



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal
de Campina Grande

ELIAS ELNATÃ PEREIRA DA SILVA



Centro de Engenharia
Elétrica e Informática

PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ANALISE HISTÓRICA E CONSTRUÇÃO DE UM MEDIDOR LC



Departamento de
Engenharia Elétrica



ELIAS ELNATÃ PEREIRA DA SILVA

ANALISE HISTÓRICA E CONSTRUÇÃO DE UM MEDIDOR LC

*Projeto de Engenharia Elétrica submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Orientador:

Luis Reyes Rosales Montero, D. Sc.

Campina Grande
2016

ELIAS ELNATÃ PEREIRA DA SILVA

ANALISE HISTÓRICA E CONSTRUÇÃO DE UM MEDIDOR LC

*Projeto de Engenharia Elétrica submetido à
Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Eletrônica

Aprovado em / /

Professor Avaliador
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Professor Luis Reyes Rosales Montero, D. Sc.
Universidade Federal de Campina Grande-DEE
Orientador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Grande Arquiteto do Universo por me dar forças e fazer persistir nas horas difíceis.

Agradeço também ao apoio da minha mãe a Professora Maria do Socorro de Lima Silva por acreditar na força da educação desde o começo.

Agradeço a minha noiva Josênelle Cavalcate Santos por estar comigo em todos os momentos e ser essa pessoa paciente.

Agradeço a pessoa do Professor Luis Reyes Rosales Montero por toda sua atenção à mim dispensada durante o período de orientação.

Finalmente agradeço as demais pessoas que estiveram ao meu lado e acreditaram no meu sonho de ser Engenheiro Eletricista.

*“Esteja sempre preparado
pois em algum momento a vida vai lhe desafiar.”*

Elias Elnatã

RESUMO

Mostrar a evolução dos equipamentos de medição de indutância e capacitância no decorrer da história moderna facilita o entendimento de como conseguimos evoluir e ter equipamentos precisos nos dias atuais. Os equipamentos considerados precisos há 50 anos hoje são considerados obsoletos, porém existem topologias clássicas: ponte de Wheatstone e ponte de Kelvin. Baseado nas topologias clássicas outros equipamentos mais sofisticados surgiram tais como o LC METER e o PCMETER, ambos desenvolvidos por professores de renomadas universidades e usam microcontrolador. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a revisão histórica dos medidores de indutância e capacitância dos últimos 200 anos, configurações de pontes consolidadas na história da eletrônica analógica, medidores não-comerciais desenvolvidos na academia, medidores comerciais considerados de ponta e ainda propõe uma solução usando porta USB de microcontrolador, oscilador a cristal e computador para a medição de capacitores e indutores.

Palavras-chave: medição de indutância, medição de indutância, Ponte de Wheatstone, Medidor LC, PCMETER, microcontrolador.

ABSTRACT

Show the evolution of inductance and capacitance measuring equipment in the course of modern history facilitates understanding of how we evolve and have precise equipment nowadays. The equipment considered accurate 50 years ago are now considered obsolete, but there are classic topologies: Wheatstone bridge and Kelvin bridge. Based on the classic topologies more sophisticated equipment have emerged such as the LC METER and PCMETER, both developed by professors from renowned universities and use microcontroller. In this context, this paper presents a historical review of inductance meters and capacitance of the last 200 years, consolidated bridges settings in analog electronics history, non-commercial meters developed in academia, commercial meters considered cutting edge and also proposes using solution USB microcontroller, crystal oscillator and a computer for measuring capacitors and inductors.

Keywords: Measuring inductance, Inductance measurement, Wheatstone bridge, LC Meter, PCMETER, Microcontroller.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fluxo magnético sobre uma superfície | 5 |
| Figura 2 - Comportamento derivada do campo magnético | 6 |
| Figura 3 - Fluxo sobre um transformador..... | 9 |
| Figura 4 - Figura representativa de uma ponte de Wheatstone | 12 |
| Figura 5 - Ponte de WheatStone para medição de indutância própria..... | 14 |
| Figura 6 - Ponte de Wheatstone para medição de indutância mútua..... | 15 |
| Figura 7 - Ponte de Jones simplificada..... | 15 |
| Figura 8 - Ponte de Kelvin..... | 16 |
| Figura 9 - Ponte de Kelvin..... | 18 |
| Figura 10 - Circuito Integrador e voltímetro | 18 |
| Figura 11 - Ponte de Indutância de Corrente Contínua | 18 |
| Figura 12 - Equipamento proposto por Ohm..... | 19 |
| Figura 13 – Ponte de Kelvin ou Ponte de Thonson | 20 |
| Figura 14 – Estrutura proposta por Felici | 21 |
| Figura 15 - Ponte proposta por Maxwell | 21 |
| Figura 16- BRC Type 100A | 22 |
| Figura 17 - Sistema de medição de impedância..... | 23 |
| Figura 18 - GR 1608-A..... | 24 |
| Figura 19 – Marconi 868A | 24 |
| Figura 20 – AVO-B 150 | 25 |
| Figura 21 - Dual-slope integrador | 26 |
| Figura 22 - Digital Mehomhmeter Backman L-9 | 26 |
| Figura 23 - Digital Guildline 9520 | 26 |
| Figura 24 - BEC 76A..... | 27 |
| Figura 25- HP 4272 | 27 |
| Figura 26 - RLC GR 1693 | 28 |
| Figura 27 - Vector Impedance HP 4193A | 28 |
| Figura 28 - Precision Meter QT 7600..... | 28 |
| Figura 29 - Agilent LCR Meter 4263 A | 29 |
| Figura 30 - Agilent E4990A Impedance Analyzer..... | 30 |
| Figura 31 - Sourcetronic LCR Meter 2810D..... | 30 |
| Figura 32 - Diagrama de Blocos..... | 32 |
| Figura 33 - Projeto de Frank Hughes | 34 |
| Figura 34 - Componentes da forma de onda na entrada do PCMETER..... | 36 |
| Figura 35 - Diagrama de bloco do PCMETER..... | 36 |
| Figura 36 - Tela do PC METER..... | 37 |
| Figura 37 - Osciloscópio do PCMETER..... | 37 |
| Figura 38 - Porta paralela usada na comunicação do PC METER..... | 38 |
| Figura 39 - Diagrama de Blocos do Modelo Proposto | 40 |
| Figura 40- Sensor de Efeito Hall | 41 |
| Figura 41 - Esquema Elétrico do cabo USB..... | 43 |
| Figura 42 - Esquema Elétrico Proposto..... | 44 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. | MOTIVAÇÃO..... | 2 |
| 2.1. | Revisão Bibliográfica | 3 |
| 2.1.1. | Grandezas Elétricas | 3 |
| 2.1.2. | Corrente Elétrica..... | 4 |
| 2.1.3. | Fluxo Magnético..... | 4 |
| 2.1.4. | Capacitor..... | 6 |
| 2.1.4.1. | Capacitância..... | 6 |
| 2.1.4.2. | Resposta na Frequência | 7 |
| 2.1.5. | Indutor | 7 |
| 2.1.5.1. | Indutância..... | 7 |
| 2.1.5.2. | Indutância Própria..... | 8 |
| 2.1.5.3. | Indutância Mútua | 9 |
| 2.1.6. | Resposta na Frequência | 10 |
| 2.1.7. | Circuitos Ressonantes..... | 11 |
| 2.2. | Esquemas de Medição | 11 |
| 2.2.1. | Ponte de Wheatstone: princípio de funcionamento | 11 |
| 2.2.2. | Ponte de Jones: princípio de funcionamento | 14 |
| 2.2.3. | Ponte Dupla de Kelvin: princípio de funcionamento | 16 |
| 2.3. | Evolução dos medidores | 18 |
| 2.3.1. | De 1775 - 1915 | 18 |
| 2.3.2. | De 1900 - 1945 | 22 |
| 2.3.3. | De 1946 - 1965 | 22 |
| 2.3.4. | De 1966 – 2000 | 25 |
| 2.3.5. | Dias atuais | 29 |
| 3. | MEDIDORES DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA | 31 |
| 3.1. | Medidores de Indutâncias e Capacitâncias | 31 |
| 3.1.1. | Proposta de Phil Rice..... | 31 |
| 3.1.1.1. | Princípio de Funcionamento | 31 |
| 3.1.1.2. | Diagrama de Blocos | 32 |
| 3.1.1.3. | Conversor A/D | 32 |
| 3.1.1.4. | Operação do circuito | 33 |

