: estímulo y medida

Los sistemas de ensayo son un caso particular de SADS caracterizados por la necesidad de aplicar un estímulo al sistema o dispositivo del que se desea medir la respuesta. En los sistemas de ensayo simples se conecta directamente la fuente de señal al dispositivo a ensayar (DAE), y éste al medidor (figura 1.8a).

En los sistemas complejos donde hay varios puntos de medida en un DAE, o hay varios DAE, o donde hay que aplicar distintas fuentes de señal o distintos medidores o ambas cosas, a uno o varios DAE, no se utiliza una conexión directa fuente-DAE-medidor sino que se comparten recursos. En todos estos casos se utiliza un conmutador para ir estableciendo las sucesivas conexiones fuente-DAE-medidor. La automatización de estas conexiones se suele realizar mediante un ordenador con una interfaz que cumpla la norma IEEE-488 o la norma VXI.

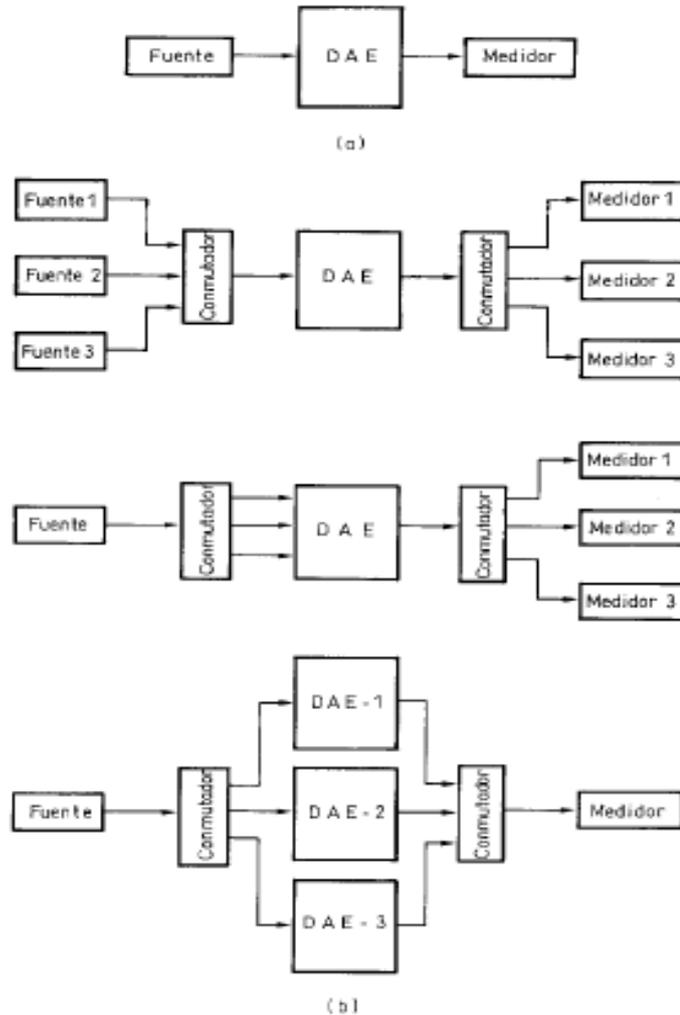


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.
Figura 3-8 Sistema de ensayo, (a) Sistema simple con conexión directa fuente. (b) Sistema de ensayo donde se comparten uno o más recursos comunes mediante conmutación.

3.6 Sistemas en línea y fuera de línea

Otra característica que afecta a la estructura de un SAS es si las señales se procesan conforme se van adquiriendo o en tiempo diferido (figura 3-9). En el

primer caso se habla de sistemas en línea (on line) mientras que en el segundo se habla de sistemas fuera de línea (off line); un ejemplo son los denominados «data loggers». Los sistemas fuera de línea se caracterizan por disponer de un elemento que registra las señales para su posterior volcado al procesador digital. El registro suele ser en memorias de semiconductor o en soporte magnético, cinta o disco, y se realiza sobre las señales digitalizadas. Los códigos empleados para el registro magnético son los mismos que para la transmisión de datos. Los sistemas fuera de línea son habituales en medidas remotas o durante periodos de tiempo largos.

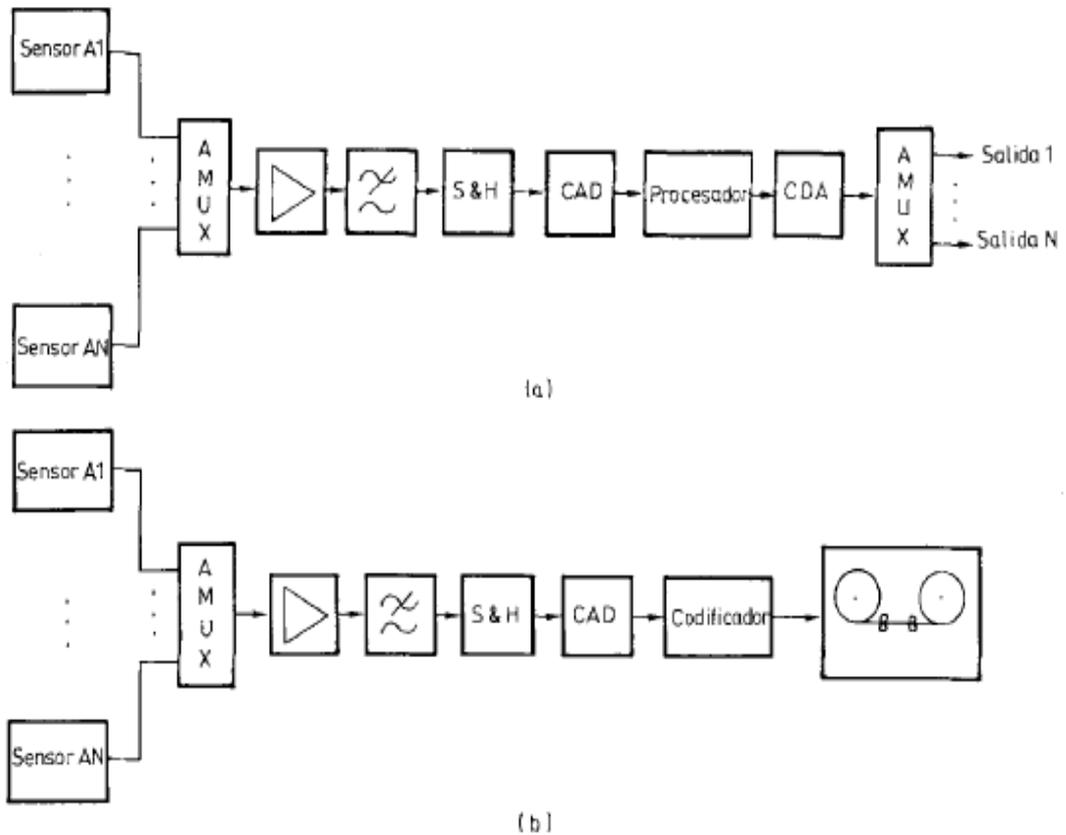


Imagen obtenida del libro Transductores y acondicionadores de señal por R. Pallás Areny.
Figura 3-9 Sistema de adquisición de datos en línea (a) y fuera de línea (b).

3.7 Sistemas integrados para adquisición de señales

Si exceptuamos algunos sensores, el resto de las funciones necesarias para adquirir señales analógicas se pueden integrar en un circuito monolítico o híbrido. Incluso hay μC que integran una parte frontal analógica (como el μPD 7002 de NEC, el SAB 80215 de Siemens, el 8096 de Intel, y la familia TMS370

de Texas Instruments), aunque sus prestaciones analógicas son inferiores a las de los SAS integrados.

Todos los SAS integrados incluyen un multiplexor, CAD y una interfaz de salida, que es la que determina el formato (serie o paralelo) de los datos de salida hacia el μ P. En algunos modelos se puede seleccionar uno cualquiera de los dos formatos. Otros modelos incluyen un amplificador, normalmente con entrada diferencial y, a veces, con ganancia programable (AGP). Aún otros modelos incorporan un S&H, bien como elemento diferenciado, bien intrínsecamente en un diseño especial del multiplexor. En este último caso se puede tomar una muestra simultáneamente en todos los canales.

3.8 Diseño de sistemas de adquisición y distribución de señales

Para el diseño de un SADS hay que seguir los principios generales de diseño de todo sistema electrónico. Las bases son la división y la organización. En nuestro caso esto se traduce en dividir la función del SADS en tareas elementales y organizar los elementos que realizan dichas tareas. Pero, ¿qué se entiende por tarea elemental y qué se entiende por elemento? La respuesta depende del nivel de diseño considerado. A nivel de componentes, un elemento es cualquier componente especificado en los catálogos; cualquiera de las tareas que puede realizar, suponiendo que no sea única, es una tarea elemental. Análogamente se puede decir a nivel de circuitos impresos. La división de la

función inicial en tareas elementales no es en general inmediata, sino que se realiza mediante sucesivas divisiones partiendo desde la función inicial.

El diseño metódico de un sistema consta de cinco etapas: definición del problema, diseño sistemático, realización del diseño, verificación y corrección, y documentación, mantenimiento y actualización.

La definición del problema implica: describirlo, dar las características del sistema que lo resuelva, establecer las condiciones de contorno o ambientales en que deben mantenerse dichas características, y justificar el tipo de sistema propuesto para la solución, frente a otras posibles alternativas.

La descripción del problema debe incluir el análisis del contexto técnico, funcional y económico en que debe integrarse el sistema. El diseñador del sistema no tiene por qué realizar dicho análisis, pero debe conocer sus resultados.

La especificación de las características del SADS debe seguir las normas técnicas habituales para el tipo de sistema. Debe incluir lo siguiente:

- La descripción de qué debe hacer el sistema.
- Las prestaciones técnicas de su función.
- Los detalles de la interacción usuario-sistema.
- La interfaz del sistema con el entorno.

hardware y del software. Para lo primero, hay que desarrollar el hábito de informarse, normalmente a través de la lectura. Para lo segundo, se dan seguidamente unas pautas.

En términos generales, las soluciones hard son más caras pero también más rápidas de ejecución que las soluciones soft. Algunos de los factores a tener en cuenta son:

- Coste por unidad producida.
- Tiempo y coste del desarrollo de la solución.
- Fiabilidad o capacidad de funcionamiento dentro de las especificaciones durante largo tiempo tras la puesta en marcha.
- Compatibilidad con otras aplicaciones dentro del entorno del sistema.
- Potencia disipada.
- Espacio ocupado.

Para grandes series de producción, cuanto menos hardware tanto mejor, aunque sea a costa de requerir un software más complejo, porque mientras en una solución hard el coste de los componentes incorporados en cada producto se mantiene fijo, en cambio en una solución software el coste de la programación se reparte entre todas las unidades producidas y sólo el coste de la memoria necesaria en cada unidad repercute directamente en su precio. Al

estimar el coste hay que tener en cuenta la disponibilidad de los componentes necesarios; tareas como la codificación de teclas o interruptores, la decodificación para elementos de presentación alfanuméricos (displays) y las interfaces serie/paralelo, son tan comunes que hay una amplia oferta hardware a bajo precio. Para los problemas donde intervienen señales analógicas, las soluciones integradas disponibles son muy limitadas.

En las soluciones soft muchas veces se puede elegir entre aquellas que requieren tiempo y las que requieren memoria. Por ejemplo, un resultado calculado mediante la aplicación de una fórmula requiere mucho tiempo y poca memoria; el mismo resultado obtenido a partir de una tabla requiere poco tiempo pero ocupa mucha memoria. Incluso dentro de una misma solución soft es posible, a veces, elegir procesadores con distintas velocidades; hay que considerar que ello puede obligar a tener memorias también de acceso rápido, cuyo precio es más elevado.

Una ventaja de los sistemas soft es que no tienen las limitaciones de abanico de entrada y abanico de salida (fan-in y fan-out) presentes en las soluciones hard. Esto no significa que la CPU no tenga dichas limitaciones; a veces incluso la limitación del número de patillas disponibles puede favorecer una solución hard. La ventaja de una solución soft es que se pueden hacer operaciones lógicas internas con muchos bits sin tener que emplear separadores (buffers) ni excitadores (drivers). La repetición, por ejemplo, de una instrucción

de escritura permite pasar información del acumulador a un gran número de posiciones de memoria sin que se tengan que añadir separadores dependiendo de cuántas posiciones se trate.

En términos generales, una solución hard es eléctricamente menos fiable que una solución soft debido al mayor número de conexiones. Además, consume mayor potencia y ocupa más espacio (salvo que la solución soft sea ávida de memoria). Además, por software se pueden realizar varias tareas (en particular si se trata con componentes mecánicos lentos, pues, en términos de las velocidades de los procesadores actuales, requieren atención sólo ocasionalmente), mientras que el hardware es muy rígido.

3.8.2 Realización del diseño

La realización del sistema incluye en general dos partes: hardware y software. Las tareas a realizar en cada caso dependen de la complejidad del sistema y del nivel de diseño considerado. Por ello sólo se exponen aquí unas consideraciones generales, inevitablemente vagas. En el hardware digital lo más práctico es emplear como componentes periféricos al microprocesador utilizado los propios de su familia; si el diseño consiste en aplicar tarjetas de circuito impreso, deben ser todas compatibles con el bus central del sistema. Conviene que el número de tensiones de alimentación distintas sea el mínimo. La disposición de los elementos del sistema, sean los componentes dentro de un

circuito impreso, sean las tarjetas dentro de un chasis modular, hay que hacerla teniendo en cuenta la compatibilidad electromagnética entre los elementos. No es prudente disponerlos al azar y confiar en la buena suerte. Esto último también aconseja disponer varios puntos de prueba para verificar el funcionamiento del sistema, en vez de confiar exclusivamente en las entradas y salidas naturales o propias de la función realizada. En sistemas muy complejos o muy costosos, se recurre a la simulación antes (o incluso en vez) de la realización de prototipos.

En el diseño del software la decisión central es qué tipo de lenguaje (nivel alto, intermedio o bajo) utilizar. La programación en lenguaje de nivel alto (ASYST, BASIC, FORTRAN, MATLAB, PASCAL) o intermedio (lenguaje C) es más rápida y fácil de corregir y mantener pero exige que se disponga de un compilador, que es el «traductor» capaz de convertir las instrucciones en órdenes inteligibles por el microprocesador utilizado. Los programas en lenguaje de alto nivel son además más fiables por cuanto incluyen muchas menos instrucciones (y, por tanto, menos posibilidades de error) que los programas en ensamblador.

Un inconveniente de los lenguajes de alto nivel es que son menos eficientes por cuanto el código máquina generado a partir de ellos suele ser mucho más largo que el generado a partir de un programa escrito en ensamblador, de modo que necesitan más memoria. Peor es, sin embargo, el hecho de que en muchas aplicaciones el objetivo es sacar provecho de detalles

específicos de la arquitectura de un determinado microprocesador, y ello no es posible con lenguajes de alto nivel. Por ello la mejor solución suele ser utilizar una combinación de lenguaje de alto nivel con lenguaje ensamblador. Los sistemas de desarrollo de software actuales permiten combinar ambos tipos de lenguaje.

3.8.3 Verificación y corrección del diseño

La verificación y corrección del sistema consiste en comprobar si el sistema cumple con las especificaciones propuestas y tomar las acciones necesarias para que las cumpla si no lo hace. Normalmente se recurre a analizar la salida ante unas condiciones predeterminadas; caso de que no cumpla con la prevista, se va «retrocediendo» desde el punto en que se detecta el error hasta encontrar su causa. Lógicamente cuando el sistema está concebido de forma modular conviene verificar cada módulo por separado una vez está completo, antes de verificar el sistema en su conjunto.

Capítulo 4 Herramientas de Programación

4.1.1. Introducción al software para el control de instrumentación y el diseño de instrumentos virtuales.

Los sistemas de instrumentación para la adquisición, los métodos de análisis de los datos adquiridos y las técnicas que permiten realizar el control del sistema físico sobre el cual se actúa. A partir de la información obtenida del proceso de adquisición, necesitan software para el control y el diseño. Parece necesario el uso de un entorno adecuado para gestionar los diferentes pasos requeridos en el sistema de instrumentación y control. Dos características fundamentales son exigibles al software:

- Debe ser capaz de controlar todo el sistema (instrumentos GPIB, VXI, comunicación serie).
- Debe permitir realizar un diseño personalizado del instrumento. El instrumento resultante será denominado ***instrumento virtual***.

Así, el software de control gestiona los procedimientos de medida (enviando las órdenes que los instrumentos deben ejecutar y adquiriendo los datos medidos) y procesa los datos procedentes de los diferentes instrumentos conectados al ordenador personal. Para disminuir el tiempo de programación necesario y reducir las dificultades de desarrollo de la aplicación, han sido creadas algunas herramientas de programación orientadas al control de

instrumentación. Este conjunto de herramientas constituye lo que se denomina ***software de instrumentación virtual***.

La escritura del programa de control es el punto clave de diferenciación entre un software de instrumentación virtual y otro de tipo general, ya que es importante en el tiempo de desarrollo de un sistema de medida. La utilización de un software de ámbito general es un proceso tedioso y sujeto a errores. Con software orientado a la instrumentación virtual esta tarea se vuelve mucho más simple a causa de la facilidad de programación y control de los dispositivos, y también gracias a la extensa variedad de librerías disponibles.

La estructura típica de un programa de instrumentación virtual consta de los siguientes módulos.

- Interfaz grafica
- Programa de control
- Adquisición de datos
- Análisis de los datos

4.1.2. Interfaz Gráfica

Con el editor de la interfaz de usuario se pueden construir, con un esfuerzo mínimo, paneles interactivos para nuestro programa, de tal manera que la

interfaz grafica se adecuara a nuestras necesidades, y gracias a ella podremos ver todo tipo de señales y datos necesarios para la interpretación de la aplicación en curso. Por todo ello se dispone de una serie de controles, cajas de dialogo y menús.

4.1.3. Programa de Control

El programa de control nos permite controlar toda la aplicación: la adquisición de los datos, el análisis de estos y la manipulación de la interfaz grafica. Para realizar esta tarea, los software de instrumentación virtual nos proveen de lenguajes de alto nivel, como pueden ser los lenguajes gráficos o el lenguaje C.

4.1.4. Adquisición de Datos

A la hora de adquirir datos, ya sea de un instrumento o de una tarjeta, es necesario realizar un control esmerado del proceso de adquisición y también de la tarea que debe realizar cada dispositivo (instrumento o tarjeta de adquisición) en cada momento. El software de instrumentación virtual permite, mediante una serie de órdenes, realizar operaciones como la lectura o la escritura cualquier instrumento, la tarjeta de adquisición, etc.

4.1.5. Análisis de Datos

Después de adquirir los datos, muy a menudo es necesario analizarlos. Algunas de las opciones que nos proporciona el software de instrumentación virtual son el procesado de la señal, la realización de operaciones estadísticas sobre los datos, su adecuación a un tipo de formato para poder ser escritos en un fichero, etc.

4.2.1. Herramientas de Programación

Dentro de las herramientas de programación existe software dirigido a la instrumentación, por ejemplo orientados a comandos (LabWindows/CVI) y dos más de tipo gráfico (LabVIEW y HP-VEE).

4.2.2. Labwindows/CVI

LabWindows/CVI es un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje C enfocado en el desarrollo de programas de prueba, medida y control gracias a la instrumentación virtual (en inglés, CVI es el acrónimo de C for Virtual Instrumentation). LabWindows/CVI es un producto de National Instruments.

La potencia de LabWindows/CVI radica en sus librerías. Para la adquisición de datos hay cinco librerías: Instruments Library, GPIB/GPIB 488.2 Library, Data Acquisition Library, RS-232 Library y la VXI Library. Para el análisis de

datos hay tres librerías: Formatting and I/O Library, Analysis Library y el Advanced Analysis Library.

Para la presentación de datos, ofrece la User Interface Library.

Para aplicaciones de comunicación entre procesos, hay dos librerías: la Dynamic Data Exchange (DDE) Library (solo para Windows) y la Transportation Control Protocol (TCP) Library.

Todas ellas se completan con una de ANSI C estándar.

La Instrument Library es una librería especial de LabWindows/CVI. Contiene *drivers* para GPIB, VXI y RS-232 de instrumentos como osciloscopios, multímetros y generadores de funciones; cada *driver* esta generado con un código fuente que puede ser modificado.

LabWindows/CVI permite concebir aplicaciones de adquisición de datos, así como de los interfaces gráficos permitiendo de poner y analizar estos datos. Este programa es muy similar a LabVIEW con lo cual comparte las funcionalidades, pero se programa en lenguaje C. Sus intereses son:

- la utilización en lenguaje C de las funcionalidades de instrumentación, análisis, medida y control de Nacional Instruments,
- la simplificación de desarrollo de los interfaces gráficos,

- la presencia de ayudantes facilita la programación de pilotos de instrumentos y de adquisiciones de datos,
- el acceso a todo el SDK de Windows win32 y así a una paleta ancha de posibilidades de programación.

Este entorno de desarrollo integrado funciona bajo Windows y se lleva también bajo Unix. Las bibliotecas especializadas en prueba, medida y control de National Instruments son también accesibles para la programación en C++, C# o Visual Basic gracias a Measurement Studio.

4.2.2.1 Historia:

Es en 1987 que la primera versión se realiza bajo DOS, entonces se nombra a simplemente LabWindows. Será llevado a continuación bajo Windows y sido reelegido LabWindows/CVI. La lista abajo indica las versiones principales del programa informático así como sus nuevas funciones:

1989: LabWindows 1.0, bajo DOS, primera versión pública

1991: LabWindows 2.0, bajo DOS, ayuda al desarrollo de interfaces gráficas de usuario

1994: LabWindows/CVI 3.0, bajo Windows 3.1 y

1995: LabWindows/CVI 3.1, generación automática de código

1996: LabWindows/CVI 4.0, mayor compatibilidad con los compiladores externos (Microsoft, Borland, Watcom y Symantec)

1998: LabWindows/CVI 5.0, compatibilidad VXI e IVI

2000: LabWindows/CVI 5.5, librerías de funciones multitarea

2001: LabWindows/CVI 6.0, ActiveX y mejora de la interfaz gráfica de usuario

2003: LabWindows/CVI 7.0, integración de los workspaces

2004: LabWindows/CVI 7.1, terminación automática

2005: LabWindows/CVI 8.0, nuevo sistema de despliegue, .NET assemblies

2006: LabWindows/CVI 8.1, variables de red, controles gráficos del estilo Windows

2007: LabWindows/CVI 8.5, mejora de la gestión del microprocesador multicorazón, edición del código durante el debug, toolkit tiempo real

2008: LabWindows/CVI 9.0, gestor de memoria y compilación optimizada, C ANSI versión 99 (en particular, las array dinámicas).

4.2.2.2 Programación de Labwindows/CVI

Un programa en LabWindows/CVI consta básicamente de dos partes bien diferenciadas: una interfaz grafica que puede ser programada en lenguaje grafico y un programa escrito en C que gestiona los mensajes de control. La interfaz puede constar de paneles, gráficos, pulsadores y otros tipos de controles e indicadores, que pueden definirse como:

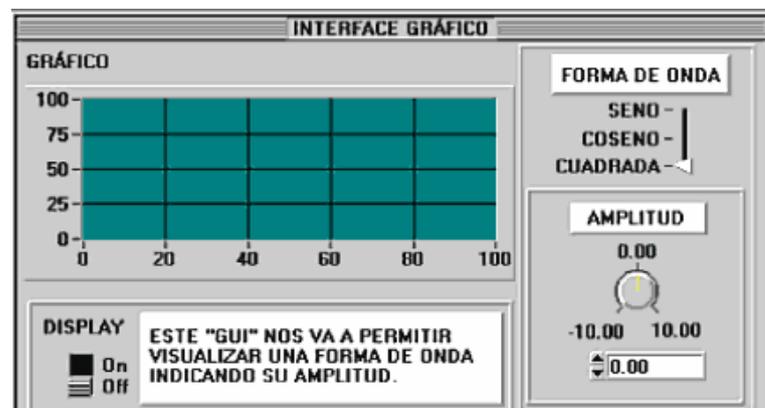


Imagen obtenida del libro Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones por José Ma. Angulo.

Figura 4-1 Ejemplo de interfaz Grafica creada con LabWindows/CVI.

Paneles: El primer paso a la hora de crear una GUI es generar un panel en el cual añadiremos todos los controles que hagan falta. Los paneles operan como *Windows* o ventanas. Se pueden minimizar, mover, abrir múltiples paneles o pueden contener otros paneles.

Menús: Una vez creado nuestro panel, podemos añadirle una barra de menús. Esta barra saldrá en la parte superior del panel y contendrá una serie de opciones que pueden interesarnos.

Controles: Un control es un objeto que reside en un panel accesible para el usuario y que permite visualizar información. La librería de interfaz grafica dispone de los siguientes tipos de controles: numéricos, botones de órdenes, *strings*, LED, gráficos, etc. Cada control tiene un tipo de dato asociado a él. El tipo de dato de un control determina el tipo de datos de las variables que deben utilizarse para colocar u obtener información.

Se puede construir una GUI en LabWindows/CVI interactivamente, utilizando el editor de interfaz de usuario (*User Interface Editor*) sin tener que escribir ni una línea de código fuente. Una vez acabada la realización del GUI, este se grabara con un formato .uir.

4.2.2.3 User interface events

Cuando se crea una interfaz, estamos definiendo áreas en la pantalla del ordenador, en forma de controles, que pueden generar events. Estos son mensajes que genera el programa al trabajar en un entorno Windows y que nuestro programa de control puede detectar. Por ejemplo, cuando tomamos un command button (un pulsador), el botón genera un event que es pasado a

nuestro programa escrito en lenguaje C. Los events que se generan al realizar esta operación son los siguientes:

- GOT_FOCUS event - Si el command button no está activo, al hacer clic con el ratón se genera el event Got_Focus, y ahora se considera que el command button esta activo.

