

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño e implementación de un medidor RLC.

Autor: Hamlet Ibarra Frances.

Tutor: Msc. Ing. Elizabeth Guillán Joa.
Ing. Manuel Verdecia Rubio.

Santiago de Cuba
Junio, 2015

Universidad de Oriente
Facultad de Ingeniería Eléctrica
Departamento de Telecomunicaciones



TRABAJO DE DIPLOMA

Diseño e implementación de un medidor RLC

Autor: Hamlet Ibarra Frances.

hamlet.ibarra@tle.fie.uo.edu.cu

Tutor: Msc. Ing. Elizabeth Guillán Joa.

eguillan@fie.uo.edu.cu

Ing. Manuel Verdecia Rubio.

manuel@fie.uo.edu.cu

Santiago de Cuba

Junio, 2015



COMPROMISO DEL AUTOR

Hago constar que el presente trabajo de diploma es de mi autoría exclusivamente, no constituyendo copia de ningún trabajo realizado anteriormente y las fuentes usadas para la realización del trabajo se encuentran referidas en la bibliografía. Doy mi consentimiento a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización del Tutor o Institución.

Firma del Autor

PENSAMIENTO

“No hay distancia que no se pueda recorrer ni meta que no se pueda alcanzar.”

Napoleón Bonaparte

DEDICATORIA

A mis padres Delmis e Ignacio, porque su amor y cariño no conoce límites, por su apoyo incondicional, el esfuerzo realizado, por confiar en mí en todo momento, por sus sabios consejos, por guiarme durante toda mi carrera estudiantil, por siempre estar ahí para mí y porque sin ellos no hubiese sido posible la realización de este trabajo.

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y hermano por su apoyo incondicional y fe en mí.
- A mis compañeros de estudio por su ayuda y amistad.
- A mi tutores Manuel y Elizabeth por todo su apoyo y ayuda.
- A mis profesores por haberme forjado como ingeniero.
- A mi amigo Yosvani y Albertico por toda su cooperación y auxilio.

En general a todos aquellos que de una forma u otra contribuyeron a mi formación y a la realización de esta tesis

¡MUCHAS GRACIAS!

RESUMEN

En el trabajo se describen las generalidades y métodos para el diseño e implementación de un medidor RLC con el fin de contar con un instrumento para el desarrollo de prácticas en los laboratorios de Electrónica y Radioelectrónica, de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica, en un rango de resistencias de 1Ω a $10\text{ M}\Omega$ con un error relativo reducido de 0.6%, de inductancia de $0.05\ \mu\text{H}$ a 70 mH con un error relativo reducido de 1.5% y de capacitancias de 1 pF a $6800\ \mu\text{F}$ con un error relativo reducido de 4.8%. Se hace una descripción del PIC18F4520 y de sus principales características, se muestran simulaciones del circuito de medición utilizando la herramienta Proteus y se analizan los resultados obtenidos. Además, se muestra la comparación del instrumento diseñado con otros medidores profesionales RLC.

Palabras clave: PIC, error, medidor RLC.

ABSTRACT

In the work described on the outline and methods for the design and implementation of an RLC meter in order to have an instrument for the development of practices in the laboratories of electronics and radio, the race for Telecommunications and Electronics, a 1Ω resistance range of $10\text{ M}\Omega$ with a relative error of 0.6%, $0.05\ \mu\text{H}$ inductance 70 mH with a reduced 1.5% and capacity of 1 pF to $6800\ \mu\text{F}$ with a reduced relative error 4.8% relative error. PIC18F4520 and a description of its main features is made, measuring circuit simulations are shown using the Proteus tool and the results are analyzed. In addition, comparison with other professional instrument designed RLC meters shown.

Keywords: PIC, error, meter RLC.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1 . GENERALIDADES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN RLC USANDO MICRONCONTROLADORES	4
1.1 Óhmetro o medidor de resistencias.....	5
1.1.1 Óhmetro Analógico	5
1.1.2 Óhmetro Digital	6
1.2 Capacímetro o medidor de capacitancia.	7
1.2.1 Capacímetro digital utilizando el circuito integrado 555 en su configuración como astable.....	8
1.2.2 Capacímetro digital utilizando el circuito integrado 555 en su configuración como monoestable.	9
1.2.3 Capacímetro digital utilizando dos generadores de pulsos.....	10
1.2.4 Capacímetro digital utilizando transistores.	10
1.3 Inductómetro o medidor de inductancia.....	11
1.4 Mediciones utilizando microcontroladores	13
CAPITULO 2 . RECURSOS Y COMPONENTES UTILIZADOS.....	16
2.1 Programas	16
2.1.1 Simulador PROTEUS.....	16
2.1.2 Compilador CCS C.....	17
2.1.3 Programador PICPgm (software)	18
2.2 Componentes.....	19
2.2.1 El microcontrolador PIC18F4520	19
2.2.2 Cuatro interruptores bilaterales integrados (4066).....	22
2.2.3 El temporizador integrado 555	23
2.2.4 Módulo LCD SYB1602A.....	23
CAPITULO 3 . DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS	25
3.1 Diseño del medidor RLC.	25
3.2 Circuito para la medición de resistencias.	26
3.2.1 Funcionamiento del medidor de resistencia	27
3.2.2 Cálculo de las resistencias de referencia	29
3.3 Circuitos para la medición de inductancia y capacitancia.....	31
3.4 Módulos utilizados del PIC18F4520 e interfaz de visualización.....	34

3.4.1	Modo Captura	34
3.4.2	Timer 0 y Timer 1	35
3.4.3	Interrupción externa INT 0.....	36
3.4.4	Comparadores operacionales	37
3.5	Modo de operación del medidor RLC	37
3.6	Diagrama de flujo	38
3.7	Diseño del circuito impreso	39
3.8	Montaje y prueba del medidor RLC	41
3.9	Fuentes de errores más significativas	43
3.10	Valoración económica	47
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		49
CONCLUSIONES		49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		50
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		52
ANEXOS		55

INTRODUCCIÓN

En la actualidad la instrumentación electrónica ha tomado un lugar relevante en el mundo industrial y académico en camino del desarrollo y se expande a la nanotecnología. Por citar un ejemplo, se podrían realizar mediciones de alta precisión en el cosmos con equipos de bajo consumo capaces de procesar grandes volúmenes de información. Es por ello la importancia de continuar el estudio de equipos de medición y calibración para aplicaciones en las comunicaciones. La tecnología de los componentes electrónicos y programables ha cambiado drásticamente la forma de concebir la electrónica moderna. Anteriormente se empleaban métodos complejos de diseños de equipos basados en componentes específicos lo que ocupaba mucho espacio y gran cantidad de tiempo. Luego se fueron integrando estos dispositivos implementándose a nivel de *software* de manera que se sintetizaron muchas de las operaciones y señales. Al mismo tiempo los circuitos integrados digitales irrumpieron con nuevas alternativas con un consumo de potencia considerablemente menor a sus antecesores. Hoy en día han cambiado mucho las perspectivas de realización de diseños debido a que las herramientas de simulación predicen con gran exactitud los posibles errores cometidos en los diseños. La medición de resistencia, inductancia y capacitancia en la circuitería de los equipos dentro de los talleres de mantenimiento y en los laboratorios académicos, es de vital importancia para extender la vida útil de estos además de profundizar los conocimientos adquiridos. El principal reto actualmente para los medidores de RLC es el de corregir errores y llevarlos a valores de tolerancia por debajo de las mili decenas de porcientos, lo que contribuye a tener mayores perspectivas y a la vez un gran avance tecnológico donde se combinan *software* y *hardware*. Estas exigencias se pudieran lograr con técnicas más profundas y modernas, al precio de adquirir los recursos a un alto costo, siendo no efectivo alcanzar metas tan altas con este inconveniente. Existen medidores RLC profesionales que permiten medir estos parámetros de forma rápida y automática. El uso de microcontroladores es una solución económica, práctica y con buena precisión.

Antecedentes del problema

Los instrumentos de medición presentan una gran aplicación en el área académica, permitiendo que los estudiantes se familiaricen con los mismos para su futura utilización en la vida profesional, además le ofrecen al estudiante una herramienta indispensable en el desarrollo de prácticas de laboratorios de diversas asignaturas, tales como, Radioelectrónica, Electrónica Digital, Electrónica Analógica, y otras. Estas prácticas de laboratorios son de importancia, debido a que permiten fijar en el estudiante los conocimientos adquiridos en clases y desarrollar en ellos la motivación y la creatividad. También hay que tener en cuenta, que estos instrumentos tienen un elevado costo en el mercado, por lo que en muchas ocasiones son inaccesibles.

Problema a resolver

Necesidad de un instrumento que permita medir inductancia, capacitancia y resistencia para el desarrollo de prácticas en los laboratorios de Radioelectrónica, Electrónica Digital y Analógica de la carrera de Telecomunicaciones y Electrónica.

Objeto de estudio

Métodos de medición de inductancia, capacitancia y resistencias.

Campo de acción

Instrumentación electrónica y técnicas de medición utilizando un microcontrolador.

Objetivo

Diseñar e implementar un instrumento para medir resistencias en un rango de 1Ω a $10\text{ M}\Omega$, inductancia en el rango de $0.05\ \mu\text{H}$ a $70\ \text{mH}$ y capacitancia en el rango de 1pF a $6800\ \mu\text{F}$ utilizando un microcontrolador.

Tareas

- Estudiar la teoría básica, las técnicas y métodos de medición inductancia, capacitancia y resistencias empleando microcontroladores.
- Diseñar un medidor de inductancia, capacitancia y resistencias.

- Simular el medidor de inductancia, capacitancia y resistencias utilizando la herramienta de simulación Proteus.
- Implementar un medidor inductancia, capacitancia y resistencias.
- Comparar los resultados obtenidos con el medidor con medidores comerciales y determinar su exactitud.
- Elaborar el informe de tesis.

CAPITULO 1 . GENERALIDADES Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN RLC USANDO MICRONCONTROLADORES

El proceso de medición generalmente requiere el uso de un instrumento como medio físico para determinar la magnitud de una variable [1]. Los instrumentos constituyen una extensión de las facultades humanas que en muchos casos permiten a las personas determinar el valor de una cantidad desconocida, la cual no podría medirse utilizando solamente los potenciales sensoriales. Por lo tanto un instrumento de medición es un dispositivo empleado para determinar el valor o la magnitud de una cantidad o variable. Los instrumentos actuales presentan alto grado de interacción con el operador sobre todo porque visualizan la información. En la figura 1.1 se observa que la señal de entrada es analógica y a través de los conversores llega finalmente a convertirse en digital propiciando que sea procesada con funciones matemáticas menos complejas y por ende mayor precisión en la medición y visualización [2].

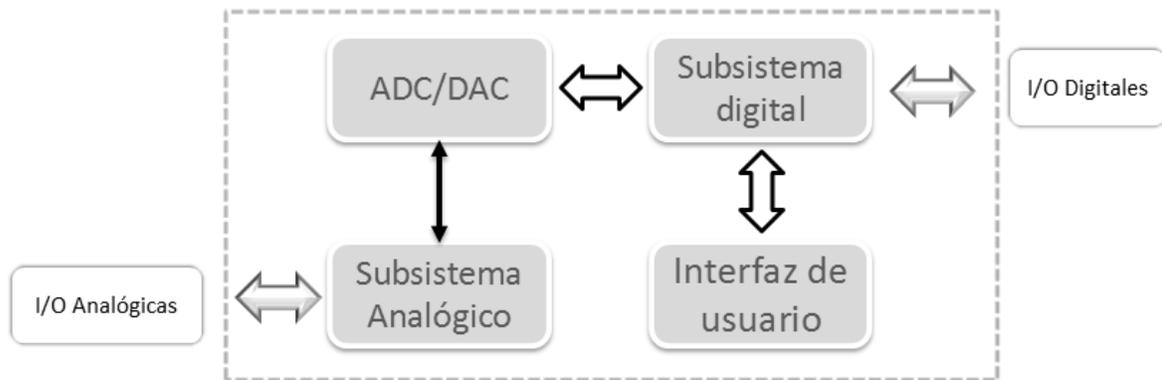


Fig.1.1. Diagrama en bloques de un instrumento.

Los microcontroladores han conquistado la electrónica moderna dando su mayor desempeño en todo tipos de equipos domésticos, industriales, de laboratorios, telemétricos, de comunicaciones e informáticos [3]. Estos a medida que avanza la tecnología se van simplificando en tamaño y aumentando en aplicaciones. La tendencia es aumentar las prestaciones debido a que se incluyen mayores utilidades en un solo circuito integrado. Los medidores a partir de éstos son actualmente entre la mayor y más fiable de las alternativas empleadas para medir resistencias, inductancias y capacitancias

por su fácil implementación y diversidad de recursos. Las variantes de estos medidores parten de las posibilidades que brindan y las ventajas ofrecidas por cada uno de los microcontroladores a escoger. Una ventaja significativa es al programarlos, puesto que la interfaz de *hardware* de programación es simple y el lenguaje del *software* es fácil de comprender [4].

1.1 Óhmetro o medidor de resistencias.

Es un aparato o dispositivo que se utiliza para medir resistencias eléctricas. La forma de realizar esta medición es desconectando cualquier tipo de fuente de tensión o de corriente que actúe sobre la resistencia a medirse, y al mismo tiempo no altere el valor de la lectura, ni se dañe el dispositivo [1].

1.1.1 Óhmetro Analógico

Un óhmetro analógico en su interior consta de una fuente o batería pequeña que entrega un voltaje a la resistencia a medirse (R_x), el galvanómetro ya calibrado en ohm mide la intensidad de la corriente que circula a través de la resistencia bajo medida (R_x), como se muestra en la Fig.1.2 [5]. Un detalle importante es que la escala del óhmetro tiene el cero marcado a la derecha, es decir, al contrario de los amperímetros y voltímetros normales; por lo que la corriente de escala máxima del amperímetro será el cero del óhmetro. Ahora considerando lo siguiente: Se tiene un valor de voltaje dado por la fuente (E), debemos determinar el valor de R para fijar las condiciones del circuito, sabiendo que si $R_x = \infty$ (circuito abierto) no circula corriente por el circuito y si R_x tiene cualquier otro valor circulará cierta corriente por el circuito que será máxima cuando $R_x = 0$.

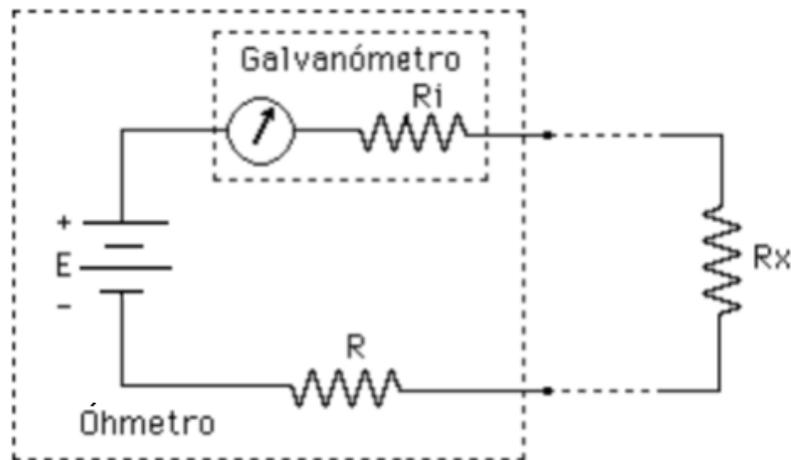


Fig.1.2. Circuito básico del óhmetro

La corriente máxima en el galvanómetro es I_m y con una $R_x = 0$, se cumple lo siguiente:

$$E = (R_i + R) I_m \quad (1.11)$$

Despejando R en (1.1)

$$R = \frac{E}{I_m} - R_i \quad (1.12)$$

Obteniendo el valor de R, el circuito está totalmente especificado para poder calibrar utilizando resistencias patrones de valores distintos.

1.1.2 Óhmetro Digital

Consiste en que un valor de R_x se transforma a voltaje por medio de un divisor de tensión lo cual ingresa al conversor A/D. Además consta de un selector de escalas, un decodificador y un visualizador (*displays* o LCD), como se indica en la Fig.1.3. Además utiliza una fuente de tensión constante (VDC) para que el conversor detecte la variación de voltaje de la R_x [5].

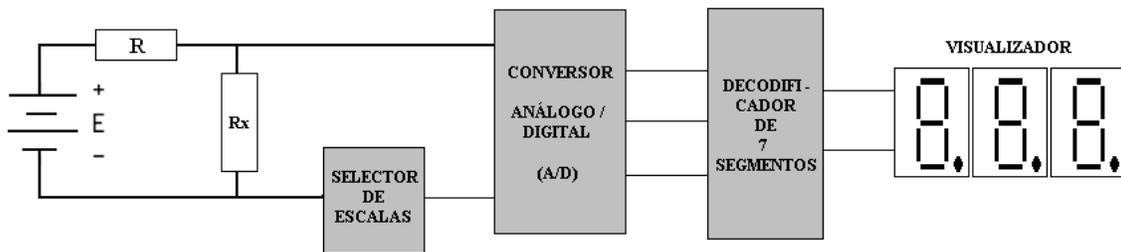


Fig.1.3. Diagrama de bloques del óhmetro.

Un método simple y que se utiliza bastante, es un divisor de tensión resistivo que consiste en un par de resistencias puestas en serie, de forma que la primera provoca una caída de tensión y por lo tanto, la tensión de salida se verá reducida. En un divisor de tensión [6] como el que se muestra en la Fig. 1.4.:

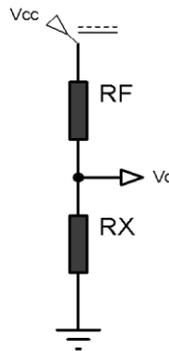


Fig.1.4. Divisor de voltaje.

Se tiene que:

$$V_O = \frac{R_x}{R_x + R_F} V_{CC}$$

(1.13)

Despejando R_x :

$$R_x = \frac{V_O}{V_{CC} - V_O} R_F$$

(1.14)

Cuando $V_O \rightarrow 0$, $R_x \rightarrow 0$ y cuando $V_O \rightarrow V_{CC}$, $R_x \rightarrow \infty$

Por tanto independientemente del valor de V_{CC} y R_F con un divisor de tensión como el mostrado en la figura se puede calcular cualquier valor de R_x conociendo el valor de V_O . Por lo que este método es factible para calcular resistencias con el PIC si se emplea una fuente de 5V para garantizar que V_O se mantenga en rango y pueda ser leído por el conversor analógico-digital.

1.2 Capacímetro o medidor de capacitancia.

Es un aparato o dispositivo que se utiliza para medir la capacidad o la capacitancia de los capacitores. La forma en que se realiza la medición es conectando los dos terminales al capacitor sin ningún orden cuando se trata de capacitores no electrolíticos, pero si son capacitores electrolíticos se debe tener en cuenta el terminal positivo y negativo, esto es en el capacímetro digital [1].

En los multímetro analógicos no existía forma de medir los capacitores por lo que solamente se utilizaban para comprobar el buen estado de éstos de la siguiente manera: se coloca en la escala de "R =1k" con la llave selector hasta que muestre cero Ohm, luego se conecta la punta del terminal negativa en uno de los terminales del capacitor y con la otra punta al otro terminal del capacitor. Con esto se lograba que el capacitor se cargara con la pila o batería interna del multímetro ya que la aguja se desplazaba levemente. Si se conectaba la punta positiva en vez de la negativa en uno de los terminales del capacitor y la otra en el otro terminal, el resultado era que la aguja volvía a reflexionar y regresaba a su posición original. Estos movimientos indicaban que el capacitor estaba en buenas condiciones [5].