| | | |
|---------|--|----|
| 3.1.2. | PC Meter princípio de funcionamento | 35 |
| 4. | MODELO PROPOSTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MEDIDOR DE INDUTÂNCIA MUTUA E PRÓPRIA E MEDIDOR DE CAPACITÂNCIA..... | 39 |
| 4.1. | Operação do Circuito | 39 |
| 4.2. | Diagrama de Blocos..... | 40 |
| 4.2.1. | Seleção da Entrada..... | 40 |
| 4.2.2. | Ligar o circuito | 40 |
| 4.2.3. | Oscilação do Componente | 41 |
| 4.2.4. | Discretização: Resistor Pull Up..... | 41 |
| 4.2.5. | Acomodação do sinal..... | 41 |
| 4.2.6. | Gerador de Sinal | 42 |
| 4.2.7. | Comparador de Frequência..... | 42 |
| 4.2.8. | Conversão A/D | 42 |
| 4.2.9. | Porta USB | 42 |
| 4.2.10. | Display LCD | 43 |
| 4.2.11. | Diagrama Elétrico do sistema de aquisição de dados | 43 |
| 5. | CONCLUSÃO..... | 45 |
| 6. | REFERÊNCIAS | 46 |

1. INTRODUÇÃO

Um medidor de indutância sempre foi um equipamento de difícil concepção, desde os primórdios quando Sir Wheatstone propôs a ponte de Wheatstone que foi capaz de medir, ainda que de forma rústica, a impedância até os modernos medidores de indutância vendidos pelos grandes fabricantes onde a precisão ainda é um desafio.

Este documento traz a história dos medidores LC abordada na publicação intitulada por A história dos medidores de impedância, *The History of Impedance Measurements* em inglês, escrito por Henry P. Hall. e outros esquemas de medições consolidados na eletrônica analógica como a ponte de Wheatstone e a ponte de Kelvin. A revisão bibliográfica é apresentada permitindo que conceitos importantes para construção de um medidor LC sejam compreendidos. Na seção seguinte os medidores de impedância não-comerciais e comerciais de ponta são apresentados. Para fins não comerciais os medidores LC Meter proposto por Phil Rice da Universidade de Western Coast e o PCMETER proposto por Luis Reyes Rosales Montero da Universidade Federal de Campina Grande são introduzidos ao leitor. Na parte final são apresentados todos os parâmetros que devem ser considerados no desenvolvimento de um medidor usando porta serial e considerações importantes para a construção do equipamento proposto.

Na conclusão observamos que o projeto não é implementado porque foge dos limites da ideia inicial do projeto de conclusão de curso.

2. MOTIVAÇÃO

A motivação partiu da ideia de desenvolver uma ponte para medir indutância não saturada e saturada usando o método de Jones para a disciplina de Laboratório de Conversão Eletromecânica da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Porém devido à complexidade de encontrar literatura e conseguir componentes para o circuito de proteção da ponte baseada no método de Jones o Trabalho de Conclusão de Curso foi redirecionado.

Permanecendo na área de eletrônica de medidores de indutância a ideia foi usar um medidor microcontrolado. Partindo da dificuldade de projetar um medidor LC, foi usado referência PCMETER proposto pelo Professor da Universidade Federal de Campina Grande Luis Reyes e o projeto baseado em radiofrequência de Phil Rice publicado na *AmateurRadio Magazine* do *The Wireless Institute of Australia* que apresenta um modelo de um medidor de indutância e capacitância com alto nível de precisão. Ambos os projetos são baseados em microcontroladores.

2.1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.1. GRANDEZAS ELÉTRICAS

A definição de grandeza elétrica apresentado (MONTERO e LIMA, 2013):

“A Ciência Elétrica estuda o fenômeno da existência e interação entre cargas elétricas. Tal como a massa, a carga elétrica é uma propriedade fundamental da matéria que se manifesta através de uma interação, designadamente através de uma força. No entanto, a carga elétrica apresenta a particularidade de se manifestar através de uma força que tanto pode ser de atração como de repulsão, ao contrário daquela manifestada pelas massas, que, como se sabe, é apenas de atração”.

As principais grandezas da ciência elétrica são a carga, a força, o campo, a energia, a tensão, a potência e a corrente elétrica. Um dos objetivos deste capítulo é explicar a relação existente entre estas grandezas elétricas, dando particular atenção às grandezas tensão e corrente elétrica. Com efeito, a análise de circuitos visa essencialmente à determinação da relação corrente/tensão elétrica em redes de componentes elétricos e eletrônicos.

A lei fundamental da Ciência Elétrica é a Lei de Coulomb. Segundo (SADIKU, 2013):

“lei estabelece que duas cargas elétricas em presença uma da outra se atraem ou repelem mutuamente, isto é, interação entre si através de uma força. Como grandeza de tipo vectorial, a força elétrica possui, portanto, uma direção, um sentido e uma intensidade. A direção da força coincide com a da reta que une as duas cargas, o sentido é uma função dos sinais respectivos, positivos ou negativos, e a intensidade é uma função do módulo das cargas e da distância que as separa. A interação à distância entre cargas elétricas conduz ao conceito de campo elétrico, que nos permite encarar a força elétrica como o resultado de uma ação exercida por uma carga ou conjunto de cargas vizinhas. Tal como a força, o campo elétrico é uma grandeza vectorial com direção, sentido e intensidade.”

O movimento de uma carga num campo elétrico, em sentido contrário ou concordante com o da força elétrica a que se encontra sujeita, conduz à libertação ou

exige o fornecimento de uma energia. O facto de se isolarem fisicamente conjuntos de cargas positivas e negativas equivale a fornecer energia ao sistema, comparável ao armazenamento de energia eléctrica numa bateria. Pelo contrário, o movimento de cargas negativas no sentido de partículas carregadas positivamente corresponde à libertação de energia. Em geral, a presença de cargas eléctricas imersas num campo atribui ao sistema uma capacidade de realizar trabalho, capacidade que é designada por energia potencial eléctrica ou, simplesmente, energia eléctrica.