- LEFT_CLICK event - Al pulsar el botón izquierdo del ratón, se genera este event.

LabWindows/CVI puede discernir entre pulsación izquierda, derecha, simple o doble del ratón.

- COMMIT event - Cuando el usuario deja de pulsar el ratón, se genera un COMMIT event que indica que el usuario ha realizado una acción sobre el control.

Cada tipo de control del editor de LabWindows/CVI visualiza diferentes tipos de información y pasa diferentes events al programa en C. Gracias a estos events, nos será fácil controlar nuestra GUI, ya que en todo momento podemos saber qué control ha sido modificado.

4.2.2.4 Control de interfaz grafica GUI

Una vez creada la GUI, tenemos que desarrollar un programa en C que procese los events generados desde la interfaz grafica. LabWindows/CVI ofrece dos métodos básicos para diseñar programas: el uso de funciones callback y el uso de event-loops. Cuando son usadas las funciones callback, estas son escritas en nuestro programa como funciones individuales que son llamadas directamente por los controles de la interfaz grafica. Por ejemplo, si tenemos una función denominada ObtenerDatos, la cual esta asignada como función callback en el command button Obtener de nuestra interfaz grafica, al pulsar este botón toda la información de events que se genere pasara directamente a la función ObtenerDatos del programa, donde se procesaran.

4.2.2.5 Conexión con el código fuente

Para establecer la conexión entre ficheros .uir y ficheros fuente en C tenemos que incluir un fichero cabecera en el código fuente. Cuando se crea una GUI es necesario asignar información a cada uno de los controles para que sean accesibles posteriormente desde el programa de aplicación. A cada control se le asignara un nombre (denominado constant name) dentro del editor grafico, que será utilizado para funciones de la librería de interfaz grafica para identificar los controles de la GUI. Además de asignar constant names a cada control de la GUI, podemos asignarles funciones callbacks.

Una vez que se salva un fichero .uir en el editor de interfaz grafica, LabWindows/CVI crea automáticamente su fichero cabecera correspondiente (.h) con la misma base que el fichero .uir. El fichero cabecera declara todos los constant names y todas las funciones callback que han sido asignadas al fichero .uir. Al incluir el fichero .h dentro de nuestro código fuente, todos los constant names y las funciones callback asociadas a nuestra GUI serán automáticamente declaradas y accesibles.

Las relaciones entre ambos ficheros se definen en un fichero proyecto (.prj) donde se añaden los ficheros que interesan (.uir, .h, .c).

4.2.2.6 Librerías y drivers de instrumentos en labwindows/CVI

Cualquier programa que pueda ser cargado con el menú Instrument puede cargarse como una librería de usuario si se encuentra el programa previamente compilado. La principal diferencia entre los módulos cargados como drivers de un instrumento y las librerías de usuario es que los drivers pueden descargarse con el comando Unload del menú Instrument, mientras que las librerías no pueden ser descargadas. También, como las librerías se encuentran en forma compilada, no se pueden editar mientras se encuentren cargadas. Las librerías de usuario se instalan con el comando Library Options del menú Options. Al entrar en esta opción, la sección User Libraries List contendrá los pathnames de las librerías que queremos añadir. La entrada son

los pathnames de los ficheros de la función panel (.fp) para el módulo de la librería. La próxima vez que se llame LabWindows/CVI, las librerías se cargarán automáticamente y aparecerán en el menú Library.

La librería de instrumentos es una librería especial del LabWindows/CVI que contiene una colección de drivers de instrumentos.

El driver de un instrumento consta de cuatro ficheros:

- El fichero de gestión del instrumento, que puede ser .lib, .obj, .dll o .c.
- El fichero include del instrumento (.h), que contiene la declaración de funciones, la definición de constantes y las declaraciones externas de variables globales.
- El fichero de la función panel del instrumento (.fp), que contiene información que define la función árbol, la función panel y el texto de ayuda.
- Un fichero de texto en ASCII (.doc), que contiene documentación para el driver del instrumento.

Los nombres de los cuatro ficheros consisten en el nombre del driver, seguido de la extensión apropiada. Por ejemplo, si el nombre del driver es Fft, los nombres serán Fft.obj (.c, .lib o .dll), Fft.h, Fft.fp y Fft.doc.

Las diferentes partes del driver se pueden desarrollar en diversas secuencias:

1. Nombre del driver del instrumento.
2. Definir las funciones del instrumento y las clases de funciones.
3. Crear una función árbol (que indica la clasificación dentro del driver) para el driver, añadir información de ayuda en el nivel superior del árbol.
4. Para cada función del driver:
 - a) Definir los parámetros de la función, incluyendo los tipos de variables y límites, los códigos de error.
 - b) Crear la función panel para la función del driver, incluyendo información de ayuda para el panel y para el control.
 - c) Añadir algún control secundario que sea necesario, que incluya información de ayuda.
 - d) Escribir el código para realizar la función.
 - e) Testear el código fuente.
5. Crear el fichero incluye para el código fuente del instrumento, que incluya la declaración de funciones y la definición de constantes.

Una vez creado todo el fichero de la función panel de instrumento, debemos crear el fichero include:

Lo primero que hay que hacer es definir la cabecera del fichero con el nombre asignado en la librería. A continuación se definirán los tipos de variables que se usan en las funciones y que son de un tipo predefinido. Finalmente, se escribirá el nombre de las funciones con sus campos correspondientes.

4.2.3 HPVEE (Hp Visual Engineering Environment)

HPVEE es la aplicación Visual Engineering Environment desarrollada por HP, que es básicamente un lenguaje de programación mediante iconos para resolver problemas de ingeniería. Para conseguir este objetivo, HPVEE tiene un conjunto de librerías y funciones accesibles por el usuario que permiten la adquisición, el control, el procesado, la visualización, la grabación y la actualización de datos, así como el control de rutinas lógicas y características propias de cualquier lenguaje de programación, sea C, Pascal o Basic.

Las versiones que hay del HPVEE son las siguientes:

HPVEE para Windows (PC)

HPVEE-Test (UNIX)

HPVEE-Engine (UNIX) (No lleva herramientas de control de instrumentos.)

HPVEE-RunOnly (Ejecuta programas desarrollados en HPVEE-Test, HPVEE para Windows y HPVEE-Engine.)

HPVEE-RunOnly for Windows (Ejecuta programas desarrollados en HPVEE-Test, HPVEE para Windows y HPVEE-Engine.)

HPVEE para Sun SPARCstation.

HPVEE es un lenguaje gráfico y trabaja exactamente como un diagrama de flujo. El flujo del programa se ejecuta de arriba hacia abajo mientras que los datos pueden viajar de derecha a izquierda o de izquierda a derecha. Ver abajo un ejemplo de flujo:

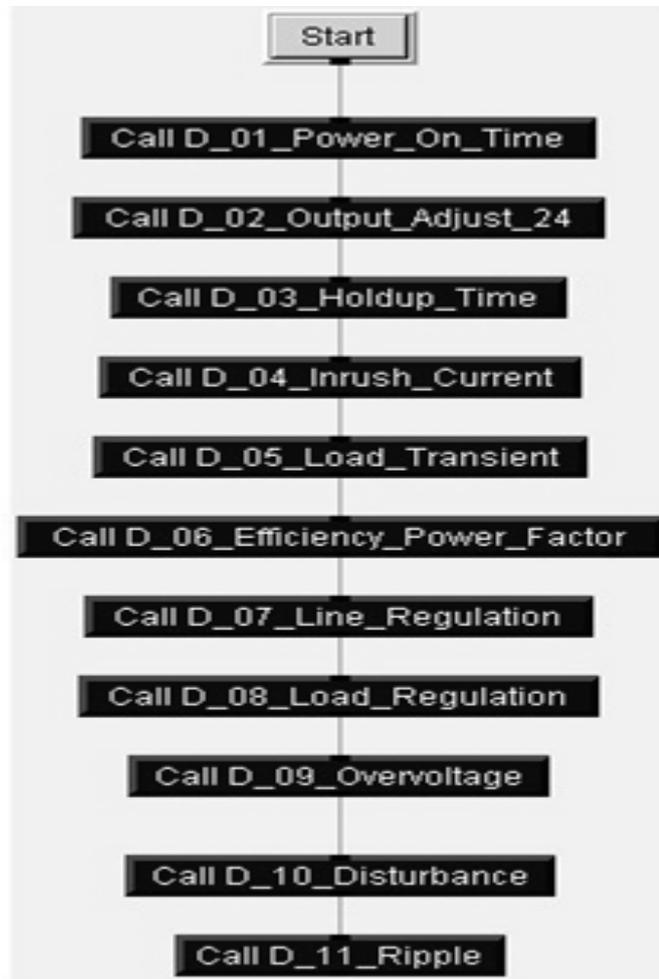


Imagen obtenida del libro Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones por José Ma. Angulo.
Figura 4-2 Ejemplo de flujo, programación HPVVEE.

4.2.3.1 Programación HPVVEE

Menús HPVVEE

La ventana principal de HPVVEE tiene un menú en el margen superior formado por:

- File. Con opciones de abrir, cerrar, guardar, etc. ficheros.
- Edit. Con opciones de copiar, cortar, pegar, etc.
- Flow. Indica cómo se ejecuta el programa.
- Device. Se refiere al tratamiento con instrumentos.
- I/O. Trata las rutinas de entrada y salida de datos.
- Data. Se refiere al formato de los datos.
- Math y AdvMath. Se refieren a los parámetros matemáticos.
- Display. Opciones de ventana.
- Help. Ayuda.

Objetos y conexiones

La programación en HPVVEE resulta muy sencilla y rápida, ya que solo se trata de interconectar los iconos (que se llaman *objetos*, figura 4-2) a fin de que se pasen datos entre ellos y ejecuten un proceso determinado. Todos los objetos son de forma rectangular y a cada lado tienen un tipo de conexión diferente. En la parte superior de cada objeto tenemos un solo *pin* de conexión, que representa la entrada de secuencia. Con esta entrada controlamos cuando queremos que se ejecute el objeto. En la parte inferior del objeto tenemos un solo *pin* de conexión que representa la salida de secuencia. Con esta salida

controlamos que los objetos a los cuales esté conectada se ejecuten *después* que el objeto. En la parte izquierda del objeto puede haber un *pin*, ninguno o *aliv* *exsos pins* de entrada de datos; y en la parte derecha, un *pin*, ninguno o diversos *pins* de salida de datos, dependiendo del tipo de objeto. La conexión de *los pins* de secuencia es opcional, y solo se utiliza cuando es necesario controlar el orden de ejecución de los objetos.

La conexión entre dos objetos es muy sencilla; solo se trata de hacer clic con el botón izquierdo del ratón en uno de los *pins* que queremos conectar y seguidamente hacer clic en el otro *pin*. El VEE se encarga de escoger la ruta que tiene que seguir la línea entre los dos *pins* (si tenemos esta opción seleccionada en las preferencias en el menú *File*). El programa impide la conexión incoherente de terminales (conectar dos entradas entre si, por ejemplo) y "marca" los terminales en que puede conectarse cuando se acerca la línea de conexión que aparece al hacer clic en un *pin* para conectarlo a otro.

4.2.3.2 Librería de prueba

La Librería de Prueba es una compilación de todas las pruebas estándar realizadas a las fuentes de poder. Es muy flexible y nuevas pruebas pueden ser agregadas conforme se van desarrollando. Esta librería también puede ser configurada para diferentes familias de fuentes de poder. Seleccionando una

prueba despliega el siguiente panel 'fill in' para especificar los parámetros de la prueba.

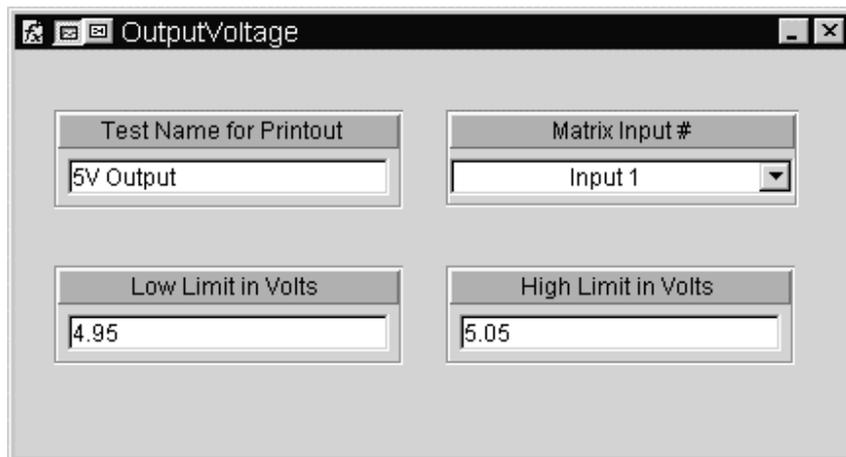


Imagen obtenida en <http://perso.wanadoo.es/pictob/micropic.htm>.

Figura 4-3 Prueba de Voltaje de Salida.

En este ejemplo, queremos probar el voltaje de salida de la fuente de poder. El usuario debe ingresar el límite inferior y el límite superior para la prueba. También se ingresa el número de matriz de entrada a la cual la fuente de poder está conectada, y el nombre de la prueba para esta salida en la impresión de los resultados de la prueba. Esto es todo lo que el usuario debe ingresar para realizar una prueba de Voltaje de Salida, la secuencia y el control del instrumento ya está escrita, ahorrando tiempo y esfuerzo del usuario.

4.2.3.3 Program Shell (Interface del usuario al momento de la ejecución)

Los siguientes son los paneles que se muestran al operador al momento de la ejecución.

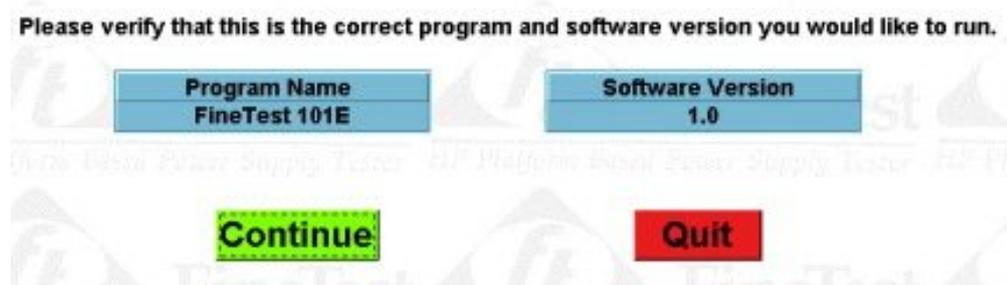


Imagen obtenida en <http://perso.wanadoo.es/pictob/micropic.htm>.

Figura 4-4 Verificación del Programa.

El primero es un panel de Verificación del Programa. Este muestra al operador que programa está cargado y listo para ser ejecutado. También muestra el número de versión, revisión, autor y fecha de liberación. Hay además cuatro líneas más que pueden mostrar más información si es necesario. El operador debe de aceptar que éste es el programa correcto o salirse si no es así (ISO9000).

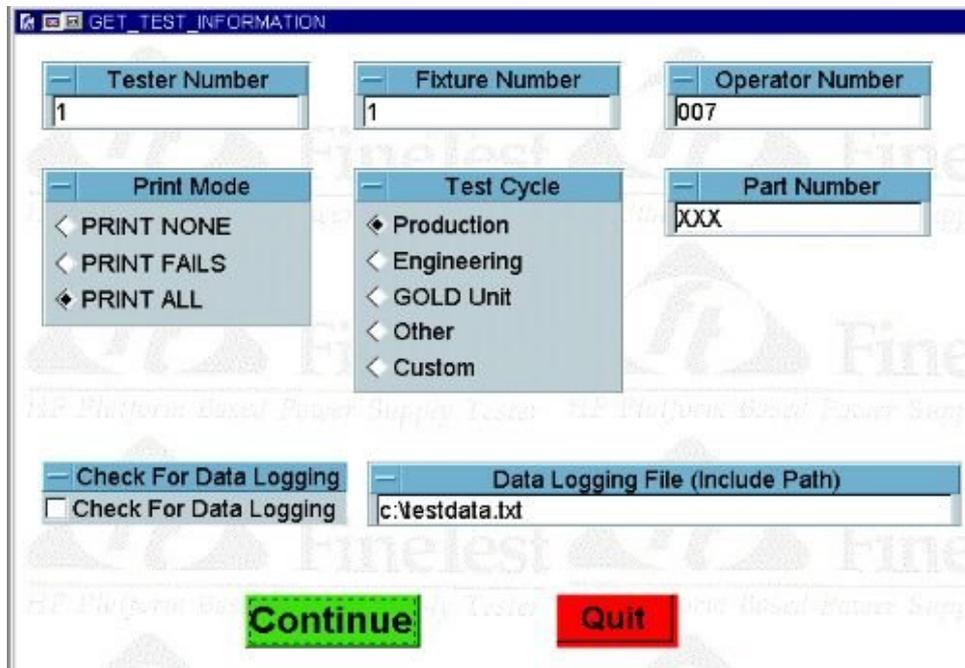


Imagen obtenida en <http://perso.wanadoo.es/pictob/micropic.htm>.

Figura 4-5 Información de la Prueba.

El siguiente panel mostrado al operador es el panel Información de la Prueba. Este panel se utiliza para recolectar información específica acerca de la ejecución de la prueba, y únicamente requiere de ser llenado una sola vez al inicio de la ejecución de la prueba. La información introducida aquí incluye el número de Probador (si más de un Probador es usado en la línea), el número de fixture (si más de un fixture está disponible), y el número de parte (si más de un número de parte pueden ser probados en el fixture). El operador puede también seleccionar si recibe una impresión de la prueba completa, una impresión únicamente de la unidad que falla o no imprimir nada. El nombre del archivo para el registro de los datos puede también ser introducido aquí, así como habilitar o deshabilitar el registro de datos. La mayoría de los usuarios

configuran éste y el siguiente panel para ajustar sus necesidades específicas de recolección de datos.

4.2.3.4 Controladores de instrumento

Los controladores de instrumentos son simples interfaces de usuario que permiten al usuario el control del instrumento en la prueba. Cada instrumento tiene un controlador y en el controlador hay paneles para controlar la función del instrumento. Cada función (a veces una combinación de funciones) tiene un panel, cada panel tiene un comando (o llamada de función) asociado con él.

El panel de abajo es de un controlador de instrumento para una fuente de CD. Notar que hay dos campos para ser llenados con valores, VOLTAJE y CORRIENTE. También note el comando DCS2_CONF en la parte inferior del panel.

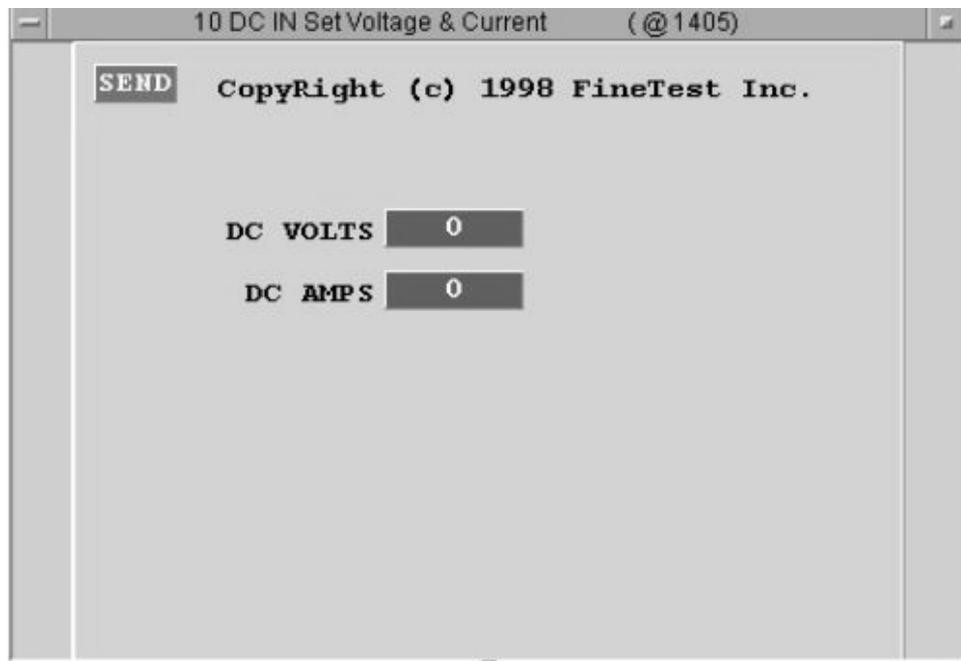


Imagen obtenida en <http://perso.wanadoo.es/pictob/micropic.htm>.
Figura 4-6 Ejemplo de Controlador de Instrumento.

Este panel ajustará la corriente límite de la fuente de CD al valor indicado en el campo CORRIENTE, y entonces ajusta la fuente de CD al voltaje especificado en el campo VOLTAJE cuando se hace click en el botón SEND / Enviar.

Este panel puede ser colocado en el flujo del programa y se ejecutará cuando el flujo lo alcance y entonces continúa el flujo de la prueba.

El uso de controladores de instrumentos hace muy fácil la escritura de un programa de prueba, ya que el usuario puede ejecutar una función y ver como la fuente de poder reacciona al cambio antes de insertar el comando en el programa de prueba. Después de ver que la unidad bajo prueba reacciona

correctamente, el usuario puede insertar el panel en el programa. Esto ahorra tiempo en depurar el programa de prueba, ya que el usuario ha visto cómo la unidad bajo prueba reacciona y verifica que la secuencia de la prueba sea la correcta.

Los controladores de instrumentos hacen muy fácil la escritura de un programa de prueba. El usuario puede ejecutar un panel inmediatamente y entonces, si está feliz con los resultados, inserta el panel en el flujo del programa de prueba. Esto reduce enormemente el tiempo de desarrollo para un programa de prueba ya que el usuario va depurando el programa conforme este va siendo escrito.

FineTest ha aprovechado la gran utilidad de los controladores de instrumentos, y ha desarrollado controladores para otras aplicaciones comunes necesarias para probar fuentes de poder. Esto también reduce grandemente el tiempo de desarrollo de la prueba, ya que el usuario no necesita escribir el engorroso software que hace que todo funcione.

Al usar los controladores de instrumentos, y muchos años de experiencia probando fuentes de poder, FineTest ha desarrollado una Librería de Pruebas de fuentes de poder comunes. Las pruebas han sido reducidas a simples paneles que requieren de mínima información necesaria para probar una fuente de poder. La Librería de Pruebas reduce enormemente el trabajo requerido

para desarrollar un nuevo programa de prueba, ya que el desarrollo de la propia secuencia de la prueba y el control de los instrumentos ha sido ya realizado.

El Program Shell es una fácil interface de usuario y ejecutivo de prueba combinado. Permite la verificación del programa a correr, la introducción de información para registro de datos (número de probador, número de fixture, número de serie, etc.). Tiene también un lazo para repetir la misma prueba en una unidad diferente una después de otra. Este Shell está probado en campo y es fácilmente configurable al actual formato de recolección de datos o al deseado por el usuario.

4.2.4 LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)

LabVIEW es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Este programa fue creado por National Instruments (1976) para funcionar sobre máquinas MAC, salió al mercado por primera vez en 1986. Ahora está disponible para las plataformas Windows, UNIX, Mac y Linux. La versión actual 8.6, liberada en Agosto de 2008, cuenta también con soporte para

Los programas desarrollados con LabVIEW se llaman Instrumentos Virtuales, o VIs, lo que da una idea de su uso en origen: el control de instrumentos. El lema de LabVIEW es: "La potencia está en el Software". Entre sus objetivos están el reducir el tiempo de desarrollo de aplicaciones de todo tipo (no sólo en ámbitos de Pruebas, Control y Diseño) y el permitir la entrada a la informática a programadores no expertos. Esto no significa que la empresa haga únicamente software, sino que busca combinar este software con todo tipo de hardware, tanto propio -tarjetas de adquisición de datos, PAC, Visión, y otro Hardware- como de terceras empresas.

4.2.4.1 Principales usos

Es usado principalmente por ingenieros y científicos para tareas como:

- Adquisición de datos y análisis matemático
- Comunicación y control de instrumentos de cualquier fabricante
- Automatización industrial y programación de PACs (Controlador de Automatización Programable)
- Diseño de controladores: simulación, prototipaje rápido, hardware-en-el-ciclo (HIL) y validación

- Diseño embebido de micros y chips
- Control y supervisión de procesos
- Visión artificial y control de movimiento
- Robótica
- Domótica

En 2008 el programa fue utilizado para controlar el LHC, el acelerador de partículas más grande construido hasta la fecha.

4.2.4.2 Características principales

Su principal característica es la facilidad de uso, válido para programadores profesionales como para personas con pocos conocimientos en programación pueden hacer (programas) relativamente complejos, imposibles para ellos de hacer con lenguajes tradicionales. También es muy rápido hacer programas con LabVIEW y cualquier programador, por experimentado que sea, puede beneficiarse de él. Los programas en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales (VIs) Para los amantes de lo complejo, con LabVIEW pueden crearse programas de miles de VIs (equivalente a millones de páginas de código texto) para aplicaciones complejas, programas de automatizaciones de decenas de miles de puntos de entradas/salidas, proyectos para combinar

nuevos VIs con VIs ya creados, etc. Incluso existen buenas prácticas de programación para optimizar el rendimiento y la calidad de la programación. El LabVIEW 7.0 introduce un nuevo tipo de subVI llamado VIs Expreso (Express VIS). Estos son VIs interactivos que tienen una configuración de caja de diálogo que permite al usuario personalizar la funcionalidad del VI Expreso. El VIs estándar son VIs modulares y personalizables mediante cableado y funciones que son elementos fundamentales de operación de LabVIEW.