1.2.1 Capacímetro digital utilizando el circuito integrado 555 en su configuración como astable.

Uno de los principales métodos que se utiliza consta de un circuito que carga a un capacitor durante el tiempo de carga que viene determinado por la capacitancia a medirse (C_x), se cuenta el tren de pulsos de un oscilador astable, el circuito integrado 555 en su modo astable (oscilador) [7] [8] Fig1.5 posee la capacidad de que su frecuencia de oscilación tiene una relación inversamente proporcional a la capacitancia determinada por la expresión:

$$f = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b) \cdot C} \quad (1.21)$$

El factor $1.44/(R_a + 2R_b)$ se puede definir como una constante (K) en la expresión (1.21):

$$f = \frac{K}{C} \quad (1.22)$$

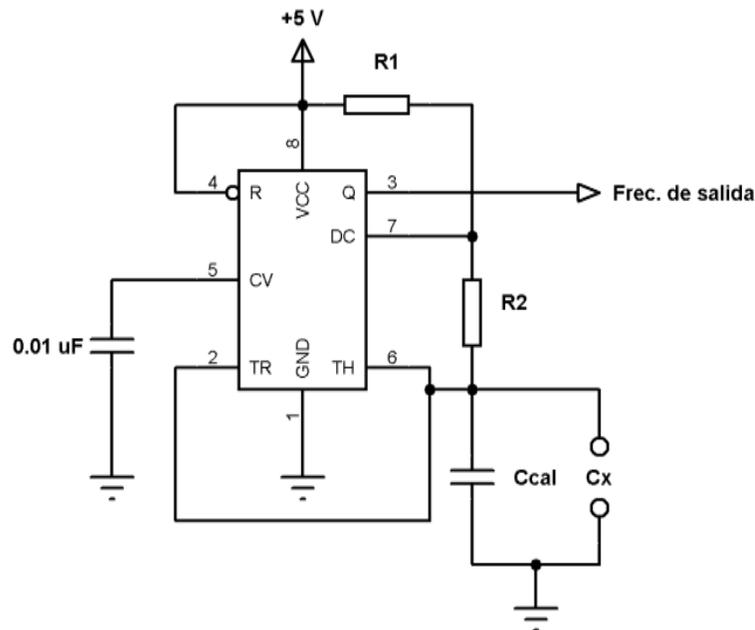


Fig. 1.5. Circuito de un medidor de capacitancia basado en un 555 como astable.

Para el proceso de calibración, se utiliza un capacitor de precisión (C_{cal}) con el que se obtiene la frecuencia de oscilación del circuito. Una vez hallada esta frecuencia se calcula la constante K:

$$\text{Despejando de la ecuación (1.20)} \quad K = f \cdot C_{cal} \quad (1.23)$$

Durante el proceso de medición de un capacitor desconocido (C_x), se mide la frecuencia y con el valor de la constante K obtenida en el proceso de calibración, se calcula la capacitancia:

$$f = \frac{K}{C_{cal} + C_x} \quad (1.24)$$

$$\text{Despejando de la ecuación (1.22)} \quad C_x = \frac{K}{f} - C_{cal} \quad (1.25)$$

1.2.2 Capacímetro digital utilizando el circuito integrado 555 en su configuración como monoestable.

Otra forma sería configurando el temporizador 555 en su configuración como monoestable [7] [8] Fig. 1.6 este en su modo monoestable (temporizador) tiene la propiedad de variar el ancho del pulso (tiempo) de salida en función de la capacitancia, dado por la expresión:

$$t_{alto} = 1.1 \cdot R_1 \cdot C \quad (1.26)$$

De modo que conociendo el tiempo que dura el pulso a la salida del 555 se puede conocer el valor de la capacitancia:

$$\text{Despejando de la ecuación (1.24)} \quad C_x = \frac{t_{alto}}{1.1 \cdot R_1} \quad (1.25)$$

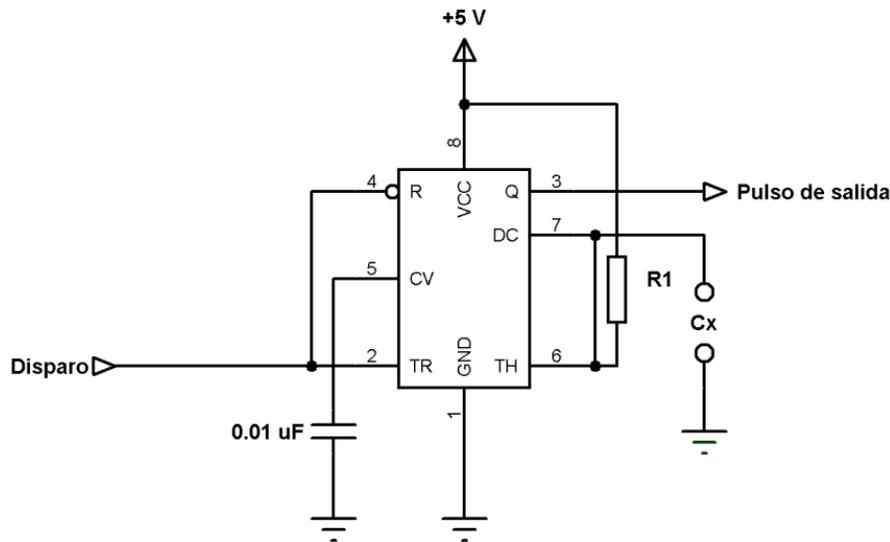


Fig.1.6. Circuito de un medidor de capacitancia basado en un 555 como monoestable.

En este circuito como la capacitancia y el ancho del pulso son directamente proporcionales, para capacitancias demasiado grandes se obtendrán tiempos poco adecuados desde el punto de vista práctico.

1.2.3 Capacímetro digital utilizando dos generadores de pulsos.

Otro método muy utilizado se muestra en la Fig. 1.7 donde tenemos un diagrama de bloques utilizando dos generadores de pulso (A y B) para saber el valor del capacitor a medirse (C_x) [8].

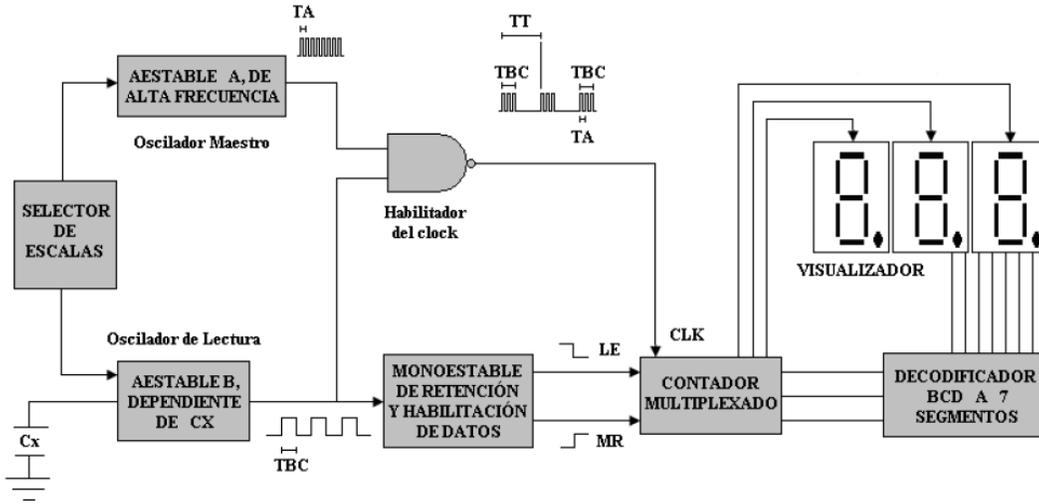


Fig. 1.7. Método utilizando dos generadores de pulsos

Consta de un selector de escala, dos multivibradores astables, un multivibrador monoestable doble, una compuerta de habilitación y un contador que es el conjunto principal. La otra sección o parte, es el circuito de visualización que cuenta con el decodificador y los visualizadores. Para cada escala seleccionada, el astable A genera un tren de pulsos de frecuencia fija mientras la capacitancia a medir (C_x) controla la frecuencia del astable B. Las señales A y B se combinan en una compuerta NAND para producir los pulsos de reloj del contador. La cantidad de pulsos que pasan mientras la señal B está en alto es numéricamente igual a la capacitancia de C_x en picofaradios, nanofaradios y microfaradios.

1.2.4 Capacímetro digital utilizando transistores.

Como se sabe los condensadores se cargan en forma exponencial. En este caso se hace que los condensadores a medirse se carguen en forma de rampa lineal de voltaje como un diente de sierra, esto se hace con una fuente de corriente de carga constante utilizando un transistor PNP y las resistencias R_1 , R_2 y R_E , como se indica en la fig. 1.8 [5] [9]

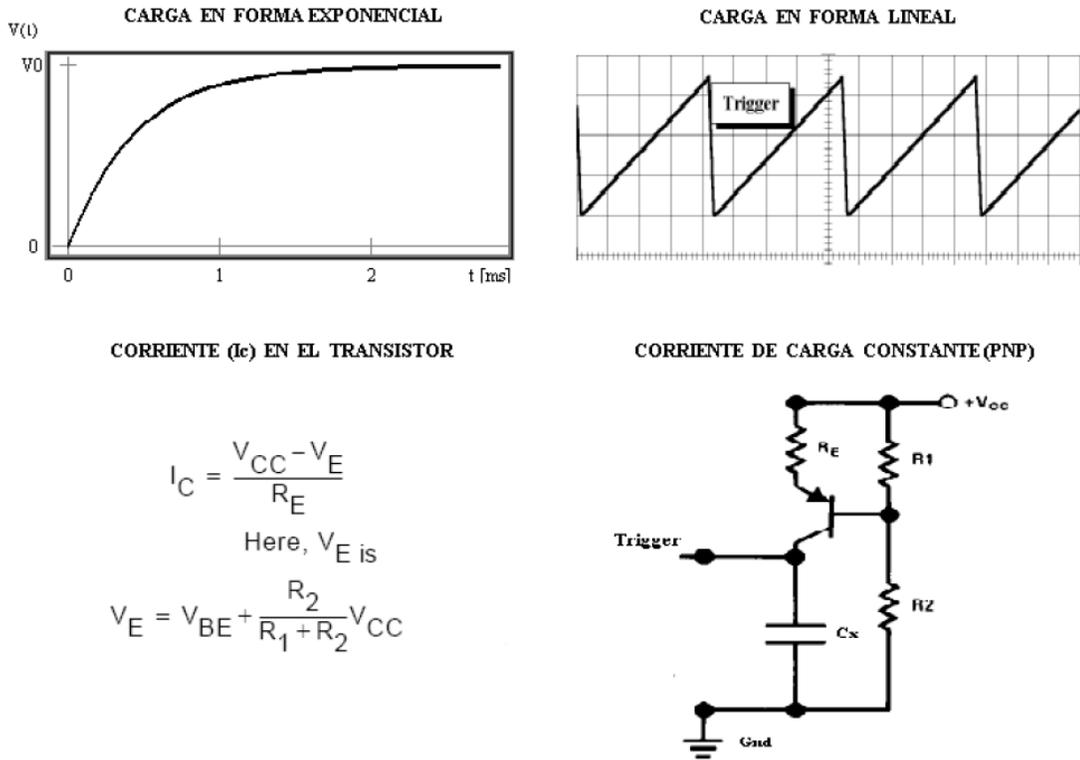


Fig.1.8. Carga del condensador y rampa lineal de voltaje.

El transistor produce una corriente constante I_C , en donde conociendo, V_{CC} , R_1 , R_2 , $V_{BE}=0.6V$ obtenemos el valor de V_E y sabiendo el valor de R_E calculamos la corriente de emisor del transistor que es la corriente de carga del condensador C_x a medirse y obtenemos el valor de éste.

1.3 Inductómetro o medidor de inductancia.

Es un aparato o dispositivo que se utiliza para medir inductores eléctricos. La forma de realizar esta medición es desconectando cualquier tipo de fuente de tensión o de corriente que actúe sobre el inductor a medirse, y al mismo tiempo no altere el valor de la lectura, ni se dañe el dispositivo. El método más utilizado es el de resonancia [10].

Una versión modificada de los métodos de resonancia está basada en la medición de la frecuencia de un oscilador con el elemento de medición conectado en un circuito de resonancia controlando la frecuencia. La medición digital de frecuencia es precisa y produce la salida digital deseada del instrumento. En la Fig.1.9 se utiliza un circuito resonante que a su salida presenta un amplificador operacional cuya frecuencia se varía mediante la conexión del inductor o capacitor a medir [7].

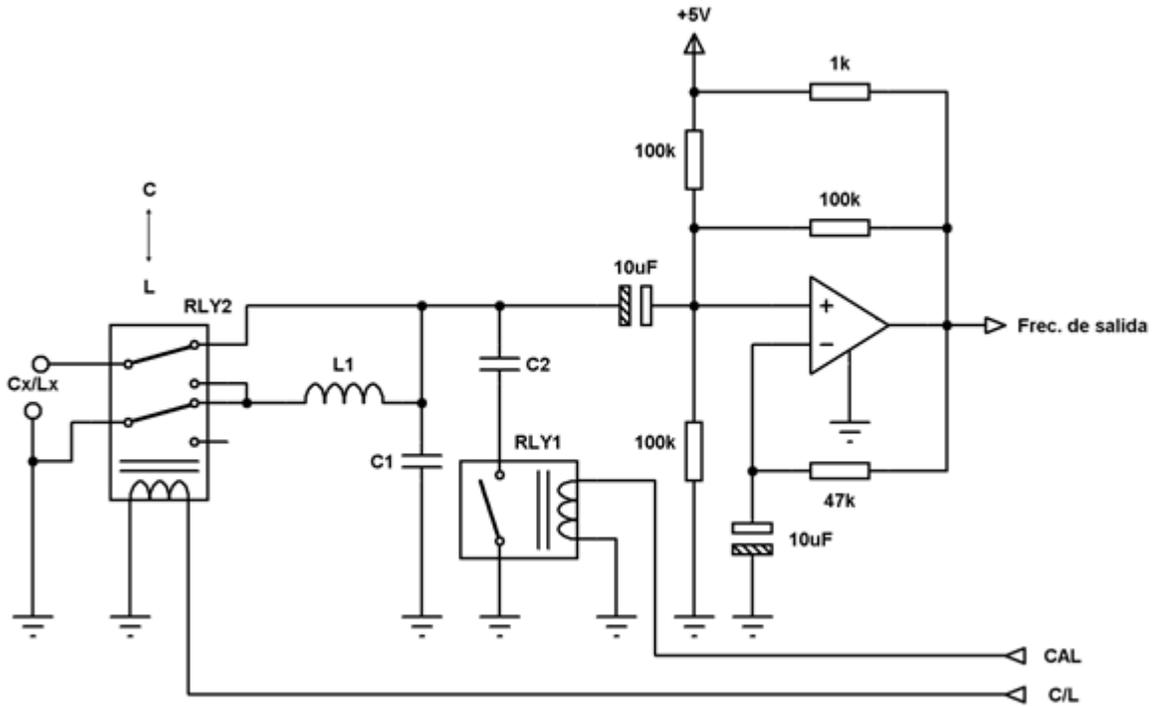


Fig.1.9. Circuito de un medidor de inductancia y capacitancia.

Modo de calibración

Inicialmente, cuando la energía se aplica al circuito, se genera una frecuencia ($F1$) y se obtiene el valor de dicha frecuencia. A continuación, se energiza el relevador electromagnético RLY1, que coloca el capacitor C2 en paralelo con C1, por lo tanto, altera la frecuencia del oscilador y nuevamente se adquiere el valor de la frecuencia ($F2$). Luego, se utilizan estas dos frecuencias ($F1$ y $F2$), más el valor de C2 para calcular con precisión los valores de C1 y L1 [8]. Este proceso conocido como calibración hace uso de algunas expresiones a través de los siguientes pasos:

$$\text{Con solo } C1 \text{ y } L1 \text{ conectados, la frecuencia (} F1 \text{) es: } F1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot C1}} \quad (1.31)$$

$$\text{Con } C2 \text{ añadido a } C1 \text{ (en paralelo): } F2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1 \cdot (C1 + C2)}} \quad (1.32)$$

$$\text{De (1.11) y (1.12) se puede encontrar } C1: C1 = \frac{F2^2}{(F1^2 - F2^2)} \cdot C2 \quad (1.33)$$

$$\text{De (1.11) y (1.12) también se puede encontrar } L1: L1 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot F1^2 \cdot C1} \quad (1.34)$$

Modo de medición

Después de calibrado el circuito, se desenergiza el relevador electromagnético RLY1 para desconectar el capacitor C2 del circuito, permitiendo que la frecuencia del oscilador vuelva a F1. El circuito está listo para medir el inductor o capacitor desconocidos (Cx o Lx). El componente (capacitor o inductor) desconocido se conecta a través de los terminales de prueba (Cx/Lx); para el caso de un capacitor debe ser conectado en paralelo con C1 y para un inductor en serie con L1. En ambos casos, los valores añadidos de Cx o Lx hacen que de nuevo la frecuencia del oscilador cambie a una nueva frecuencia (F3). Al igual que con F2, ésta siempre será inferior a F1. Así, mediante F3 se puede calcular el valor del capacitor o inductor desconocidos utilizando una de las expresiones que se muestran a continuación, dependiendo de lo que se desee calcular:

$$\text{Cuando Cx está conectado (en paralelo con C1)} \quad F3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L1(C1+Cx)}} \quad (1.35)$$

$$\text{De modo que } Cx = C1 \cdot \left(\frac{F1^2}{F3^2} - 1 \right) \quad (1.36)$$

$$\text{O cuando Lx está conectado (en serie con L1)} \quad F3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L1+Lx)C1}} \quad (1.37)$$

$$\text{De modo que } Lx = L1 \cdot \left(\frac{F1^2}{F3^2} - 1 \right) \quad (1.38)$$

Tener en cuenta que F2 y F3 siempre deben ser inferior a F1. Este circuito está diseñado para medir inductancias en el rango de 0.05 μ H a más de 50 mH y capacitancias en el rango aproximadamente de 1 pF a más de 0.02 μ F; para valores más altos la frecuencia disminuye mucho y el circuito se hace inestable.

1.4 Mediciones utilizando microcontroladores

Los microcontroladores son realmente uno de los grandes logros de la electrónica moderna. Con un solo microcontrolador es posible la sustitución de circuitos lógicos enteros comprendidos de dispositivos discretos. El avance de las escalas de integración permitió integrar cada vez más transistores por unidad de superficie. El desarrollo de la tecnología VLSI (*Very Large Scale Integration* – muy alta escala de integración), que produjo los microprocesadores, pronto permitió introducir en un solo chip todo un sistema mínimo [3]. Esto dio nacimiento a la microcomputadora, actualmente conocida como microcontrolador. Dentro de ellos encontramos una CPU, una memoria de programa, una

memoria de datos, el circuito de *reset* y el circuito oscilador, además de los puertos de entrada/salida, también conocidos como *PORTS I/O*. Los microcontroladores, debido a su muy bajo costo, alta inmunidad al ruido eléctrico y pequeño tamaño, produjeron una revolución en la electrónica, que desplazó a toda la lógica cableada (utilizada en la electrónica industrial) y a la lógica programada (realizada con microprocesadores). Los microcontroladores han invadido la electrónica de consumo, brindando a los electrodomésticos y a todo tipo de sistema electrónico la capacidad de inteligencia y conectividad [3]. El mundo actual está rodeado de microcontroladores; desde celulares, sistemas de alarmas y lavarropas, hasta los sistemas en los automóviles. En el presente, los microcontroladores PIC son muy populares, sus aplicaciones pueden ser infinitas y se encuentran en la industria, la robótica, la domótica y las comunicaciones. Esta familia de microcontroladores es manufacturada por la firma Microchip y se ofrecen con una amplia gama de funcionalidades, destacándose por su sencillez y bajo consumo. La arquitectura del microcontrolador PIC se basa en un set de instrucciones *RISC Harvard* modificado (*Reduced Instruction Set Computer*) con arquitectura de doble bus, ofreciendo así un diseño rápido y flexible con una ruta de fácil migración desde sólo 6 terminales hasta 80 terminales, y desde 384 bytes hasta 128 kilobytes de memoria de programa [10]. Los PIC están disponibles con muchas especificaciones diferentes en función del tipo de memoria, terminales de entrada – salida, tamaño de memoria y prestaciones como se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Especificaciones generales de los PIC.

Tipo de Memoria	Entrada-Salida (E/S)	Tamaño de memoria	Prestaciones
Flash	4 – 18 terminales	0.5 – 1 K	CAN
OTP	20 – 28 terminales	2– 4 K	USB
ROM	32 – 44 terminales	8 – 16 K	LCD
ROMless	45 y más terminales	24 – 32 K	Control de Motores
		48 – 64 K	Radio Frecuencia

Los microcontroladores PIC que tienen memoria de programa Flash, son una excelente opción para el desarrollo de aplicaciones y creación de prototipos. La gama de micros PIC

de memoria flash se ha expandido de tal manera que los dispositivos alternativos están disponibles con más características y a un costo unitario más bajo. Se dividen en tres grupos, con un número de prefijo diferente: las series 12XXXX son PICs miniatura de ocho terminales, el grupo 16XXXX que podría describirse como la serie estándar y los dispositivos 18XXXX como el grupo de alto rendimiento. Actualmente los microcontroladores, incluyendo los PIC, son muy utilizados en los sistemas de medición por las posibilidades que ofrecen, como velocidad de procesamiento, periféricos integrados programables (convertidores analógicos digitales, amplificadores operacionales) y otras características que los hacen indispensables. En la figura 1.10 se muestran esquemas generales de medidores usando microcontroladores [10].