Uma carga colocada em pontos distintos de um campo eléctrico atribui valores também distintos de energia ao sistema. A diferença de energia por unidade de carga é designada por diferença de potencial, ou tensão eléctrica. Tensão e energia eléctrica são, por conseguinte, duas medidas da mesma capacidade de realizar trabalho. A taxa de transformação de energia eléctrica na unidade de tempo é designada por potência eléctrica.

O fluxo de cargas eléctricas é designado por corrente eléctrica. Em particular, define-se corrente eléctrica como a quantidade de carga que na unidade de tempo atravessa uma dada superfície. “Corrente e tensão eléctrica definem as duas variáveis operatórias dos circuitos eléctricos” (SADIKU, 2013).

2.1.2. CORRENTE ELÉTRICA

(MONTERO e LIMA, 2013) define a “corrente média como a quantidade de carga eléctrica que na unidade de tempo atravessa uma dada superfície”, equação 1, sendo sua unidade de medida o ampère. Sua intensidade varia de acordo com a carga, ou seja, para uma mesma intensidade de tensão, quanto maior a carga, maior a corrente eléctrica.

$$I = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

E valor instantâneo da mesma à derivada, Eq. (2),

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \quad (2)$$

Por convenção, o sentido positivo da corrente eléctrica coincide com o do movimento das cargas positivas.

2.1.3. FLUXO MAGNÉTICO

Podemos definir o fluxo magnético que atravessa uma superfície plana pela relação

$$\Phi = \int_S \bar{B} d\bar{s} \quad (3)$$

onde o elemento diferencial de superfície $d\bar{s}$ é multiplicado pelo vetor unitário \bar{B} perpendicular a esta superfície. Se a distribuição do fluxo magnético for uniforme trás como consequência a uniformidade da densidade do fluxo magnético. O fluxo magnético que passa por uma superfície S conforme a figura 1 a seguir

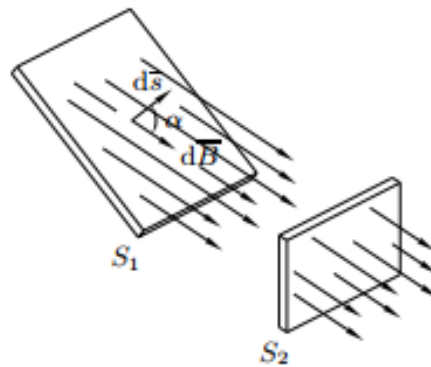


Figura 1 - Fluxo magnético sobre uma superfície

é relacionado por:

$$\Phi_1 = BS_1 \cos \alpha \quad (4)$$

Podendo α variar entre 0° e 90° , tornando o valor da densidade de fluxo máxima ($\alpha = 0$) ou nula com $\alpha = 90$. No sistema internacional de medidas o fluxo magnético é dado em Weber (Wb) e sua densidade é dada em Weber por metro quadrado (Wb/m^2).

A natureza da qual é constituída o material no qual o fluxo magnético circula é muito importante, pois o fluxo pode ser gerado espontaneamente através de ímãs ou de forma artificial usando corrente elétrica conduzida em bobinas.

Estabelecendo um ponto para o vetor densidade de fluxo \bar{B} em um ponto do espaço livre, do qual a distancia do condutor que produz a corrente elétrica é dada por

$$\bar{r} = \hat{k}r \quad (5)$$

$$d\bar{B} = \mu_0 \frac{id\bar{l} \times \hat{k}}{4\pi r^2} \quad (6)$$

onde μ_0 é a permissibilidade magnética no vácuo onde $\mu_0 = \frac{4\pi 10^{-7} \text{Wb}}{\text{m} \cdot \text{A}}$, $id\bar{l}$ é a corrente no fio, \hat{k} é o vetor unitário dirigido de comprimento dl para o ponto que deseja-

se determinar o valor do campo magnético. A figura 2 a seguir ajuda a visualizar o comportamento da equação 6.

Para o indutor conduzindo uma corrente i , temos o fluxo magnético dado por

$$B = \frac{\mu_0}{2\pi R} i \quad (7)$$

Segundo (BIM, 2012) “ $2\pi R$ é o comprimento da linha de campo definida pelo vetor R .”

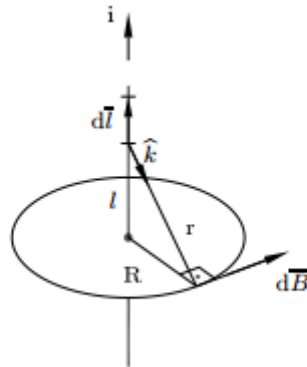


Figura 2 - Comportamento derivada do campo magnético

2.1.4. CAPACITOR

2.1.4.1. CAPACITÂNCIA

A definição de capacitância segundo (BOYLESTAD, 2004) ”é a medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas”

Ainda segundo (BOYLESTAD, 2004) ”Um capacitor possui uma capacitância de 1farad se uma carga de 1 coulomb for depositada em suas placas por uma diferença de potencial de 1 volt entre elas”, em outras palavras 1 farad é

$$C = \frac{Q}{V} \quad (8)$$

Onde as unidades são Coulomb (C) para carga, Volt (v) para tensão e Farad (F) para capacitância.

A capacitância pode ser modificada ao inserir um material dielétrico entre as placas do capacitor. O dielétrico irá aumentar a concentração de cargas necessárias para romper a barreira imposta pelo material, assim aumenta a quantidade de energia armazenada.

A tensão sobre o capacitor é dada pela integral da corrente que circula sobre o capacitor mais tensão inicial, isto é:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau + v(0) \quad (9)$$

A corrente no capacitor é determinada pela derivada da tensão, isto é

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (10)$$

A energia armazenada no capacitor é dada por:

$$w = \frac{1}{2} CV^2 \quad (11)$$

2.1.4.2. RESPOSTA NA FREQUÊNCIA

No domínio da frequência a característica do capacitor varia de acordo com a frequência. Na frequência, a impedância e admitância do capacitor aumentam ou diminuir de acordo com a frequência do sinal a qual o capacitor é submetido. A equação da impedância para o capacitor é definida por:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (12)$$

Onde ω é definido por

$$\omega = 2\pi f \quad (13)$$

2.1.5. INDUTOR

2.1.5.1. INDUTÂNCIA

Uma das principais grandezas elétricas é a indutância, segundo (SADIKU, 2013)

“Um indutor é um componente passivo projetado para armazenar energia em seu campo magnético. (...). Qualquer condutor de corrente elétrica possui propriedades indutivas e pode ser considerado um indutor. Mas, para aumentar o efeito indutivo, um indutor usado na prática é normalmente formado em uma bobina cilíndrica com várias espiras de fio condutor.”

Ainda segundo (SADIKU, 2013) “Indutância é a propriedades a qual um indutor se opõe à mudança do fluxo de corrente através dele medida em henrys (H).”

A indutância pode ser determina pela relação entre o número de enrolamentos (espiras) N , a área da seção transversal A , o comprimento l e a permissividade do núcleo. A equação abaixo mostra como determinar o valor da indutância na forma matemática.

$$L = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (14)$$

Normalmente os indutores são fio, porém é possível encontrar algumas configurações variáveis ou que permitam variar o valor da indutância, por exemplo, os encontrados dentro dos transformador tipo variac.