Presenta facilidades para el manejo de:

Interfaces de comunicaciones	Capacidad de interactuar con otros lenguajes y aplicaciones	Herramientas gráficas y textuales para el procesamiento digital de señales
Puerto serie	DLL: librerías de funciones	Visualización y manejo de gráficas con datos dinámicos
Puerto paralelo	.NET	Adquisición y tratamiento de imágenes
GPB	ActiveX	Control de movimiento (combinado incluso con todo lo anterior)
PXI	Multisim	Tiempo Real estrictamente hablando
VXI	Matlab/Simulink	Programación de FPGAs para control o validación
TCP/IP, UDP, DataSocket	AutoCAD, SolidWorks, etc.	Sincronización entre dispositivos
Irda	DLL: librerías de funciones	
Bluetooth	.NET	
USB	ActiveX	
OPC	Multisim	

Tabla 4-1 Características principales LabVIEW.

4.2.4.3 Historial

Fue en 1986 que la primera versión de LabVIEW se realiza sobre Macintosh. Se sigue un trabajo incesante para añadir funcionalidades:

- 1986 : LabVIEW 1.0, primera versión en Mac OS
- 1990 : LabVIEW 2.0, máximo aprovechamiento de los resultados
- 1992 : LabVIEW 2.5, primera versión en Windows 3.1 y Solaris
- 1993 : LabVIEW 3.0
- 1994 : LabVIEW 3.0.1, primera versión en Windows NT
- 1994 : LabVIEW 3.1
- 1995 : LabVIEW 3.1.1, integración del Application Builder (creación de archivos ejecutables)
- 1996 : LabVIEW 4.0
- 1997 : LabVIEW 4.1
- 1998 : LabVIEW 5.0, multitarea, contenedores ActiveX, asistente para la adquisición de dato (tarjetas de adquisición DAQ) e asistente para el control de instrumentos
- 1999 : LabVIEW 5.1, primera versión para Linux, primera versión de LabVIEW RT (Real Time)
- 2000 : LabVIEW 6.0, controles gráficos en 3D, referencias de controles

- 2001 : LabVIEW 6.1, mejoramiento y correcciones, primera versión en Palm OS
- 2003 : LabVIEW 7.0, VI Express, primera versión en Windows Mobile 2003
- 2004 : LabVIEW 7.1, traducción en francés, alemán y japonés
- 2005 : LabVIEW 8.0, Project Explorer, XControls, shared variables
- 2005 : LabVIEW 8.1, mejoramiento y correcciones
- 2006 : LabVIEW 8.20, Programación orientada a objetos
- 2007 : LabVIEW 8.5, primera version del toolkit FPGA y del toolkit Statechart
- 2008 : LabVIEW 8.6, limpieza automática de los diagramas

4.2.4.4 ¿Cómo trabaja LabVIEW?

Los programas desarrollados mediante LabVIEW se denominan Instrumentos Virtuales (VIs), porque su apariencia y funcionamiento imitan los de un instrumento real. Sin embargo son análogos a las funciones creadas con los lenguajes de programación convencionales. Los VIs tienen una parte interactiva con el usuario y otra parte de código fuente, y aceptan parámetros procedentes de otros VIs.

Todos los VIs tienen un panel frontal y un diagrama de bloques. Las paletas contienen las opciones que se emplean para crear y modificar los VIs. A continuación se procederá a realizar una somera descripción de estos conceptos.

4.2.4.4.1 Panel frontal

Se trata de la interfaz gráfica del VI con el usuario. Esta interfaz recoge las entradas procedentes del usuario y representa las salidas proporcionadas por el programa. Un panel frontal está formado por una serie de botones, pulsadores, potenciómetros, gráficos, etc.

Cada uno de ellos puede estar definido como un control (a) o un indicador (b). Los primeros sirven para introducir parámetros al VI, mientras que los indicadores se emplean para mostrar los resultados producidos, ya sean datos adquiridos o resultados de alguna operación.

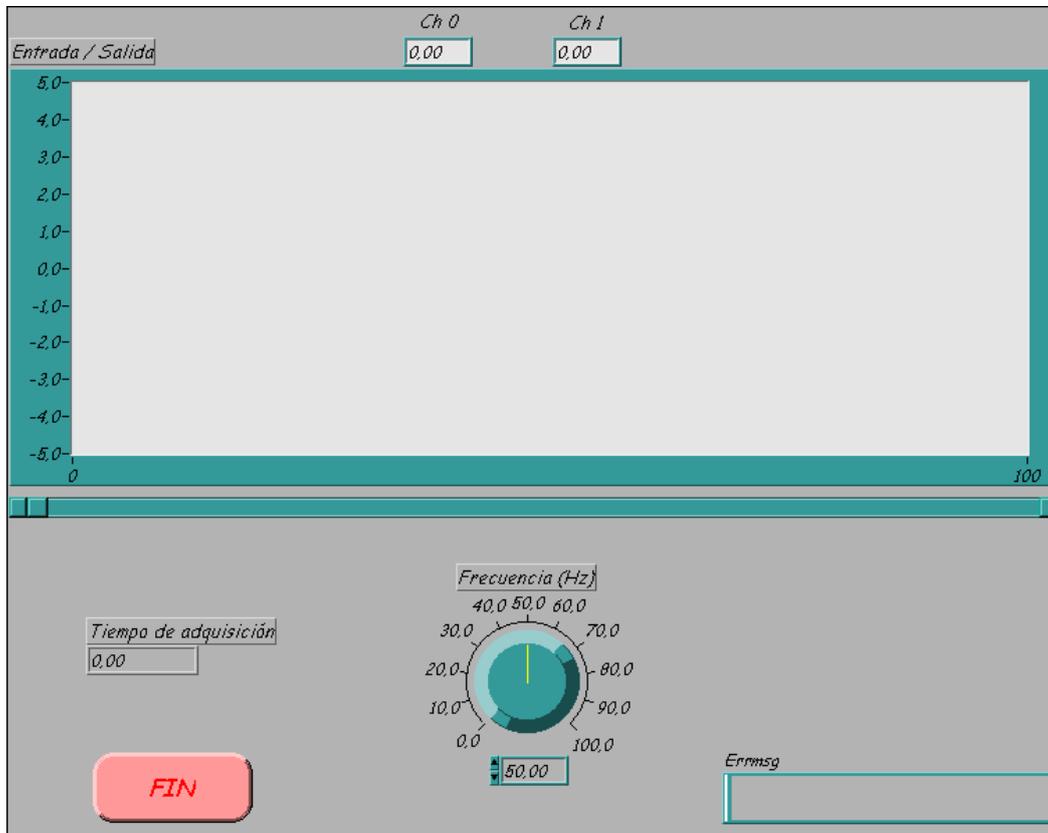


Imagen adquirida de (GTE) Grupo de Tecnología Electrónica. Tutorial de LabVIEW.
Figura 4-7 Panel frontal

4.2.4.4.2 Diagramas de bloques

El diagrama de bloques constituye el código fuente del VI. En el diagrama de bloques es donde se realiza la implementación del programa del VI para controlar o realizar cualquier procesamiento de las entradas y salidas que se crearon en el panel frontal.

El diagrama de bloques incluye funciones y estructuras integradas en las librerías que incorpora LabVIEW. En el lenguaje G las funciones y las

estructuras son nodos elementales. Son análogas a los operadores o librerías de funciones de los lenguajes convencionales.

Los controles e indicadores que se colocaron previamente en el Panel Frontal, se materializan en el diagrama de bloques mediante los terminales. A continuación se presenta un ejemplo de lo recién citado:

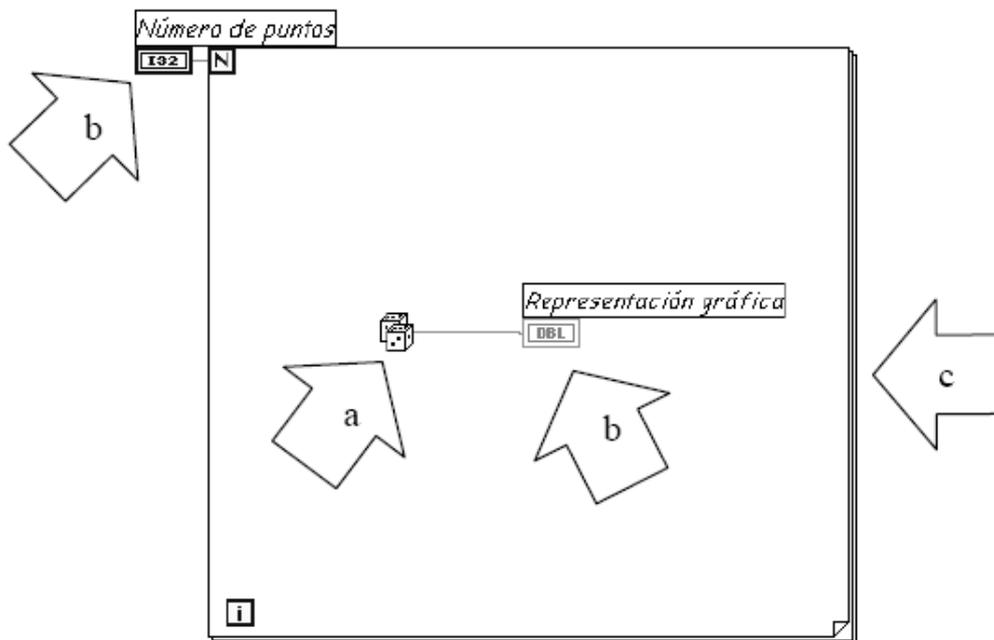


Imagen adquirida de (GTE) Grupo de Tecnología Electrónica. Tutorial de LabVIEW.

Figura 4-8 Controles colocados en un panel frontal.

(a) Función.

(b) Terminales (control e indicador).

(c) Estructura.

El diagrama de bloques se construye conectando los distintos objetos entre sí, como si de un circuito se tratara. Los cables unen terminales de entrada y salida con los objetos correspondientes, y por ellos fluyen los datos.

LabVIEW posee una extensa biblioteca de funciones, entre ellas, aritméticas, comparaciones, conversiones, funciones de entrada/salida, de análisis, etc.

Las estructuras, similares a las declaraciones causales y a los bucles en lenguajes convencionales, ejecutan el código que contienen de forma condicional o repetitiva (bucle for, while, case,...).

Los cables son las trayectorias que siguen los datos desde su origen hasta su destino, ya sea una función, una estructura, un terminal, etc. Cada cable tiene un color o un estilo diferente, lo que diferencia unos tipos de datos de otros.

4.2.4.4.3 Paleta controles

Se utiliza únicamente en el panel frontal. Contiene todos los controles e indicadores que se emplearán para crear la interfaz del VI con el usuario.



Imagen adquirida de (GTE) Grupo de Tecnología Electrónica. Tutorial de LabVIEW.

Figura 4-9 Paleta de controles

El menú Controls de la ventana correspondiente al panel frontal contiene las siguientes opciones:



Numeric – Para la introducción y visualización de cantidades numéricas.



Boolean – Para la entrada y visualización de valores booleanos.



String & Table – Para la entrada y visualización de texto.



List & Ring – Para visualizar y/o seleccionar una lista de opciones.



Array & Cluster – Para agrupar elementos.



Graph – Para representar gráficamente los datos.



Path & RefNum – Para gestión de archivos.



Decorations – Para introducir decoraciones en el panel frontal. No visualizan datos.



User Controls – Para elegir un control creado por el propio usuario.



ActiveX – Para transferir datos y programas de unas aplicaciones a otras dentro de Windows.



Select a Control – Para seleccionar cualquier control.

Al seleccionar objetos desde el menú Controls estos aparecen sobre el panel frontal, pueden colocarse donde convenga, y además tienen su propio menú desplegable que permite la configuración de algunos parámetros específicos de cada tipo de control..

4.2.4.4.4 Paleta de funciones

Se emplea en el diseño del diagrama de bloques. La paleta de funciones contiene todos los objetos que se emplean en la implementación del programa

del VI, ya sean funciones aritméticas, de entrada/salida de señales, entrada/salida de datos a fichero, adquisición de señales, temporización de la ejecución del programa,...

Para seleccionar una función o estructura concretas, se debe desplegar el menú Functions y elegir entre las opciones que aparecen. A continuación se enumeran todas ellas, junto con una pequeña definición.



Structures – Muestra las estructuras de control del programa, junto con las variables locales y globales.



Numeric – Muestra funciones aritméticas y constantes numéricas.



Boolean – Muestra funciones y constantes lógicas.



String – Muestra funciones para manipular cadenas de caracteres, así como constantes de caracteres.



Array – Contiene funciones útiles para procesar datos en forma de vectores, así como constantes de vectores.



Cluster – Contiene funciones útiles para procesar datos procedentes de gráficas y destinados a ser representados en ellas, así como las correspondientes constantes.



Comparison – Muestra funciones que sirven para comparar números, valores booleanos o cadenas de caracteres.



Time & Dialog – Contiene funciones para trabajar con cuadros de diálogo, introducir contadores y retardos, etc.



File I/O – Muestra funciones para operar con ficheros.



Communication – Muestra diversas funciones que sirven para comunicar varios ordenadores entre sí, o para permitir la comunicación entra distintos programas.



Instrument I/O – Muestra un submenú de VIs, que facilita la comunicación con instrumentos periféricos que siguen la norma ANSI/IEEE 488.2-1987, y el control del puerto serie.



Data Acquisition – Contiene a su vez un submenú donde puede elegirse entre distintas librerías referentes a la adquisición de datos.



Analysis – Contiene un submenú en el que se puede elegir entre una amplia gama de funciones matemáticas de análisis.



Tutorial – Incluye un menú de VIs que se utilizan en el manual LabVIEW Tutorial.



Advanced – Contiene diversos submenús que permiten el control de la ayuda, de los VIs, manipulación de datos, procesamiento de eventos, control de la memoria, empleo de programas ejecutables o incluidos en librerías DLL, etc.



Instrument drivers – En él se muestran los drivers disponibles de distintos instrumentos.



User Libraries – Muestra as librerías definidas por el usuario. En este caso, la librería mostrada contiene los drivers de la tarjeta de adquisición de datos de Advantech.



Application control – Contiene varias funciones que regulan el funcionamiento de la propia aplicación en ejecución.



Select a VI – Permite seleccionar cualquier VI para emplearlo como subVI.

4.2.4.5 Programación en LabVIEW

Como se ha dicho es una herramienta gráfica de programación, esto significa que los programas no se escriben, sino que se dibujan, facilitando su comprensión. Al tener ya prediseñados una gran cantidad de bloques, se le facilita al usuario la creación del proyecto, con lo cual en vez de estar una gran cantidad de tiempo en programar un dispositivo/bloque, se le permite invertir mucho menos tiempo y dedicarse un poco más en la interfaz gráfica y la interacción con el usuario final. Cada VI consta de dos partes diferenciadas:

Panel Frontal: El Panel Frontal es la interfaz con el usuario, la utilizamos para interactuar con el usuario cuando el programa se está ejecutando. Los usuarios podrán observar los datos del programa actualizados en tiempo real (como van fluyendo los datos, un ejemplo sería una calculadora, donde tú les pones las entradas, y te pone el resultado en la salida). En esta interfaz se definen los controles (los usamos como entradas, pueden ser botones, marcadores etc.) e indicadores (los usamos como salidas, pueden ser graficadas).

Diagrama de Bloques: es el programa propiamente dicho, donde se define su funcionalidad, aquí se colocan iconos que realizan una determinada función y se interconectan (el código que controla el programa. Suele haber una

tercera parte icono/conector que son los medios utilizados para conectar un VI con otros VIs.

En el panel frontal, encontraremos todo tipos de controles o indicadores, donde cada uno de estos elementos tienen asignado en el diagrama de bloques una terminal, es decir, el usuario podrá diseñar un proyecto en el panel frontal con controles y indicadores, donde estos elementos serán las entradas y salidas que interactuarán con la terminal del VI. Podemos observar en el diagrama de bloques, todos los valores de los controles e indicadores, como van fluyendo entre ellos cuando se está ejecutando un programa VI.

4.2.4.6 Ejecución de un VI

Una vez se ha concluido la programación del VI se debe proceder a su ejecución. Para ello la ventana activa debe ser el panel frontal (si se está en la ventana del diagrama de bloques, se debe seleccionar la opción Show Panel del menú Window).

Un a vez situados en el panel frontal, se pulsará el botón de Run, situado en la barra de herramientas.

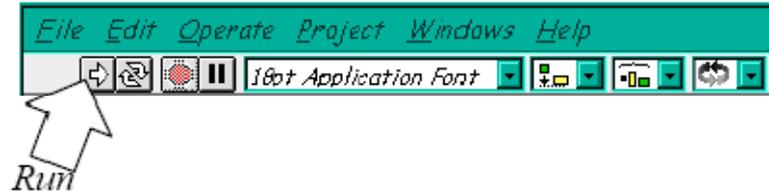


Figura 4-10 Ejecución de un VI

El programa comenzará a ejecutarse. Mientras dura la ejecución del mismo, la apariencia del botón de Run es la que se muestra a continuación:

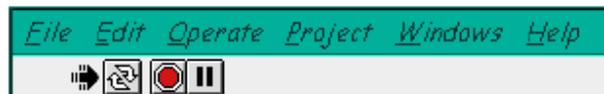


Figura 4-11 Ejecución de un VI

De este modo el programa se ejecutará una sola vez. Si se desea una ejecución continua, se pulsará el botón situado a la derecha del de Run (Continuous Run). Si durante el funcionamiento continuo del programa se vuelve a pulsar el citado botón, se finalizará la última ejecución del mismo, tras lo cual el programa se parará.

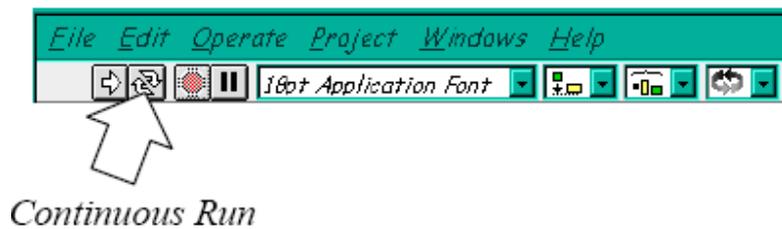


Figura 4-12 Ejecución de un VI

Para finalizar la ejecución de un programa se puede operar de dos formas. La primera, y la más aconsejable, es emplear un botón en el panel frontal del VI, cuya pulsación produzca la interrupción del bucle de ejecución de

la aplicación. La segunda forma de detener la ejecución del VI es pulsando el botón de pausa o el de stop. La diferencia entre ambos es que si se pulsa stop, la ejecución del programa finaliza inmediatamente, mientras que si se pulsa pausa, se produce una detención en el funcionamiento del programa, retomándose su ejecución una vez se vuelve a pulsar el mismo botón.

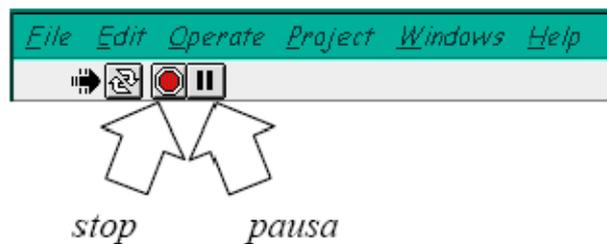


Figura 4-13 Ejecución de un VI

4.2.4.7 Requerimientos del sistema

	MINIMO	RECOMENDADO
PROCESADOR	Pentium III/Celeron 600 Mhz o equivalente	Pentium 4 o equivalente
RAM	128 Mb	256 Mb
RESOLUCION	800 x 600 pixels	1024 x 768 pixels
S.O.	Windows 200/NT*/XP *(nota: Windows Nt versión 4, Service Pack 6 o posterior)	Windows 200/XP
ESPACIO LIBRE EN DISCO	130 Mb	550 Mb

Capítulo 5 Microcontroladores

5.1.1. ¿Qué es un Microcontrolador?

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes de un computador. Se emplea para controlar el funcionamiento de una tarea determinada y, debido a su reducido tamaño, suele ir incorporado en el propio dispositivo al que gobierna.

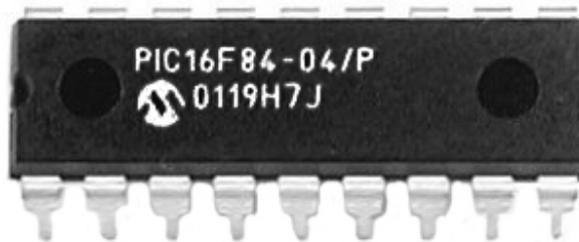


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-1 Circuito integrado de un Microcontrolador PIC.

El Microcontrolador es un computador dedicado. En su memoria solo reside un programa destinado a gobernar una aplicación determinada; sus líneas de entrada/salida soportan el conexionado de los sensores y actuadores del dispositivo a controlar y todos los recursos complementarios disponibles tienen como única finalidad atender sus requerimientos. Una vez programado y configurado el microcontrolador solamente sirve para gobernar la tarea asignada.

La industria Informática acapara gran parte de los microcontroladores que se fabrican. Casi todos los periféricos del computador, desde el ratón o el

teclado hasta la impresora, son regulados por el programa de un microcontrolador.

Los electrodomésticos de línea blanca (lavadoras, hornos, lavavajillas, etc.) y de línea marrón (televisores, videos, aparatos musicales, etc.) incorporan numerosos microcontroladores. Igualmente, los sistemas de supervisión, vigilancia y alarma en los edificios utilizan estos chips para optimizar el rendimiento de ascensores, calefacción, aire acondicionado, alarmas de incendio, robo, etc.

Las comunicaciones y sus sistemas de transferencia de información utilizan profundamente estos pequeños computadores incorporándolos en los grandes automatismos y en los modernos teléfonos.

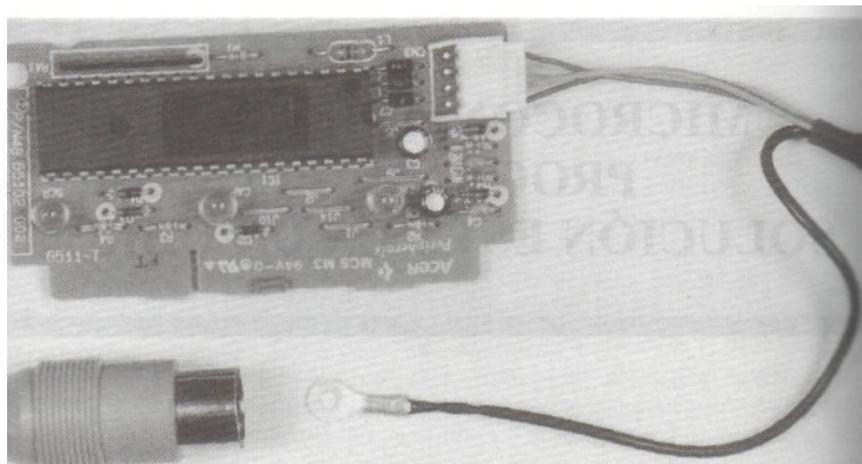


Imagen obtenida del libro Microcontroladores PIC diseño práctico de aplicaciones por José Ma. Angulo.
Figura 5-2 Fotografía de la tarjeta electrónica usada para el control del teclado de un computador.

La instrumentación y la electromedicina son dos campos idóneos para la implantación estos circuitos integrados. Una importante industria consumidora de microcontroladores la de automoción, que los aplica en el control de aspectos tan populares como la climatización, la seguridad y los frenos ABS.

Los 'PIC' son una familia de microcontroladores tipo RISC fabricados por Microchip Tecnología Inc.

5.1.2 Historia del PIC

El nombre actual no es un acrónimo. En realidad, el nombre completo es PICmicro, aunque generalmente se utiliza como Peripheral Interface Controller (Controlador de Interfaz Periférico).

El PIC original se diseñó para ser usado con la nueva CPU de 16 bits CP16000. Siendo en general una buena CPU, ésta tenía malas prestaciones de E/S, y el PIC de 8 bits se desarrolló en 1975 para mejorar el rendimiento del sistema quitando peso de E/S a la CPU. El PIC utilizaba micro código simple almacenado en ROM para realizar estas tareas; y aunque el término no se usaba por aquel entonces, se trata de un diseño RISC que ejecuta una instrucción cada 4 ciclos del oscilador.

En 1985 la división de microelectrónica de General Instrument se separa como compañía independiente que es incorporada como filial (el 14 de

diciembre de 1987 cambia el nombre a Microchip Tecnología y en 1989 es adquirida por un grupo de inversores) y el nuevo propietario canceló casi todos los desarrollos, que para esas fechas la mayoría estaban obsoletos. El PIC, sin embargo, se mejoró con EPROM para conseguir un controlador de canal programable.

5.1.3 Características

Los detalles más importantes que vuelven “locos” a los profesionales de la microelectrónica y microinformática y las razones de la excelente acogida que tienen los PIC son los siguientes:

- Sencillez de manejo: Tienen un juego de instrucciones reducido; 35 en la gama media.
- Buena información, fácil de conseguir y económica.
- Precio: Su coste es comparativamente inferior al de sus competidores.
- Poseen una elevada velocidad de funcionamiento. Buen promedio de parámetros: velocidad, consumo, tamaño, alimentación, código compacto, etc.