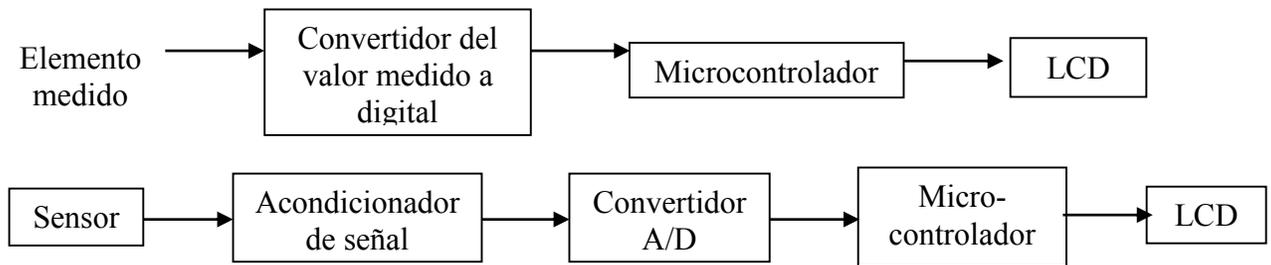


Fig. 1.10. Esquema general de un medidor basado en un microcontrolador.

CAPITULO 2 . RECURSOS Y COMPONENTES UTILIZADOS.

En este capítulo se describen los programas necesarios para el diseño del instrumento así como para corroborar su funcionamiento adecuado: CCS C 4.057 (*Custom Computer Service*), Proteus 7.10 y 8.1, y *PICPgm Development Programmer 1.7.8.0*. Además se incluyen los componentes utilizados para el diseño del medidor RLC: el microcontrolador PIC18F4520, cuatro interruptores bilaterales integrados (4066), el temporizador integrado 555 y el visualizador LCD Im016 (*Liquid Crystal Display*). (Anexo 5)

2.1 Programas

2.1.1 Simulador PROTEUS

El simulador de circuitos electrónicos Proteus Fig. 2.1 creado por *Labcenter Electronics*, es un entorno integrado utilizado para la realización y construcción de circuitos y equipos electrónicos en todas sus etapas: diseño, simulación, depuración y construcción. Dentro de los elementos que provee están: *ISIS (Intelligent Schematic Input System)*, *ARES (Advanced Routing and Editing)* y *VSM (Virtual System Modelling)* que incluye además ProSPICE [7] [12].

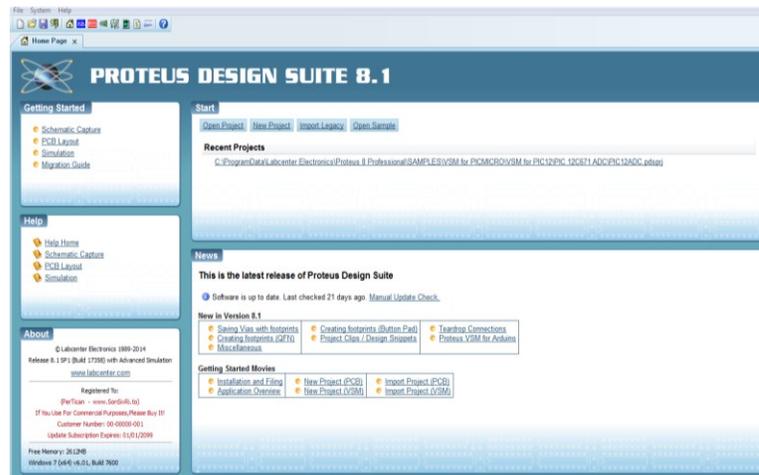


Fig.2.1. Interfaz inicial en Proteus.

2.1.2 Compilador CCS C

El compilador C de CCS Fig.2.2 se ha desarrollado específicamente para la programación de microcontroladores PIC y su función principal es la obtención del código de máquina para programar el PIC. Cuenta con una amplia biblioteca de funciones predefinidas, comandos de procesado y ejemplos. Dispone de numerosos controladores para dispositivos como LCD, relojes de tiempo real, EEPROM, etc. El CCS C es C estándar y además de las directivas estándar suministra directivas específicas para PIC, así como algunas funciones. El compilador provee además un editor que permite controlar la sintaxis del programa (ver Anexo 1). CCS suministra tres compiladores básicos denominados PCB, PCM, y PCH. Cada uno se utiliza para una familia de PIC distinta: PCB para PIC de 12 bit, PCM para 14 bit y PCH para 16 bit. Estos compiladores se utilizan a través de una consola con comandos de funcionamiento, lo que permite que los tres compiladores puedan ser utilizados desde otros entornos de programación, como por ejemplo MPLAB de Microchip. El programa incluye también, compiladores con IDE (entorno de desarrollo integrado) para Windows: PCW y PCWH. Estos compiladores utilizan los tres anteriores de manera transparente al usuario. El PCW puede compilar programas para PIC de 12 y 14 bit (PCB y PCM) mientras que el PCWH puede hacerlo con cualquiera de los tres compiladores nombrados anteriormente [13].

Compiladores con IDE:

- PCW para PIC10/12/16
- PCWH para PIC10/12/16/18
- PCDIDE para PIC24/dsPIC
- PCWHD para PIC10/12/16/18 y PIC24/dsPIC

Compiladores de línea de comando:

- PCB para PIC10/12/16
- PCM para PIC10/12/14/16
- PCH para PIC18
- PCD para PIC24

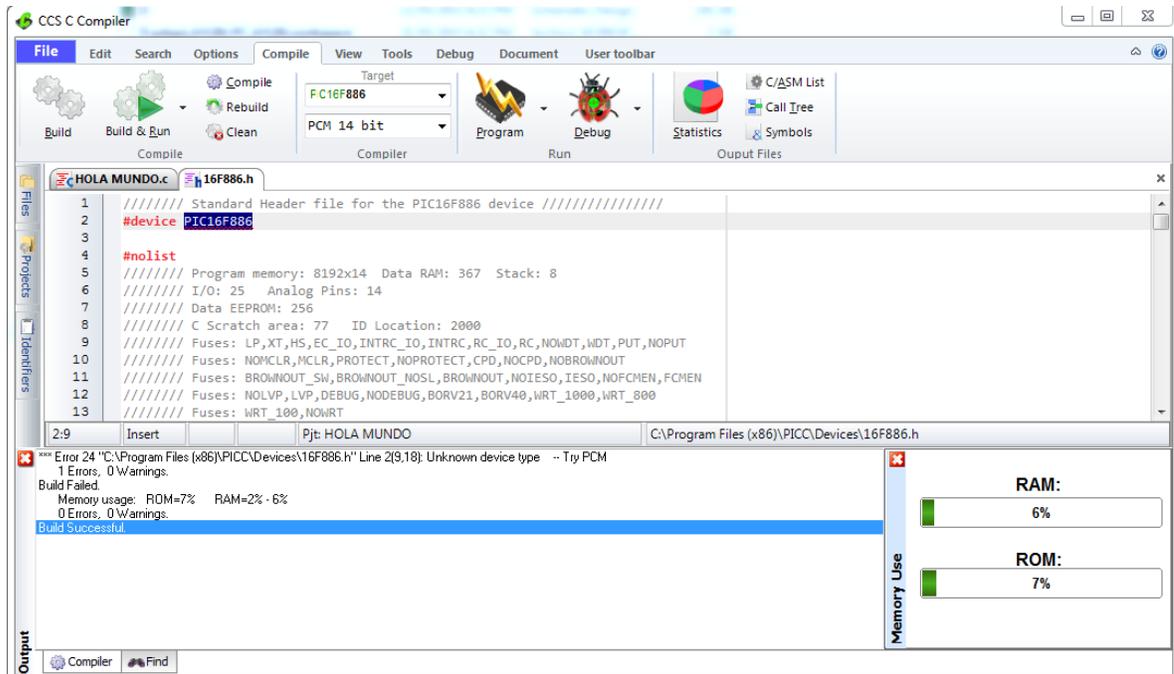


Fig.2.2 Compilador CCS C.

2.1.3 Programador PICPgm (software)

El *PICPgm Development Programmer 1.7.8.0* Fig. 2.3 es un *software* programador para los microcontroladores PIC, que además necesita un circuito programador ver Anexo 4 para conectar la computadora con el microcontrolador [4] [11].

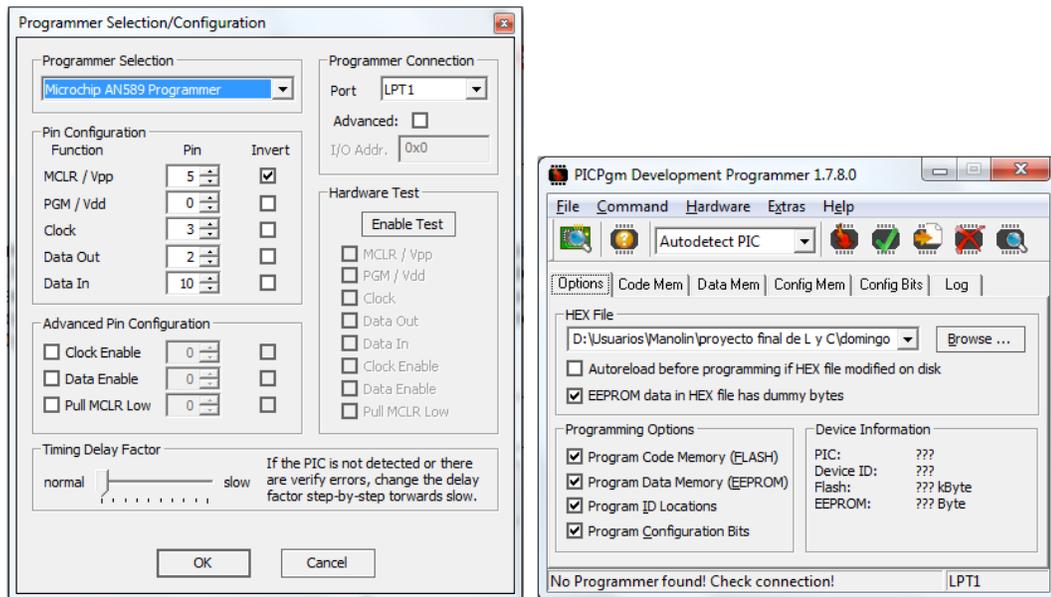


Fig.2.3. Interfaz del programa PICPgm Development Programmer

Principales características:

- Disponibilidad de interfaz gráfica de usuario
- Ejecución en *Windows* 98/ME/2k/XP/VISTA/7, Linux y MacOS (experimental)
- Para WIN 2k/XP/VISTA se utiliza un controlador incluido para acceder al puerto paralelo
- Detecta automáticamente el dispositivo PIC y utiliza el método de programación adecuado
- Permite la programación de memoria flash (código), EEPROM interna y los bits de configuración de los datos de archivo HEX
- Permite la programación a bajo voltaje (no se necesita voltaje de programación)
- Soporta varias familias de microcontroladores PIC
- Soporta programadores populares como JDM, Microchip AN589 programmer.
- Permite la configuración de los terminales del programador.

2.2 Componentes

Entre los componentes (Anexo 5) utilizados los principales fueron:

2.2.1 El microcontrolador PIC18F4520

El PIC18F4520 es un PIC de gama alta desarrollado por Microchip y pertenece a la familia de microcontroladores PIC18FXXXX que además son compatibles con los PIC16CXX y PIC17CXX. En la tabla 2.1 se muestran sus principales características [14].

Tabla 2.1. Características del PIC18F4520

Características	PIC18F4520
Frecuencia de trabajo	DC – 40 MHz
Memoria de Programa (bytes)	32768
Memoria de Programa (instrucciones)	16384
Memoria Datos (bytes)	1536
Memoria Datos EEPROM (bytes)	256
Fuentes de Interrupciones	20
Puertos E/S	Puertos A, B,C,D,E
Temporizadores (Timers)	4
Módulos Captura/Comparación/PWM (CCP)	1

Módulos CCP mejorados	1
Comunicaciones serie	MSSP, EUSART
Comunicaciones paralelo (PSP)	Sí
Módulo AD de 10 bits	13 canales de entrada
Reset y delays	POR, BOR, Instrucción RESET, Pila llena, Desbordamiento de Pila (PWRT, OST), MLCR (opcional), WDT
Detección programable de alto/bajo voltaje	Sí
Reseteo programable con bajo voltaje	Sí
Set de Instrucción	75 Instrucciones; 83 con el set de instrucciones extendido habilitado
Encapsulados	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

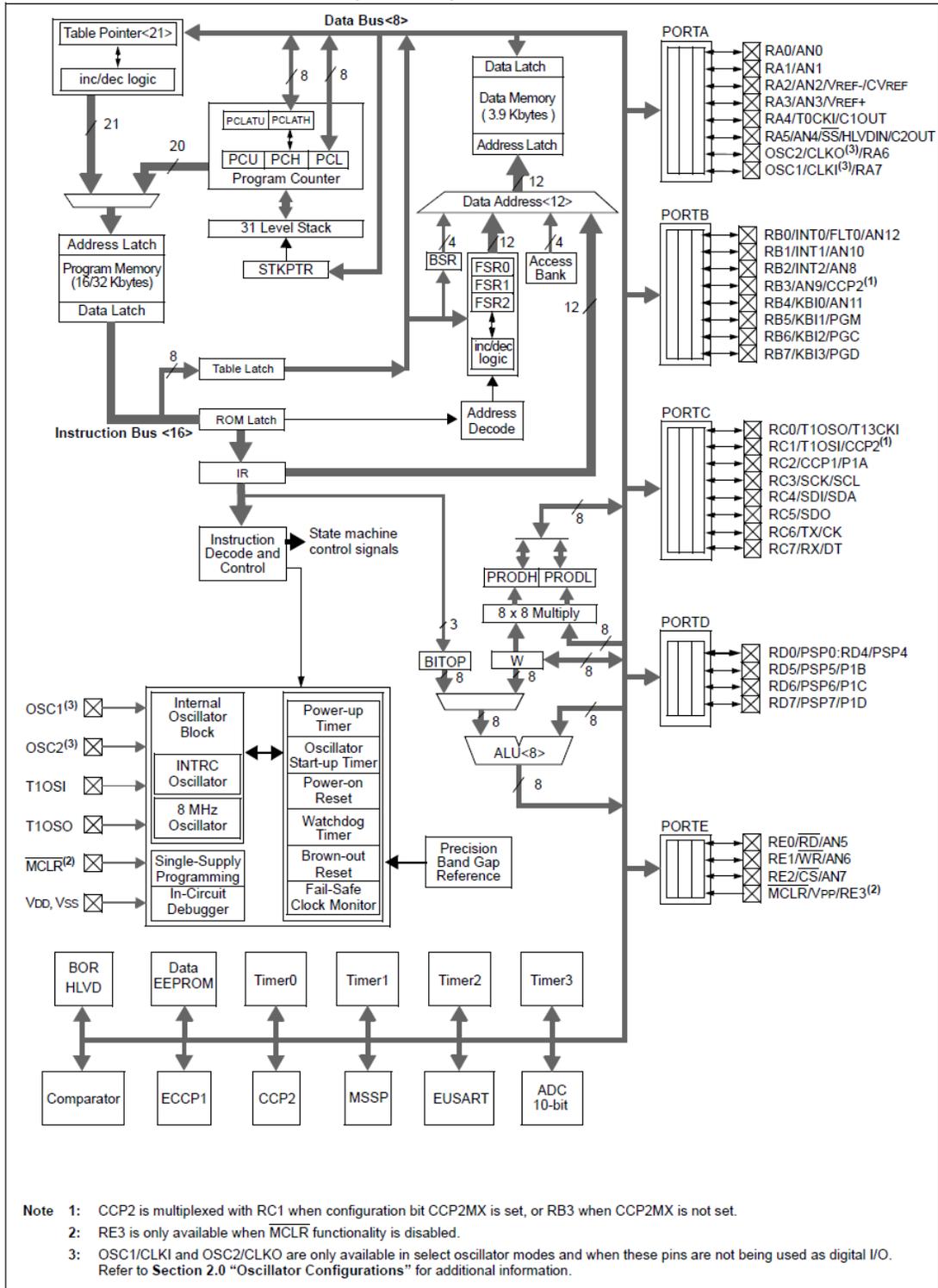


Fig.2.4. Diagrama de bloques del PIC18F4520

El PIC184520 dispone de las siguientes memorias:

- Memoria de programa: memoria FLASH interna de 32768 bytes, la cual almacena instrucciones y constantes/datos y puede ser leída mediante un programador externo o durante la ejecución del programa mediante unos punteros [2].
- Memoria RAM de datos: memoria SRAM interna de 1536 bytes en la que están incluidos los registros de función especial (FSR), esta memoria almacena los datos de forma temporal durante la ejecución del programa y puede ser escrita-leída en tiempo de ejecución mediante diversas instrucciones.
- Memoria EEPROM de datos: memoria no volátil de 256 bytes que almacena datos que se deben conservar aun en ausencia de voltaje de alimentación y puede ser escrita/leída en tiempo de ejecución a través de registros.
- Pila: bloque de 31 palabras de 21 bits que almacena la dirección de la instrucción que debe ser ejecutada después de una interrupción o subrutina.
- Memoria de configuración: memoria en la que se incluyen los bits de configuración (12 bytes de memoria flash) y los registros de identificación (2 bytes de memoria de sólo lectura).

Este PIC [11] tiene una arquitectura Harvard por lo que dispone de buses diferentes para el acceso a la memoria de programas y a la memoria de datos. Lo que permite acceder simultáneamente a la memoria de programa y a la memoria de datos. Es decir, se puede ejecutar una instrucción (lo que generalmente requiere acceso a la memoria de datos) mientras se lee de la memoria de programa la siguiente instrucción. El PIC18F4520 ofrece muchas ventajas, como: alto rendimiento computacional a un precio módico, alta fortaleza y durabilidad y memoria de programa flash mejorada. Además, introduce diseños mejorados que hace que este microcontrolador sea una elección lógica para muchas aplicaciones de alto rendimiento.

2.2.2 Cuatro interruptores bilaterales integrados (4066).

La 4066 [15] contiene 4 conmutadores analógicos bilaterales, cada una con un activo de pulso en alto, entrada de habilitación (A) y dos entradas / salidas (X e Y). Cuando la entrada de habilitación está en alto, los terminales X e Y están conectados. Se utiliza para la multiplexación de señales analógicas o digitales. Características:

- Conmutación digital de 7.5V-15V pico a pico.
- Resistencia de 125Ω operando con 15V.

- Proporción de voltaje en alto y en bajo 65dB TYP. $f_{IS} = 10\text{KHz}$, $R_L = 10\text{K}\Omega$.
- Alto grado de linealidad: $<0,5\%$ distorsión typ. al $FIS = 1\text{KHz}$, $VIS = 5\text{Vpp}$, $VDD - VSS > 10\text{V}$, $R_L = 10\text{KW}$
- Interferencia de baja entre los interruptores: 50dB típ. al $FIS = 0.9\text{MHz}$, $R_L = 1\text{KW}$.
- Respuesta de frecuencia interruptor ON: 40MHz (Typ.).
- Voltajes de trabajo 5V, 10V y 15V.
- Voltaje máximo soportado hasta 20V.
- Entrada de corriente de fuga $I_L = 100\text{nA}$ (MAX) EN $VDD = 18\text{V}$ $T_A = 25^\circ\text{C}$

2.2.3 El temporizador integrado 555

El 555 [16] es un temporizador de precisión increíblemente útil que puede actuar como un temporizador o un oscilador. Es muy usado por su fácil implementación (requiere pocos componentes y cálculos), es económico y se puede utilizar en varias aplicaciones.

Dentro de las principales características del NE 555 se encuentran:

- Voltaje de alimentación (V_{CC}) entre 4,5 V y 16 V.
- Máxima frecuencia de operación mayor de 500 kHz
- Estabilidad de temperatura de $0.005/^\circ\text{C}$
- Corriente de salida (máx.): 200 mA
- Temporizaciones desde microsegundos hasta horas
- Opera en modos astable y monoestable
- Ciclo útil ajustable
- Aplicaciones: temporización, generación de pulsos, generación de retardos, otras.