A relação entre a corrente e a tensão do indutor é:

$$di = \frac{v}{L} dt \quad (15)$$

Integrando os dois lados da equação acima, encontramos:

$$i = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau + i(t_0) \quad (16)$$

A energia armazena no indutor é:

$$w = \frac{1}{2} Li^2 \quad (17)$$

Em um circuito operando em regime permanente um indutor funciona como um curto-circuito e o indutor não permite que sua corrente mude abruptamente, caso isso acontece um pico de tensão infinita é formado danificando-o.

2.1.5.2. INDUTÂNCIA PRÓPRIA

“Indutância própria ou autoindutância é definida como o número de linhas de fluxo que enlaça uma bobina devido a apenas a corrente que circula sobre ela”. (SILVA,

2015). A figura 3 ilustra um transformador com seus enrolamentos, onde é possível explicar a física que envolve a indutância própria.

A indutância de uma bobina sobre ela mesma é dado pelo fluxo concatenado dividido pela corrente que circula sobre ela, isto é, a densidade de fluxo magnético que circula sobre ela vezes o número de espira pertencente à bobina dividido pela corrente que circula em cada espira, matematicamente podemos traduzir para:

$$L_{11} = \frac{\lambda_{11}}{i_1} = \frac{N_1 * \phi_{11}}{i_1} \quad (18)$$

$$L_{11} = \frac{N_1}{i_1} * (\phi_{21} + \phi_{21}) \quad (19)$$

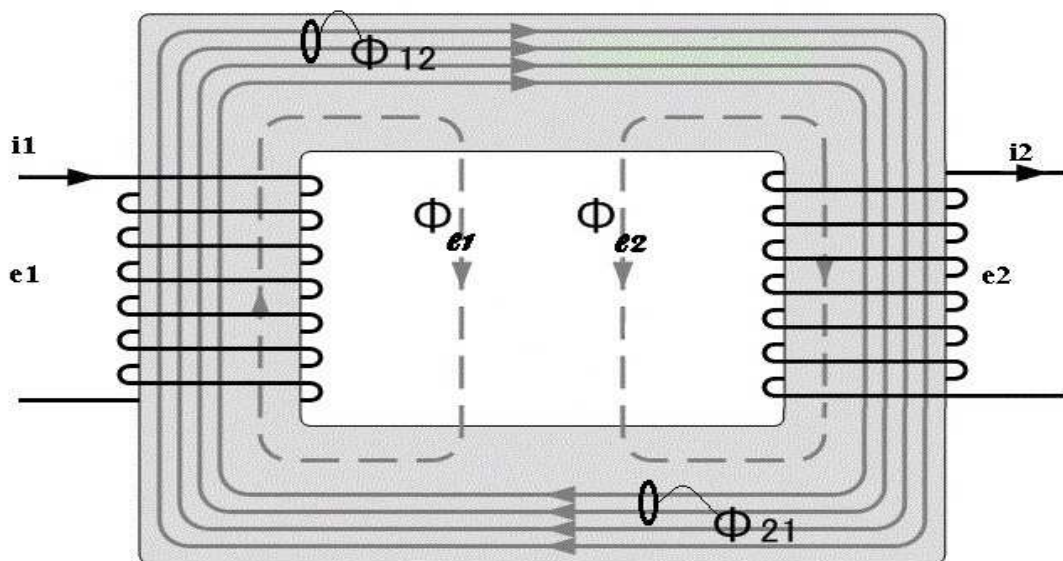


Figura 3 - Fluxo sobre um transformador

2.1.5.3. INDUTÂNCIA MÚTUA

Segundo (BIM, 2012)

“A indutância mútua entre duas bobinas é o quociente entre a variação do fluxo concatenado por uma bobina e a variação da corrente da outra bobina quando somente esta última tem corrente fluindo por suas espiras”. Assim podemos organizar a ideia da indutância mútua de uma bobina em relação à outra”

Para a bobina um, temos que sua indutância mútua em relação a dois é:

$$M_{12} = \frac{N_1 d\Phi_{12}}{di_{12}} \quad (20)$$

Para a bobina 2, temos que sua indutância mutua em relação a 1 é:

$$M_{21} = \frac{N_2 d\Phi_{21}}{di_{21}} \quad (21)$$

Onde $\frac{d\Phi_{21}}{di_{21}} = \frac{N_2}{R}$ e $\frac{d\Phi_{12}}{di_{12}} = \frac{N_1}{R}$, onde R é a relutância da trajetória.

Reorganizando as equações, encontra-se:

$$M_{12} = \frac{N_1 N_2}{R} \quad (22)$$

$$M_{12} = \frac{N_2 N_1}{R} \quad (23)$$

Logo:

$$M_{12} = M_{12} = \frac{N_2 N_1}{R} \quad (24)$$

Assim definimos a relação da indutância mutua usando a relutância:

$$M_{12} = \frac{N_2 N_1}{R} \quad (25)$$

Ou usando a densidade de fluxo magnético que circula sobre um determinado sentido.

$$M_{21} = \frac{N_2 d\Phi_{21}}{di_{21}} = \frac{N_1 d\Phi_{12}}{di_{12}} = M_{12} \quad (26)$$

2.1.6. RESPOSTA NA FREQUÊNCIA

No domínio da frequência a característica do indutor varia de acordo com a frequência. Na frequência, a impedância e admitância do indutor aumentam ou diminuir de acordo com a frequência do sinal a qual o indutor é submetido. A equação da impedância para o indutor é definida por:

$$X_c = \omega L \quad (27)$$

Onde ω é definido por

$$\omega = 2\pi f \quad (28)$$

2.1.7. CIRCUITOS RESSONANTES

Circuitos ressonantes podem ser construídos usando componentes ativos e passivos (SADIKU, 2013). Circuitos ressonantes passivos são constituídos de capacitores, indutores e resistores.

Para um circuito ressonantes com oscilações constantes os resistores devem ser evitados, isto é, são usados apenas a combinação de indutores e capacitores. A frequência de oscilação é determinada por

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (29)$$

Onde L e C são os valores do indutor e do capacitor. A frequências de oscilação é dada em Hertz (Hz) que é a unidade inversa do tempo.

2.2. ESQUEMAS DE MEDIÇÃO

2.2.1. PONTE DE WHEATSTONE: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Sir Charles Wheatstone foi um cientista e inventor inglês com grandes habilidades. Entre seus inventos estão a fotografia estereoscópica, a concertina e inventou o estereoscópio, além de ter participação importante no desenvolvimento das comunicações com o telégrafo (MICHIGAN, 1879). Ele foi um dos primeiros cientistas a explorar a ponte desenvolvida por Samuel Hunter Christie em 1833, sendo esta depois denominada de ponte de Wheatstone devido a grande gama de aplicações inicialmente encontrar por Sir Charles Wheatstone.

A ponte desenvolvida por Samuel Hunter (figura 4) consiste numa montagem em forma de losango onde elementos elétricos são posicionados que permite fazer a medição de uma determinada grandeza elétrica a parti do valor obtido da resistência de referência obtida.