- Herramientas de desarrollo fáciles y baratas. Muchas herramientas software se pueden recoger libremente a través de Internet desde Microchip.
- Existe una gran variedad de herramientas hardware que permiten grabar, depurar, borrar y comprobar el comportamiento de los PIC.
- Diseño rápido.
- La gran variedad de modelos de PIC permite elegir el que mejor responde a los requerimientos de la aplicación.

Una de las razones del éxito de los PIC se basa en su utilización. Cuando se aprende a manejar uno de ellos, conociendo su arquitectura y su repertorio de instrucciones, es muy fácil emplear otro modelo.

5.1.3.1 Arquitectura

La arquitectura del procesador sigue el modelo Harvard. En esta arquitectura, la CPU se conecta de forma independiente y con buses distintos con la memoria de instrucciones y con la de datos.

La arquitectura Harvard permite a la CPU acceder simultáneamente a las dos memorias. Además, propicia numerosas ventajas al funcionamiento del sistema.

ARQUITECTURA HARVARD

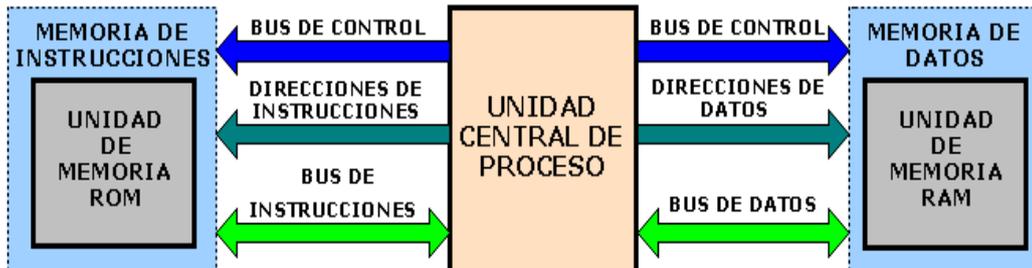


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-3 Arquitectura Harvard

En los PIC, el formato de las instrucciones es de 12 bits, 14 bits o 16 bits según el modelo y, en consecuencia, la longitud de las palabras de la memoria de instrucciones o programa corresponde con esa longitud. Este tamaño permite codificar en una palabra el código de operación de la instrucción junto al operando o su dirección.

Para adaptarse a las necesidades de las aplicaciones del usuario hay modelos con 512 posiciones para la memoria de instrucciones y otros que tienen 1 k, 2 k, y hasta 64 k posiciones de memoria.

Existen varias versiones de memoria de instrucciones para los PIC:

- **Versión Flash.** Utiliza una memoria EEPROM tipo Flash, que puede grabarse y borrarse muchas veces.
- **Versión OTP.** ("One Time Programmable") "Programable una sola vez". Sólo se puede grabar una vez por el usuario sin la posibilidad de borrar lo

que se graba. Resulta mucho más económica en la implementación de prototipos y pequeñas series.

- **Versión QTP.** Es el propio fabricante el que se encarga de grabar el código en todos los chips que configuran pedidos medianos y grandes.
- **Versión SQTP.** El fabricante solo graba unas pocas posiciones de código para labores de identificación, número de serie, palabra clave, checksum, etc.

Los modelos con memoria OTP sólo pueden ser grabados una vez por el usuario.

Puesto que los datos y operandos que manejan las instrucciones son de 8 bits, la longitud de las palabras de la memoria de datos tiene ese tamaño.

La capacidad de la SRAM varía entre 16 y 3968 posiciones, según el modelo.

5.1.3.2 Segmentación

Se aplica la técnica de segmentación (“pipe-line”) en la ejecución de las instrucciones.

La segmentación permite al procesador realizar al mismo tiempo la ejecución de una instrucción y la búsqueda del código de la siguiente. De esta forma se puede ejecutar cada instrucción en un ciclo (un ciclo de instrucción equivale a cuatro ciclos de reloj).

Las instrucciones de salto ocupan dos ciclos al no conocer la dirección de la siguiente instrucción hasta que no se haya completado la de bifurcación.

5.1.3.3 Formato de las instrucciones

El formato de todas las instrucciones es de la misma longitud

Todas las instrucciones de los microcontroladores de la gama baja tienen una longitud de 12 bits. Las de la gama media tienen 14 bits y más las de la gama alta. Esta característica es muy ventajosa en la optimización de la memoria de instrucciones y facilita enormemente la construcción de ensambladores y compiladores.

Procesador RISC (Computador de Juego de Instrucciones Reducido).

Los modelos de la gama baja disponen de un repertorio de 33 instrucciones, 35 los de la gama media y casi 60 los de la alta.

5.1.3.4 Arquitectura basada en un banco de registro

Esto significa que todos los objetos del sistema (puertas de E/S, temporizadores, posiciones de memoria, etc.) están implementados físicamente como registros.

En la figura siguiente se muestra como la ALU (Unidad Aritmético-Lógica) efectúa sus operaciones con dos operandos, uno que proviene del registro W (Work), que en otras CPUs recibe el nombre de Acumulador, y el otro que se encuentra en cualquier otro registro o desde el propio código de instrucción.

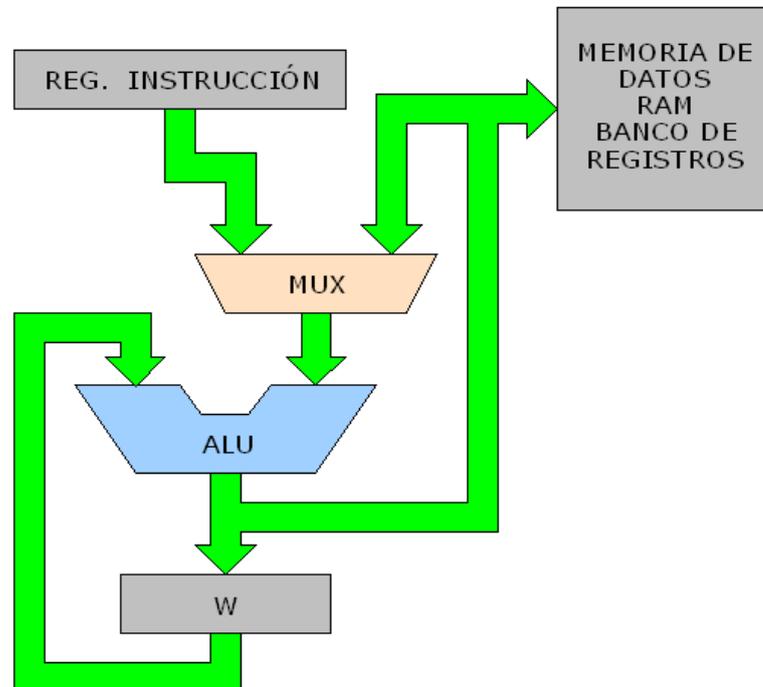


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-4 Arquitectura de un banco de registro.

5.1.3.5 Modelos de arquitectura

Entre los fabricantes de microcontroladores hay dos tendencias para resolver las demandas de los usuarios:

1ª. Microcontroladores de arquitectura cerrada.

Cada modelo se construye con una determinada CPU, cierta capacidad de memoria de datos, cierto tipo y capacidad de memoria de instrucciones, un número de E/S y un conjunto de recursos auxiliares muy concreto. El modelo no admite variaciones ni ampliaciones.

La aplicación a la que se destina debe encontrar en su estructura todo lo que precisa y, en caso contrario, hay que desecharlo. Microchip ha elegido principalmente este modelo de arquitectura.

2ª. Microcontroladores de arquitectura abierta.

Estos microcontroladores se caracterizan porque, además de disponer de una estructura interna determinada, pueden emplear sus líneas de E/S para sacar al exterior los buses de datos, direcciones y control, con lo que se posibilita la ampliación de la memoria y las E/S con circuitos integrados externos. Microchip dispone de modelos PIC con arquitectura abierta, sin

embargo, esta alternativa se escapa de la idea de un microcontrolador incrustado y se asemeja a la solución que emplean los clásicos microprocesadores.

Los verdaderos microcontroladores responden a la arquitectura cerrada y permiten resolver una aplicación con un solo circuito integrado y a precio muy reducido.

5.1.4 Características generales de los microcontroladores PIC

Prácticamente todos los PIC se caracterizan por poseer unos mismos recursos mínimos:

- a) Sistema POR (POWER ON RESET). Todos los PIC tienen la facultad de generar una autoreinicialización o auto reset al conectarles la alimentación.
- b) Perro guardián, (Watchdog). Existe un temporizador que produce un reset automáticamente si no es recargado antes de que pase un tiempo prefijado. Así se evita que el sistema se quede "colgado" puesto que dada esa situación el programa no recargaría dicho temporizador y se generaría un reset.

c) Código de protección. Cuando se procede a realizar la grabación del programa, puede protegerse para evitar su lectura. También disponen de posiciones reservadas para registrar números de serie, códigos de identificación, prueba, etc.

d) Modo de reposo (bajo consumo o SLEEP). Ejecutando una instrucción (SLEEP), el CPU y el oscilador principal se detienen y se reduce notablemente el consumo.

5.1.5 Programación del PIC

La utilización de los lenguajes más cercanos a la máquina (de bajo nivel) representan un considerable ahorro de código en la confección de los programas, lo que es muy importante dada la estricta limitación de la capacidad de la memoria de instrucciones. Los programas bien realizados en lenguaje Ensamblador optimizan el tamaño de la memoria que ocupan y su ejecución es muy rápida.

El lenguaje que utilizan los profesionales para la programación de los microcontroladores es el Ensamblador, que es el más cercano a la máquina. También son frecuentes los programas en lenguaje C y en BASIC.

Para transferir el código de un ordenador al PIC normalmente se usa un dispositivo llamado programador. La mayoría de PICs que Microchip distribuye

hoy en día incorporan ICSP (In Circuit Serial Programming, programación serie incorporada) o LVP (Low Voltage Programming, programación a bajo voltaje), lo que permite programar el PIC directamente en el circuito destino. Para la ICSP se usan los pines RB6 y RB7 como reloj y datos y el MCLR para activar el modo programación aplicando un voltaje de 13 voltios.

Existen muchos programadores de PICs, desde los más simples que dejan al software los detalles de comunicaciones, a los más complejos, que pueden verificar el dispositivo a diversas tensiones de alimentación e implementan en hardware casi todas las funcionalidades. Muchos de estos programadores complejos incluyen ellos mismos PICs preprogramados como interfaz para enviar las órdenes al PIC que se desea programar. Uno de los programadores más simples es el TE20, que utiliza la línea TX del puerto RS232 como alimentación y las líneas DTR y CTS para mandar o recibir datos cuando el microcontrolador está en modo programación. El software de programación puede ser el ICprog, muy común entre la gente que utiliza este tipo de microcontroladores.

Se pueden obtener directamente de Microchip muchos programadores/depuradores (octubre 2005):

La empresa Microchip y otras que utilizan los PIC ponen a disposición de los usuarios numerosas herramientas para desarrollar hardware y software. Son muy abundantes los programadores, los simuladores software, los emuladores

en tiempo real, Ensambladores, Compiladores C, Intérpretes y Compiladores BASIC, etc.

El PIC18F2550 por ejemplo, puede ser programado utilizando el programa JDM (**Jens Dyekjær Madsen**). Este programador es alimentado por el puerto **RS232** del **PC** y funciona con niveles RS232 $\leq \pm 8.6V$.

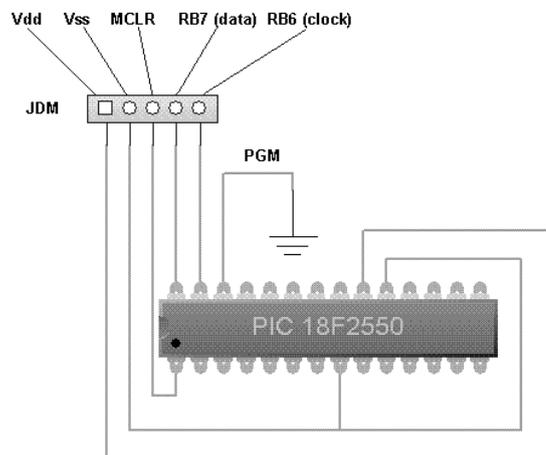


Imagen obtenida de <http://micros.mforos.com/1149901/6456206-programar-el-pic18f2550-con-el-jdm/>

Figura 5-5 Configuración del PIC18F2550 para su programación

5.1.6 Las pilas en los PIC

La Pila en los PIC es una zona de memoria que se encuentra separada tanto de la memoria de programa como de la de datos. Tiene una estructura LIFO (Last In First Out), por lo que el último valor que se guarda es el primero que sale. Dispone de varios niveles de profundidad, cada uno de ellos con una longitud de n bits. Su funcionamiento es como el de un buffer circular, de

manera que el valor que se obtiene al realizar tantos desplazamientos como niveles más uno, es igual al primer desplazamiento.

La única manera de cargar la Pila es a través de la instrucción CALL (llamada a subrutina) o por una interrupción que hacen que con cada una de ellas, se cargue el contenido del PC en el valor superior de la Pila. Para recuperar el contenido de la Pila en el PC hay que ejecutar una instrucción RETURN, RETLW o RETFIE (vuelta del programa de atención a una subrutina o interrupción).

No se dispone de ningún flag (identificador o bandera) que indique un desbordamiento de la Pila.

Los dispositivos más complejos responden a microcontroladores de arquitectura abierta que pueden expandirse en el exterior al poder sacar los buses de datos, direcciones y control. Así se pueden configurar sistemas similares a los que utilizan los microprocesadores convencionales, siendo capaces de ampliar la configuración interna del PIC añadiendo nuevos dispositivos de memoria y de E/S externas. Esta facultad obliga a estos componentes a tener un elevado número de patillas.

Con los PIC se dispone de gran diversidad de modelos y encapsulados, pudiendo seleccionar el que mejor se acople a las necesidades de acuerdo con el tipo y capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S y las funciones

auxiliares precisas. Sin embargo, todas las versiones están construidas alrededor de una arquitectura común, un repertorio mínimo de instrucciones y un conjunto de opciones muy apreciadas, como el bajo consumo y el amplio margen del voltaje de alimentación.

5.1.7 Alimentación y corrientes de salida

La tensión típica de los PIC es de 5 v, si bien según que modelos se pueden alimentar con tensiones de 2 a 6,25 voltios, lo cual posibilita el funcionamiento mediante pilas corrientes teniendo en cuenta su bajo consumo (menos de 2 mA a 5 V y 4 MHz).

Las líneas de E/S de los PIC pueden proporcionar o absorber una corriente de salida comprendida entre 20 y 25 mA, capaz de excitar directamente ciertos periféricos.

5.1.8 Manera de clasificar los PICs

Pueden tomarse diversas maneras de clasificar los PIC y ninguna puede considerarse definitiva, debido a la rápida evolución de estos dispositivos. A continuación se presentan distintas formas de clasificar a los PIC, según diversos aspectos ver tabla 5-1:

Familia de productos	Tipo de memoria	Número de patillas E/S	Tamaño de memoria (bytes)
PIC10	FLASH	4 - 17 patillas	0.5K - 1K
PIC12	OTP	18-27 patillas	2K - 4K
PIC14	ROM	28-44 patillas	8K - 16K
PIC16		45-80 patillas	24K -32K
PIC17			48K - 64K
PIC18			96K - 128K

Tabla 5-1 Manera de clasificar los PICs.

En la clasificación por familias, las principales diferencias radican en el número de instrucciones y su longitud, el número de puertos y funciones, lo cual se refleja en el encapsulado, la complejidad interna y de programación, y en el número de aplicaciones.

5.2.1 Familia de Microcontroladores PIC

Una de las labores más importantes del ingeniero de diseño es la elección del microcontrolador que mejor satisfaga las necesidades del proyecto con el mínimo presupuesto.

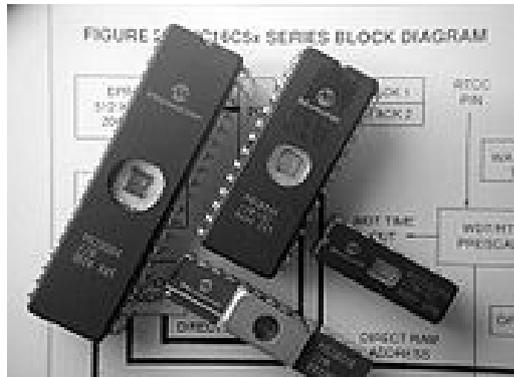


Imagen extraída de <http://camedinam.blogspot.com/2009/03/que-es-un-pic-los-pic-son-una-familia.html>. Autor Christian Arley Medina Morales.

Fig.5-6 Varios viejos (EPROM) microcontroladores PIC

Para resolver aplicaciones sencillas se precisan pocos recursos, en cambio, las aplicaciones grandes requieren numerosos y potentes. Siguiendo esta filosofía Microchip construye diversos modelos de microcontroladores orientados a cubrir, de forma óptima, las necesidades de cada proyecto. Así, hay disponibles microcontroladores sencillos y baratos para atender las aplicaciones simples y otros complejos y más costosos para las de mucha envergadura.

Microchip dispone de cuatro familias de microcontroladores de 8 bits para adaptarse a las necesidades de la mayoría de los clientes potenciales.

En la mayor parte encontrarán tan solo tres familias de microcontroladores, con lo que habrán despreciado la llamada gama baja, que es en realidad una subfamilia formada por componentes pertenecientes a las otras gamas. Dado que los PIC bajas son muy apreciadas en las aplicaciones

de control de personal, en sistemas de seguridad y en dispositivos de bajo consumo que gestionan receptores y transmisores de señales. Su pequeño tamaño los hace ideales en muchos proyectos donde esta cualidad es fundamental.

5.2.1.1 La familia baja: PIC12C(F)XXX 8 pines

Se trata de un grupo de PIC de reciente aparición que ha acaparado la atención del mercado. Su principal característica es su reducido tamaño, al disponer todos sus componentes de 8 pines. Se alimentan con un voltaje de corriente continua comprendido entre 2,5 V y 5,5 V, y consumen menos de 2 mA cuando trabajan a 5 V y 4 Mhz. El formato de sus instrucciones puede ser de 12 o de 14 bits y su repertorio es de 33 o 35 instrucciones, respectivamente. En la Figura 5-7 se muestra el diagrama de conexionado de uno de estos PIC.

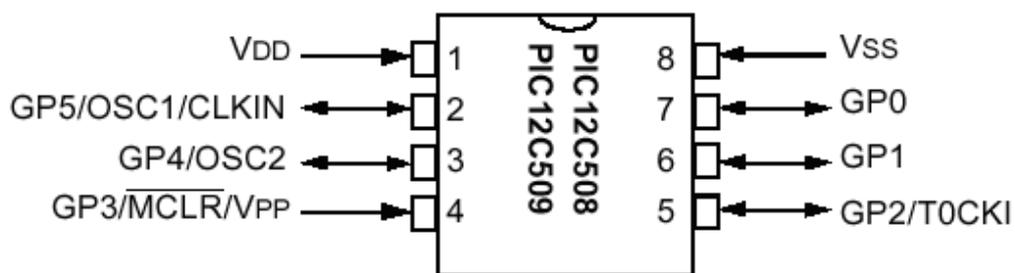


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>
Figura 5-7 Diagrama de conexiones de los PIC12Cxx de la familia baja.

Aunque los PIC bajas sólo tienen 8 pines, pueden destinar hasta 6 como líneas de E/S para los periféricos porque disponen de un oscilador interno R-C.

En la Tabla 5-2 se presentan las principales características de los modelos de esta subfamilia, que el fabricante tiene la intención de potenciar en un futuro próximo. Los modelos 12C5xx pertenecen a la gama baja, siendo el tamaño de las instrucciones de 12 bits; mientras que los 12F6xx son de la gama media y sus instrucciones tienen 14 bits. Los modelos 12F6xx poseen memoria Flash para el programa y EEPROM para los datos.

MODELO	MEMORIA PROGRAMA	MEMORIA DATOS	FRECUENCIA MAXIMA	LINEAS E/S	ADC 8BITS	TEMPORIZADORES	PINES
PIC12F508	512x12	25x8	4 MHz	6		TMR0 + WDT	8
PIC12F509	1024x12	41x8	4 MHz	6		TMR0 + WDT	8
PIC12F670	512x14	80x8	4 MHz	6		TMR0 + WDT	8
PIC12F671	1024x14	128x8	4 MHz	6	2	TMR0 + WDT	8
PIC12F672	2048x14	128x8	4 MHz	6	4	TMR0 + WDT	8
PIC12F680	512x12 FLASH	80x8 16x8 EEPROM	4 MHz	6	4	TMR0 + WDT	8
PIC12F681	1024x14 FLASH	80x8 16x8 EEPROM	4 MHz	6		TMR0 + WDT	8

Tabla 5-2 Características de los modelos PIC12C(F)XXX de la familia baja

5.2.1.2 La familia baja básica: PIC16C5X con instrucciones de 12 bits

Se trata de una serie de PIC de recursos limitados, pero con una de las mejores relaciones coste/prestaciones. Sus versiones están encapsuladas con 18 y 28 pines y pueden alimentarse a partir de una tensión de 2,5 V, lo que les hace ideales en las aplicaciones que funcionan con pilas teniendo en cuenta su bajo consumo (menos de 2 mA a 5 V y 4 MHz). Tienen un repertorio de 33 instrucciones cuyo formato consta de 12 bits. No admiten ningún tipo de

interrupción y la Pila sólo dispone de dos niveles. En la Figura 5-8 se muestra el diagrama de conexionado de uno de estos PIC.

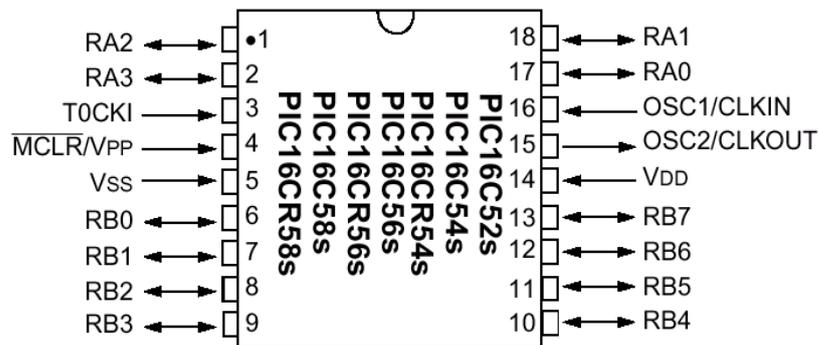


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-8 Diagrama de pines de los PIC de la gama baja que responden a la nomenclatura PIC16C54/56.

Al igual que todos los miembros de la familia PIC16/17, los componentes de la gama baja se caracterizan por poseer los siguientes recursos: (en la Tabla 5-3 se presentan las principales características de los modelos de esta familia).

1. Sistema POR (“Power On Reset”)

Todos los PIC tienen la facultad de generar una autoreinicialización o autoreset al conectarles la alimentación.

2. Perro guardián (Watchdog o WDT)

Existe un temporizador que produce un reset automáticamente si no es recargado antes que pase un tiempo prefijado. Así se evita que el sistema

quede “colgado” dado en esa situación el programa no recarga dicho temporizador y se genera un reset.

3. Código de protección

Cuando se procede a realizar la grabación del programa, puede protegerse para evitar su lectura. También disponen los PIC de posiciones reservadas para registrar números de serie, códigos de identificación, prueba, etc.

Modelo	Memoria Programada (* 12 BITS) EPROM ROM	Memoria Datos (bytes)	Frecuencia Máxima	Líneas E/S	TEMPORIZADORES	PATITAS
PIC16C52	384	25	4MHz	4	TMRO+WDT	18
PIC16C54	512	25	20MHz	12	TMRO+WDT	18
PIC16C54A	512	25	20MHz	12	TMRO+WDT	18
PIC16CR54A	512	25	20MHz	12	TMRO+WDT	18
PIC16C55	512	24	20MHz	20	TMRO+WDT	28
PIC16C56	1K	25	20MHz	12	TMRO+WDT	18
PIC16C57	2K	72	20MHz	20	TMRO+WDT	28
PIC16CR57B	2K	72	20MHz	20	TMRO+WDT	28
PIC16C58A	2K	73	20MHz	12	TMRO+WDT	18
PIC16CR58A	2K	73	20MHz	12	TMRO+WDT	18

Tabla 5-3. Características de los modelos PIC16C(R)5X de la gama baja

4. Líneas de E/S de alta corriente

Las líneas de E/S de los PIC pueden proporcionar o absorber una corriente de salida comprendida entre 20 y 25 mA, capaz de excitar directamente ciertos periféricos.

5. Modo de reposo (Bajo consumo o “sleep”)

Ejecutando una instrucción (SLEEP), la CPU y el oscilador principal se detienen y se reduce notablemente el consumo.

Para terminar el comentario introductorio sobre los componentes de la gama baja conviene nombrar dos restricciones importantes:

- La pila o “stack” sólo dispone de dos niveles lo que supone no poder encadenar más de dos subrutinas.
- Los microcontroladores de la gama baja no admiten interrupciones.

5.2.1.3 Familia media: PIC16CXX con instrucciones de 14 bits

Es la gama más variada y completa de los PIC. Abarca modelos con encapsulado desde 18 pines hasta 68, cubriendo varias opciones que integran abundantes periféricos. Dentro de esta gama se halla el «fabuloso PIC16X84» y sus variantes. En la Figura 5-9 se muestra el diagrama de conexionado de uno de estos PIC.