2.2.4 Módulo LCD SYB1602A

El visualizador alfanumérico de matriz de punto SYB1602A Fig.2.5 es un dispositivo de interfaz humano formado por una pantalla de cristal líquido o LCD de dos líneas por 16 caracteres, donde se pueden mostrar mensajes formados por distintos caracteres: letras, números y símbolos. El módulo tiene incorporado el controlador 44780 de Hitachi, encargado de polarizar los puntos en la pantalla, generar los caracteres, desplazar la pantalla, mostrar el cursor y otras funciones. Para comunicarse con microcontroladores o microprocesadores utiliza transferencia de datos paralela [17].

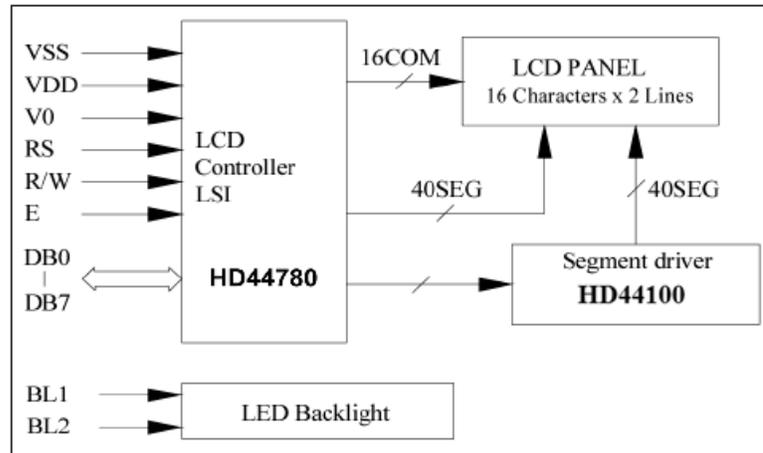


Fig.2.5. Diagrama de bloques del módulo LCD.

Las principales características del módulo LCD son:

- Fuente de voltaje simple (4.5 V – 5.5 V)
- Amplio ángulo de visibilidad
- Interfaz a buses de 4 u 8 bit
- 16 caracteres por 2 líneas
- Encendido/Apagado del *display*.
- Desplazamiento izquierdo/derecho.
- Compatible con ASCII.
- 189 caracteres y símbolos diferentes
- Pequeño y de peso ligero
- *Display* de matriz de puntos de 5x7 o 5x10
- Bajo consumo de energía
- LED *Backlight* (3.5 V – 5 V)

CAPITULO 3 . DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se presenta el diseño, funcionamiento del medidor RLC, su implementación, las comprobaciones del instrumento y se analizan los resultados obtenidos.

3.1 Diseño del medidor RLC.

El instrumento está constituido por cuatro etapas. En la primera etapa se realiza la elección de lo que se desea medir, ya sea inductancia, capacitancia o resistencias; en la segunda y tercera etapas, se procesa la señal y se realizan los cálculos necesarios, obteniéndose el valor de la medición que posteriormente será visualizado en la cuarta etapa. A continuación se muestra el diagrama de bloques Fig. 3.1 del medidor RLC, donde se aprecia cada una de sus partes fundamentales [7].

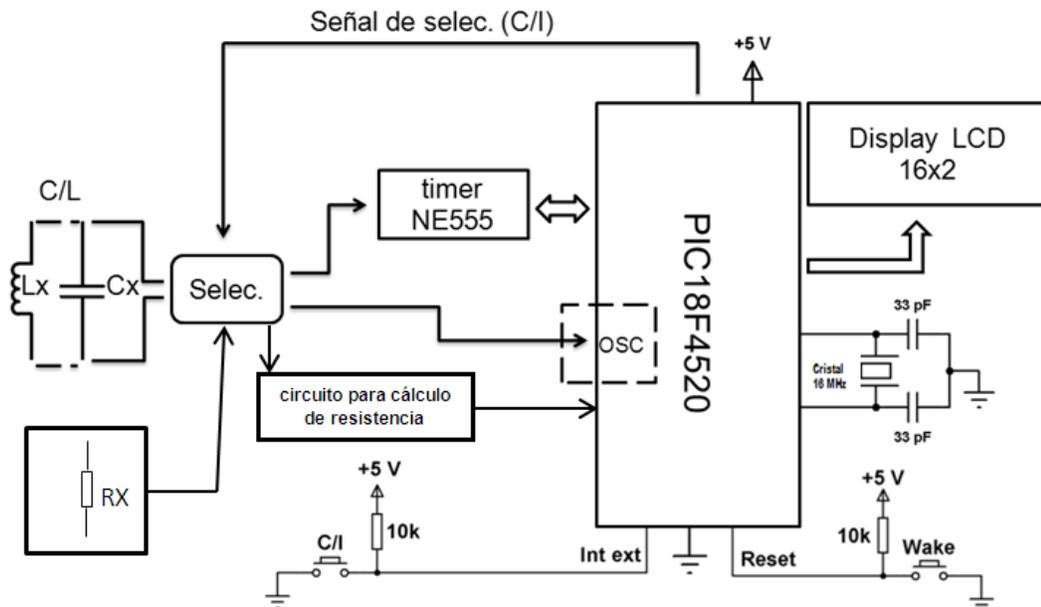


Fig.3.1. Diagrama de bloques del medidor RLC.

El esquema eléctrico del instrumento diseñado que se muestra en la Fig. 3.2, presenta la configuración de los circuitos escogidos para la medición.

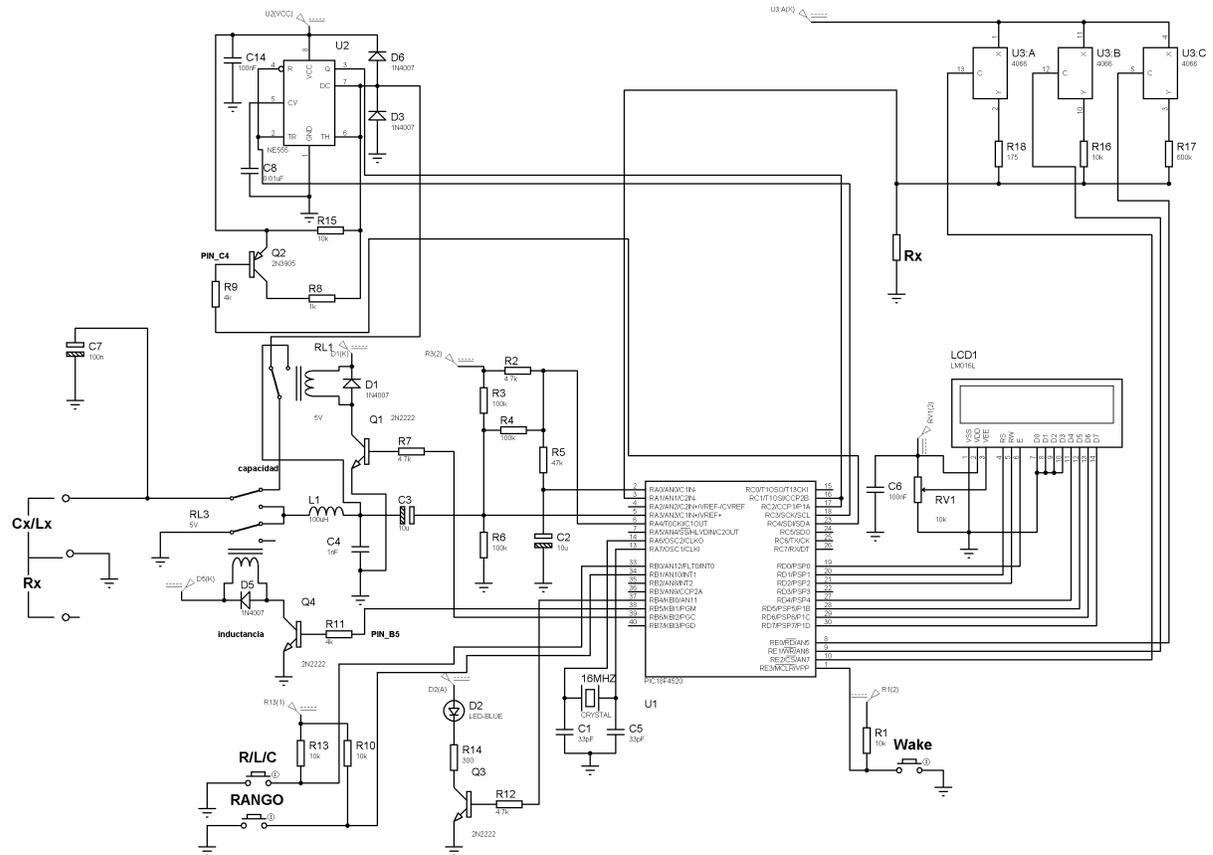


Fig.3.2. Esquema eléctrico del medidor RLC.

El medidor RLC está formado por un microcontrolador PIC18F4520 (realiza los cálculos y controles necesarios de todo el sistema), un temporizador 555 en su forma monoestable, el circuito integrado 4066 (4 conmutadores bilaterales), un *display* LCD 16x2 en el que se muestran los resultados de las mediciones y un circuito de selección que es controlado por el microcontrolador.

3.2 Circuito para la medición de resistencias.

El PIC18F4520 controla los 3 interruptores bilaterales integrados 4066 para seleccionar el rango de medición luego se realiza la lectura de la caída de tensión en la resistencia a medir con el conversor analógico digital y utilizando la expresión matemática 1.14 para la caída de tensión en un divisor, se calcula su valor conociendo las restantes incógnitas. El esquema eléctrico utilizado para la medición de resistencia es el siguiente:

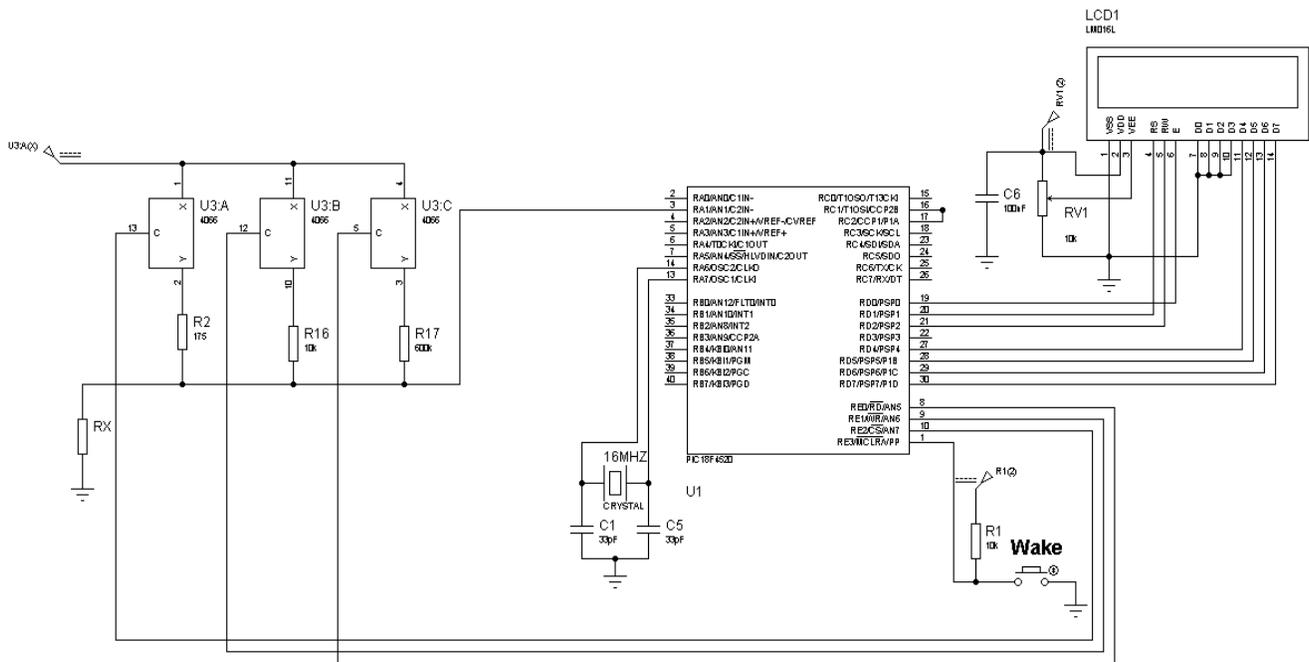


Fig.3.3. Esquema eléctrico del bloque para la medición de resistencias.

3.2.1 Funcionamiento del medidor de resistencia

Para la medición de resistencias se utilizan básicamente 3 divisores de tensión conectados al convertor analógico-digital del microprocesador. El objetivo es crear 3 escalas diferentes, variando la resistencia de referencia, para abarcar un rango de resistencias más grande ya que el convertor interno del microprocesador es de 10 bits y con una resistencia de referencia solo se pueden calcular como máximo 1024 valores diferentes, los cuales resultan insuficientes para representar el rango de 1Ω a $10\text{ M}\Omega$ con una aproximación aceptable. Las tres resistencias de referencia y la resistencia desconocida están unidas en el nodo objeto de medición del convertor analógico digital, como se muestra en la figura, lo cual permite realizar el cálculo utilizando las relaciones matemática propias de un divisor de tensión. La selección de la escala se realiza utilizando el conmutador bilateral 4066 Fig.3.4, el cual controlado por el microprocesador permite alimentar una sola resistencia de referencia y desconectar las restantes del circuito para que no afecten en la medición, de forma tal que en todo momento el circuito es un divisor de tensión simple.

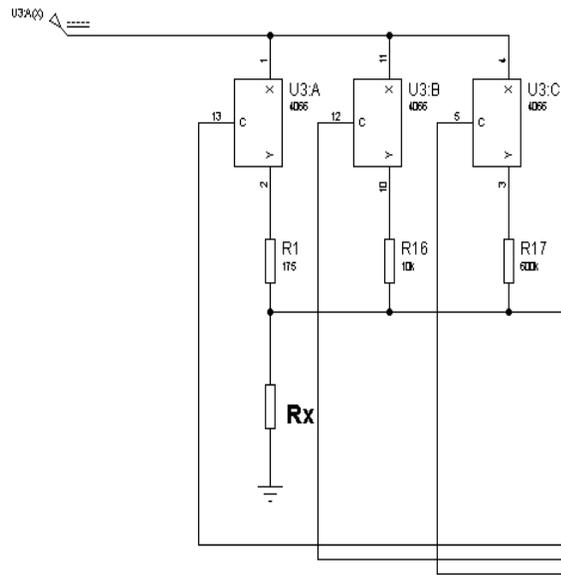


Fig.3.4. Esquema eléctrico del bloque para la medición de resistencias.

En principio por utilizar divisores de tensión todas las escalas permiten calcular cualquier valor de resistencia, sin embargo, el error máximo estimado en dicho cálculo es variable según los valores de resistencia de referencia y el valor de la resistencia medida. Es por ello que las resistencias de referencia fueron escogidas de forma tal que cada una de ellas permite calcular valores de resistencia con buena aproximación en un rango determinado e indistintamente. De esta forma la primera resistencia de referencia permite calcular con buena aproximación los valores más pequeños del intervalo de interés, mientras que para los restantes valores realiza un cálculo donde el error cometido pudiese ser muy grande, asimismo la segunda resistencia de referencia permite calcular con buena aproximación los valores intermedios y la tercera los valores más grandes del intervalo. Por tanto el microprocesador activa uno de los divisores, realiza el cálculo, compara y si no está en el rango de buena aproximación pues vuelve a realizar el proceso utilizando el rango más conveniente; por ejemplo, se realiza el cálculo utilizando la resistencia de referencia 1 (que se usa para valores pequeños) cuando se obtiene el valor de la resistencia medida se compara con el máximo valor de resistencia que se puede calcular en este rango con buena aproximación; si es menor se toma ese valor como el resultado final pero si es mayor el error cometido pudo haber sido muy grande por lo que se utiliza el segundo rango activando la resistencia de referencia 2, cuando se calcula se vuelve a comparar con el límite superior de este rango para decidir si el nuevo resultado es el valor final o se debe utilizar el próximo rango. Este proceso se puede realizar de igual forma en cualquier sentido.

3.2.2 Cálculo de las resistencias de referencia

La principal fuente de error en el cálculo de resistencias por este método radica en que el conversor con que cuenta el microprocesador es de 10 bits y por tanto solo se pueden calcular 1024 valores diferentes de resistencia para estimar todos los valores posibles desde 0 hasta infinito, lo cual resulta insuficiente para representar todos estos valores con una buena aproximación en todos los casos [3]. De esta forma por el error que se comete en la cuantificación todos los valores de resistencia menores que R_{L1} se cuantifican como escalón 0 y en el cálculo de la resistencia desconocida R_x por este método se obtiene un valor R_{x0} ; así mismo los valores de resistencia comprendidos entre R_{L1} y R_{L2} se cuantifican como escalón 1 y en el cálculo se aproximan como R_{x1} ; de forma general los valores de resistencia comprendidos entre R_{Li} y $R_{L(i+1)}$ se cuantifican como escalón i y en el cálculo se aproximan como R_{xi} , para todos los valores naturales de i con $i \leq 1023$. Por tanto hay que identificar qué valores R_{xi} son capaces de representar a todos los valores comprendidos entre R_{Li} y $R_{L(i+1)}$ con un error menor que el máximo permisible según los requerimientos prácticos de diseño. Teniendo en cuenta que el error de medición se define como la diferencia entre el valor medido y el valor verdadero y que en este caso el error cometido es relativo (pues no es igual un error de 100 Ω midiendo una resistencia de 200 Ω que una de 10 k Ω) se tomó como medida del error la siguiente expresión:

$$Error = \frac{R_{xi} - R_{Li}}{R_{xi}}$$

(3.1)

Y además:

$$R_{xi} = \frac{i}{N-i} R_F$$

(3.2)

Donde:

R_{xi} : Resistencia calculada

R_{Li} : Resistencia que representa el extremo inferior del intervalo cuyos valores se aproximan a R_{xi} cuando se realiza el cálculo por este método.

i : Escalón de cuantificación para la resistencia calculada

N : Máximo valor de los escalones de cuantificación (en el caso de un conversor de 10 bit es 1023)

Para calcular R_{Li} se toma el escalón de cuantificación como $i - 0.5$ pues éste es el mínimo valor que puede tomar el escalón de cuantificación para ser redondeado a i ya que si fuera menor que eso se aproximaría a $i - 1$ y estaría en el rango inmediato inferior:

$$R_{Li} = \frac{i-0.5}{N-i+0.5} R_F$$

(3.3)

Uniendo estas fórmulas y simplificando quedaría que:

$$Error = \frac{0.5N}{(N-i)(i-0.5)} \quad (3.4)$$

Donde se puede apreciar que el error es independiente de la resistencia de referencia y solo depende del escalón de cuantificación calculado y del escalón de cuantificación máximo. Además si se fija el error máximo permisible se puede determinar el rango de escalones de cuantificación útiles para el cálculo de resistencias:

$$Error_{m\acute{a}x} > \frac{0.5N}{(N-i)(i-0.5)} \quad (3.5)$$

Donde luego de despejar i y eliminar ciertos términos por considerarse despreciables desde el punto de vista práctico y que de mantenerlos complejizarían las fórmulas, podemos restringir el valor de i al siguiente rango según el error máximo permisible:

$$\frac{N}{2} - \sqrt{\frac{N^2}{4} - \frac{0.5N}{Error_{m\acute{a}x}}} < i < \frac{N}{2} + \sqrt{\frac{N^2}{4} - \frac{0.5N}{Error_{m\acute{a}x}}} \quad (3.6)$$

Por ejemplo para un conversor de 10 bit ($N=1023$) que se quiere emplear para muestrear el voltaje y calcular resistencias con un error menor del 0.5% ($Error_{m\acute{a}x} = 0.005$) se tiene que i debe ser aproximadamente mayor que 113 y menor que 910.

Una vez que se han fijado los valores de i_{max} e i_{min} se procede a calcular los diferentes valores de resistencia de referencia y los límites de los intervalos para cada uno de los rangos que se van a utilizar siguiendo los siguientes principios:

1. La resistencia mínima que limita cualquier rango se calcula con la expresión:

$$R_{min} = \frac{i}{N-i} R_F \quad (3.7)$$

empleando para ello la resistencia de referencia del rango en cuestión y la i_{min}

2. La resistencia máxima que limita cualquier rango se calcula con la expresión

$$R_{max} = \frac{i}{N-i} R_F \quad (3.8)$$

empleando para ello la resistencia de referencia del rango en cuestión y la i_{max}

3. La resistencia de referencia de cualquier rango se calcula con la expresión

$$R_F = \frac{N-i}{i} R_x \quad (3.9)$$

empleando para ello la resistencia mínima del rango en cuestión con la i_{min} , o la resistencia máxima del rango en cuestión con la i_{max} .