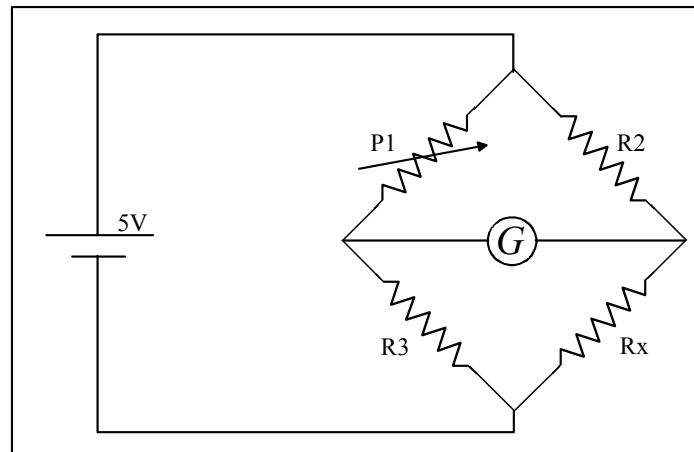


Figura 4 - Figura representativa de uma ponte de Wheatstone

A ideia da ponte é fazer a medição de resistências elétricas desconhecida. Ela contém uma fonte de força eletromotriz – f.e.m, um galvanômetro e quatro resistores, onde três dessas quatro resistências são conhecidas e a quarta é a qual se deseja determinar.

A resistência desconhecida (R_x) da figura 4 é feita com a ponte em equilíbrio. Esse equilíbrio é encontrado quando nenhuma corrente circula pelo galvanômetro, para tal uma das resistências funciona como um potenciômetro que será ajustado até que o equilíbrio seja atingido. Atingido o equilíbrio a relação entre as resistências segue a equação 29, onde:

$$R_1 R_x = R_2 R_3 \quad (30)$$

O ponto de equilíbrio sobre o resistor R_3 é observável com o auxílio de um multímetro operando como amperímetro conectado aos terminais de saída mostrando como resultado o valor zero quando o equilíbrio for atingido.

Como o equilíbrio atingido, a razão entre $\frac{R_x}{R_2}$ é igual a razão entre $\frac{R_3}{R_1}$ assim, podemos encontrar o valor da resistência desconhecida.

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (31)$$

A demonstração da equação acima é obtida de forma direta, usando a lei de Kirchhoff da corrente, temos:

$$I_2 - I_x + I_g = 0 \quad (32)$$

$$I_1 - I_3 - I_g = 0 \quad (33)$$

Usando a lei de Kirchhoff da tensão temos:

$$R_2 * I_2 - R_1 * I_1 - R_g * I_g = 0 \quad (34)$$

$$R_x * I_x - R_3 * I_3 + R_g * I_g = 0 \quad (35)$$

Com a ponte em equilíbrio, $I_g = 0$, assim as equações obtidas pela lei de Kirchhoff das correntes e das tensões tornam-se:

$$R_2 * I_2 - R_1 * I_1 = 0 \quad (36)$$

$$R_x * I_x - R_3 * I_3 = 0 \quad (37)$$

$$I_2 - I_x = 0 \quad (38)$$

$$I_1 - I_3 = 0 \quad (39)$$

Rearranjando as equações encontramos:

$$R_2 * I_2 = R_1 * I_1 \quad (40)$$

$$R_x * I_x = R_3 * I_3 \quad (41)$$

$$I_2 = I_x \quad (42)$$

$$I_1 = I_3 \quad (43)$$

Finalmente é encontrado:

$$R_x I_x = \frac{R_2 I_2 R_3 I_3}{R_1 I_1} \quad (44)$$

$$R_x = \frac{R_2 I_2 R_3 I_3}{R_1 I_1 I_x} \quad (45)$$

Fazendo os cancelamentos de I_2 com I_x e I_1 com I_3 é possível chegar à relação que determina o valor da resistência desconhecida.

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (46)$$

Com o passar dos anos a ponte de Wheatstone ganhou novas aplicações tais como medição de temperatura, pressão, medição de indutâncias, tensões mecânicas e outras aplicações, isto só foi possível devido ao artifício do equilíbrio da ponte.

2.2.2. PONTE DE JONES: PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Baseado na ponte de Jones, que usa uma ponte de Wheatstone conforme a figura 5.

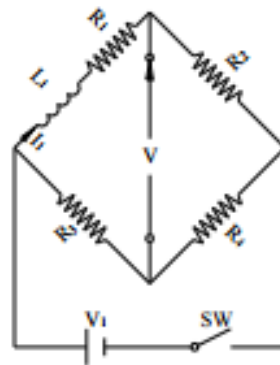


Figura 5 - Ponte de WheatStone para medição de indutância própria

A ponte de Wheatstone está balanceada quando a tensão sobre o voltímetro é nula, isto é, a corrente em L_1 é I_1 e a tensão V_1 é removida no tempo $t = 0$ (JONES, 1967). Sendo assim a indutância L_1 é

$$L_1 = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{I_1} \int_0^{\infty} V dt \quad (47)$$

O estado permanente da ponte é encontrado após o fechamento da chave e o resistor R_2 , R_3 e R_4 são ajustados que até o valor da tensão V seja nula. Os valores de para atingir o estado permanente para os resistores e R_1 , R_2 , R_3 e R_4 , tem-se:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (48)$$

Com a chave aberta temos:

$$V = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} L_1 \frac{di_1}{dt} \quad (49)$$

Integrando tem:

$$\int_0^{\infty} V dt = \frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \int_0^{\infty} L_1 \frac{di_1}{dt} = \frac{L_1 * I_1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} \quad (50)$$

$$L_1 = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{I_1} \int_0^{\infty} V dt \quad (51)$$

Onde I_1 é o estado permanente da corrente através da indutância L_1 , antes da chave ser aberta. De modo similar é possível encontrar a indutância mútua M , conforme a figura 6.

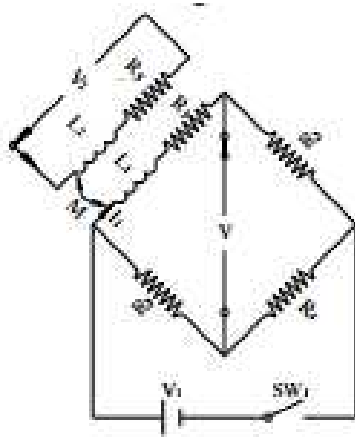


Figura 6 - Ponte de Wheatstone para medição de indutância mútua

A indutância mútua tem relação dada pela equação abaixo, onde M é a indutância mútua, R e R são os valores das resistências no mesmo braço e V é a tensão sobre o braço.

$$M = \frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{I_1} \int_0^{\infty} V_2 dt \quad (52)$$

O circuito da figura 6 pode ser simplificado conforme é mostrado na figura 7, a indutância mútua pode então ser medida de maneira mais simples.

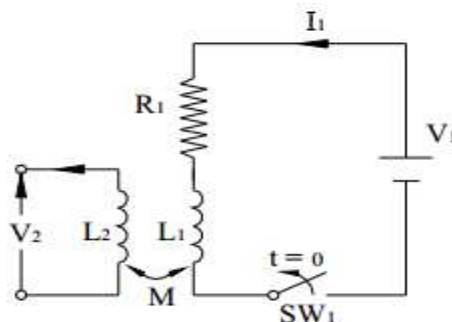


Figura 7 - Ponte de Jones simplificada.