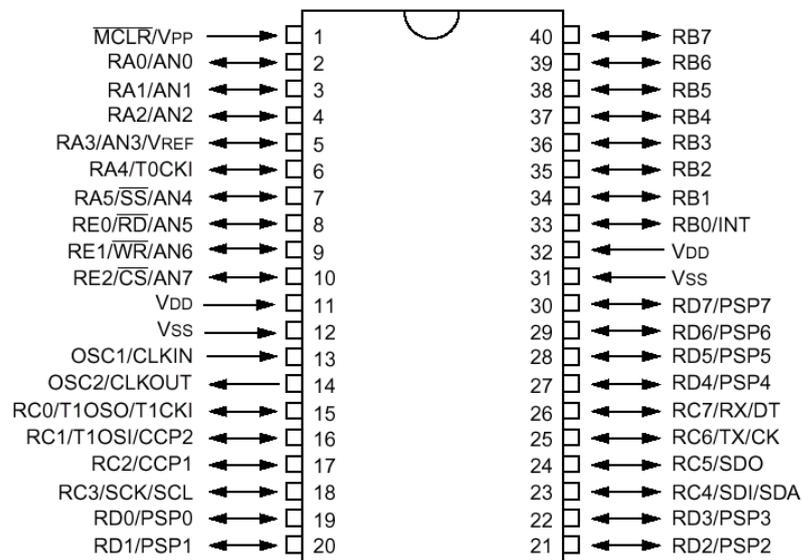


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-9 Diagrama de pines del PIC16C74, uno de los modelos más representativos de la gama media.

En esta gama sus componentes añaden nuevas prestaciones a las que poseían los de la gama baja, haciéndoles más adecuados en las aplicaciones complejas. Admiten interrupciones, poseen comparadores de magnitudes analógicas, convertidores A/D, puertos serie y diversos temporizadores.

El repertorio de instrucciones es de 35, de 14 bits cada una y compatible con el de la gama baja. Sus distintos modelos contienen todos los recursos que se precisan en las aplicaciones de los microcontroladores de 8 bits. También dispone de interrupciones y una Pila de 8 niveles que permite el anidamiento de subrutinas. En la Tabla 5-4 se presentan las principales características de los modelos de esta familia.

MODELO	MEMORIA PROGRAMADA	MEMORIA DATOS		REGISTROS ESPECIFICOS	TEMPORIZADORES	INTERRUPCIONES	E/S	RANGO VOLTAJE	PATITAS
		RAM	EPROM						
PIC16C84	1K*14 EEPROM	36	64	11	TMRO + WDT	4	13	2-6	18
PIC16F84	1K*14 FLASH	68	64	11	TMRO + WDT	4	13	2-6	18
PIC16F83	12*14 FLASH	36	64	11	TMRO + WDT	4	13	2-6	18
PIC16CR84	1K*14 ROM	68	64	11	TMRO + WDT	4	13	2-6	18
PIC16CR83	512*14 ROM	36	64	11	TMRO + WDT	4	13	2-6	18

Tabla 5-4 Características relevantes de los modelos PIC16X8X de la gama media.

Encontrado en la gama media también se halla la versión PIC14C000, que soporta el diseño de controladores inteligentes para cargadores de baterías, pilas pequeñas, fuentes de alimentación ininterrumpible y cualquier sistema de adquisición y procesamiento de señales que requiera gestión de la energía de alimentación. Los PIC 14C000 admiten cualquier tecnología de las baterías como Li-Ion, NiMH, NiCd, Ph y Zinc.

El temporizador TMR1 que hay en esta gama tiene un circuito oscilador que puede trabajar asincrónicamente y que puede incrementarse aunque el microcontrolador se halle en el modo de reposo (“sleep”), posibilitando la implementación de un reloj en tiempo real. Las líneas de E/S presentan una carga “pull-up” activada por software.

5.2.1.4 Familia alta: PIC17CXX con instrucciones de 16 bits

Se alcanzan las 58 instrucciones de 16 bits en el repertorio y sus modelos disponen de un sistema de gestión de interrupciones vectorizadas muy potente. También incluyen variados controladores de periféricos, puertas de comunicación serie y paralelo con elementos externos, un multiplicador hardware de gran velocidad y mayores capacidades de memoria, que alcanza los 8 k palabras en la memoria de instrucciones y 454 bytes en la memoria de datos.

Quizás la característica más destacable de los componentes de esta gama es su arquitectura abierta, que consiste en la posibilidad de ampliación del microcontrolador con elementos externos. Para este fin, las pines sacan al exterior las líneas de los buses de datos, direcciones y control, a las que se conectan memorias o controladores de periféricos. Esta facultad obliga a estos componentes a tener un elevado número de pines comprendido entre 40 y 44. Esta filosofía de construcción del sistema es la que se empleaba en los microprocesadores y no suele ser una práctica habitual cuando se emplean microcontroladores. En la tabla 5-5 se muestran las características más relevantes de los modelos de esta gama, que sólo se utilizan en aplicaciones muy especiales con grandes requerimientos.

MODELO	MEMORIA PROGRAMA	MEMORIA DATOS RAM	REGISTROS ESPECIFICOS	TEMPORIZADORES	CAP	PWM	CAD 10 BIT	INTERRUPCIONES	E/S	MULTIPLICADOR HARDWARE	PATITAS
PIC17C42A	2k x16	232	48	4+ WDT	2	2		11	33	8X8	44
PIC17C43	4k x16	454	48	4+ WDT	2	2		11	33	8X8	44
PIC17C44	8k x16	454	48	4+ WDT	2	2		11	33	8X8	44
PIC17C752	8k x16	454	76	4+ WDT	4	3	12	18	50	8X8	44
PIC17C756	16k x16	902	76	4+ WDT	4	3	12	18	50	8X8	44

Tabla 5-5 Características más destacadas de los modelos PIC17CXXX de la gama alta.

5.2.2 Familia de Microcontroladores PIC18

Los microcontroladores de la familia PIC18 cuentan con características que los colocan muy por encima de otros microcontroladores que se encuentran en el mismo rango de precio y complejidad. Entre estas características encontramos que utilizan un amplio conjunto de instrucciones, multiplicador por hardware, velocidad de 40 MHz, arquitectura optimizada para lenguaje C e instrucciones y memoria de 16 bits.



Imagen obtenida de la hoja de datos de la familia PIC18 Microchip.com

Figura 5-10 Familia de Microcontroladores PIC18

La memoria de programa puede ser hasta de 2 MB, y la memoria de datos puede llegar a los 4k registros de 8 bits cada uno. Algunos miembros de la familia PIC18 admiten una expansión externa de la memoria de programa. Poseen una pila de 31 niveles de profundidad, así como un sistema de interrupción muy elaborado, con interrupciones internas provenientes de los dispositivos de entrada y salida integrados en el microcontrolador, y tres interrupciones externas. Poseen un gran número y variedad de dispositivos de entrada y salida integrados.

Varios dispositivos PIC18 están diseñados para trabajar con tensiones bajas (2.0 V a 3.6 V) y con corrientes inferiores a 2 mA.

La estructura básica de un microcontrolador PIC18 la podríamos dividir en dos grupos: núcleo y periféricos. A continuación se especifican los componentes comunes de cada una de estas divisiones, ver tabla 5-6.

Núcleo	Periféricos
Oscilador	Puertos de entrada y salida (I/O)
Reset	Puerto esclavo paralelo (PSP)
Arquitectura	Temporizadores (timers)
Unidad central de proceso (CPU o UCP)	Módulo de captura, comparación, modulación de ancho de pulso (CCP)
Unidad lógica aritmética (ALU)	Puerto esclavo serial (SSP)
Multiplicador en hardware 8x8 bits	Puerto serial síncrono y asíncrono (USART)
Memoria	Protocolo CAN (Controller Area Network)
Lectura y escritura de tablas	Comparador de voltaje
Bus del sistema	Referencia de voltaje para el comparador
Interrupciones	Convertidor A/D de 10 bits
Juego de instrucciones	

Tabla 5-6 Tabla de división básica PIC18.

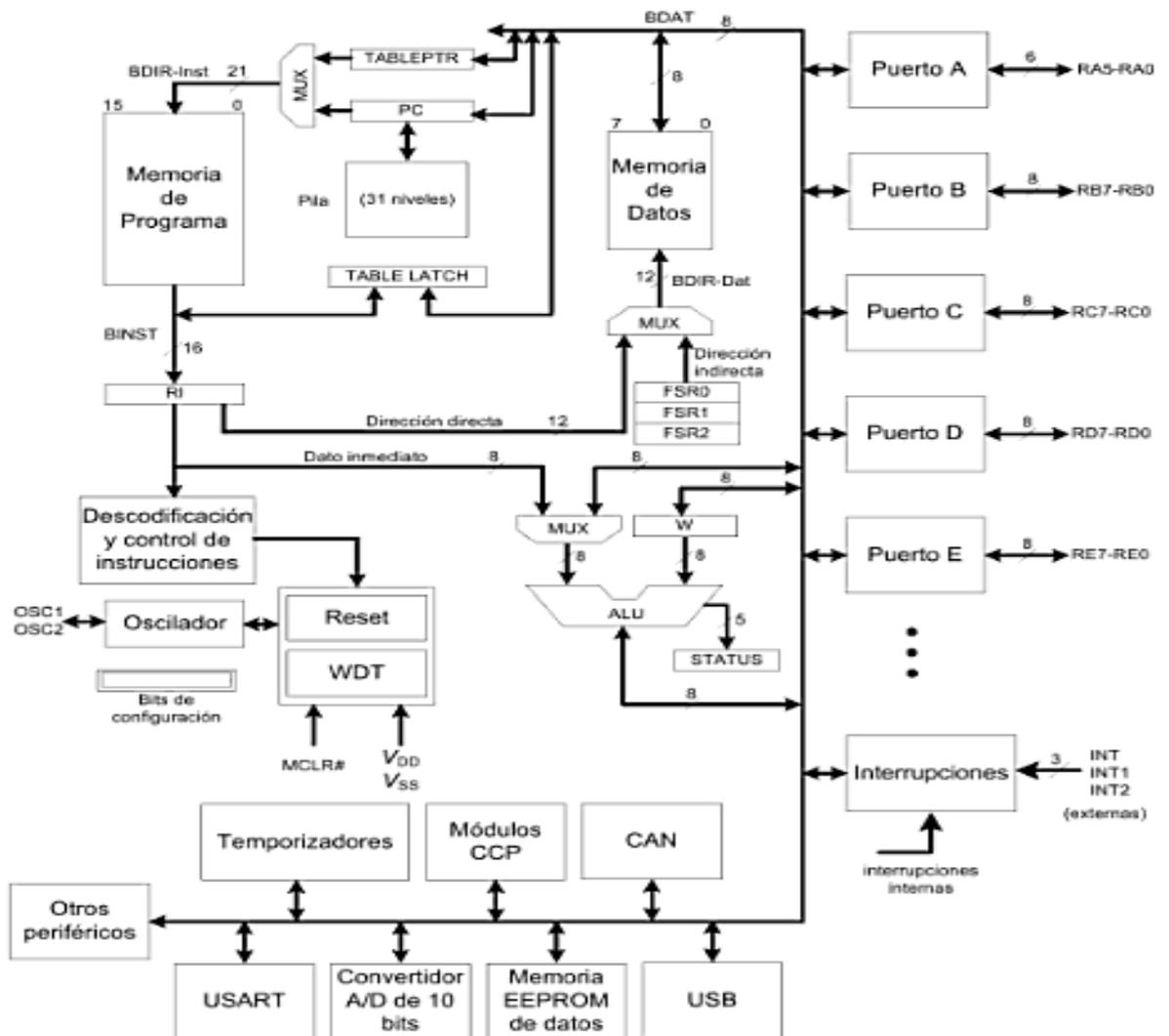


Imagen obtenida de Microcontroladores <http://perso.wanadoo.es/pictob/microcr.htm>

Figura 5-11 Arquitectura interna de los PIC18.

5.2.2.1 Características especiales

Estas son características que nos permiten disminuir los costos, e incrementar la flexibilidad y confiabilidad del diseño.

Los microcontroladores PIC18 ofrecen distintas características que nos ayudan a conseguir estos objetivos, algunas de estas son:

- Detección de bajo voltaje
- Watch dog timer y operación en sleep
- Bits de configuración del dispositivo
- Programación serial en circuito ICSP

5.2.2.2 Conexión USB

En combinación con una amplia variedad de periféricos en chip nanoWatt y Tecnología de gestión de la energía, estas características proporcionan una completa solución de control para los diseñadores que trabajan con USB en el sector industrial, médica y muchas otras aplicaciones.

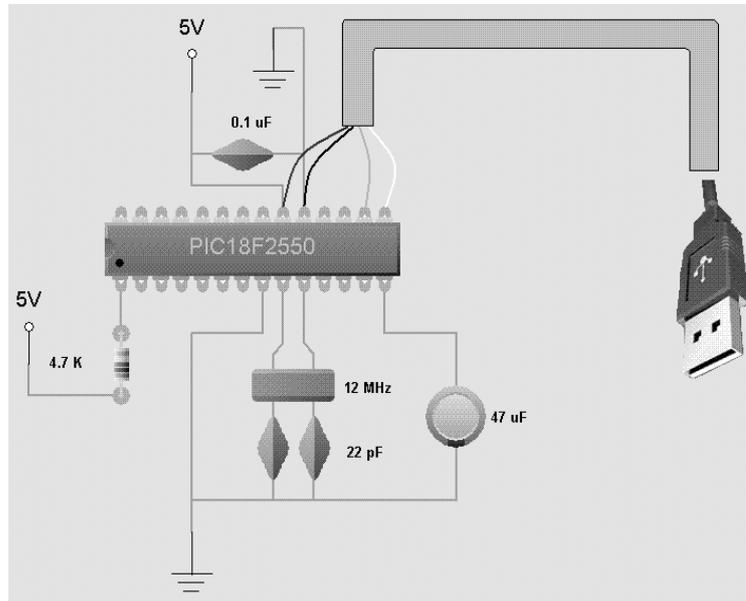


Imagen obtenida de <http://micros.mforos.com/1149901/6456206-programar-el-pic18f2550-con-el-jdm/>
Figura 5-12 Conexión directa mediante USB de un PIC18F2550

La mayoría de los micro controladores con capacidad USB están optimizados exclusivamente para la computación personal (PC) y periféricos de los mercados de consumo, dejando un vacío para los ingenieros incorporados. Microchip la nueva familia de microcontroladores PIC USB objetivos aplicaciones integradas que operan en entornos difíciles y en ocasiones conectarse a los ordenadores personales. La cuatro nuevos íntegro-Speed USB microcontroladores PIC abordar estas necesidades mediante la integración de USB como una de las principales interfaces seriales, en contraposición con el enfoque que prevalece, añade una serie a USB en la parte superior de un legado de diseño.

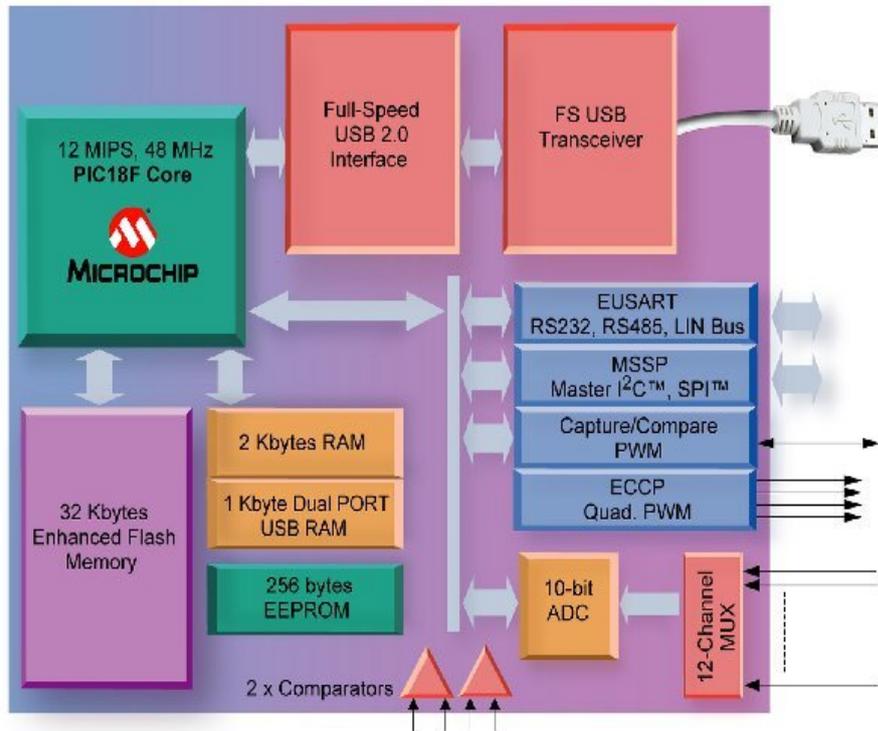


Imagen obtenida de http://www.microcontroller.com/news/microchip_48mhz_pic.asp. Autor Eric Lawson, nov 8, 2004.
Figura 5-13 PIC18F microchip con conexión USB, diagrama de bloque.

Para que nuestro dispositivo sea detectado por el ordenador lo primero que tenemos que hacer es configurar nuestro driver. Una vez configurado el driver a nuestro gusto, pasaremos a la instalación del puerto USB.

Lo primero será conectar nuestro dispositivo a algún puerto USB libre que tengamos.

5.2.2.3 Funciones analógicas

a) Módulo conversor analógico-digital (A / D) con:

- Rápida velocidad de muestreo
- Multiplexor de hasta 16 canales de entrada
- Conversión disponible durante el estambay

b) Detección programable de voltaje bajo (LVD)

c) Comparadores

5.2.2.4 Puertas de entrada / salida

Cada puerto dispone de tres direcciones:

PORTx: Es la correspondiente a los pines del puerto. Se utiliza para leer el estado de las entradas. Por razones de compatibilidad, escribir en esta dirección equivale a hacerlo en la dirección LATx.

LATx: Es la de los registros que almacenan los datos que pueden salir por los correspondientes pines de puerto. Se utiliza para escribir el estado que se desea poner en las salidas. Si se lee esta dirección, se leerá el valor que hay en los registros y no el estado de los pines.

TRISx: Es la de los registros que configuran los bits del puerto, de forma individual y dinámica, como entrada o salida. Se puede escribir y leer.

5.2.3 PICs modernos

Los viejos PICs con memoria PROM o se están renovando gradualmente por chips con memoria Flash. Así mismo, el juego de instrucciones original de 12 bits del PIC1650 y sus descendientes directos ha sido suplantado por juegos de instrucciones de 14 y 16 bits. Microchip todavía vende versiones PROM y EPROM de la mayoría de los PICs para soporte de aplicaciones antiguas o grandes pedidos.

Se pueden considerar tres grandes gamas de MCUs PIC en la actualidad: Los básicos (Line base), los de medio rango (Mid Range) y los de alto desempeño (high performance). Los PIC18 son considerados de alto desempeño y tienen entre sus miembros a PICs con módulos de comunicación y protocolos avanzados (USB, Ethernet, Zigbee por ejemplo).

Capítulo 6 Desarrollo y fabricación del TDR virtual (Marco Metodológico)

6.1 Explicación y limitaciones

El Reflectómetro de Dominio de Tiempo (TDR) ha sido durante mucho tiempo utilizado para medir la longitud eléctrica de líneas de transmisión, localizar fallas en líneas de transmisión, y caracterizar la impedancia de línea de transmisión.

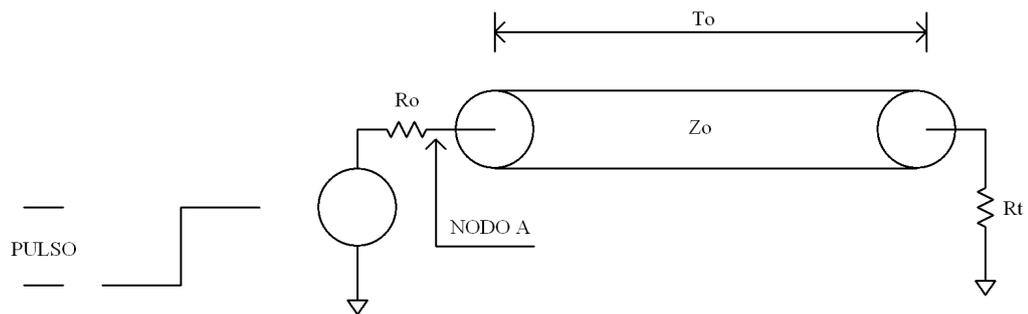


Figura 6-1. Diagrama básico de una línea de transmisión

La Figura 6-1 muestra un generador de impulsos con una resistencia R_o conectado a una línea de transmisión con una impedancia Z_o y resistencia de terminación R_t . El generador de pulso produce un pulso con un aumento (T_r) y descenso (T_f) tiempo que es mucho más rápido que la longitud eléctrica de la línea de transmisión (normalmente T_r y T_f son menos $2nS$). Si utilizamos la aparición del borde creciente del pulso como punto de referencia en el tiempo ($0nS$) y, a continuación, en $T = 0nS$ la tensión en el nodo A es:

$$= \frac{1}{2} * \frac{V_A}{T_0} \quad \text{Ecuación. 6-1}$$

Donde V_A es la amplitud del pulso y T_0 es el voltaje en el nodo A.

La transmisión eléctrica tiene una longitud de L donde t es el tiempo que toma el pulso a propagarse por la línea de transmisión. La longitud eléctrica

de la línea de transmisión se puede calcular mediante, $\frac{1}{(Velocidad\ de\ luz)}$ ó

$$\frac{1.017nS}{ft} * (\text{longitud de la línea de transmisión}).$$

El voltaje en el nodo A a $2 * T_0$ será el siguiente:

$$= \frac{1}{2} * \frac{V_A}{T_0} \quad \text{Ecuación. 6-2}$$

Si la línea de transmisión no está terminada entonces cuando $T \geq 2 * T_0$. Figura 6-2 es trazado en un osciloscopio de un generador de impulsos con una impedancia de salida de 50 ohmios conduciendo pulso de 2V en un cable coaxial de 50 ohmios.

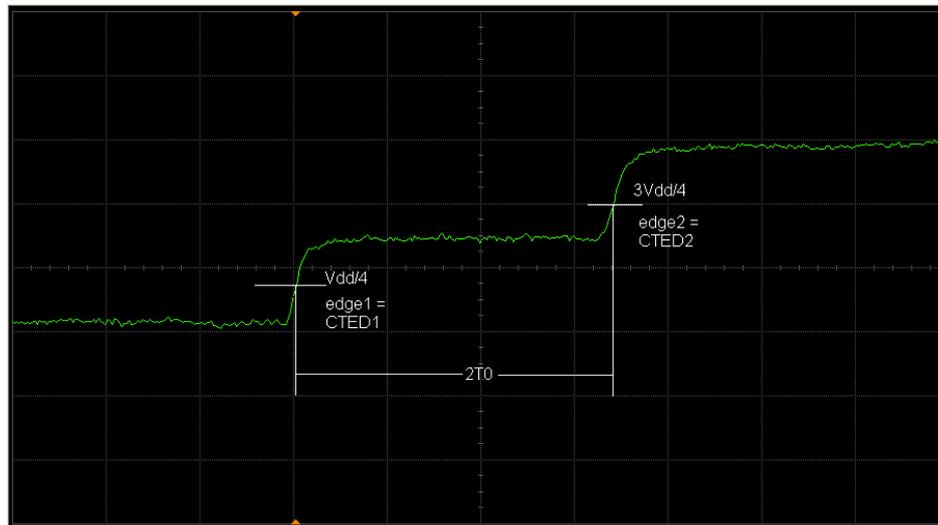


Figura 6-2. Línea de transmisión no terminada.

Los dos pasos de una forma de onda en un línea de transmisión no terminada se muestra en la figura 6-2. La tensión inicial en $T = 0\text{ns}$ utilizando Ec. 1 en el nodo A es $1V(VP/2)$. En el momento $2*VP$ refleja el pulso de la línea de transmisión no terminada y retorna, utilizando la Ec. 6-2, la tensión en el nodo A es $2V(VP)$. Así el Dominio de Tiempo se refiere al hecho de que estamos mirando la forma de onda en el dominio del tiempo, y Reflectometría se refiere al hecho de que estamos viendo la reflejada en la impedancia de la línea de transmisión y la terminación de la línea de. La impedancia está representada por la tensión.

La Reflectometría de Dominio de Tiempo (TDR) es una medición de la impedancia de una línea de transmisión que utiliza un pulso de energía reflejada sobre la línea de transmisión. Como un pulso es enviado en una línea de

transmisión, este viaja a la velocidad de la luz, el cual para los medios de comunicación se encuentra en (por lo general, el 60% a 80% de la velocidad de la luz en espacio libre). Como el pulso llega a una impedancia, la energía se refleja de nuevo en la falla a la fuente de pulsos y llega un momento que es de dos veces la distancia eléctrica desde el pulso a la fuente de impedancia o unión mal hecha. La típica forma de onda en el pulso de una fuente a la línea de transmisión sin final.

Una gran cantidad de información se puede determinar mediante un TDR, tales como la consistencia de la impedancia a lo largo de la línea de transmisión, la calidad de los conectores, la ubicación de los conectores, la longitud de las líneas de transmisión, fallas debido a cortos, debido a fallas de cable abierto. Pero el costo de los equipos de prueba para estos fines no es barato, generalmente cuestan miles de dólares. En la mayoría de los casos, estamos interesados en una de las tres piezas de información - la longitud de la línea de transmisión, fallas debido a cortocircuitos o fallas debido a cable abierto.

Esto nos lleva al tema de este proyecto. Para demostrar y probar ciertos fenómenos que ocurren en una línea de transmisión para el laboratorio de telecomunicaciones de UNAPEC en la materia sistemas de transmisión y radio frecuencias TEC-634. Si limitamos nuestra necesidad de información a la siguiente y, a continuación, una solución de bajo costo se puede implementar:

1. Línea de transmisión de longitud.
2. Localización de averías debido a cable abierto.
3. Localización de fallas debido a cortos.