4. La resistencia máxima de un rango es la mínima del rango inmediato superior y viceversa.
5. Siempre es necesario asumir el valor de una de las resistencias inicialmente ya sea una de referencia o una de límite de intervalo.

En el caso del circuito implementado por cuestiones prácticas y limitaciones de la resistencia interna del conmutadores bilaterales 4066 se tomó una resistencia de referencia para el rango más pequeño de 175 Ω lo cual permite calcular resistencias de hasta 1.3 k Ω con un error menor del 0.5% en la cota superior mientras que en la inferior con igual error permite llegar hasta 20 Ω , aunque se pueden calcular valores más pequeños a costa de degradar el error, por ejemplo, hasta 10 Ω se calcula con un error del 1% y hasta 1 Ω con un error del 5%. Para el rango intermedio se parte de una cota inferior de 1.3 k Ω , lo cual para un error menor del 0.5% permite calcular resistencias de hasta 75 k Ω con una resistencia de referencia de 10 k Ω . Finalmente para el rango superior se parte de una cota inferior de 75 k Ω , lo cual para un error menor del 0.5% permite calcular resistencias de hasta 5 M Ω con una resistencia de referencia de 600 k Ω , aunque se pueden calcular otros valores mayores a costa de degradar el error, por ejemplo, hasta 10 M Ω se puede calcular con un error de hasta 8.6% [18].

3.3 Circuitos para la medición de inductancia y capacitancia.

El PIC18F4520 controla los dos circuitos Fig. 3.5 usados en la medición LC, un circuito oscilador implementado internamente y un circuito temporizador integrado 555 en su forma monoestable; además de controlar la selección a través de un relevador electromagnético. El primer circuito se utiliza para hacer mediciones de inductancia en un rango efectivo de 0.05 μ H a 70 mH y mediciones de capacitancias en un rango efectivo de 1pF a 100nF; mientras que el segundo se utiliza para hacer mediciones de capacitancias en un rango efectivo de 1000 pF a 6800 μ F aproximadamente [7] [8].

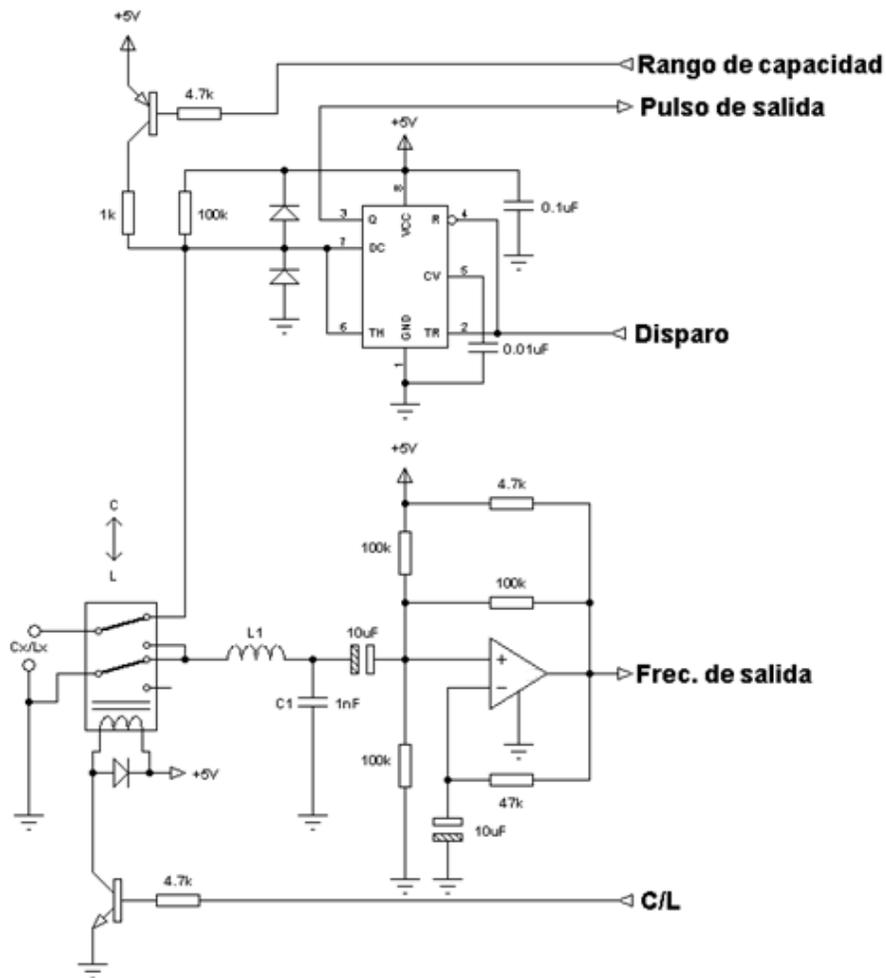


Fig.3.5.Circuitos de medición de inductancia y capacitancia.

Circuito para la medición de inductancia (Lx) y capacitancia (Cx) pequeñas

El circuito empleado para determinar el valor de inductancia y capacitancia requiere ser calibrado antes de realizar alguna medición, donde el microcontrolador necesita conocer con precisión el valor de L1 y C1 (componentes internos del instrumento). Durante la calibración, sin tener conectado aún algún capacitor o inductor, el PIC18F4520 mide una frecuencia F1 que almacena en la memoria. Con esta frecuencia el microcontrolador realiza los cálculos necesarios para obtener L1 y C1. Luego de este proceso se energiza el relevador electromagnético, permitiendo la medición de la inductancia o capacitancia externa (Lx y Cx). Para lograr la oscilación fiable en un amplio rango de frecuencia, el oscilador de prueba se basa en un amplificador operacional con retroalimentación positiva que funciona como comparador analógico. Esta configuración tiene una inclinación natural a oscilar debido a la muy alta ganancia entre la entrada y la salida del

comparador. Cuando es aplicada inicialmente la energía (+5 V) al circuito, la entrada no inversora (+) del comparador se mantiene en la mitad del voltaje de alimentación por un divisor formado por dos resistencias de 100 k Ω . Sin embargo, el voltaje en la entrada inversora es inicialmente cero, porque el capacitor de 10 μ F en esta entrada necesita tiempo para cargarse a través de la resistencia de realimentación de 47 k Ω . Así, con su entrada no inversora mucho más positiva que su entrada inversora, el comparador activa inicialmente su salida a alto (5 V). Una vez que la salida del comparador está en alto, el capacitor de 10 μ F en la entrada inversora comienza a cargarse a través de la resistencia de 47 k Ω y así el voltaje en esta entrada se eleva exponencialmente. Cuando el voltaje sobrepasa el nivel de +2,5 V, la salida del comparador cambia repentinamente a bajo. Este bajo voltaje alimenta de nuevo a la entrada no inversora del comparador a través de una resistencia de realimentación de 100 k Ω . También está acoplado a través del capacitor de entrada de 10 μ F a un circuito sintonizado formado por la inductancia L1 y el capacitor C1. Esto hace que el circuito sintonizado resuene a esa frecuencia resonante. Como resultado, el comparador y el circuito sintonizado funcionan como un oscilador a esa frecuencia resonante. Una vez establecida esta oscilación, una onda cuadrada de la misma frecuencia aparece a la salida del comparador (frecuencia de salida). En la práctica, antes que algo esté conectado al circuito, la frecuencia de salida simplemente corresponde a la frecuencia de resonancia de L1, C1 y cualquier capacitancia parásita que puede estar asociada con ellos.

Circuito para la medición de capacitancia (Cx) grandes

Para realizar la medición de capacitancia se utiliza el integrado 555 en su modo monoestable, que es controlado por el PIC18F4520. Después de aplicar el pulso de disparo al 555, el micro realiza la medición del ancho del pulso a la salida, que está en función de la capacitancia (Cx). Si Cx excede el valor de 1 μ F se satura el transistor T1 (Rango de capacitancia), permitiendo la medición de capacidades mayores. En la configuración como monoestable, inicialmente (antes de que se aplique un pulso de disparo) la salida del 555 está en bajo (estado estable), mientras que el transistor de descarga (interno en el 555) está saturado, cortocircuitando el terminal 7 a tierra y manteniendo Cx descargado. Cuando se aplica un pulso de disparo (menor que 1/3VCC) de sentido negativo al terminal 2, la salida del 555 va a alto (alrededor de VCC - 1,5 V) durante un tiempo establecido por la red R1C, mientras se corta el transistor de descarga. Esto permite que Cx se cargue a través de R1 desde 0 V hacia VCC. Sin embargo, cuando el voltaje a través del capacitor alcanza 2/3VCC, la salida del 555 va a bajo, mientras satura el transistor de descarga, permitiendo que el capacitor se descargue rápidamente hacia 0 V. La salida permanecerá en este estado estable (bajo) hasta que se aplique otro pulso de disparo.

3.4 Módulos utilizados del PIC18F4520 e interfaz de visualización

Luego de recibir los datos necesarios, el PIC18F4520 realiza el procesamiento de los mismos para calcular el valor de inductancia, capacitancia o resistencia, según se esté midiendo. Una vez obtenido el valor de la medición los datos son enviados al visualizador LCD (Anexo 3) a través de una interfaz paralela de 4 bit utilizando el puerto D Fig. 3.6. Para realizar este procedimiento el microcontrolador hace uso de varios registros, que son configurados como se describe a continuación [17].

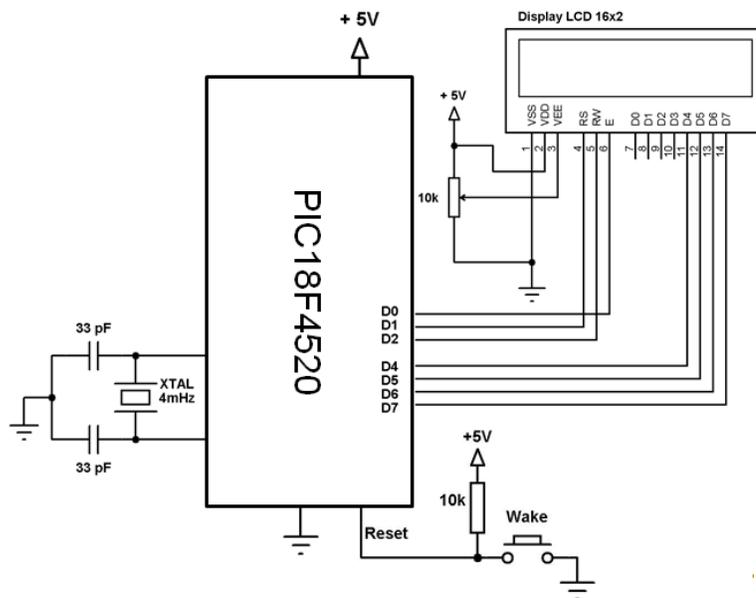


Fig.3.6. Interfaz PIC18F4520 y LCD

3.4.1 Modo Captura

En el módulo CCP (Captura/Comparación/PWM), el modo captura permite la medición de eventos externos, como la duración de pulsos digitales, por lo que es utilizado para medir a la salida del 555 el ancho del pulso. Para la aplicación del medidor, este modo emplea el timer1 y se modifican los bit 4 – 0 del registro CPPXCON como se muestra en la Fig 3.8.

U-0	U-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0
—	—	DCxB1	DCxB0	CCPxM3	CCPxM2	CCPxM1	CCPxM0
bit 7							bit 0

Fig.3.8. Registro de control CPPXCON

CCPxM3:CCPxM0: bits de selección del modo

CPP1 (módulo 1) 0100 = modo captura, cada flanco de bajada.

CPP2 (módulo 2) 0101 = modo captura, cada flanco de subida.

3.4.2 Timer 0 y Timer 1

El Timer 0 se utiliza en el modo contador de 16 bit, para el cálculo de la frecuencia del circuito oscilador, que se usa para la medición de inductancia y el Timer 1 se utiliza como temporizador para el apagado del dispositivo si no tiene nada conectado al cabo de 5 minutos [7]. Para ello se hace uso de los registros de control Fig. 3.8

R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1	R/W-1
TMR0ON	T08BIT	T0CS	T0SE	PSA	T0PS2	T0PS1	T0PS0
bit 7							bit 0

Fig.3.8. Registro de control del Timer.

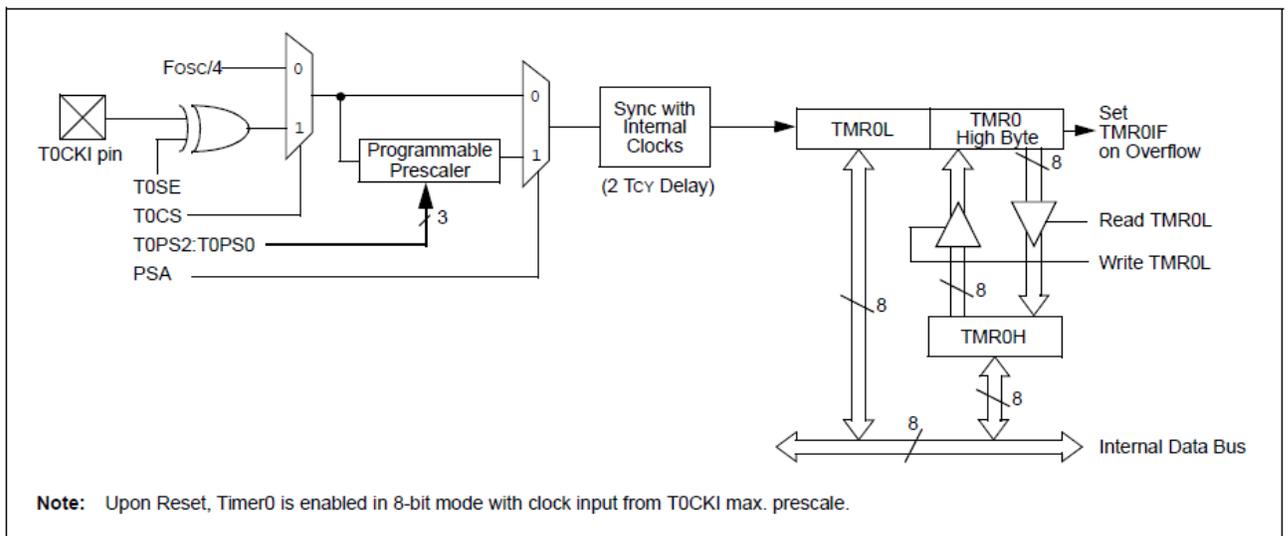


Fig.3.9. Diagrama de bloques del Timer0 (modo 16 bit)

bit7 TMR0ON: bit de control de Encendido/Apagado del Timer0

1 = Habilitación del Timer0

0 = Parada del Timer0

bit 6 T08BIT: bit de control de 8 bit/16 bit del timer0

1 = Configuración del Timer0 como un contador/temporizador de 8 bit

0 = Configuración del Timer0 como un contador/temporizador de 16 bit

- bit 5 T0CS: bit de selección de la fuente de reloj del Timer0
1 = Transición en el pin T0CKI
0 = Reloj de ciclo de instrucción interna (reloj interno)
- bit 4 T0SE: bit de selección del flanco de la fuente de reloj (tipo de flanco)
1 = Incremento en la transición de alto a bajo en el pin T0CKI
0 = Incremento en la transición de bajo a alto en el pin T0CKI
- bit 3 PSA: bit de asignación del *prescaler* del Timer0
1 = El *prescaler* del Timer0 no está asignado. La entrada de reloj del Timer0 no pasa *prescaler*
0 = El *prescaler* del Timer0 está asignado. La entrada de la fuente de reloj viene de la salida del *prescaler*
- bit 2 - 0 T0PS2:T0PS0: bits de selección del *prescaler* del Timer0.

3.4.3 Interrupción externa INT 0

La interrupción externa INT0 (RB0) permite seleccionar el circuito de medición. Es activada a través de los registros INTCON Fig.3.10, los cuales pueden ser leídos y escritos y además contienen varios de los bits de habilitación, prioridad (INT0 siempre tiene alta prioridad) y bandera. La interrupción externa INT0 se puede activar por flanco de subida o por flanco de bajada [7].

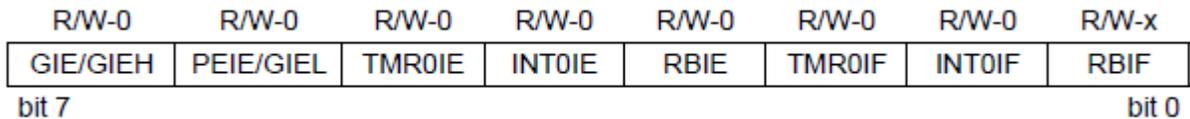


Fig.3.10. Registro INTCON

El bit 4 (INT0IE) es el bit de habilitación de la interrupción externa INT0, se habilita a 1 y se deshabilita a 0. El bit 1 (INT0IF) es el bit bandera de la interrupción externa, si es 1 significa que la interrupción externa ocurrió (debe ser limpiado por software), si es 0 significa que no ocurrió.

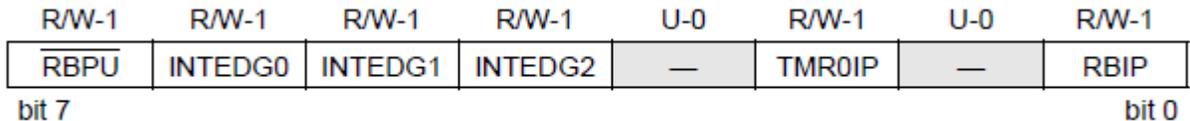


Fig.3.11. Registro INTCON2

El bit 6 (INTEDG0) permite seleccionar el flanco de la interrupción externa INT0, en el caso de que sea 1 es activada por flanco de subida y en el caso de que sea 0 es activada por flanco de bajada.

3.4.4 Comparadores operacionales

El PIC18F4520 trae un módulo de comparadores (dos comparadores) que se puede configurar de diversas formas. Para el diseño del medidor RLC se seleccionó el modo de operación mostrado en la figura 3.13 y se configuró el registro CMCON de la siguiente manera [7]:

R-0	R-0	R/W-0	R/W-0	R/W-0	R/W-1	R/W-1	R/W-1
C2OUT	C1OUT	C2INV	C1INV	CIS	CM2	CM1	CM0
bit 7							bit 0

Fig.3.12. Registro CMCON.

bit 2 – 0 CM2:CM0: bits de selección del modo comparador.

Hay 8 modos de operación para los comparadores. Los bits del registro CMCON son usados para seleccionar estos modos.

CM2:CM0: 001 = un comparador independiente con salida externa.

CM2:CM0 = 001

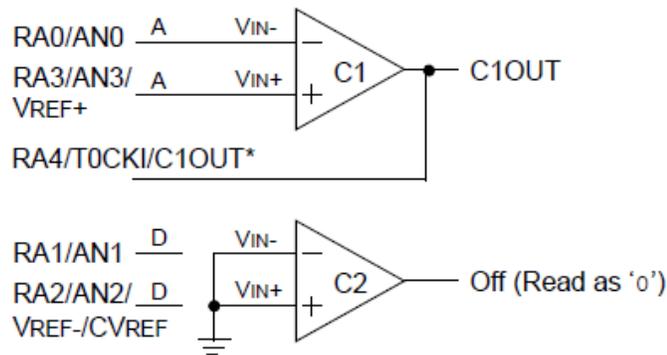


Fig.3.13. Comparador independiente con salida externa.

3.5 Modo de operación del medidor RLC

Una vez encendido inmediatamente se efectúa la calibración automática del instrumento antes de que se pueda medir algún valor de resistencia, inductancia o capacitancia, inicialmente el instrumento se encuentra en el modo resistencia. Para el cambio al modo capacitancia e inductancia, se debe presionar la tecla de selección (R/L/C). Cuando no se está midiendo ningún componente, se mostrará 0.00 nF en el caso de capacitancia , 0.00 mH en el caso de inductancia o 0.00Ω en el caso de resistencias; transcurrido 3 minutos en esta condición, el equipo se apagará automáticamente, y podrá salir de este estado si se presiona la tecla *wake* (despertar).

Al realizar una medición si los valores están dentro del rango especificado de 0.05 μH a 70 mH, de 1pF a 6800 μF o 1 Ω a 10M Ω respectivamente, se mostrará el resultado de la medición; de lo contrario, se visualizará "00".

3.6 Diagrama de flujo

En la figura 3.14 se muestra el diagrama de flujo del programa diseñado para el medidor.