A equação para a indutância mútua então é definida de forma mais simples, o desenvolvimento da equação é encontrado em (CHUANG, GALE e LANGMAN, 2005)

$$M = \frac{1}{I_1} \int_0^{\infty} V_2 dt \quad (53)$$

Segundo (JONES, 1967) existem erros de fluxo residual quando a corrente I_1 é revertida durante o período de integração, considerando esse erro a equação da indutância mutua é resumida a

$$M = \frac{1}{2 \times I_1} \int_0^{\infty} V_2 dt \quad (54)$$

2.2.3. PONTE DUPLA DE KELVIN: PRINCIPIO DE FUNCIONAMENTO

Este tipo de ponte proporciona que melhores leituras sejam feitas para resistências com valores abaixo de 1Ω . Levando em consideração o fato que os enrolamentos que constituem as indutâncias de uma máquina elétrica têm valores resistivos bem baixos e que a ponte de wheatstone não possui tal nível de sensibilidade. O diagrama elétrico é apresentado na figura 8

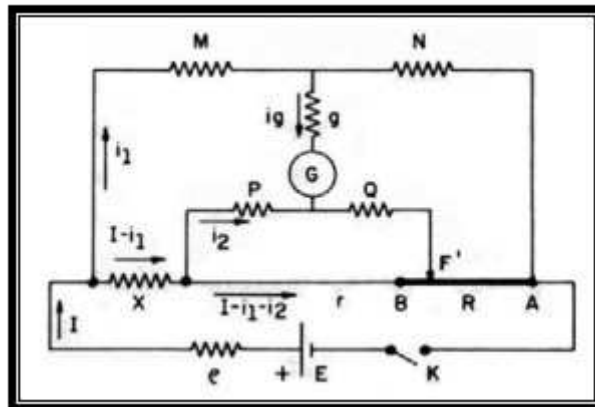


Figura 8 - Ponte de Kelvin

Os elementos que constituem essa ponte são identificados como:

- E – Bateria interna;
- K – Chave;
- G – Galvanômetro;
- A e B – Potenciômetro;
- M, N, P e Q – Resistores fixos;
- X, R e r – Condutores que têm comportamento resistivo devido à sensibilidade a baixas resistividades.

A relação de soma dos resistores $M+N$ e $P+Q$ é muito maior que a relação envolvendo os resistores X , R e r , sendo assim:

$$M + N = P + Q \gg X + R + r \quad (55)$$

E como essa ponte é uma derivação da ponte de Wheatstone, a relação de entrada da ponte

$$\frac{M}{N} = \frac{P}{Q} \quad (56)$$

Deve ser mantida.

Similar à ponte de Wheatstone, quando a chave que controla a tensão que alimenta o circuito for fechada, o potenciômetro deve ser ajustado de modo que o equilíbrio seja atingido (MEDEIROS, 1981). O detalhamento matemático que com a ponte equilibrada, encontra-se:

$$M i_1 = P i_2 + X(I - i_1) \quad (57)$$

$$N i_1 = Q i_2 + R(I - i_1) \quad (58)$$

$$i_2 = \frac{r}{r + Q + P} (I - i_1) \quad (59)$$

Isolando X , tem-se

$$X = \frac{M}{N} R + \frac{rQ}{r + P + Q} \left(\frac{M}{N} - \frac{P}{Q} \right) \quad (60)$$

$$X = \frac{M}{N} R \quad (61)$$

2.2.4. PONTE DE INDUTÂNCIA DE CORRENTE CONTINUA

A ponte de indutância de corrente continua é atualmente usada como alternativa a ponte de Jones. Ela é constituída por três partes:

- Ponte dupla de Kelvin;
- Um integrador Eletrônico;
- Um voltímetro digital.

As figuras 9, 10 e 11 mostram respectivamente o diagrama da ponte de Kelvin, circuito integrador, o voltímetro digital e o diagrama da Ponte de Indutância de Corrente Contínua.

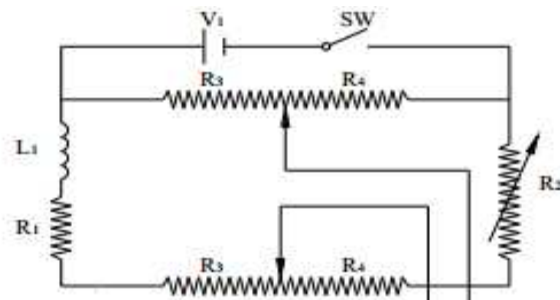


Figura 9 - Ponte de Kelvin

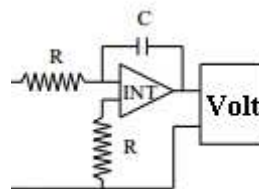


Figura 10 - Circuito Integrador e voltímetro

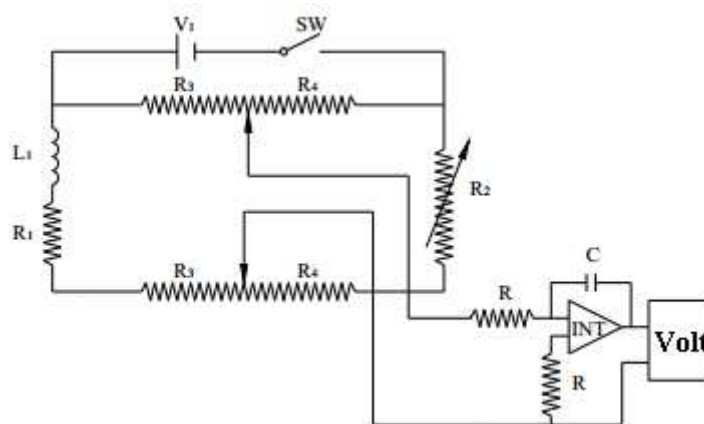


Figura 11 - Ponte de Indutância de Corrente Contínua

2.3. EVOLUÇÃO DOS MEDIDORES

2.3.1. DE 1775 - 1915

Uma das primeiras pontes dedicadas a medição de circuitos foram chamadas por Georg Simon Ohm (1788-1854), apesar de ser uma ponte que media resistências ela

também era capaz de fornecer informações sobre a natureza reativa através da resistência do material. Ohm idealizou a estrutura baseado em uma célula voltaica (pilha de zinco e cobre) que variava a tensão de acordo com a carga. Como resultado Ohm encontrou uma relação logarítmica que a princípio estava errada entre o comprimento do fio e a corrente medida. Em 1825 o físico Alemão Johann Cristian Poggendorff (1776-1887) sugere que Ohm use efeito recém-descoberto Steinbeck para ter uma tensão mais constante. Ohm usou uma célula com material de cobre-bismuto para repetir suas medições. Usando a invenção de Charles Augustin de Coulomb (1736-1806) denominado de galvanômetro de tensão ele detectou que da corrente é a soma de todas as tensões. O equipamento proposto por Ohm consistia de células conectadas por barras de cobre conectadas a um equipamento que variava seu ponteiro de acordo com a tensão sobre seus terminais, a figura 12 mostra um esquema da montagem proposta.