Los problemas 1 y 2 son prácticamente iguales. La longitud de la línea de transmisión se puede determinar mediante el envío de un pulso en una línea no terminada. Problema 3 se ilustra en la figura 6-3. Si se produce un corto en la línea de transmisión y, a continuación, la reflexión, cuando vuelve a un nodo de la tensión volverá a 0V.

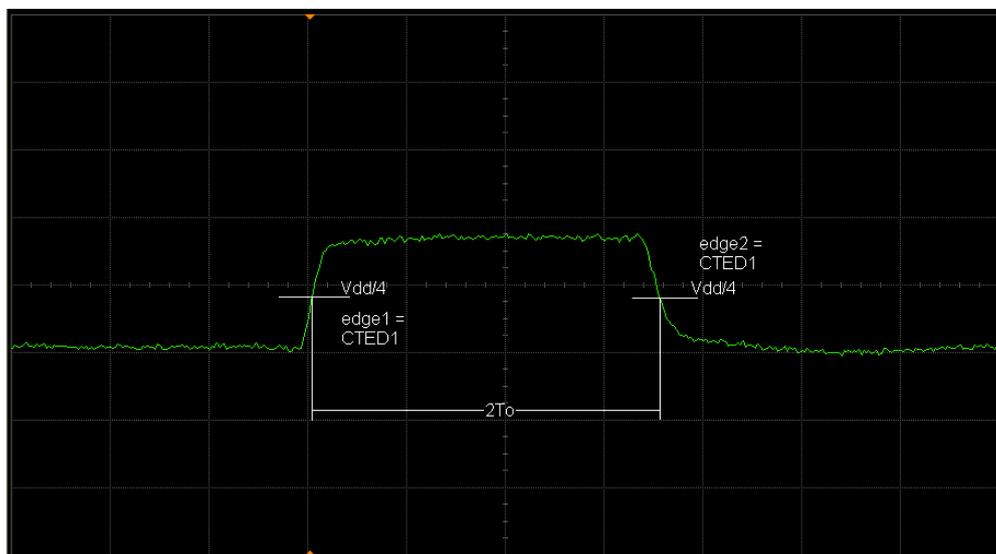


Imagen obtenida de ENCMag.com

Figura 6-3 Línea de transmisión con una terminación de 0ohm.

6.2 Arquitectura del TDR Virtual



Imagen obtenida de autoría propia
Figura 6-4 Arquitectura de TDR Virtual

6.3 Diagrama en bloques

En este apartado presentamos el diagrama en bloques del TDR Virtual, en el mismo podremos observar tres etapas que serán brevemente explicadas a continuación.

Etapa I: en esta etapa esta se presenta el instrumento virtual o herramienta desarrollada en LabVIEW la cual recibe la información desde el módulo de adquisición de datos en este caso Etapa II, para ser procesado y realizar los cálculos que por último se presentan en pantalla.

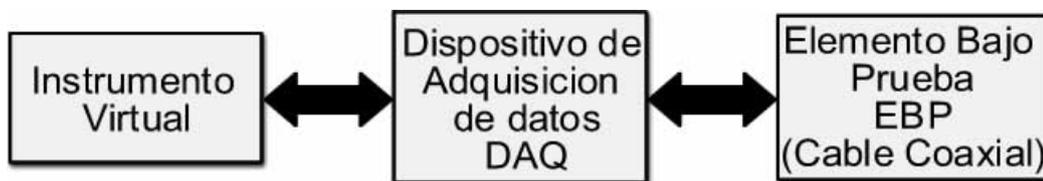


Imagen obtenida de autoría propia

Figura 6-5 Diagrama en bloques de TDR Virtual

Etapa II: en la etapa dos vemos el módulo de adquisición de datos que se desarrolla utilizando micro controladores y convertidores análogos digitales A/D y se comunica mediante el puerto USB al computador.

Etapa III: esta etapa representa el elemento bajo prueba o EBP, que en este proyecto es un cable de tipo coaxial RG-59, por el cual viaja el pulso incidente que es reflejado de acuerdo a las condiciones que se sometan.

6.4 Fabricación del módulo de adquisición de datos

Se considera el módulo de adquisición de datos como una de las vértebras o la espina dorsal del TDR virtual, por ser esta la etapa que comunica los fenómenos físicos del mundo real y así de esta forma introducirlos al computador.

Para la construcción del módulo de adquisición de datos para el TDR virtual se utilizara un micro controlador PIC24FJ64GB106. El PIC tiene un módulo de Unidad de Medición de Tiempo Capacitivo (por sus siglas en ingles, CTMU) que se puede usar para medir tiempo o capacitancia. Para esta aplicación se utilizará para medir el tiempo.

El CTMU está basado en la siguiente ecuación:

$$I = C \left(\frac{dV}{dT} \right) \quad \text{Ecuación. 6-3}$$

Resolviendo para T

$$dT = \left(\frac{C}{I} \right) dV \quad \text{Ecuación. 6-4}$$

Si I y C son constantes e integramos podremos obtener

$$T = \left(\frac{C}{I}\right)V + B \quad \text{Ecuación. 6-5}$$

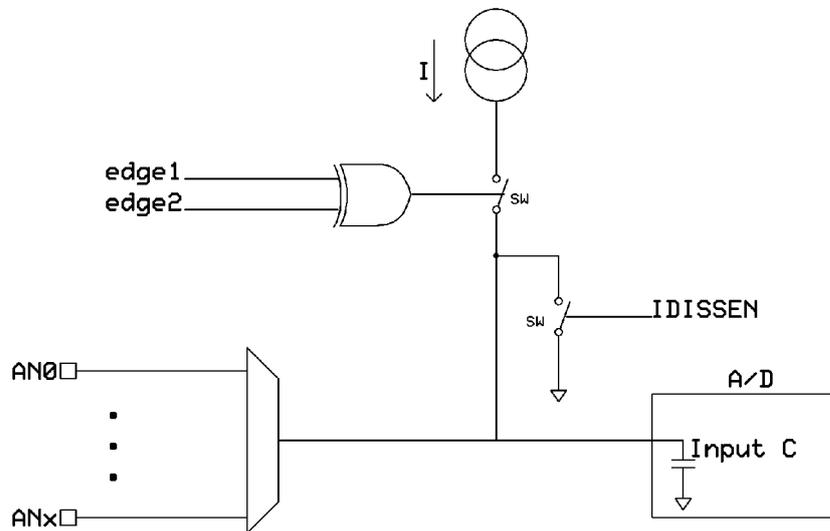


Figura 6-6 CTMU, A/D y multiplexor analógico del PIC24FJ64GB106

El CTMU, A/D y multiplexor analógico del PIC24FJ64GB106 se muestra en la Figura 6-6. El CTMU es una fuente de corriente constante que se puede activar y desactivar en menos de un nanosegundo. La corriente de salida de la CTMU está conectado al chip convertidor A / D de 10 bits. Este convertidor A/D utiliza un DAC capacitivo para una entrada. Así que tenemos una fuente de corriente que se puede activar y desactivar en menos de un nanosegundo, y un

convertidor A/D con un valor fijo de capacidad de entrada. La entrada del A/D se carga por una cantidad de tiempo desconocida después de que una tensión de medida se realiza mediante el A/D. Conocer C , I y medir V podemos calcular T . la Figura 6-7 se muestra una rampa de tensión generado en combinación con el convertidor A/D.

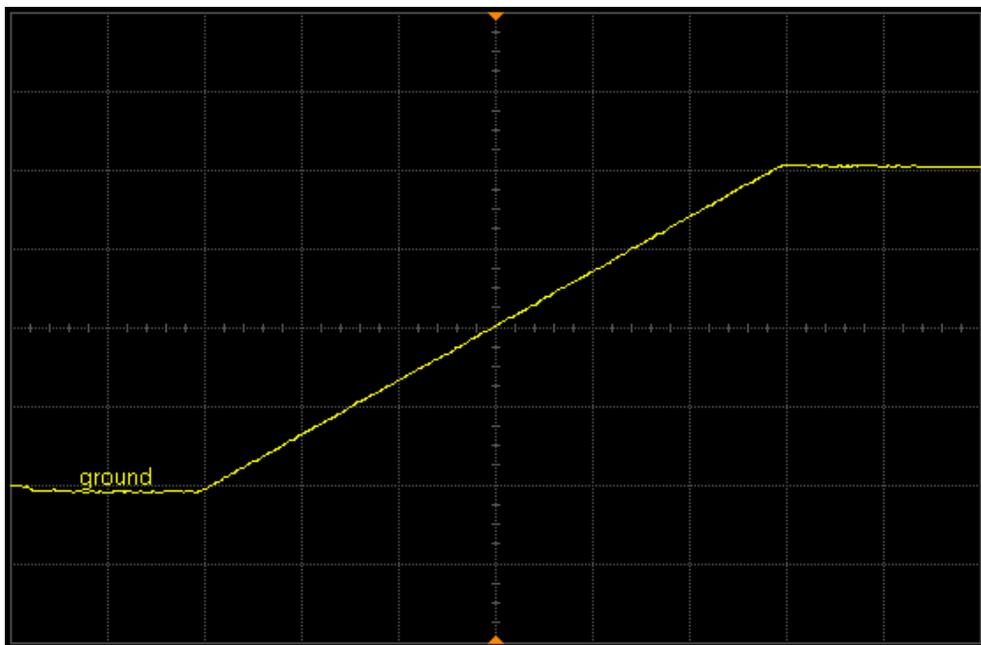


Imagen obtenida de ENCmag.com

Figura 6-7. Rampa de tensión generado en combinación con el convertidor A/D.

Entonces, ¿cuál es la resolución que podemos conseguir? El CTMU tiene corrientes nominales seleccionables de 550nA, 5.5uA, o 55uA. Estas corrientes pueden ser $\pm 30\%$ debido a variaciones del proceso, pero se puede recortar a su valor nominal $\pm 1\%$ utilizando un recortador de bits. La capacitancia es nominalmente 17.6pF. El 17.6pF es la suma de la capacidad nominal de entrada

del convertidor A/D ($4.4\text{pF} \pm 10\%$), Y 13.2pF debido a la almohadilla y el paquete de capacitancia. El máximo de la escala de tensión es de $2,5\text{ V}$ para el convertidor A/D y está determinada por una fuente externa VREF. Con 10 bits A/D, la tensión mínima que se puede resolver es 2.44mV ($2.5/1024$). Por lo tanto, usando Ec. 6-4, el tiempo mínimo que puede ser resuelto es típicamente es:

$$T = \left(\frac{17.6\text{pF}}{55\text{uA}} \right) * 2.44\text{mV} \text{ ó } 781\text{pS}$$

En última instancia, el valor absoluto de la capacidad y la corriente actual carece de importancia ya que estos valores se abordan durante el procedimiento de calibración.

6.5 Implementación del Circuito

6.5.1 Esquemático PIC

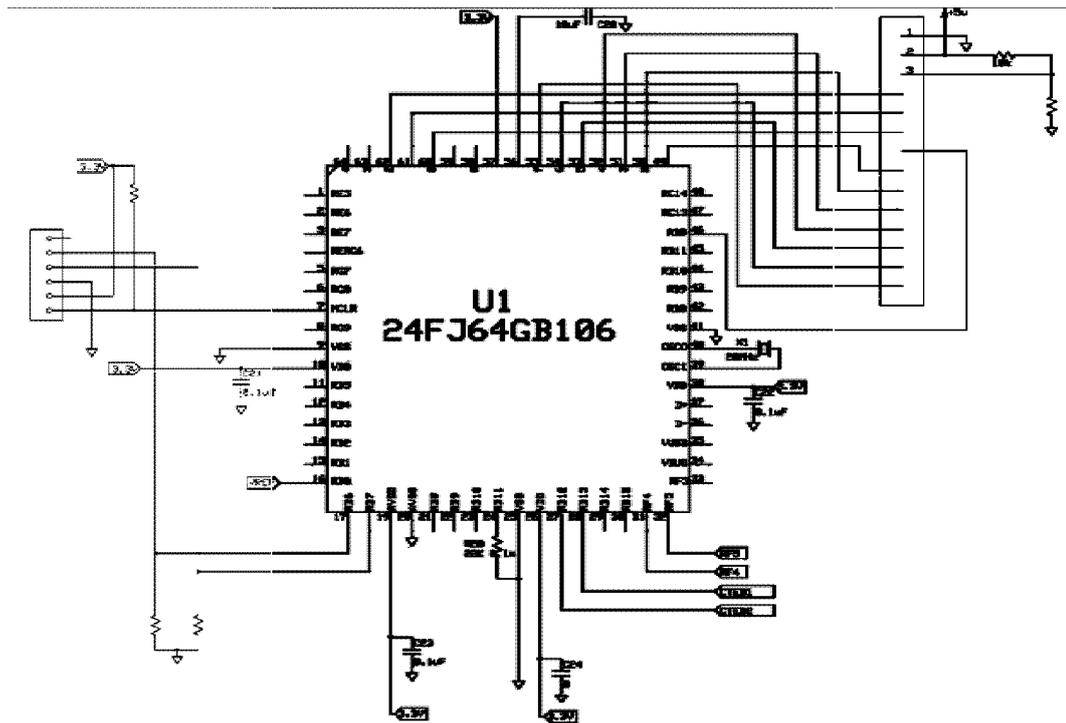


Figura 6-8: Esquemático etapa de control PIC24FJ64GB106

La figura 6-8 muestra el diagrama esquemático del corazón del módulo de adquisición de datos o TDR, el cual tiene la configuración básica para su funcionamiento. Más adelante detallamos de la disposición de los puertos utilizados.

6.5.2 Circuito eléctrico del TDR

La Figura 6-9 es una aplicación detallada de los circuitos eléctricos del TDR. Desde los pines de puerto del PIC no se puede controlar directamente a una línea de transmisión. Por esto se utiliza un buffer (LMH6559 para controlar la línea de transmisión a través de una resistencia de 50/75 ohmios. El buffer es controlado por el puerto RF4 del PIC. Es importante mantener la distancia y la capacitancia entre el PIC, como mínimo, con el fin de obtener un aumento tan rápido como sea posible del tiempo en el buffer.

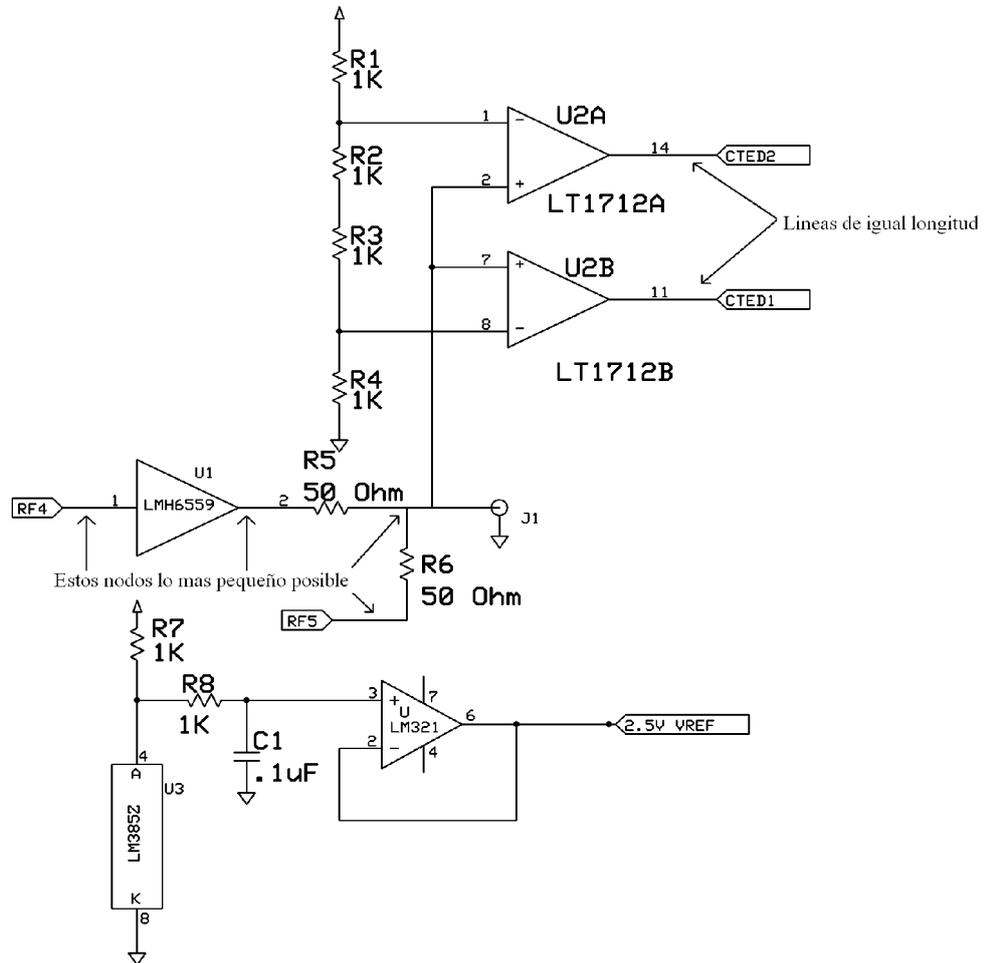


Figura 6-9 Circuito eléctrico del TDR

La salida del búfer de 50/75 ohmios conduce un 1% de superficie resistencia de montaje que se conecta a un conector coaxial para la línea de transmisión y dos comparadores. Una vez más la capacitancia y la longitud debe reducirse al mínimo en este nodo. Los comparadores se seleccionan para la velocidad y emparejar. La propiedad de demora para la comparación de una sobre conducción de 20mV es típicamente menos de 4.5nS con una

concordancia entre los dos 0.5nS. Los puntos de comparación son seleccionados por la red de resistencias de 1k ohm red creada a través de R1 a R4 es $1/4V_{dd}$ y $3/4V_{dd}$. El comparador que controla CTED1 de entrada en el PIC puede ir a $1/4V_{dd}$. Este proporciona el primer borde para medir el tiempo tanto para una línea no terminada, fallas de cable abierto y defectos de corto circuito. Además, establece el segundo borde de medición del tiempo para fallas de corto circuito. El comparador que controla CTED2 de entrada al PIC puede ir a $3/4V_{dd}$. Este proporciona pues el segundo borde para mediciones de tiempo en cables no terminados o una falla abierta.

Un voltaje de 2.5V de referencia se genera utilizando una banda de referencia y un Op-Amp. Este suministro se utilizará como referencia para el convertidor A/D para que coincida con el rango de entrada del A/D y la salida de la CTMU. Esto ayudará a proporcionar a la mejor tiempo de resolución.

RF5 se conecta al no conector BNC a través de una resistencia de 50/75 ohmios. Esto será utilizado para la calibración antes de la medición del tiempo. Una vez más el largo y Capacitancia deben ser minimizadas en este nodo.

6.5.3 Firmware de Microcontrolador

Códigos para la configuración del convertidor A/D

```
void adc_tdr_init (void){
    // Inicializa el ADC
    // Inicia con AD1CON1 = 0x2000;
    AD1CON1bits.ADSIDL = 0; // Este módulo de la operación deja
en reposo
    //FORM[1:0] = 00 fija el ADC los
resultados de enteros sin signo
    AD1CON1bits.FORM1 = 0;
    AD1CON1bits.FORM0 = 0;
    //SSRC[2:0] = 100 fija el trig de CTMU
para accionar el ADC y comenzar una conversión AD1CON1bits.SSRC2 = 0;
    AD1CON1bits.SSRC1 = 0;
    AD1CON1bits.SSRC0 = 0;
    AD1CON1bits.ASAM = 0; // no comienza a muestrear
automáticamente después de que la conversión termina AD1CON1bits.SAMP =
1; // Cuando el ADC se activa comienza a muestrear
    //final del AD1CON1 inicialización del
inicio de ADCON2

    //VCFG[2:0] = 001 este selecciona el
Vref+ como referencia positiva y Vss como referencia negativa.
    AD1CON2bits.VCFG2 = 0;
    AD1CON2bits.VCFG1 = 0;
    AD1CON2bits.VCFG0 = 1;
    AD1CON2bits.CSCNA = 0; //este selecciona un canal utilizando
el bit CHSx y no realice escaneo de entradas.
    // SMPI[3:0] = 0000 Si se utilizan las
interrupciones la interrupción se publica en el final de cada conversión
    AD1CON2bits.SMPI3 = 0;
    AD1CON2bits.SMPI2 = 0;
    AD1CON2bits.SMPI1 = 0;
    AD1CON2bits.SMPIO = 0;
    AD1CON2bits.BUFM = 0; //el Buffer es configurado como un
buffer de dieciséis bits
}
```

```

        AD1CON2bits.ALTS = 0;           //siempre utiliza la configuración de
entrada del multiplexor MUX

ADCON3                                     //final de AD1CON2 inicialización del
        AD1CON3bits.ADRC = 0;         //reloj ADC derivado del sistema de
reloj                                     // SAMC[4:0] = 0001 este
puede iniciar el muestreo cuando los bits de muestreos hayan finalizado o llegue
el disparador
        AD1CON3bits.SAMC3 = 0;
        AD1CON3bits.SAMC2 = 0;
        AD1CON3bits.SAMC1 = 0;
        AD1CON3bits.SAMC0 = 1;

//ADCS[7:0] = 0000 0001 este
configure la conversión del reloj ADC igual que el sistema de reloj
        AD1CON3 = AD1CON3 | 0x0001;
//final del AD1CON3 inicialización del
registro AD1CHS0
        AD1CHS0 = 0;                 //canal 0 negativo = Vr- = Vss
//CH0SA[3:0] = 1000 que selecciona
AN8
        AD1CHS0bits.CH0SA3 = 1;
        AD1CHS0bits.CH0SA2 = 0;
        AD1CHS0bits.CH0SA1 = 0;
        AD1CHS0bits.CH0SA0 = 0;

//final de configuración AD1CHS0 y
configuración de AD1PCFG
        AD1PCFG = 0xFFFF;           //configure todas las entradas como
entradas digitales
        AD1PCFGbits.PCFG8 = 0;       //y luego configura PCFG8 como
entrada analógica
//finaliza la configuración AD así que
lo habilita y retorna
        IFS0bits.AD1IF = 0;
        AD1CON1bits.ADON = 1;
}
Códigos para la configuración del CTMU
//.....
//INIT_CTMU()

```

```

//inicialización de la rutina para la configuración de partes de variables y
//periféricos
//.....
void INIT_CTMU(void) {
    //configuración del CTMU
    //CTMUCON
    _CTMUEN = 0; //asegura que el CTMU esta deshabilitado
    _CTMUSIDL = 0; //CTMU continua corriendo en modo Idle
    _TGEN = 0; //deshabilita el modo de generación de
delay de borde del CTMU.
    _EDGEN = 0; //los bordes son
    _EDGSEQEN = 0; //secuencia de borde no necesaria
    _IDISSEN = 0; //no ground de la fuente de corriente
    _CTTRIG = 0; //salida del Trigger es deshabilitada
if (short == 0)
    {
    _EDG2POL = 1;
    _EDG2SEL = 0x2; //edge2 Fuente = CTED2
else
    _EDG2POL = 0;
    _EDG2SEL = 0x3; //edge2 Fuente = CTED1
    }
    _EDG1POL = 1;
    _EDG1SEL = 0x3; //edge1 Fuente = CTED1
    //CTMUICON
    _IRNG = 0x03; //55uA
    _ITRIM = 1F; //x1F00; //ajuste máximo positivo
    //GIE = 1;
    // enciende el interruptor global una vez hecho
regresa al inicio
}

```

6.5.4 Calibración

Pasamos ahora a la calibración del sistema. Se trata de componentes del sistema que son intrínsecamente inexactos debido a la naturaleza del proceso de semiconductores. La fuente actual es típicamente $\pm 30\%$, y el modelo tope

del A/D es típicamente $\pm 10\%$. Además, tenemos cuestiones como los errores debidos a la disposición, la propagación de problemas con la comparación, y de los puntos de comparación para nombrar unos pocos. Con el fin de alcanzar el 1% de precisión, todas estas fuentes de error se deberán tener en cuenta. Sin embargo, si utilizamos un cristal oscilador basado en fuente de referencia del 1% de precisión se logra sencillamente. La ecuación para el sistema es una función lineal descrita por la ecuación estándar:

$$T_{E2} - T_{E1} = \left(\frac{C}{I} \right) * (V_2 - V_1) + B_{TOFFSET}$$

O dado que $T_{E1} = 0nS$ y $V_1 = 0V$ entonces

$$T = \left(\frac{C}{I} \right) * V + B_{TOFFSET}$$

Teniendo en cuenta que la relación entre la V y T es una ecuación lineal de primer orden podemos resolver para la constante C/I y BTOFFSET haciendo dos mediciones de tiempo cuando el tiempo es conocido. Una vez que se conocen las constantes que podemos usar la ecuación para calcular el tiempo, y

la calibración. Los pasos necesarios para obtener valores de calibración para una línea de transmisión no terminada son los siguientes:

```
/** Esta rutina realiza las siguientes tareas
    1. PORT PINS RF4 y RF5
       a. los configura como
       b. configura RF4 y RF5 LOW estos fuerzan el votaje a J1 a ser
0V
    2. inicializa el A/D
    3. Variable SHORT = 0 este será utilizado por la inicialización del
CTMU para configurar una línea no terminada.
    4. inicializa el CTMU
    5. descarga y libera entrada A/D
    6. configura RF4 cuando RF4 es configurado el voltaje en J1 podra ser
Vdd(R6/(R6+R5)) o Vdd/2 causando que el edge1 ocurra
    7. configura RF5 cuando RF5es configurado el voltaje J1 será Vdd
causando que aparezca edge2. El tiempo entre edge1 y edge2 puede ser un ciclo
de instrucción. Si un ciclo de instrucción es de 100nS entonces el tiempo entre
estos será 100nS así que simulando de una línea de transmisión no terminada
con una longitud eléctrica To de 50nS.
    8. Obtiene los resultados del A/D y los guarda para propósitos de
demostración asumiendo que el A/D regresa su conteo a 123 o 0.3V.
    9. PORT PINS RF4 y RF5
       a. SET RF4 y RF5 LOW
    10. limpia CTMUCON.EDGE1STAT and CTMUCON.EDGE2STAT
    11. descarga la entrada A/D y la libera
    12. configura RF4
    13. NOP
    14. configura RF5 insertando la instrucción NOP del tiempo entre
edge1 y edge2 que puede ser 200nS, simulando la línea de transmisión con una
longitud eléctrica To de 100nS.
    15. Obtiene los resultados del A/D y los guarda para propósitos de
demostración, asumiendo que los resultados del A/D regresan su conteo de246
o 0.6V.
    16. calcula la constante C/I y BTOFFSET

**//
//variables locales

int i;
```

```

void tdr_calibration(void)
{
    // configura RF4 y RF5 Ports

    LATF = 0; //paso 1b

    pulse_en = 0; //paso 1a
    cal_en = 0;

    adc_tdr_init(); //paso 2

    SHORT = 0; //paso 3
    // ahora configure el CTMU
    // paso 4
    ctmu_tdr_init();
    AD1CON1bits.DONE = 0;
    IFS0bits.AD1IF = 0;
    AD1CON1bits.SAMP = 1; //inicializa el muestreo
después que la conversión esta
    Nop();
    Nop();
    Nop();
    Nop();
    TIMER_4_off();
    _IDISSEN = 0; // paso 5
    pulse_out = 1; // paso 6
    cal_out = 1; // paso 7
    ctmucon_mirror = CTMUCON;
    TIMER_4_on();
    AD1CON1bits.SAMP = 0;
    while (AD1CON1bits.DONE == 0)
    {
    }
    tdr_v1_return = ADC1BUF0; // paso 8
    AD1CON1bits.SAMP = 1; // inicializa el
muestreo después que la conversión esta

    LATF = 0; // paso 9

    // Now rearm the CTMU

```

```

CTMUCON = CTMUCON & 0xFFFC;           // paso 10
AD1CON1bits.DONE = 0;
IFS0bits.AD1IF = 0;
_IDISSEN = 1;
Nop();
Nop();
Nop();
Nop();
TIMER_4_off();
_IDISSEN = 0;                           // paso 11
pulse_out = 1;                           // paso 12
Nop();
Nop();
Nop();
Nop();
Nop();                                 // paso 13
cal_out = 1;                              // paso 14
TIMER_4_on();
AD1CON1bits.SAMP = 0;
while (AD1CON1bits.DONE == 0)
{
}
tdr_v2_return = ADC1BUF0;                 // paso 15
AD1CON1bits.SAMP = 1;                     // inicializa el
muestreo después que la conversión esta
// ahora calcula C/I
para un cable abierto
v2_v1 = tdr_v2_return - tdr_v1_return;
c_div_i_opn =(600-100)/(v2_v1);

Boffset_opn = 0;                          // paso 16

// paso 16
}

```

Cuando la medida de la longitud eléctrica de una línea de transmisión termina en un corto, para una mejor precisión diferentes pares de valores se debe utilizar para C/I y BTOFFSET. Este es un camino diferente, porque se

utiliza para edge2. Además edge2 es un borde y la comparación negativa puede tener un poco diferente a una respuesta negativa ventaja frente a un borde.