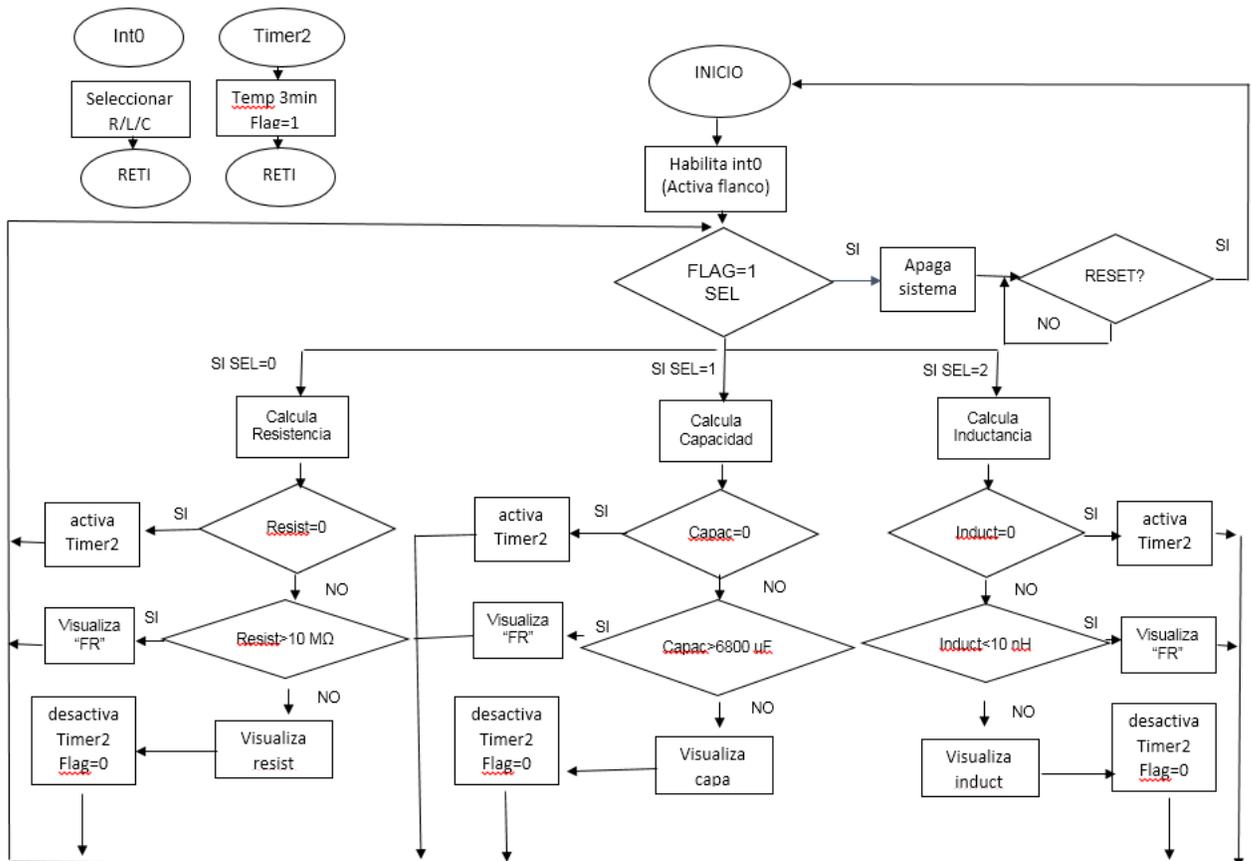


Fig.3.14. Diagrama de flujo del medidor RLC

Inicialmente se crean todas las variables, se inicializa el LCD y se activan las interrupciones utilizadas en el programa. A continuación, se selecciona el modo resistencia, inductancia o capacitancia (Por defecto va al modo R); al conectar una resistencia se calcula y visualiza el valor de C si el mismo es menor de 10M Ω , de lo contrario se visualiza "FUERA DE RANGO". Al conectar un capacitor, se calcula y visualiza el valor de C si el mismo es menor de 6800 μF , de lo contrario se visualiza "FUERA DE RANGO". Para el caso de la inductancia se realiza el mismo proceso. La interrupción externa int0 permite la selección del modo resistencia, inductancia o

capacitancia. Utilizando el timer2 si transcurre un tiempo de 3 minutos sin que se conecte ningún componente (resistencia, inductor o capacitor), se apaga el sistema, manteniéndose en este hasta que sea presionada la tecla *wake* (*reset*). Algunas de las funciones utilizadas en la programación se muestran en el anexo 3.

3.7 Diseño del circuito impreso

Un circuito impreso consiste en una placa de material aislante sobre la que se encuentran adheridas láminas metálicas. Posee orificios a través de los cuales pasan los terminales de los componentes los que se sueldan a las láminas metálicas que sirven de interconexión entre los componentes [19].

Ventajas de los circuitos impresos:

- Permite la producción automática.
- Reduce la mano de obra de producción y por lo tanto el costo.
- Permite un montaje más compacto economizando espacio y peso.
- Su exacta y total reproducibilidad elimina los errores del cableado.

Para el diseño del circuito impreso debe contarse con los elementos siguientes:

- Esquema eléctrico del circuito.
- Rango de frecuencia de trabajo.
- Tamaño real y forma física de los componentes (nombre del encapsulado).
- Corrientes y voltajes en cada rama.
- Potencia que disipa cada componente.

La disposición de los componentes en el área, se hace teniendo en cuenta reglas:

- Térmicas.
- Eléctricas.
- Electromagnéticas.
- De accesibilidad.
- Estéticas.

Reglas básicas de diseño del conexionado impreso:

- Evitar al máximo los cruzamientos.
- Prever una isla de cobre para cada terminal de componente.
- Evitar los ángulos abruptos ya que tienden a desprenderse los conductores en esos puntos.
- Los conductores impresos deben ser lo más cortos y anchos posible para evitar caídas de tensión indeseadas.

- El ancho del conductor impreso depende de la corriente, para que no haya un calentamiento excesivo se recomienda 1mm de ancho cuando circula 1A.
- La separación entre los conductores impresos debe ser tal que no haya riesgos de descargas, cortocircuitos ni de corrientes de fuga. Una separación de 1mm permite una diferencia de potencial de 240v.
- La interconexión entre placas se debe realizar a través de conectores.

Hoy en día existen varios programas profesionales que permiten el diseño de circuitos impresos entre ellos el Ares 7 Profesional, el ORCAD Layout, entre otros. En este caso se hizo uso del Ares del paquete Proteus por su fiabilidad y calidad a la hora de diseñar el circuito impreso, el diseño quedo de la forma siguiente Fig.3.15 y 3.16:

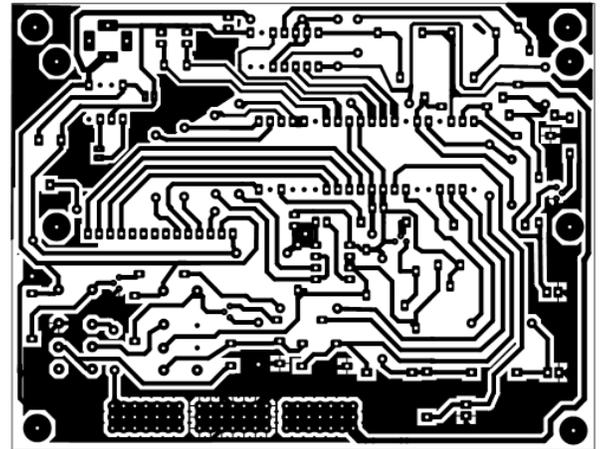
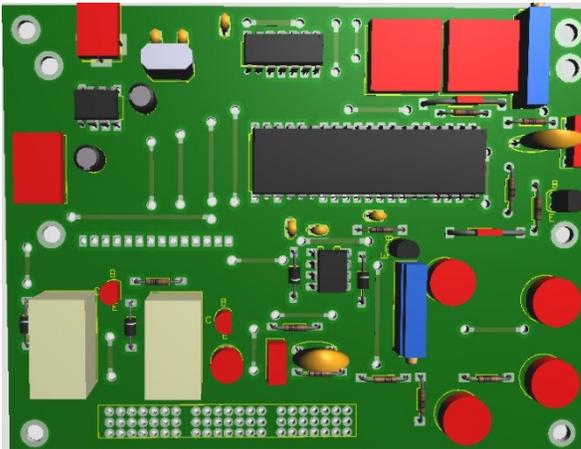


Fig.3.15 Diseño del PCB

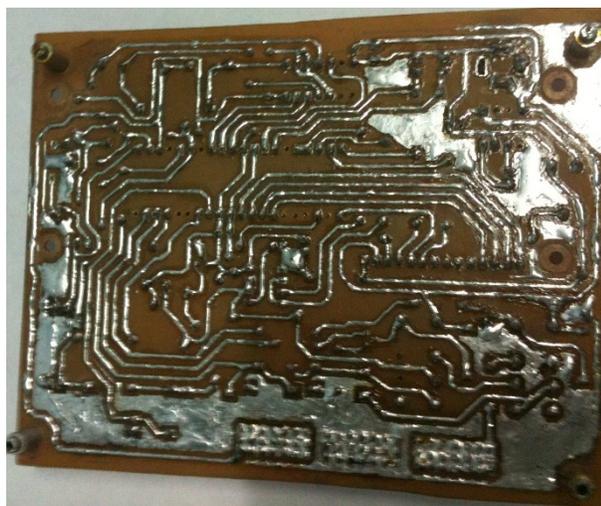


Fig.3.16 Resultado final del PCB

3.8 Montaje y prueba del medidor RLC

Durante el diseño del medidor se realizaron varias simulaciones utilizando Proteus, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del mismo. Además se hizo el montaje experimental y final del instrumento y se efectuaron varias mediciones de resistencias, inductancia y capacitancia, cuyos resultados están próximos a los obtenidos en las simulaciones. En el anexo 5 y 6 se muestran imágenes de algunas simulaciones y pruebas realizadas.

Del mismo modo se hicieron pruebas y comparaciones de las mediciones con dispositivos profesionales para comparar su correcto funcionamiento. En las tablas 3.1, 3.2 y 3.3 se muestran comparaciones de las mediciones realizadas empleando el medidor RLC diseñado y otros

Tabla 3.1. Valores de capacitancia utilizando el instrumento diseñado y el Fluke 179

Cx NOMINAL	MEDIDOR RLC	FLUKE 179
10 nF	11.91 nF	12 nF
22 nF	20.21 nF	20 nF
33 nF	37.10 nF	38 nF
100 nF	104.42 nF	105 nF
220 nF	222.50 nF	222 nF
1 μ F	1.08 μ F	1.07 μ F
10 μ F	10.30 μ F	10.09 μ F
22 μ F	22.61 μ F	23.9 μ F
470 μ F	475.11 μ F	495 μ F
1000 μ F	1017.33 μ F	1023 μ F
2200 μ F	2164.12 μ F	2221 μ F

Tabla 3.1. Valores de inductancias patrones de laboratorio y mediciones utilizando el instrumento diseñado.

Lx NOMINAL	MEDIDOR RLC
1 μH	1.15 μH
1.5 μH	1.45 μH
2.5 μH	2.47 μH
5 μH	4.59 μH
10 μH	9.02 μH
25 μH	22.12 μH
50 μH	44.58 μH
100 μH	89.75 μH
250 μH	230.51 μH
500 μH	472.81 μH
1 mH	919.91 μH
2.5 mH	2.41 mH
5 mH	4.75 mH
10 mH	9.52 mH

Tabla 3.3. Valores de resistencias medidos utilizando el instrumento diseñado y el Fluke 115.

Rx NOMINAL	FLUKE 115	MEDIDOR RLC
2 Ω	2.1 Ω	1.9 Ω
10 Ω	10.8 Ω	9,8 Ω
50 Ω	50.5 Ω	49.5 Ω
100 Ω	100,5 Ω	99,3 Ω
200 Ω	200.5 Ω	200.3 Ω
800 Ω	800 Ω	802 Ω
1 k Ω	1k Ω	1.01 k Ω
2.2k Ω	2.19k Ω	2.18 k Ω
4.4 k Ω	4.39 k Ω	4.38 k Ω
10 k Ω	9.99 k Ω	10.01 k Ω
100 k Ω	98.9 k Ω	98.97 k Ω
140 k Ω	140 k Ω	141 k Ω
500 k Ω	501k Ω	504 k Ω
840 k Ω	840 k Ω	841 k Ω
1.9 M Ω	1.95 M Ω	1.91M Ω

3.9 Fuentes de errores más significativas

El medidor de resistencia, inductancia y capacitancia es afectado por varios factores que contribuyen a errores en el proceso de medición, a continuación se presentan las principales fuentes de error y su influencia en la medición [18].

La principales fuentes de error en la medición de resistencias son: el error de cuantificación producido por el conversor A/D al tomar las muestras a la salida del divisor de tensión ; las resistencias internas de los dispositivos utilizados, las variaciones de resistencias por temperatura y las resistencias parásitas introducidas por el ruido presente en el circuito. Otro error es el provocado en el cálculo del valor de resistencia al realizar la aproximación cuando se redondea el valor real. Todas estas fuentes de error se tienen en cuenta en el código a la hora de calcular Rx.

Principales fuentes de error en la medición de capacitancia: error en la generación del pulso de salida del temporizador integrado 555, causado por la tolerancia del valor de las resistencias externas conectadas a los terminales 6 y 7 del integrado; este al ser un circuito con muy buenas prestaciones y las resistencias externas de precisión, su efecto se puede considerar despreciable. Otro error es el provocado en la medición del pulso, en los que se encuentran: el error de aproximación al redondear el valor real, que puede considerarse despreciable ya que la resolución es de 5 % dígitos; además está el error dado por la inestabilidad del oscilador, que al ser un cristal de cuarzo, se puede considerar despreciable.

Principales fuentes de error en la medición de inductancia: error en la generación de frecuencia, causado por el inductor y capacitor externos que forman el circuito tanque, por lo que usando componentes de precisión el efecto de este error se puede considerar depreciable o se puede compensar; también se encuentra el error del oscilador (circuito tanque y amplificador operacional), que a frecuencias muy bajas se vuelve inestable, por lo que se ha limitado su rango de medición, de tal forma que se puede considerar despreciable. Otro error a tener en cuenta es el provocado en la medición de la frecuencia, en los que se encuentran: el error de aproximación al redondear el valor real, que puede considerarse despreciable ya que la resolución es de 5 dígitos; también está el error dado por la inestabilidad del oscilador, que al ser un cristal de cuarzo, se puede considerar despreciable. Los capacitores medidos, algunos superan el 20% de tolerancia, por lo que las mediciones están dentro de la tolerancia del componente. El instrumento patrón tomado como referencia para el cálculo del error absoluto (IDEAL Pro 61.340) presenta un error de +/- 3.0% + 10 en el rango de 0.01 μ F hasta 0.04 μ F, de +/- 3.0% + 5 en el rango de 0.4 μ F hasta 40 μ F y de +/- 20% + 5 en el rango de 400 μ F hasta 4000 μ F, por lo que los resultados en cuanto a exactitud se pueden considerar correctos para una primera versión de diseño de un instrumento de medición de inductancia y capacidad. Para la inductancia se usaron inductores calibrados que presentan una capacidad parásita de 5 a 8 pF. En la tabla 3.4 y 3.5 se muestran los valores de inductancia, capacitancia y resistencias medidos utilizando el medidor diseñado y el error absoluto

Tabla 3.5. Valor del error absoluto para las mediciones de resistencias.

Valor de R	R medido	Error absoluto
2 Ω	1.9 Ω	0.1 Ω
10Ω	9.8 Ω	0.2 Ω
50 Ω	49.5 Ω	0.5 Ω
100 Ω	99.3 Ω	0.7 Ω
200 Ω	200.3 Ω	0.7 Ω
800 Ω	802 Ω	2 Ω
1 kΩ	1.01 kΩ	10 Ω
2.2kΩ	2.18 kΩ	20 Ω
4.4 kΩ	4.38 kΩ	20 Ω
10 kΩ	10.01 kΩ	10 Ω
100 kΩ	98.97 kΩ	130 Ω
140 kΩ	141 kΩ	1000 Ω
500 kΩ	504 kΩ	4000 Ω
840 kΩ	839 kΩ	1000Ω
1.9 MΩ	1.91MΩ	10000 Ω

El cálculo del error relativo reducido del máximo valor, para la capacitancia da como resultado 1.5%, para la inductancia 4.8% y para resistencias 0.6%. La fórmula utilizada se muestra a continuación:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_n} \cdot 100 \quad (3.12)$$

donde:

ΔX – error absoluto

X_n – valor normalizado

Después del análisis y las pruebas efectuadas con el medidor RLC y otros instrumentos, se observa en las tablas antes presentadas que el instrumento diseñado muestra un comportamiento relativamente estable y aceptable [18].

3.10 Valoración económica

Los medidores RLC comerciales son instrumentos que pueden encontrarse en tiendas y sitios de venta de Internet, su costo oscila alrededor de \$ 35.00 (USD) hasta \$ 189.00 (USD) en dependencia de las características, marca y país. Además existen medidores profesionales por valor mayor de

\$ 200.00 (USD). El instrumento diseñado presenta un amplio rango de medición, confiabilidad y su implementación es de bajo costo. A continuación en la tabla 3.6 se muestra una lista del costo de los componentes necesarios para la construcción del medidor RLC, dando como resultado un costo total de \$ 12.51 (USD). Como se observa, la construcción del instrumento es factible económicamente, pues el costo de implementación del medidor RLC diseñado es inferior al de los medidores vendidos en el mercado.

Tabla 3.6. Listado de componentes utilizados y precios correspondientes.

COMPONENTES	PRECIOS
1 Microcontrolador (PIC18F4520)	\$ 3.00 (USD)
1 Temporizador (NE555)	\$ 0.25 (USD)
1 Interruptor bilateral integrado (4066)	\$ 0.25 (USD)
1 Display LCD (SYB1602A)	\$ 2.06 (USD)
3 Push-button	\$ 0.15 (USD)
12 Resistencias	\$ 0.10 (USD)
6 Resistencias variables (potenciómetros)	\$ 0.60 (USD)
4 transistores	\$ 0.42 (USD)
2 capacitores (tantalio)	\$ 0.35 (USD)

8 capacitores (cerámica)	\$ 0.75 (USD)
1 inductor	\$ 0.07 (USD)
1 Cristal de cuarzo (16 MHz)	\$ 0.16 (USD)
3 diodos	\$ 0.05 (USD)
2 Relevador electromagnético	\$ 0.60 (USD)
Placa virgen 15x15	\$0.80 (USD)
Estaño (rollo)	\$3.00 (USD)
Total	\$ 12.51 (USD)

Es importante mencionar que la mayoría de los componentes utilizados son recuperados es decir, equipos que se han desechados, por lo que no fue necesario su compra.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Del estudio realizado se demostró la versatilidad del uso de microcontroladores por su fácil implementación y fiabilidad.
2. De las simulaciones y montajes experimentales efectuados se pudo demostrar el correcto funcionamiento del medidor RLC diseñado.
3. Se consiguió diseñar un instrumento que puede ser fabricado con pocos elementos y bajo costo, brindándole al estudiante una herramienta necesaria para llevar a la práctica sus conocimientos.
4. Se logró la implementación práctica del instrumento cumpliéndose el objetivo de medir inductancia en el rango de 0.05 μH hasta 70 mH con un error relativo reducido de 4.8%, capacitancia en el rango de 1pF hasta 6800 μF con un error relativo reducido de 1.5% y resistencias con un error relativo de 0.6%.