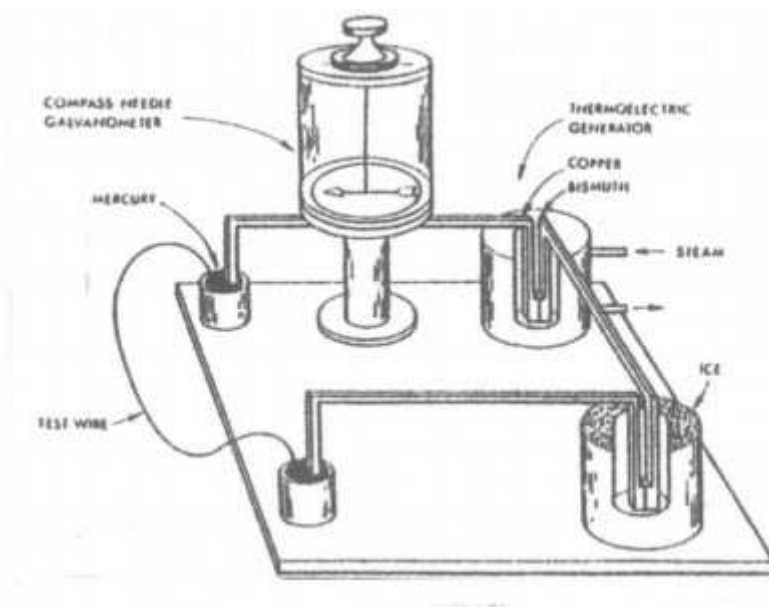


Figura 12 - Equipamento proposto por Ohm

O equipamento montado por Ohm foi publicado oficialmente em seu livro em 1827. O físico norte-americano Joseph Henry (1797-1878), o estoniano Heinrich Friedrich Emil Lenz e o inglês Sir. Charles Wheatstone(1802-1875) foram os principais atores na divulgação do trabalho de Ohm em seus respectivos países. “O trabalho de Ohm foi publicado sobre o título de *The Galvanic Circuit Mathematically Worked Out.*” (HALL, 1999) e ([EspaçoReservado2]). Sir Charles Wheatstone (1802-1875) propôs um método de medição da corrente baseado no trabalho de Samuel Hunter Christie publicado em 1833 com o título “*Experimental Determination of the Laws of*

Magneto-Eletric Induction que ficou mundialmente conhecido até os dias atuais como “Ponte de Wheatstone” (HALL, 1999) ([EspaçoReservado2]).

“Willian Thonson (1824-1907) mais conhecido por Lord Kelvin apresenta em 1862 apresenta um estudo sobre os possíveis erros da ponte de Wheatstone” (HALL, 1999) ([EspaçoReservado2]), referenciando as junções quando aplicados a valores de resistores de baixo valor, propondo uma nova configuração para a ponte de Wheatstone. Essa nova estrutura conhecida por ponte de Kelvin ou Ponte de Thonson (figura 13) permitia que pequenas resistências fossem utilizadas, tudo isso devido a implementação de um dispositivo para ajuste fino. A ponte operava com quatro resistores fixos e dois variáveis, o componente a ser determinado o valor da impedância era inserido no local de R_x . Os resistores variáveis eram ajustados até que a corrente fosse nula

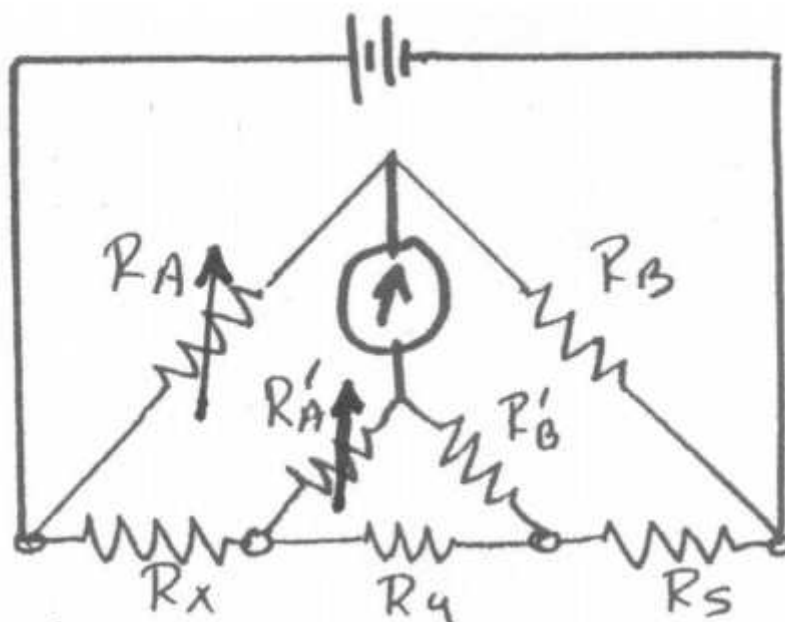


Figura 13 – Ponte de Kelvin ou Ponte de Thonson

“Os físicos Michael Faraday (1791-1867) e Joseph Henry descobriram de forma simultânea e independente a indutância mútua em 1831 e a indutância-própria em 1832” (HALL, 1999). Eles usavam o galvanômetro de deflexão para medir os valores das indutâncias. “Em 1852 R. Felici demonstrou a indutância mutua com uma ponte baseada na ideia de Wheatstone” (HALL, 1999). O equipamento proposto por Felici (figura 14) operava com um transformador variável e indutâncias conhecidas, uma fonte de tensão DC controlada por uma chave que possibilitava a aplicação de pulsos e um local para ser inserido um transformador fixo a ser medido a corrente. O valor da corrente era

visualizado através de um amperímetro. Através de uma série de medições era possível montar a curva característica da indutância mútua.

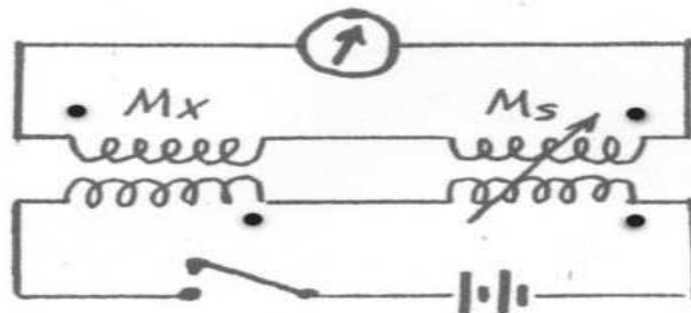


Figura 14 – Estrutura proposta por Felici

“O método de Felici foi abandonado quando J. C. Maxwell propôs em 1895 um novo modelo para medir indutores e resistores.” (HALL, 1999). O modelo proposto por Maxwell (figura 15) é uma estrutura baseada na ponte de wheatstone com a introdução do método de deflexão balística. A ponte proposta por Maxwell é inicialmente balanceada com uma tensão DC aplicada em regime permanente, depois a chave é aberta e fechada criando um transiente no indutor e finalmente a indutância pode ser calculada baseada na magnitude da deflexão do transiente do indutor e do impulso gerado pela parte balística da ponte.