Los pasos necesarios para obtener valores de calibración para una línea de transmisión en cortocircuito son:

1. PUERTO PINS RF4 y RF5
 - a. Configurar como salidas
 - b. AJUSTE RF4 y RF5 LOW
2. Iniciar A / D
3. Variable SHORT = 1 será usado por la CTMU de inicialización para configurar la línea de cortocircuito
4. Iniciar CTMU
5. Aprobación de la gestión A / D de entrada y la liberación
6. Configura RF4 cuando RF4 se establece la tensión en J1 puede ser $V_{dd} (R_6 / (R_5 + R_6))$ o $V_{dd} / 2$ Causando que edge1 se produzca
7. Limpia RF4 cuando RF4 se elimina la tensión en J1 sea 0V o causando una transición negativa de CTED2 utilizados para edge2. Este simula una línea de transmisión terminada con un corto y una longitud eléctrica de $T_o = 50nS$
8. Obtener A/D y guardar asumiendo de nuevo A/D de lectura de 123 o -0,3 V
9. PUERTO PINS RF4 y RF5
 - a. AJUSTE RF4 y RF5 LOW
10. Borrar CTMUCON.EDGE1STAT y CTMUCON.EDGE2STAT
11. Descarga el A/D de entrada y la libera
12. Establecer RF4
13. NOP
14. Limpia RF4 cuando RF4 se elimina la tensión en J1 será 0V o causando la transición negativa de CTED2 utilizados para edge2. Este simula una línea de transmisión terminada con un corto y una longitud eléctrica de $T_o = 100nS$
15. Obtener A/D y lo guarda guarda asumiendo de nuevo que el A/D esta leyendo una cuenta de 246 lecturas o 0,6 V
16. Calcular las constantes C/I y B/OFFSET

// Permite ahora obtener el valor para el corto

// Configura los puertos RF4 y RF5
// Configura los puertos RF4 y RF5

```

LATF = 0; //Paso 1b

pulse_en = 0; //Paso 1a
cal_en = 0;

//Paso 2 Paso 2 no se necesita
nuevamente

SHORT = 1; //Pasop 3

// Ahora se configure el CTMU
ctmu_tdr_init(); //Paso 4
AD1CON1bits.DONE = 0;
IFS0bits.AD1IF = 0;
AD1CON1bits.SAMP = 1; //inicia Muestreo automáticamente
después de completar la conversión
Nop();
Nop();
Nop();
Nop();
TIMER_4_off();
_IDISSEN = 0; //Paso 5
pulse_out = 1; // Paso 6
pulse_out = 0; // Paso 7
ctmucon_mirror =CTMUCON;
TIMER_4_on();
AD1CON1bits.SAMP = 0;
while (AD1CON1bits.DONE == 0)
{
}
tdr_v1_return = ADC1BUF0; // Paso 8
AD1CON1bits.SAMP = 1; //Inicia el muestreo
automáticamente después de completar la conversión
LATF = 0; // Paso 9

// Se rearma el CTMU
CTMUCON = CTMUCON & 0xFFFC; // Paso 10
AD1CON1bits.DONE = 0;
IFS0bits.AD1IF = 0;
_IDISSEN = 1;

```

```

Nop();
Nop();
Nop();
Nop();
TIMER_4_off();
_IDISSEN = 0; // Paso 11
pulse_out = 1; // Paso 12
Nop();
Nop();
Nop();
Nop(); // Paso 13
pulse_out = 0; // Paso 14
TIMER_4_on();
AD1CON1bits.SAMP = 0;
while (AD1CON1bits.DONE == 0)
{
}
tdr_v2_return = ADC1BUF0; // Paso 15
AD1CON1bits.SAMP = 1; //Inicia el muestreo
automaticamente despuesde completer la conversion
// ahora se calcula el C/I para
un cable abierto
v2_v1 = tdr_v2_return - tdr_v1_return;
c_div_i_shrt =(600-100)/(v2_v1);
Boffset_shrt = 600 - c_div_i_shrt*tdr_v2_return;

```

6.6 Comunicación del módulo de adquisición de datos

Microchip permite mediante la programación de sus PIC realizar una comunicación PIC - PC de forma sencilla y eficaz.

Para ello usaremos la librería proporcionada por el propio fabricante llamada MPUSBAPI, gracias a la cual podemos escribir y leer en el PIC.

La velocidad de estos dispositivos es teóricamente de 12Mbit/seg, pero para ello necesitaríamos una programación compleja teniendo que abrir muchos pipes (tuberías) para poder alcanzar dicha velocidad.

6.6.1 Fundamentos

El USB es una comunicación serie de alta velocidad. Ha sustituido en gran medida al famoso puerto serie RS-232, ello se debe en gran medida a que el USB utiliza señales digitales TTL, mientras que el puerto serie utiliza señales digitales entre -12 y +12 voltios, además de la gran diferencia de velocidad de transmisión entre ambos dispositivos.

Existen en el mercado infinidad de conectores USB, entre los que destaca el puerto MiniUSB debido a su alta estandarización en dispositivos portátiles, sin dejar de lado al conector USB "normal" el cual usa nuestros ordenadores personales.

La velocidad de transferencia ha ido aumentando rápidamente a lo largo de estos años. Cabe destacar 3 de estos:

USB 1.0: baja velocidad (hasta 1.5Mbit/seg) usado en dispositivos de interfaz humana (HID) como ratones y teclados.

USB 2.0: Alta Velocidad (hasta 480Mbit/seg) unos 60Mg/seg.

USB 3.0: Giga Velocidad, en fase experimental, (hasta 4.8Gbit/seg) unos 600 Mg/seg. Los buses son mucho más rápido debido a la incorporación de una fibra óptica al enlace de cobre.

La transmisión del USB se realiza mediante un cable de cobre de par trenzado con una impedancia de unos 90 ohm llamados D+ y D-. Estos pueden dar energía a dispositivos externos, con una tensión de 5V y un máximo consumo de 500mA.

6.6.2 Teoría

Vamos a usar un PIC24FJ64GB106 que gestiona mediante software la comunicación USB2.0 con nuestro ordenador, el cual configuraremos a nuestro gusto, donde puede agregar el nombre de la empresa o equipo deseado y el nombre de identificación de éste.

También se configuran dos parámetros esenciales en todo dispositivo que son el VID e ID.

VID (Vendor ID):

Es el identificador de la empresa. Cada empresa tiene un identificador, el cual puede vender diferentes productos a los que se les incluye el ID.

ID (Product ID):

Es el identificador del producto. Por tanto un dispositivo tendrá un VID e ID fijos que les hace únicos con lo que no pueden sufrir incompatibilidad con otros dispositivos.

Estos son únicos para cada dispositivo que existe en el mercado, ya que si hubiese en nuestro ordenador dos dispositivos con el mismo VID/ID causarían conflictos entre ellos, impidiendo el correcto funcionamiento de ambos.

6.6.3 Comunicación módulo de adquisición de datos y LABVIEW

La comunicación del módulo de adquisición de datos hacia el LabVIEW lo realizamos haciendo un llamado al dispositivo mediante la librería externa ***mpusbapi.dll*** liberada por MICROCHIP TECHNOLOGY INC., para la comunicación de sus componentes del tipo USB.

En LabVIEW figura 6-10, se realiza el llamado de esta librería externa utilizando la función *Call Library Function Node*:

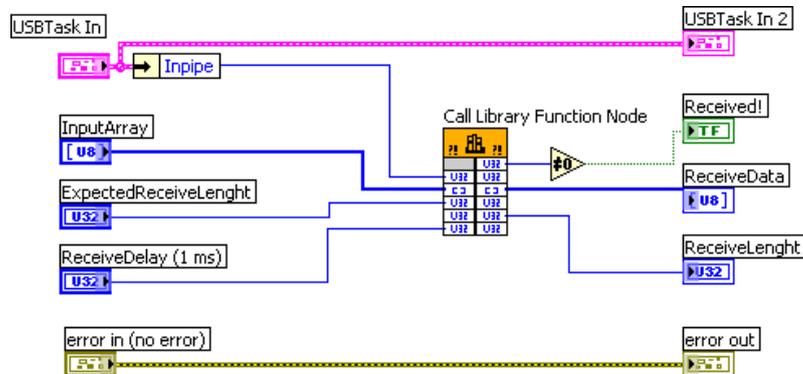


Figura 6-10 Call Library Function Node para llamado de librería mpushapi.dll

La Figura 6-11 muestra que dentro de esta función se puede especificar donde se localiza localmente la librería externa o archivo DLL, para cada uno de los vi's que la utilizan.

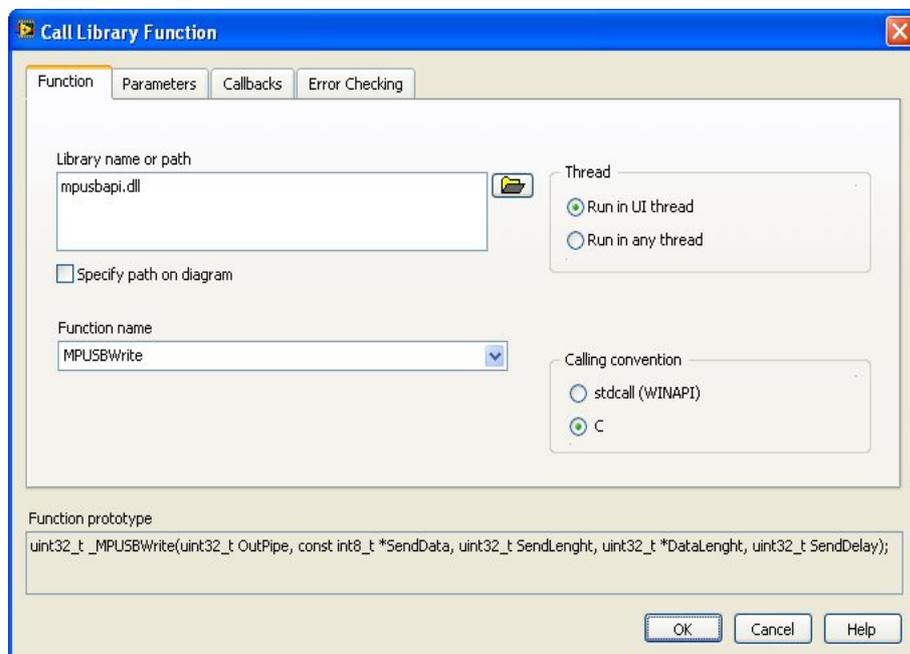


Figura 6-11 Propiedades de la función Call Library Function Node

6.7 Interfaz grafica en LABVIEW

La representación grafica o elemento virtual se presenta en la figura 6-12, en este instrumento virtual es que se observan los resultados de las medidas realizadas al elemento de prueba o EBP, donde se obtienen las fallas comunes y la medida de longitud del cable total.



Figura 6-12 Interfaz grafica virtual para TDR

El primer paso para la utilización del instrumento virtual es la presionar la función o botón INICIAR, el cual hace que el módulo de adquisición de datos

envíe el pulso en todo el cable o elemento de prueba, luego que el pulso viaje sobre todo el elemento, este produce una señal que se refleja dependiendo del estado al cual este sometido el EBP.

Al someter el EBP a un corto circuito al final de la línea este enciende el indicador de “corto circuito”, de igual forma lo hace al verificar que se presenta un estado de cable abierto. El módulo de adquisición de datos está programado para realizar los cálculos tanto de cable abierto como corto circuito, y también por otro lado envía los datos de los cálculos realizados para conocer la longitud del cable.

En el instrumento virtual también se puede observar un indicador de “Estado de datos”, este indicador hace referencia al estado de conexión del módulo de adquisición de datos y el instrumento virtual en labview. Una vez se estén realizando una transferencia de datos desde el módulo hacia el computador el indicador se mantendrá en estado activo “tildante”.

Una vez que se obtiene toda la información necesaria, “forma de onda de la falla” y estado del cable se procede a presionar el botón “DETENER” para inhabilitar el módulo de adquisición de datos y así hacer uso de los datos obtenidos.

6.8 Análisis Financiero

El costo de los elementos que intervienen en el módulo de adquisición de datos para el TDR, oscila entre US\$10,47 y US\$20 dólares estadounidenses. Esto cumple con uno de los objetivos esperados en el proyecto, que es el de disminuir costos. Este valor no incluye los costos de fabricación de la placa PCB, conector USB, u otras funciones que puedan ser incluidas. En seguida vamos a mostrar los precios de los componentes utilizados para la realización del TDR virtual. La misma fue realizada considerando diferentes suplidores:

Dispositivo	Precio Unidad US\$	Suplidor
LMH6559	0.95	http://www.national.com
LT1712	4.00	http://www.linear.com
PIC24FJ64GB106	3.64	http://www.microchip.com
LM385Z	0.61	http://parts.digikey.com
LM321	0.22	http://www.national.com
BNC conector	2.31	http://www.mouser.com
Resistencias/Cap	3.00	N/A
TOTAL	14.73	

Como se puede apreciar, el costo es significativamente menor en comparación a los precios de equipos TDR standalone existentes en el mercado, los cuales tienen unos precios que oscilan entre US\$800 y US\$2000 dolares.

Capitulo 7 Marco Jurídico

Un elemento indispensable en la gestión del desarrollo de este proyecto, es el conocimiento actualizado de las patentes y las leyes que regulan del lenguaje de programación en el cual se desarrollan las aplicaciones que son utilizadas en el TDR. El TDR Virtual requiere la utilización de LabVIEW para el desarrollar el elemento Virtual, el cual controla y hace la representación grafica de los datos obtenidos por el módulo de adquisición de datos, el cual requiere de licencia. La universidad APEC cuenta con la versión LabVIEW 8.2 Embedded Edition (registro M62X92592), licencia para Facultad y de Campus.

7.1 Licencias Departamentales, de Facultad y de Campus

Debido al amplio uso de productos de National Instruments, muchas universidades han expresado interés en acuerdos de licencias. Una licencia es su la opción para aplicaciones de instalaciones grandes en las aulas y para propósitos de investigación. Las licencias de sitio para un departamento, facultad

o campus se venden por separado para propósitos de investigación y para impartir clases.

Las licencias para impartir clases se venden por separado por un solo pago y un pequeño pago de mantenimiento anual. Las licencias para investigación y desarrollo son renovadas cada año con un pago anual.

El uso de licencias para dar clases es legítimo si se cumple con los siguientes requisitos:

1. Aplicación de un examen común a los estudiantes al final del semestre.
2. Utilización de tareas o proyectos similares para calificar a los estudiantes.

7.2 ¿Con qué frecuencia se distribuyen las versiones más recientes de los conjuntos de software?

National Instruments distribuye las versiones más recientes de software (Software Solution Set) cada seis meses (noviembre y mayo). Usuarios que han comprado un acuerdo de mantenimiento van a recibir las versiones más recientes de software y manuales en estos meses también. Hemos elegido este calendario para que los usuarios académicos puedan actualizar sus sistemas durante los recesos de invierno y verano.

Sobre las políticas de la universidad, generalmente cuando se hacen investigaciones usando los recursos de esta la propiedad intelectual le pertenece. Hay casos puntuales donde esto se negocia pero varía mucho.

CONCLUSIÓN

Al finalizar este trabajo de investigación, se demostró la validez de todo el planteamiento plasmado durante el proceso del mismo, de igual forma queda clara la propuesta presentada por este grupo de estudiantes de ingeniería electrónica en comunicaciones, de que con las herramientas ya existentes en nuestro entorno de prácticas en el laboratorio de telecomunicaciones de la universidad APEC, es posible llevar a cabo el desarrollo de otras más complejas que facilitarían el aprendizaje en determinadas áreas, permitiendo así un dominio más sólido y claro de asignaturas impartidas a los estudiantes de ingeniería electrónica en comunicaciones como es el caso de sistemas de transmisión y radio frecuencias TEC-634.

Durante el proceso de investigación, descubrimos un mundo de facilidades que nos ofrece LabVIEW como software y herramienta práctica para el diseño de múltiples proyectos como el desarrollado en este trabajo.

Con la implementación de este proyecto los estudiantes de ingeniería electrónica de la universidad APEC contarán con la ayuda de un módulo didáctico en el laboratorio de telecomunicaciones que les facilitara realizar mediciones de cables coaxiales RG-59 o RG-58 para poder determinar en los mismos, la consistencia de la impedancia a lo

largo de la línea de transmisión, la calidad de los conectores, la ubicación de los conectores, la longitud de las líneas de transmisión, fallas debido a cortos, debido a cable abierto.

LÍNEAS FUTURAS

Entre las posibles líneas futuras de este trabajo destacamos las siguientes:

- El desarrollo práctico del TDR virtual, realizando el proyecto de forma física y completamente funcional listo para su utilización en el laboratorio adicionando los análisis que puede realizar un TDR que están fuera de las limitaciones de este proyecto como son: fallas de tipo capacitivas, distancia de la falla, detección de conectores, conectores y conectores mal terminados.
- Otro proyecto de mucho interés a realizar partiendo de los principios de este proyecto es el OTDR u “Reflectómetro de Dominio del Tiempo Óptico”, el cual realiza mediciones y detección de fallas en líneas de fibras ópticas.

Bibliografía

- Angulo Usategui, José María.; Angulo Martínez, Ignacio y Romero Yesa, Susana. (1999). *MICROCONTROLADORES PIC Diseño practico de aplicaciones*. España: McGraw-Hill, 2da. Edición.
- Bartling, Jim. (2009). *Low Cost, High-Resolution Time-Measurement Application*. Microchip Technology.
- Biel Solé, Domingo; Mànuel Làzaro, Antoni; Olivé Duran, Joaquim; Prat Tacias, Jordi y Sànchez Robert, Francesc J. (2001). *Instrumentación Virtual: Adquisición, Procesado y análisis de Señales*. Barcelona: Ediciones UPC.
- Creus Sole, Antonio. (2005). *Instrumentación Industrial*. Barcelona: Alfaomega Grupo Editor, 7ª Edición.
- Enrique Mandado, Perfecto Mariño, Alfonso Lago, Ed. 1ra. (1995). *Instrumentación electrónica. Introducción a la instrumentación electrónica* (pp. 1- 9), *Instrumentos de medida de señales analógicas* (pp. 11-37). Recuperado de la base de datos Books.google.es.
- H. Bishop, Robert. (2006). *LabVIEW 7 Express Student Edition*. United States: Pearson Education.

- Instrumentación virtual, capítulo 7. (n.d.). Extraído el 29 julio del 2009 desde http://www.inele.ufro.cl/apuntes/Instrumentacion_y_Control/Ivan_Velazquez/Catedra/Capitulo%207.%20Instrumentacion%20Virtual.pdf
- Irwin, J. David. (2003). *Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería*. España: Prentice Hall, 5ta. Ed.
- Manuel Lázaro Antoni, Biel Solé Domingo, Olivé Duran Joaquín, Prat Tasia Jordi, Sánchez Robert Francesc J., Ed. (2001). Instrumentación Virtual adquisición, procesado y análisis de la señal. *Software para el control de instrumentación y el diseño de instrumentos virtuales* (pp. 227-268). Recuperado de la base de datos Books.google.es.
- Microcontroladores PIC, (n.d.). Extraído el 29 de julio del 2009 desde <http://perso.wanadoo.es/pictob/micropic.htm>.
- New Microchip PIC18 48MHz Microcontrollers with USB (Eric Lawson) nov. 8, 2004. Extraído el 29 de Julio del 2009 desde http://www.microcontroller.com/news/microchip_48mhz_pic.asp
- Palacios Municio Enrique, Remiro Domínguez, Fernando y Lopez Perez, Lucas Jose. (2009). *Microcontrolador PIC16F84, Desarrollo de Proyectos*. Ra-Ma.

- Ramón Pallas Areny, Ed. 1ra. (1993). Adquisición y distribución de señales. Disponible en <http://books.google.com.do/books?id=sYavwLAI2k4C&pg=PA1&dq=adquisicion+y+distribucion>.
- Sensores y adquisición de datos, capítulo 2. (n.d.). Extraído el 29 julio del 2009 desde http://es.geocities.com/idase_ecu/pdfs/cap2_sya.pdf
- The ARRL. (2004). *The Antenna Book*. Inglaterra: ARRL, 19th Edición.
- Transductores, capítulo 1. (n.d.). Extraído el 29 de julio del 2009 desde http://www.gii.upv.es/personal/gbenet/dispositivos_ctrl/tema_transductores/INTRODUCCION%20A%20LOS%20TRANSDUCTORES.pdf.

Glosario

CTMU: módulo de Unidad de Medición de Tiempo Capacitivo (por sus siglas en inglés) se utiliza para medir tiempo y capacitancia.

VHF: (Very High Frequency) es la banda del espectro radio eléctrico que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz.

UHF: (siglas del inglés: Ultra High Frequency, frecuencia ultra alta) es una banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz.

SWR: La relación de onda estacionaria (ROE) o Standing Wave Ratio (SWR) designa la relación entre el la mayor y la menor amplitud de onda después de la reflexión.

Impedancia: La impedancia es una magnitud que establece la relación (cociente) entre la tensión y la intensidad de corriente

Balun: dispositivo adaptador de impedancias que convierte líneas de transmisión simétricas en asimétricas. La inversa también es cierta: el balun es un dispositivo reversible.

Galga extensométrica: es un sensor basado en el efecto piezorresistivo. Un esfuerzo que deforma a la galga producirá una variación en su resistencia eléctrica.

Osciloscopio: es un instrumento de medición electrónico para la representación gráfica de señales eléctricas que pueden variar en el tiempo.

CRT: El Tubo de Rayos Catódicos (CRT del inglés Cathode Ray Tube) es un dispositivo de visualización inventado por Carl Ferdinand Braun. Es empleado principalmente en monitores, televisiones y osciloscopios.