RECOMENDACIONES

- Agregar otros parámetros de medición al instrumento.
- Trabajar en la disminución del error producido por el instrumento al realizar las mediciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] W. D. Cooper y A. D. Helfrick, Instrumentación Electrónica Moderna y de Técnicas de Medición, Editorial Pearson Educación, 1990.
- [2] J. G. Webster, Electrical measurements, signal processing, and displays, CRC PRESS, 2004.
- [3] F. Adina, Microcontroladores Funcionamiento, programación y aplicaciones prácticas, Dálaga, 2011.
- [4] C. d. Autores, PIC microcontrollers, Elseiver, 2008.
- [5] R. G. A. NARVÁEZ, «construcción de un multímetro digital que mida voltajes dc, resistencias y capacitores,» Quito, 2010.
- [6] M. RASHID, circuitos microelectronicos analisis y diseño FELLOW, Florida: INTERNATIONAL THOMSON EDITORS, 1999.
- [7] J. D. B. LABRADA, «diseño de un medidor de inductancia y capacitancia,» Santiago de Cuba, 2014.
- [8] E. G. D. Garrido, Aplicaciones de la electrónica, Santiago de Cuba, 2010.
- [9] J. Rowe, «High-accuracy Digital LC Meter,» Everyday Practical Electronics, Constructional Project,» Marzo 2010. [En línea]. Available: http://www.handsontec.com/ezone_files/LC Meter.pdf.
- [10] H. F. C. A. E. Arroyo, Medidor LC utilizando pantalla LCD 2X16 para la visualización con programa embebido en un microcontrolador, Guayaquil, 2010.
- [11] «Resonance and Filters,» Diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://cie-wc.edu/Resonance-and-filters-Resonant-Frequency-and-Impedance-of-a-Parallel-Resonant-LC-Circuit-08-21-2012.pdf>.
- [12] F. Valdés, P. Monografía PIC, Santiago de Cuba, 2004.
- [13] «Proteus Lab Centers,» 2015. [En línea]. Available:

- <http://www.ieespain.com/ieeproteus/index.html>.
- [14] E. García, *Compilador C CCS y simulador Proteus para microcontroladores PIC*, 1ra. ed., Marcombo, 2008 .
- [15] Microchip Technologic Inc, «PIC18F2420/2520/4420/4520 Data Sheet,» 2004. [En línea]. Available: <http://alldatasheet.com>.
- [16] «4066 Datasheet,» Enero 2015. [En línea]. Available: www.alldatasheet.com/HCF4066B.
- [17] «NE555 Datasheet,» 2014. [En línea]. Available: www.alldatasheet.com/NE555.pdf.
- [18] J. Ignacio, «Cómo gobernar un display LCD alfanumérico basado en el controlador HD44780,» 2014. [En línea]. Available: http://eii.unex.es/profesores/jisuarez/descargas/ip/lcd_alfa.pdf.
- [19] J. F. A. Salazar M, *Mediciones Eléctricas*, Santiago de Cuba, 1992.
- [20] I. R. M. Marcos, «Primeros pasos para diseñar circuitos con Ares,» Santiago de Cuba, 2014.
- [21] Microchip Technology, «PIC18F2420/2520/4420/4520 Data Sheet,» 2004. [En línea]. Available: <http://www.microchip.com/PIC18F2420/2520/4420/4520DataSheet/index.html>.

BIBLIOGRAFIA

- ✓ S. P. Dandamudi. *Guide to RISC Processors for Programmers and Engineers*, Springer Science + Business Media, Inc., 2005.
- ✓ Dogan. *Advanced PIC Microcontroller Projects in C*, Linacre House, Jordan Hill, Oxford, 2008.
- ✓ R. Pallás. *Adquisición y Distribución de Señales*, Marcobo Boixareu Editores, Barcelona, 1993.
- ✓ M. A. Pérez; A. Álvarez A; J. C. Campo; J. Ferrero; G. J. Grillo. *Instrumentación electrónica*,

GLOSARIO DE TÉRMINOS

A/D: Conversor analógico digital.

Capacitancia o capacidad (C): propiedad de un dispositivo o medio material para almacenar una carga electrostática. Un capacitor es un dispositivo diseñado específicamente para hacerlo.

Capacitor: dispositivo eléctrico diseñado específicamente para almacenar una carga electrostática y se opone a cambios en el voltaje.

Circuito tanque: circuito formado por una bobina y un capacitor, que es capaz de almacenar energía eléctrica.

Cristal de cuarzo: Un pedazo natural o artificial de cuarzo cortado a dimensiones específicas, generalmente auto-contenido en un encapsulado. El dispositivo actúa como un circuito selectivo altamente estable. Se exhibe una resonancia fuerte a la frecuencia para la que se corta, y en los armónicos de esta frecuencia. Se utiliza como el elemento que determina la frecuencia en osciladores de precisión.

CPU: Unidad de procesamiento central.

Cx: Capacidad desconocida o capacidad a medir.

Error Absoluto: Es la diferencia entre el resultado de una medición, y un valor de referencia expresado en unidades de la magnitud.

Error de medición: La diferencia entre el valor medido de una cantidad y su valor real.

Error Relativo: Es la relación que existe entre el error absoluto y la magnitud de referencia.

Error relativo reducido: Es el error relativo calculado con respecto al valor normalizado o medio de medición.

Impedancia (Z): La oposición pasiva total ofrecida por un circuito al flujo de una corriente eléctrica alterna (CA). Es la suma vectorial de resistencia y reactancia. Este es un número complejo cuyo componente real del número es la resistencia R, y cuyo componente imaginario del número es la reactancia jX ; matemáticamente, $Z = R + jX$.

Inductancia (L): es la propiedad de un circuito eléctrico o dispositivo en virtud de los cuales una corriente variable induce una fuerza electromotriz (fem), es decir, voltaje (V), en ese circuito o dispositivo, o en un circuito o dispositivo adyacente.

Inductor: dispositivo que comprende uno o más devanados de un material conductor, alrededor de un núcleo de aire o un material ferromagnético, para la introducción de la inductancia en un circuito eléctrico y se opone a cambios en la corriente.

LCD: Pantalla de cristal líquido.

Lx: Inductor desconocido o inductor a medir.

Microprocesador: circuitos integrados que contienen millones de transistores en su interior, los cuales crean circuitos complejos encargados de realizar diferentes tareas. También se los denomina unidad de procesamiento central o CPU, ya que muchos de ellos pueden actuar como el “cerebro” de un sistema computacional, administrando todas las tareas que este realice y llevando a cabo las operaciones con los datos. No incorporan puertos para control de periféricos, ni memoria de programa ni tampoco memoria de datos. Están especialmente diseñados para procesar grandes cantidades de datos y son muy susceptibles al ruido eléctrico.

Microcontroladores: son una pequeña computadora inyectada en un chip. Ellos incluyen una CPU, ROM, puertos de entrada salida, control de interrupciones, adaptador de puerto serie, etc. Su nombre se debe a que son pequeños (micro) y a través de ellos se realiza el control de máquinas y dispositivos. Están diseñados, principalmente, para el control industrial y no para el procesamiento de grandes cantidades de datos. Su principal ventaja radica en la alta inmunidad al ruido, el bajo costo y la reducción de espacio.

Medición: **1.** El proceso por el cual se encuentra la magnitud, el alcance o la duración de un parámetro. **2.** El valor de un parámetro, tal como se obtiene, de acuerdo con 1.

Medidor RLC: Medidor de resistencias, inductancias y capacitancias.

Puente de capacitancia: una de cuatro ramas de un puente de corriente para medir la capacitancia en función de un capacitor patrón. En su forma más simple, tiene un capacitor en una de sus ramas y resistencias en las otras tres.

Puente: **1.** Una red, que por lo general consiste de cuatro ramas, conectadas de manera que una señal de entrada se puede aplicar entre dos puntos opuestos y la salida se toma entre los otros dos puntos opuestos. Cuando los valores de los componentes están en una cierta proporción, el voltaje entre los puntos de salida es cero, y el puente se dice que está equilibrado o se establece en *null*. **2.** Un circuito tal como el descrito en (1) utilizado para mediciones eléctricas.

Puente equilibrado: Cualquier circuito puente de cuatro terminales en el que todos los terminales son idénticos en todos los aspectos eléctricos.

Puente de inductancia: Un puente de corriente alterna para medir la inductancia en términos de una inductancia patrón o una capacitancia patrón.

Rango de medición: En un dispositivo de medición, el intervalo en el que el error es menor que un valor especificado.

Resonancia: condición de un circuito que se produce cuando la reactancia inductiva (X_L) es igual a la reactancia capacitiva (X_C).

Reactancia (X): una forma de oposición al flujo de corriente eléctrica alterna (CA) a causa de la capacitancia o la inductancia, reactancia es una reacción de inercia para el flujo de CA, y se mide en ohmios (Ω).

Reactancia capacitiva (XC): oposición al flujo de corriente eléctrica alterna (CA) en un capacitor, se mide en ohmios (Ω).

Reactancia inductiva (XL): oposición al flujo de corriente eléctrica alterna (CA) en un inductor, se mide en ohmios (Ω).

Relevador electromagnético (relay, relé): Un dispositivo que abre o cierra un contacto cuando se energiza. Cuando el voltaje o corriente en un relé supera el valor especificado, el contacto del relé cambia su posición, provocando una acción en el interruptor del circuito.

Resolución: Cambio más pequeño en el valor medido al cual responde el instrumento. Una forma muy típica de especificar la resolución de un instrumento digital es a partir de su número de dígitos.

Resistencia: Se le llama **resistencia eléctrica** a la igualdad de oposición que tienen los electrones para desplazarse a través de un conductor. La unidad de resistencia en el Sistema Internacional es el ohmio, que se representa con la letra griega omega (Ω), en honor al físico alemán George Ohm.

Rx: Resistencia desconocida.

Impedancia (Z): es la oposición al paso de la corriente alterna. A diferencia de la resistencia, la impedancia incluye los efectos de acumulación y eliminación de carga (capacitancia) e/o inducción magnética (inductancia). Este efecto es apreciable al analizar la señal eléctrica implicada en el tiempo.

VDC: Fuente de tensión constante.

ANEXOS

Anexo 1 Simulación en Proteus, vista general de circuito experimental y final.

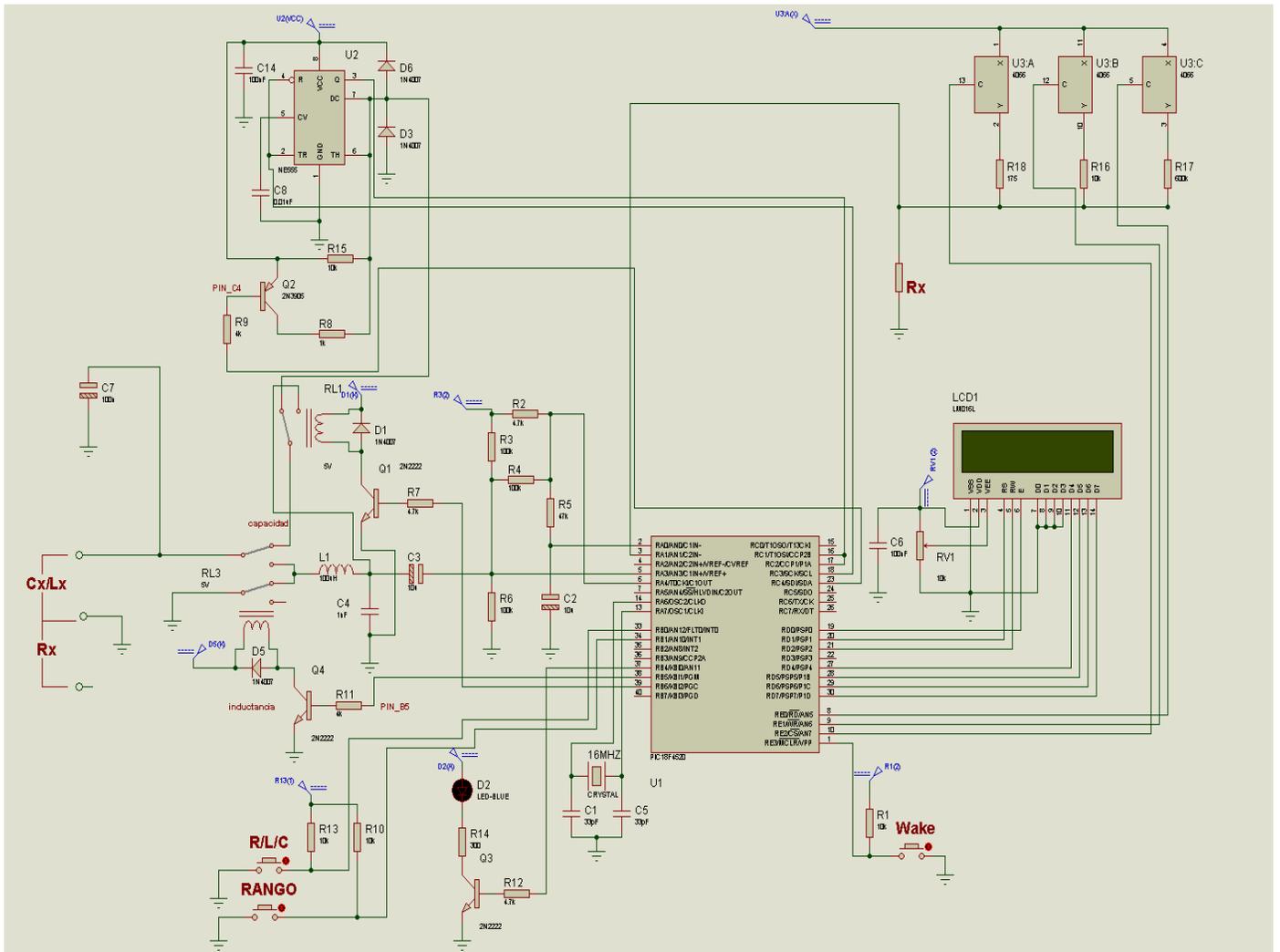


Fig.1. Circuito del medidor en Proteus.

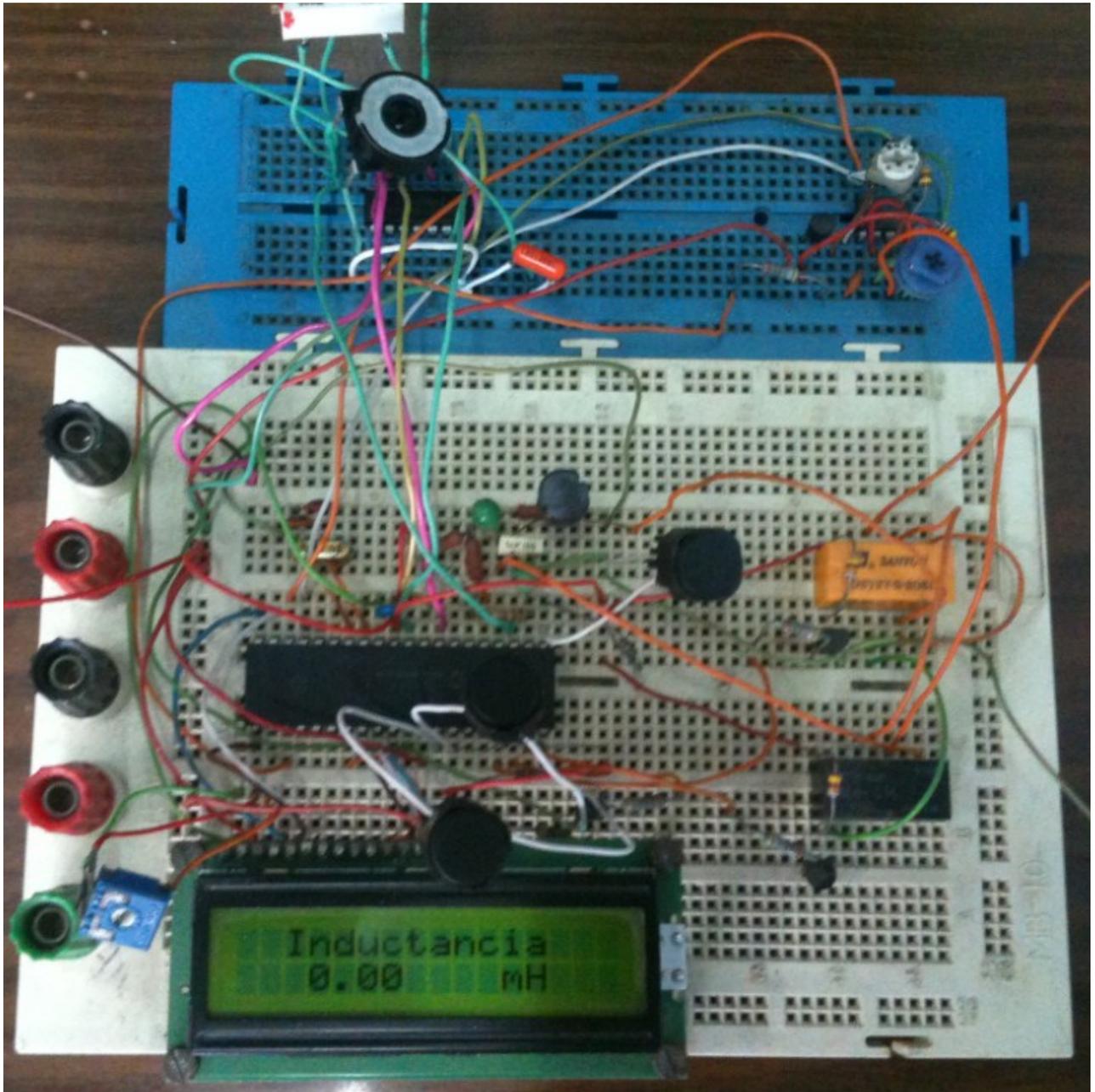


Fig.2.Montaje experimental.

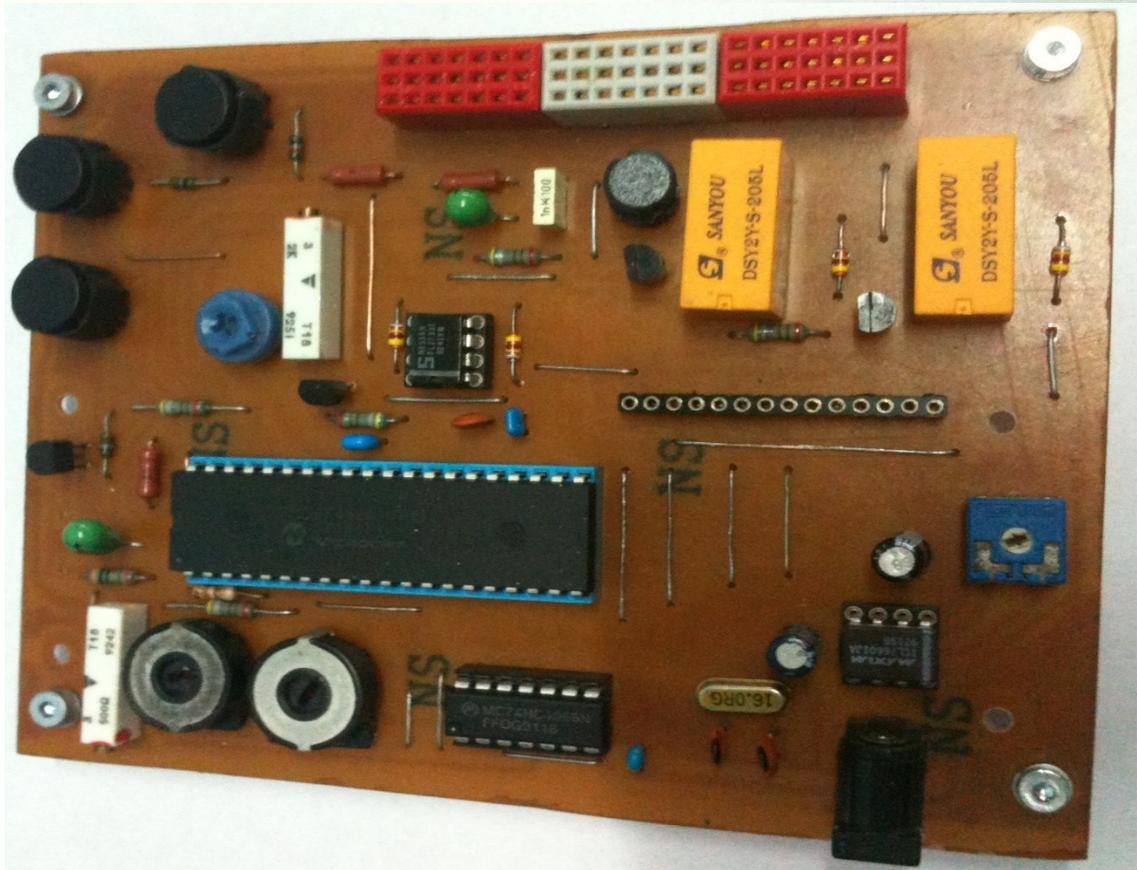
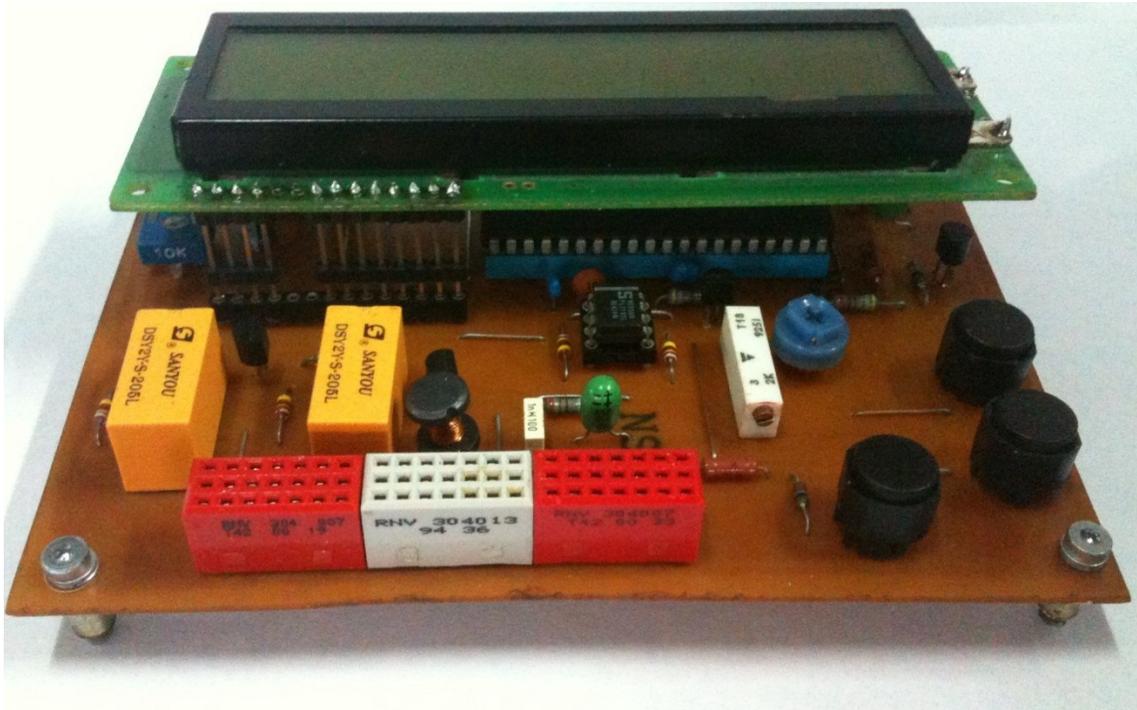


Fig.3.Montaje final del dispositivo.

Anexo 2 PCB

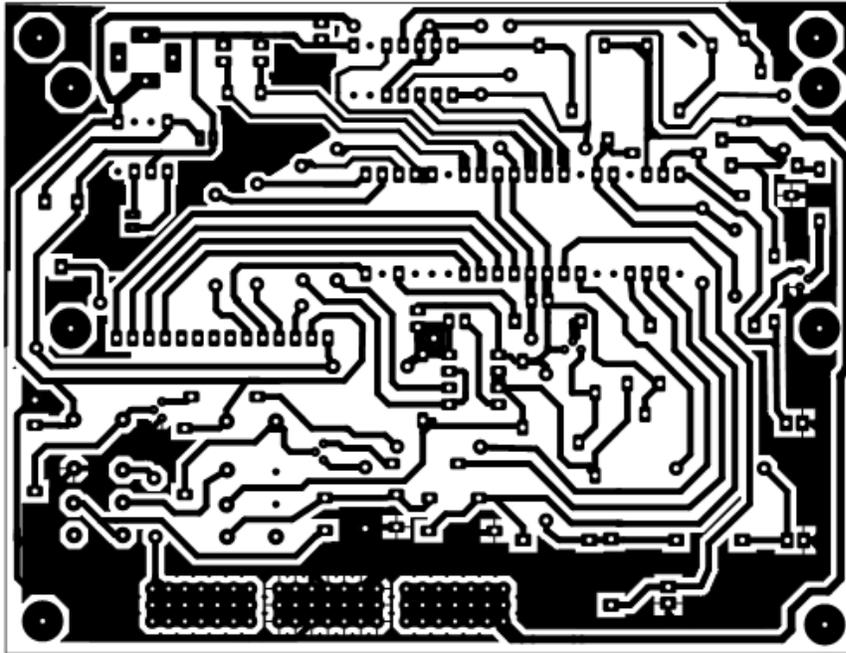


Fig.4.Diseño en Ares.

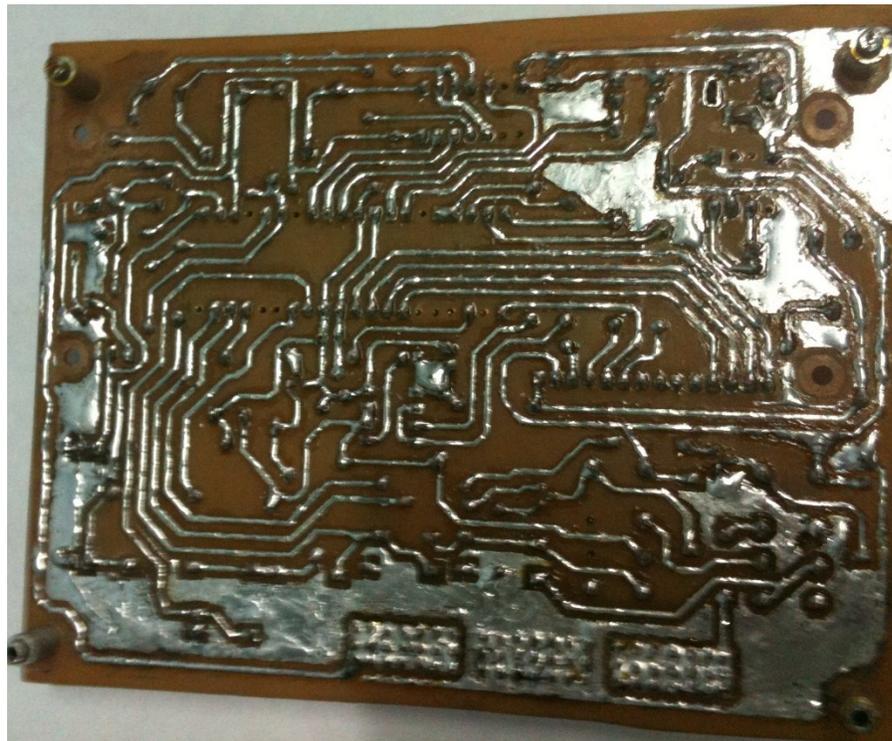


Fig.5.Resultado final.

Anexo 3 Funciones utilizadas

set_timer0(0), pone el registro del *timer0* a 0.

time=get_timer0(), permite leer el registro del *timer0*

time=get_timer1(), permite leer el registro del *timer1*

SETUP_COMPARATOR(A0_A3_NC_NC_OUT_ON_A4), Configuración de los dos comparadores independientes (C1 y C2)

SLEEP(), permite que el micro entre en modo de ahorro de energía

ext_int_edge(), activa la interrupción externa por flanco

void rango capacidad()

```
{
    if (capacidad>999)
    {
        capacidad = capacidad/1000;
        if (capacidad>6800)
        {
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc,"FUERA DE RANGO");
        }
        else
        {
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc," %f uF",capacidad);
        }
    }
    else
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc," %f nF ",capacidad);
    }
}
```

void rango inductancia()

```
{
    if(inductancia>999)
    {
        inductancia/=1000;
        if (inductancia>999)
        {
            inductancia/=1000;
            lcd_gotoxy(1,2);
            printf(lcd_putc," %f mH ",inductancia);
        }
        else
        {
            lcd_gotoxy(1,2);
        }
    }
}
```

```

        printf(lcd_putc," %f uH",inductancia);
    }
}
else
{
    if (inductancia<10)
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc,"FUERA DE RANGO");
    }
    else
    {
        lcd_gotoxy(1,2);
        printf(lcd_putc," %f nH ",Lx);
    }
}
}
}

```

void Rango Resistencia()

```

{
    if (R>=1 && R<10)          // Si la resistencia está en ohm 1 y 9
    {
        lcd_gotoxy(7,2);      // Mueve el cursor al caracter 7 de la línea 2
        printf(lcd_putc,"%1.1f",R); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
        coma, dejando dos decimales
    }
    else if (R>=10 && R<100)   // Si la resistencia está en ohm 10 y 99
    {
        lcd_gotoxy(6,2);      // Mueve el cursor al caracter 6 de la línea 2
        printf(lcd_putc,"%2.1f",R); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
        coma, dejando dos decimales
    }

    else if (R>=100 && R<1000) // Si la resistencia está en ohm 1000 y 999
    {
        lcd_gotoxy(5,2);      // Mueve el cursor al caracter 5 de la línea 2
        printf(lcd_putc,"%3.1f",R); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
        coma, dejando dos decimales
    }

    else if (R>=1000 && R<10000) // Si la resistencia está en ohm 1.xx K y 9.xx K
    {
        lcd_gotoxy(6,2);      // Mueve el cursor al caracter 6 de la línea 2
        printf(lcd_putc,"%1.2f K",R/1000); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
        coma, dejando dos decimales
    }
    else if (R>=10000 && R<100000) // Si la resistencia está en ohm 10.xx K y 99.xx K
    {
        lcd_gotoxy(5,2);      // Mueve el cursor al caracter 6 de la línea 2
    }
}

```

```
    printf(lcd_putc,"%2.2f K",R/1000); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
coma, dejando dos decimales
}
else if (R>=100000 && R<1000000)    // Si la resistencia está en ohm 100 K y 999 K
{
    lcd_gotoxy(7,2);                // Mueve el cursor al caracter 6 de la línea 2
    printf(lcd_putc,"%3.0f K",R/1000); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone una
coma, dejando dos decimales
}

else if (R>=1000000 && R<10000010)    // Si la resistencia está en ohm 1M y 10M
{
    lcd_gotoxy(7,2);                // Mueve el cursor al caracter 6 de la línea 2
    printf(lcd_putc,"%1.1f M",R/1000000); // Imprime los 3 caracteres como entero y pone
una coma, dejando dos decimales
}
```

Anexo 4 Interfaz gráfica de desarrollo del compilador PCW CCS C 4.057 y circuito del programador AN589

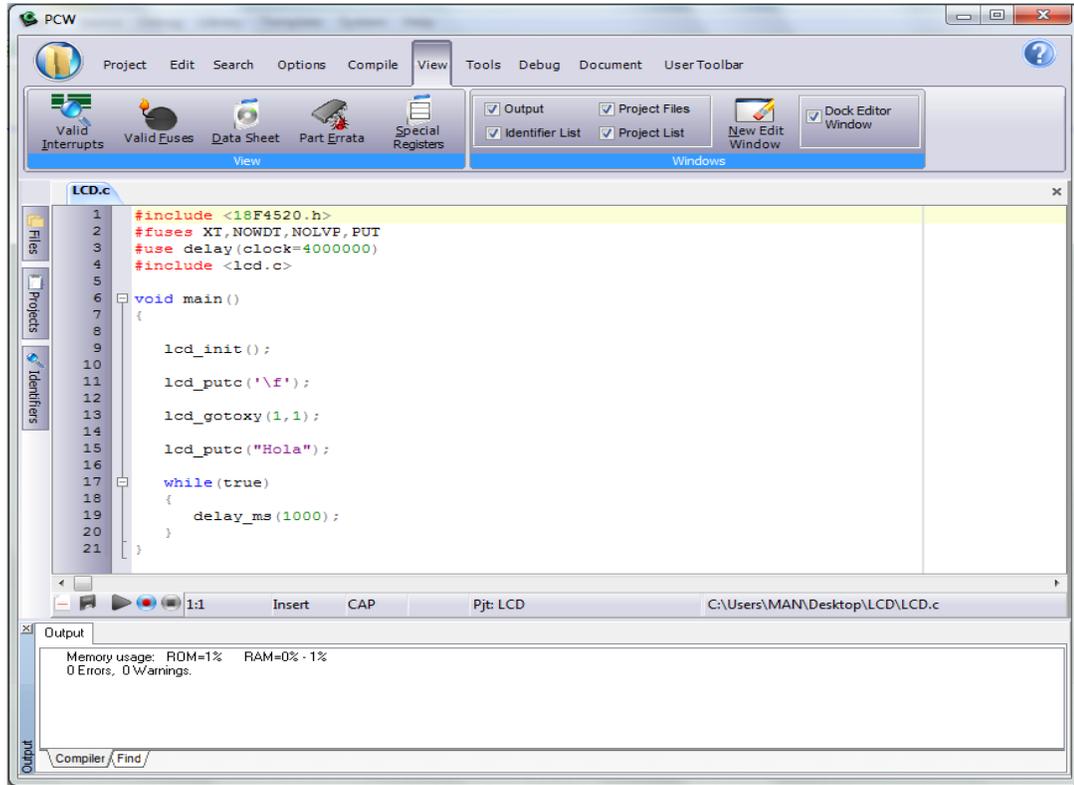


Fig.6. Compilador PCW CCS C 4.057

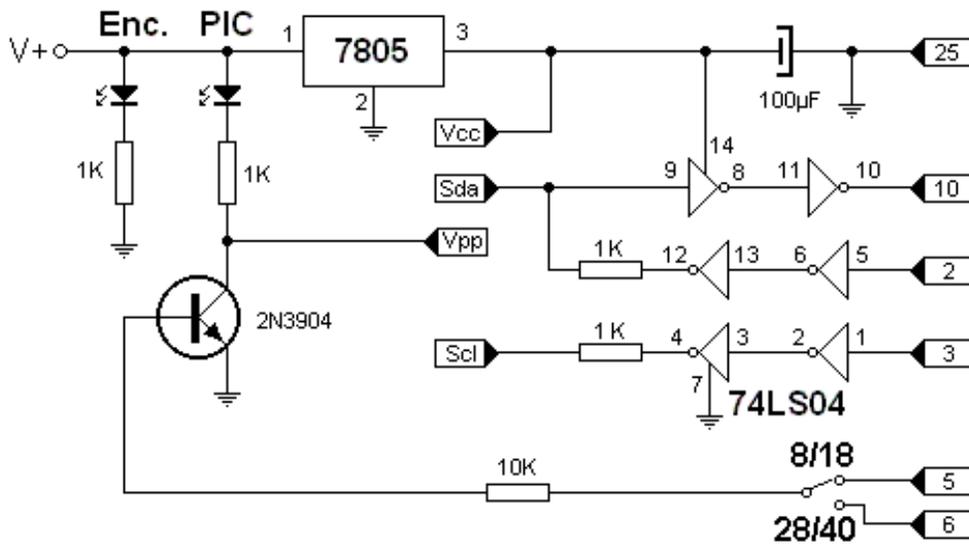


Fig.7. Programador AN589

Anexo 5 Tabla de componentes

Tabla 3.1. Valores de capacitancia utilizando el instrumento diseñado y el UNI-T UT70B

Componentes	Valor
1 Microcontrolador	PIC18F4520
1 Temporizador	NE555
1 CI 4066	4 SWITCH
1 Display LCD	16x2
3 Botones	<i>Push-button</i>
1 Resistencia	1 k Ω 0.25 W
1 Resistencia	47 k Ω 0.25 W
2 Resistencia	10 k Ω 0.25 W
4 Resistencias	100 k Ω 0.25 W
4 Resistencias	4.7 k Ω 0.25 W
6 Resistencias variables (potenciómetros)	-----
1 transistor	2N3905
3 transistores	2N2222
1 capacitor	1000 pF
2 capacitor (tantalio)	10 μ F 16 V
2 capacitores (cerámica)	33 pF
4 capacitores	0.1 μ F
1 inductor	100 μ H
1 Cristal de cuarzo	16 MHz
3 diodos	1N4007
2 Relevador electromagnético (relé)	2 polos 5 V

Anexo 6 Mediciones de resistencias, capacitores e inductores

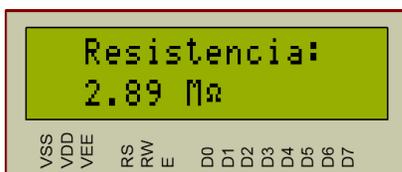
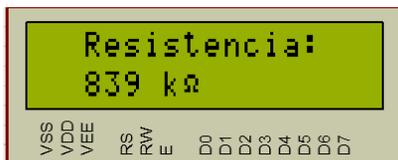
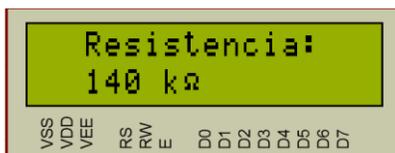
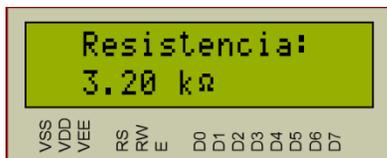
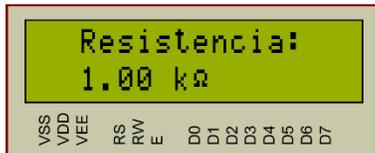
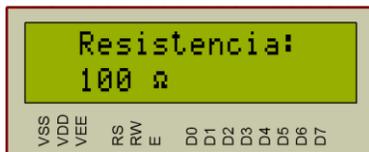




Fig.8. Simulaciones y mediciones realizadas.

Anexo 7 Tablas de mediciones de resistencias, capacitores e inductores realizadas:

Tabla 3.2 Valores de capacitancia utilizando el instrumento diseñado y el IDEAL Pro 61-340

C nominal	Medidor LC	IDEAL Pro 61-340
1 nF	0.95 nF	1.21 nF
2.2 nF	2.13 nF	2.40 nF
3.3 nF	3.3 nF	3.58 nF
10 nF	11.91 nF	11.55 nF
22 nF	20.21 nF	20.01 nF
33 nF	37.10 nF	36.23 nF
100 nF	104.42 nF	104 nF
220 nF	222.50 nF	220.1 nF
1 μ F	1.08 μ F	1.066 μ F
2.2 μ F	2.16 μ F	2.301 μ F
10 μ F	10.30 μ F	11.04 μ F
22 μ F	22.61 μ F	24.18 μ F
470 μ F	475.11 μ F	474 μ F
1000 μ F	1017.33 μ F	997 μ F
2200 μ F	2164.12 μ F	2149 μ F
3300 μ F	3352.03 μ F	3347 μ F

Tabla 3.3. Valores de capacitancia utilizando el instrumento diseñado y el Fluke 179

C nominal	Medidor LC	Fluke 179
10 nF	11.91 nF	12 nF
22 nF	20.21 nF	20 nF
33 nF	37.10 nF	38 nF
100 nF	104.42 nF	105 nF
220 nF	222.50 nF	222 nF
1 μ F	1.08 μ F	1.07 μ F
10 μ F	10.30 μ F	10.09 μ F
22 μ F	22.61 μ F	23.9 μ F
470 μ F	475.11 μ F	495 μ F
1000 μ F	1017.33 μ F	1023 μ F
2200 μ F	2164.12 μ F	2221 μ F

Tabla 3.4. Valores de capacitancia utilizando el instrumento diseñado y el UNI-T UT70B

C nominal	Medidor LC	UNI – T UT70B
10 nF	11.91 nF	10.8 nF
22 nF	20.21 nF	19.4 nF
1 μ F	1.08 μ F	1.06 μ F
2.2 μ F	2.16 μ F	2.30 μ F
10 μ F	10.30 μ F	10.98 μ F
22 μ F	22.61 μ F	24.08 μ F

470 μF	475.11 μF	497.3 μF
1000 μF	1017.33 μF	1020.2 μF
2200 μF	2164.12 μF	2197.8 μF

Tabla 3.5. Valores de inductancias patrones de laboratorio y mediciones utilizando el instrumento diseñado.

Lx NOMINAL	MEDIDOR RLC
1 μH	1.15 μH
1.5 μH	1.45 μH
2.5 μH	2.47 μH
5 μH	4.59 μH
10 μH	9.02 μH
25 μH	22.12 μH
50 μH	44.58 μH
100 μH	89.75 μH
250 μH	230.51 μH
500 μH	472.81 μH
1 mH	919.91 μH
2.5 mH	2.41 mH
5 mH	4.75 mH
10 mH	9.52 mH

Tabla 3.6. Valores de resistencias medidos utilizando el instrumento diseñado y el Fluke 115.

Rx NOMINAL	FLUKE 115	MEDIDOR RLC
2 Ω	2.1 Ω	1.9 Ω
10 Ω	10.8 Ω	9,8 Ω
50 Ω	50.5 Ω	49.5 Ω
100 Ω	100,5 Ω	99,3 Ω
200 Ω	200.5 Ω	200.3 Ω
800 Ω	800 Ω	802 Ω
1 k Ω	1k Ω	1.01 k Ω
2.2k Ω	2.19k Ω	2.18 k Ω
4.4 k Ω	4.39 k Ω	4.38 k Ω
10 k Ω	9.99 k Ω	10.01 k Ω
100 k Ω	98.9 k Ω	98.97 k Ω
140 k Ω	140 k Ω	141 k Ω
500 k Ω	501k Ω	504 k Ω
840 k Ω	840 k Ω	841 k Ω
1.9 M Ω	1.95 M Ω	1.91M Ω