Semiconductor: Un semiconductor es una sustancia que se comporta como conductor o como aislante dependiendo de la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

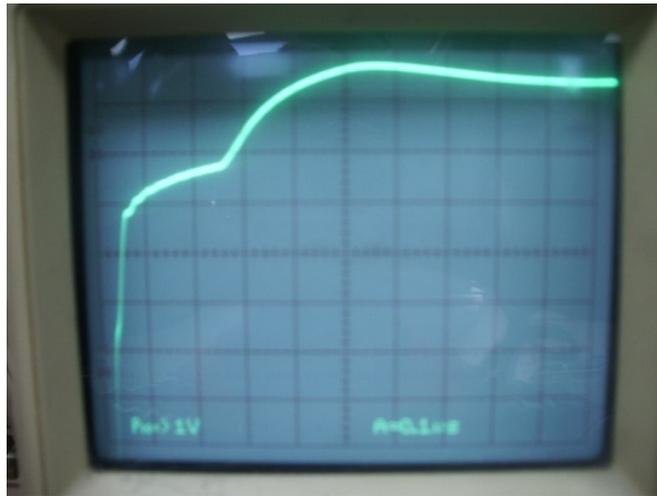
Anexos



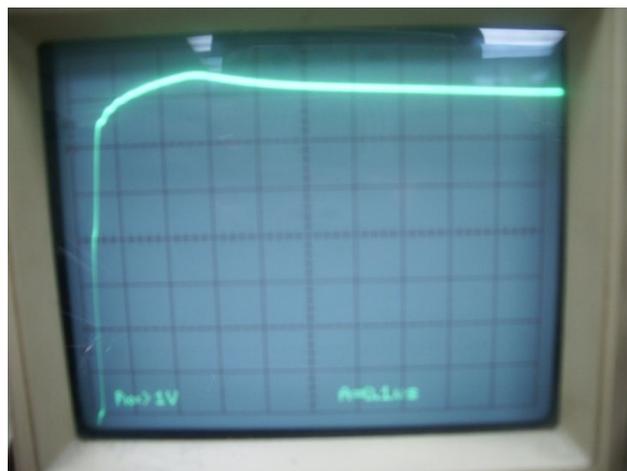
Técnico de Codetel y TDR 3M Dynatel 965DSP para par trenzado



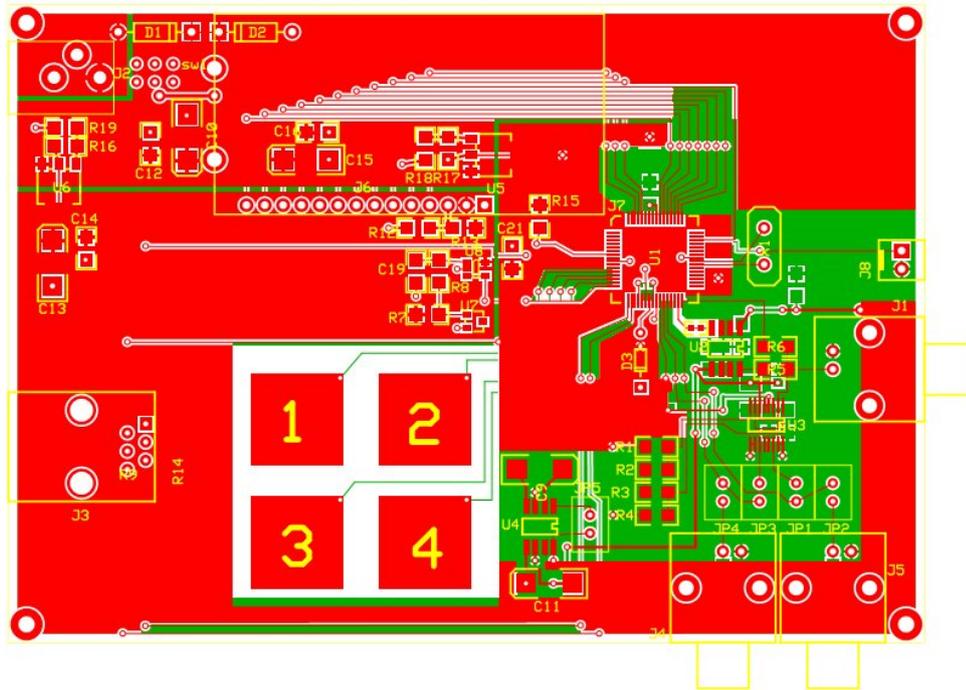
TDR 3M Dynatel 965DSP utilizado en la empresa de telecomunicaciones CODETEL, para pruebas y análisis de cables de par trenzado



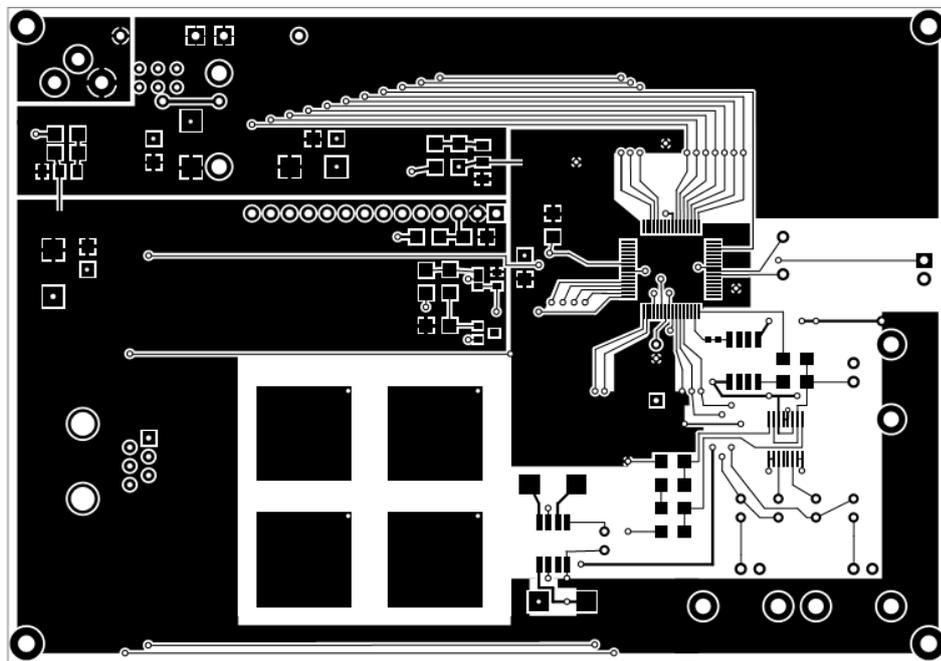
Forma de onda de cable abierto, realizada en el laboratorio de telecomunicaciones utilizando un TDR fabricado mediante un NTE555 de "Antennas Handbook-ARRL-19th Edition-2004" y un osciloscopio convencional a 100Mhz.



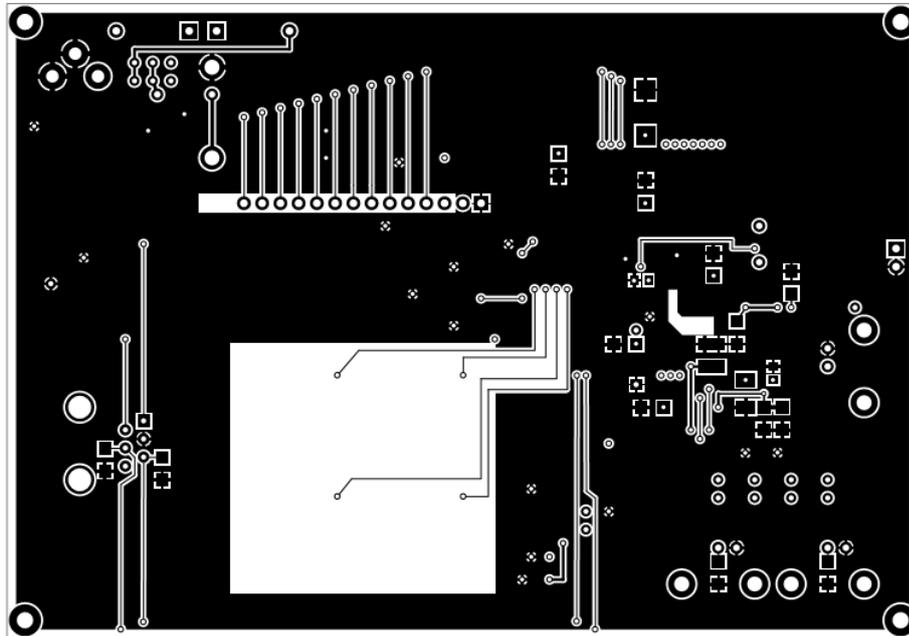
Forma de onda de cable con terminación perfecta, realizada en el laboratorio de telecomunicaciones utilizando un TDR fabricado mediante un NTE555 de "Antennas Handbook-ARRL-19th Edition-2004" y un osciloscopio convencional a 100Mhz.



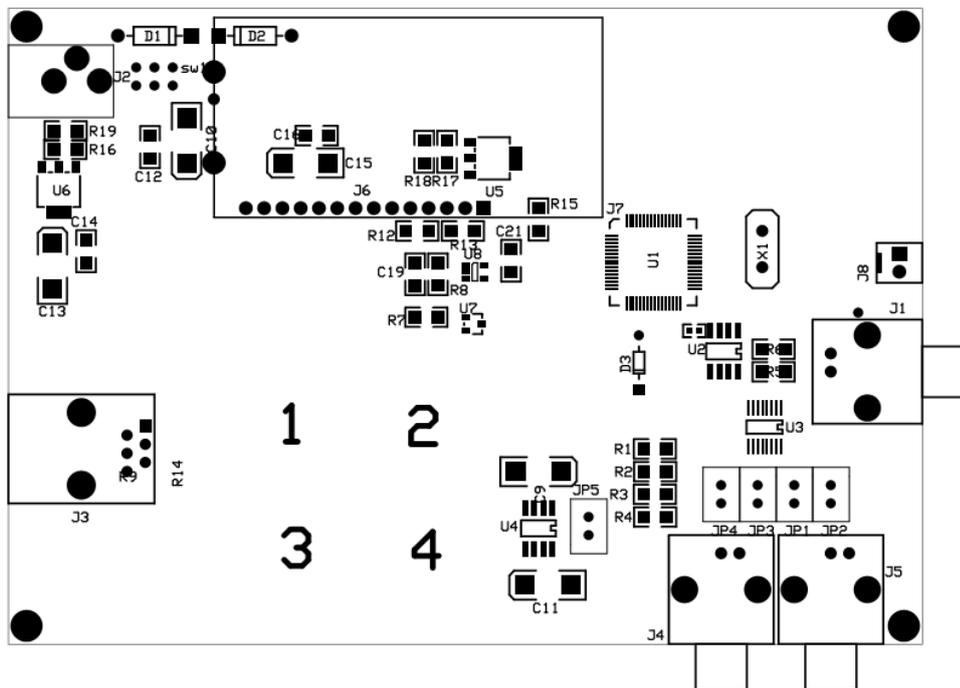
Circuito PCB TDR- completo doble capa



Circuito PCB TDR – Capa superior de cobre



Circuito PCB TDR – Capa inferior de Cobre



Circuito PCB TDR – Mascara superior

Universidad Acción Pro Educación y Cultura UNAPEC



DECANATO DE INGENIERIA E INFORMATICA
ESCUELA DE TECNOLOGIA

“Reflectómetro de dominio de tiempo (TDR) virtual como módulo didáctico desarrollado en Labview utilizando micro controladores para el Laboratorio de Telecomunicaciones de UNAPEC en R.D.”

Sustentantes:

Br. Carlos Alfredo Olalla Báez
Matricula 2001-1511

Br. Donovan Joel Rodríguez Peguero
Matricula: 2002-0887

Br. Rogelio Sebastián Tejeda Méndez
Matricula: 2003-1291

Asesores:

Ing. Santo Navarro

Ing. Luís Pereza Méndez

**MONOGRAFIA PARA OPTAR POR EL TITULO DE INGENIERO
ELECTRONICO EN COMUNICACIONES DISTRITO NACIONAL,
REPUBLICA DOMINICANA 2009**

1. Título

Reflectómetro de dominio de tiempo (TDR) virtual como módulo didáctico desarrollado en Labview utilizando micro controladores para el Laboratorio de Telecomunicaciones de UNAPEC en R.D.

2. Planteamiento del problema

La Universidad APEC como entidad destinada a fines educativos y envueltos en un amplio mercado competitivo se ha visto en la obligación de implementar herramientas que la coloquen en un nivel de preferencia en el área de ingeniería electrónica en Telecomunicaciones utilizando recursos tecnológicos que se encuentren a la vanguardia y que faciliten al estudiante desarrollarse mejor en algunas asignaturas como es el caso de Sistemas de transmisión y radio frecuencia, una de las asignaturas principales del pensum.

Uno de los recursos destinados a la asignatura de sistemas de transmisión y radio frecuencias TEC-634 sería la utilización de un Reflectómetro de Dominio de Tiempo (TDR), para estudiar el comportamiento de propagación de señales mediante un conductor eléctrico, pudiendo este ser desarrollado utilizando los recursos disponibles en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad APEC, evitando con esto incurrir en gastos para la adquisición de un equipo que cumpla con las especificaciones de un Reflectómetro de Dominio de Tiempo (TDR).

Además, de lo anteriormente expuesto sería una herramienta didáctica que facilitaría al estudiante el estudio de los fenómenos asociados a la

propagación de ondas electromagnéticas, localización defectos en cableados de cobre (abierto, corto circuito, y pérdidas parciales) en la materia de Sistemas de Transmisión de Radio Frecuencia.

3. Objetivos de la investigación

a. *Objetivos Generales*

Desarrollar un Reflectómetro de dominio de tiempo virtual como módulo didáctico en Labview siendo esta una herramienta de medida y adquisición de datos a utilizar en el laboratorio de telecomunicaciones de la Universidad APEC en República Dominicana.

b. *Objetivos Específicos u Operativos*

- Diseñar un módulo de adquisición de datos de bajo costo para la implementación del sistema a investigar.
- Desarrollar una herramienta para facilitar la metodología docente de la institución en el área de telecomunicaciones.
- Comunicar la interfaz del módulo de adquisición de datos con el computador al puerto USB por medio de librerías DLLs.
- Desarrollar los algoritmos de programación en Labview y el firmware para el micro controlador.
- Diseñar la interfaz gráfica virtual por la cual se controlara el TDR en Labview.

- Disminuir los costos en la adquisición de nuevas herramientas.

4. Justificación del Trabajo de grado

La universidad APEC como entidad destinada a fines educativos y envueltos en un amplio mercado competitivo se ha visto en la obligación de implementar herramientas que la coloquen en un nivel de preferencia en el mercado educativo utilizando recursos tecnológicos que se encuentren a la vanguardia en lo que a telecomunicaciones se refiere de manera que estos últimos resultan sumamente costosos para su adquisición.

Por las razones anteriormente mencionadas las que llevarán a la investigación y desarrollo de nuevas alternativas para poder adquirir instrumentos y herramientas utilizando los recursos disponibles en la universidad sin la necesidad de incurrir en gastos adicionales por parte de la institución para ser utilizado en el laboratorio de telecomunicaciones.

El sistema de control e instrumentación basado en Labview, representará una importante mejora ante los demás equipos ya disponibles en el laboratorio de telecomunicaciones.

5. Tipos de investigación

La metodología a seguir en este trabajo de grado se llevara a cabo a través de los métodos de estudio: descriptivo y explicativo.

Esta investigación será descriptiva, porque se necesita dar a conocer que es el TDR y su interacción con un entorno gráfico virtual, para ser utilizado como módulo didáctico en el laboratorio de telecomunicaciones de la universidad APEC R.D. Esto, nos llevara a especificar las partes o componentes más importantes de nuestro objeto de estudio. Será necesario medir y evaluar diversos aspectos y dimensiones de los componentes, pues en ellos se describe el propósito de la herramienta. Es importante; también describir los pasos para que el usuario pueda utilizar la herramienta de modo que sea de utilidad y como complemento de estudio en la asignatura de Sistemas de Transmisión y radio Frecuencia.

Una vez descrita cada parte de nuestro objeto de estudio, existirá una relación entre los conceptos o variables establecidas, las cuales será necesario explicar sus razones de causas, funcionamiento, el porqué ocurren y cuales serian las condiciones para que estén presentes. Es por tal razón que la metodología también será explicativa.

6. Marco de referencia

Marco Teórico

El método general para evaluar cualquier sistema electromagnético implica la resolución de las ecuaciones de Maxwell en el dominio del tiempo. El planteo de tal problema tendría en cuenta todos los efectos de las propiedades eléctricas y geométricas del sistema incluyendo los efectos de la línea de transmisión. Todo este método sería complicado para evaluar un simple conector por ejemplo, y aun más si se quiere evaluar una estructura más compleja.

Por esta razón se han desarrollado varios tipos de métodos para analizar la integridad de la señal a través de un elemento bajo prueba (EBP).

Estos métodos comprenden el uso de instrumental complejo como analizadores de redes o métodos de barrido de frecuencias que vuelven tediosa la operación. Por esto, se prefiere el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), cuando se lo compara con otras técnicas, este método provee una mirada más directa e intuitiva a las características del EBP.

El Reflectómetro de dominio del tiempo (TDR) es un instrumento electrónico usado para caracterizar y localizar los defectos en cables metálicos (por ejemplo, los pares trenzados de alambre, cables coaxiales) y, en otro tipo de OTDR, fibras ópticas.

Son imprescindibles para la conservación y mantenimiento de telecomunicación. Con ellos se pueden detectar aumentos de los niveles de la resistencia en empalmes y conectores que se corroen, y disminución de aislamiento por degradación y absorción de la humedad, etc. Los TDR son instrumentos muy útiles para medidas de mantenimiento, donde ayudan a determinar la existencia y la ubicación de empalmes de cable. Las aplicaciones nuevas de TDR incluyen aislar los puntos de fallo.

Método de operación

Fundamento

Un TDR emite un pulso muy corto en el tiempo. Si el conductor es de una impedancia uniforme y está apropiadamente terminado, el pulso transmitido se absorberá en la terminación final y no se reflejará ninguna señal de vuelta hacia el TDR. En cambio, si existen discontinuidades de impedancia, cada discontinuidad creará un eco que se reflejará hacia el TDR (de ahí su nombre). Los aumentos en la impedancia crean un eco que refuerza el pulso original, mientras que las disminuciones en la impedancia crean un eco que se opone al pulso original. El resultado del pulso medido en la salida/entrada al TDR se representa o muestra como una función del tiempo y, dado que la velocidad de la propagación de la señal es relativamente constante para una impedancia dada, puede ser leído como una función de la longitud de cable. Esto es semejante en su funcionamiento al del radar.

A causa de esta sensibilidad a las variaciones en la impedancia, un TDR puede utilizarse para verificar las características de impedancia, las ubicaciones de empalmes y conectores, y las pérdidas asociadas en un cable, estimando tanto la longitud del mismo, como cada discontinuidad del cable que será detectada como una señal en forma de eco.

Labview:

Es una herramienta gráfica para pruebas, control y diseño mediante la programación. El lenguaje que usa se llama lenguaje G, donde la G simboliza que es lenguaje Gráfico.

Micro controlador

Es un circuito integrado programable que contiene todos los componentes necesarios para controlar el funcionamiento de una tarea determinada, como el control de una lavadora, un teclado de ordenador, una impresora, un sistema de alarma, etc.

Marco conceptual

TDR: Reflectómetro de dominio de tiempo

Convertidor A/D: son dispositivos electrónicos que establecen una relación biunívoca entre el valor de la señal en su entrada y la palabra digital obtenida en su salida. La relación se establece en la mayoría de los casos, con la ayuda de una tensión de referencia.

Instrumento virtual (VI): es un módulo software que simula el panel frontal de instrumentos de un sistema de medidas. Y apoyándose en elementos hardware accesible por el computador.

Cable coaxial: es un cable utilizado para transportar señales eléctricas de alta frecuencia que posee dos conductores concéntricos, uno central, llamado positivo o vivo, encargado de llevar la información, y uno exterior, de aspecto tubular, llamado malla o blindaje, que sirve como referencia de tierra y retorno de las corrientes.

Impedancia: es una magnitud que establece la relación (cociente) entre la tensión y la intensidad de corriente. Tiene especial importancia si la corriente varía en el tiempo, en cuyo caso, ésta, la tensión y la propia

impedancia se notan con números complejos o funciones del análisis armónico.

Voltaje: (también llamado fuerza electromotriz o potencial) entre dos puntos en un circuito como la diferencia en el nivel de energía de una unidad de carga localizada en cada uno de los dos puntos.

Corriente: es la razón de cambio de la carga con respecto al tiempo.

Pulso eléctrico: Es una señal discontinua que se caracteriza por poseer una naturaleza discreta con variaciones de voltaje o corriente que, en determinados instantes, aumentan o disminuyen con brusquedad de forma teóricamente instantánea y en realidad casi instantánea.

Atenuación: Atenuación es la reducción de nivel de una señal, cuando pasa a través de un elemento de un circuito, o la reducción en nivel de la energía de vibración, cuando pasa a través de una estructura. La atenuación se mide en Decibeles, pero también se puede medir en porcentajes.

Decibel: es una unidad relativa de una señal, tal como la potencia, voltaje, etc. Los logaritmos son muy usados debido a que la señal en decibeles (dB) puede ser fácilmente sumada o restada y también por la razón de que el oído humano responde naturalmente a niveles de señal en una forma aproximadamente logarítmica.

Marco Espacial

El estudio de esta monografía está delimitado al Laboratorio de Telecomunicaciones de la universidad APEC.

Marco Temporal

Esta investigación será realizada durante el periodo junio-agosto del año 2009.

Métodos de la investigación

La primera fase de la investigación será diseñar la parte física, que servirá de interfaz para poder adquirir los datos desde el mundo real e introducirlos al computador.

La segunda fase, es comunicar la interfaz física con el computador mediante el puerto USB utilizando librerías dlls.

La tercera fase será desarrollar los algoritmos en el entorno de programación gráfico LABVIEW, con el objetivo de manipular la interfaz desde una consola virtual.

La cuarta fase de esta investigación es la creación de la interfaz gráfica del usuario, siendo esta la forma por la cual se podrá comunicar de forma visual con el módulo de adquisición de datos.

En la quinta fase de esta investigación se realizará la documentación de acuerdo a las medidas y pruebas realizadas, en conjunto con las especificaciones del equipo finalmente desarrollado.

8. Tabla de contenido

El capítulo I se presenta el Reflectómetro de dominio de tiempo, su método de operación y fundamentos de operación. El capítulo II hace referencia a la instrumentación tanto electrónica como virtual. El capítulo III, se introduce el entorno de programación gráfico Labview. El capítulo IV, se presenta las herramientas de programación. El capítulo V, se presentan los micro controladores, su funcionamiento, aplicaciones y características generales.

Índice Propuesto

Marco Teórico

Resumen

Introducción

Planteamiento del problema

Propuesta de la Investigación

Objetivo de la Investigación

Objetivos Generales

Objetivos Específicos

Hipótesis

Ubicación del área de estudio

Capítulo 1: Reflectómetro de dominio de tiempo (TDR)

1.1.0 Que es el Reflectómetro de dominio de tiempo

1.2.1. Características

1.2.2 Principios de operación

1.2.3. Funcionamiento

Capítulo 2: Instrumentación

2.1.0 Que es la instrumentación

2.1.1 Sensores

2.1.2 Transductores

2.2.1 Acondicionamiento de señales

2.3.0 Instrumentación virtual

2.3.1 ¿Que es la instrumentación Virtual?

2.3.2 ¿Cómo construir un instrumento virtual?

Capítulo 3: Adquisición de datos

3.1.0 Proceso de adquisición de datos

3.1.2 Tiempo de de conversión

3.1.3 La etapa de acondicionamiento de la señal

Capítulo 4: Herramientas de Programación

4.1.0 Herramienta grafica de programación labview

4.1.1. Características

4.1.2 Utilidad de Labview

4.1.3 Labview para procesamiento digital de señales

Capítulo 5: Micro controladores

5.1.0 Micro controladores PIC

5.1.1 Características

5.1.2 Funcionamiento

5.2.0 Alimentación de un PIC18F2550

5.2.1 Puertos de entrada/salida

5.2.2 Aplicaciones

Marco Metodológico

Análisis Financiero

Resultados

Conclusiones

Líneas Futuras

Bibliografía

Glosario

Anexos

Fuentes de información

Anexos

Bibliografías

Referencias Electrónicas

Wikipedia. LabView. Recuperado 8 Julio, 2009, de Wikipedia, la enciclopedia libre:

Wikipedia. Impedancia. Recuperado 20 Junio, 2009, de Wikipedia, la enciclopedia libre:

Wikipedia. Cable coaxial. Recuperado 7 Julio, 2009, de Wikipedia, la enciclopedia libre:

AZIMA DLI. Atenuación. Recuperado 21 Junio, 2009, de AZIMA DLI:

Eveliux. El decibel. Recuperado el 21 Junio, 2009, de Evelio Martínez:

Libros

Antoni Mánuel, Domingo Biel, Joaquim Olivé, Jordi Prat, Francesc J. Sánchez, Alfaomega Grupo Editor, Instrumentación Virtual: Adquisición, Procesado y análisis de señales.

Antonio Creus Sole, Alfaomega Grupo Editor, Instrumentación Industrial 7ª Edición.

Enrique Palacios, Fernando Remiro & Lucas J. López, Alfaomega Grupo Editor, Micro controlador PIC16F84: Desarrollo de proyectos.

H. Bishop, Robert, Pearson Education, Inc. 2006, National Instruments, United States, Labview 7 Express Student Edition.

J. David Irwin, Prentice Hall, (5ta Ed.) Análisis Básico de Circuitos en Ingeniería.

José Manuel Angulo, Ignacio Angulo Martínez, McGraw-Hill, MICROCONTROLADORES PIC Diseño practico de aplicaciones. 2da. Edición 1999.