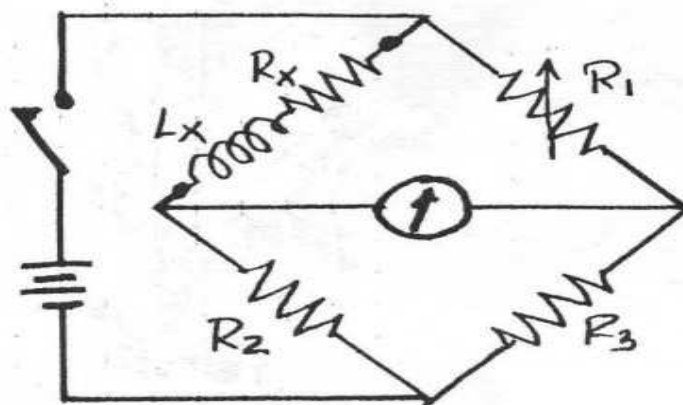


Figura 15 - Ponte proposta por Maxwell

Após as variações de Kelvin e Maxwell a ponte de Wheatstone ganharam muitas variações, como as propostas por Anderson em 1891, Carey Foster em 1894, Heavyside em 1892, Aryton e Perry em 1888, Wien em 1891 e outras tantas que surgiram.

A mais importante configuração para medição de indutores é a ponte de Maxwell-Wien e suas variações.

2.3.2. DE 1900 - 1945

As empresas pioneiras no setor de equipamentos de precisão surgiram no início do século XX. Conforme (HALL, 1999):

Um engenheiro da Leeds and Northrup (L&N) e General Radio (GR) conhecido como R. F. Field desenvolveu o GR Type 667-A que foi o mais popularmente preciso laboratório de ponte indutiva que comparava um indutor desconhecido com um indutor interno pré-definido, com 1mH na forma toroidal, mas também tinha um indutor variável em serie com DUT que permitia fazer um ajuste final de forma lenta e precisa, porém, em alguns casos não era possível fazer o ajuste. O GR 667-A.

A GR investiu em uma nova linha de desenvolvimento criando o GR 667-A que foi desenvolvido pela equipe de engenheiros liderada por Lamson e Hersh que possuía um não interativo ajuste, pois seus componentes encontravam-se no mesmo circuito o que impossibilitava a variação da corrente instantaneamente pelos seus componentes indutivos.

Em 1934 a *Boonton Radio Company's* introduziu o seu modelo *Type 100A* figura 16 que foi o mais famoso medidor RF (HALL, 1999). Neste equipamento o indutor desconhecido ressonava junto com o capacitor variável interno, quando o valor do capacitor era ajustado para um determinado valor a fim de fazer o sistema ressonar, assim sendo possível determinar o valor do indutor.

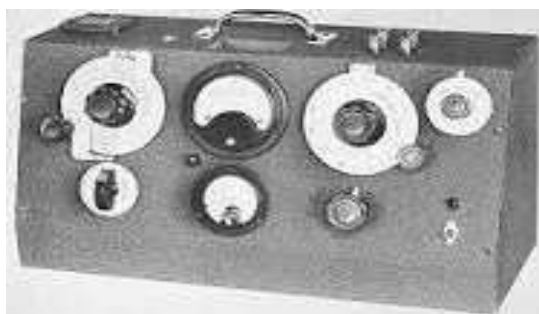


Figura 16- BRC Type 100A

Outros importantes equipamentos foram desenvolvidos durante o início do século XX até o final da segunda guerra mundial, entre eles estão a Ponte T da *Turtle*, *GR 721* comparador de Bobina da GR e a Ponte Gêmea T da Sinclair.

2.3.3. DE 1946 - 1965

Passado a segunda guerra mundial o mundo vivia a corrida industrial e o início da guerra fria. De um lado as indústrias necessitando cada vez mais de equipamentos necessários para melhora de sua linha de produção, no outro lado a corrida tecnológica que envolvia as duas maiores potências do mundo, EUA e URSS.

Então o que era conhecido como tecnologia de radiofrequência dividiu-se em duas áreas surgindo a eletrônica trazendo junto com ela milhares de inovações que necessitavam cada vez mais de equipamentos precisos e seguros.

Os equipamentos de medição de indutor e capacitor, conhecidos como medidores LC foram também divididos em três categorias, medidores AC, DC e em RF. Com precisões cada vez mais afiadas, esses equipamentos desafiavam os fabricantes e concorrentes. Na era pós-guerra o nível de precisão dos equipamentos de medição chegara a erros decimais, o GR 291-A (figura 17) que era um sistema de medição de impedância desenvolvida pela equipe liderada pelo engenheiro eletrônico Merle Morgan que apresentava erro de 0.5%.



Figura 17 - Sistema de medição de impedância.

Em 1962 a GR criou um sistema com alta resolução, o GR 1608 tinha níveis de precisão muito além de sua época. Esse equipamento permitia erros na casa de 0.1% para R, L e C, e em 1962 esse equipamento foi aperfeiçoada chegando a 0.05% de erro nas medidas. O GR 1608-A (figura 18) e ainda mais compacto que o seu antecessor.

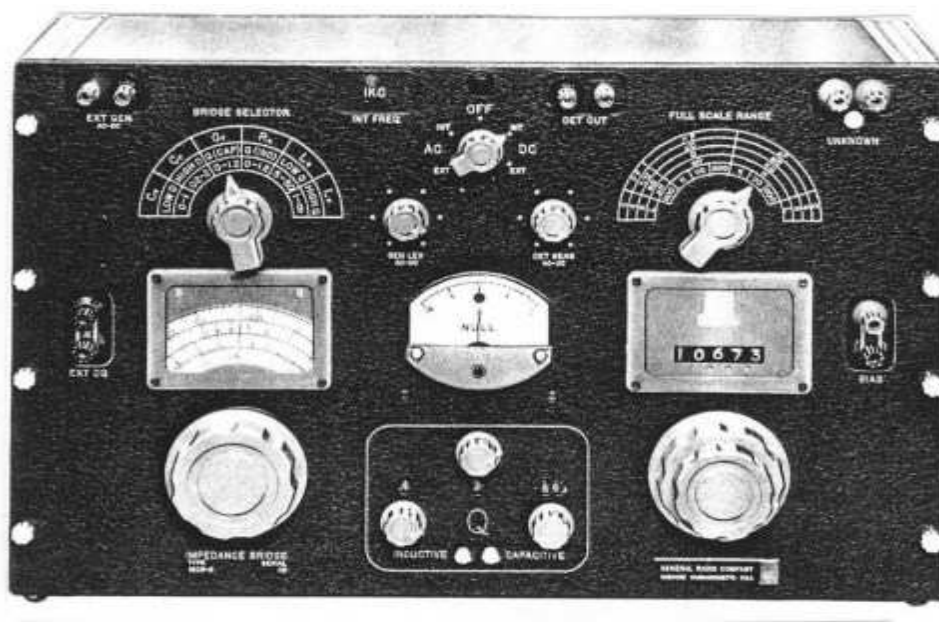


Figura 18 - GR 1608-A

O início da guerra fria aqueceu a competição entre os fabricantes de equipamentos, esse fato é constatado com o incremento de novos equipamentos com características semelhantes e com níveis de precisão mais aprimorados. Entre os concorrentes os equipamentos com significativa importância foram o Marconi 868A (figura 19), AVO-B 150 (figura 20), GR 1656 e Fluke 710A.

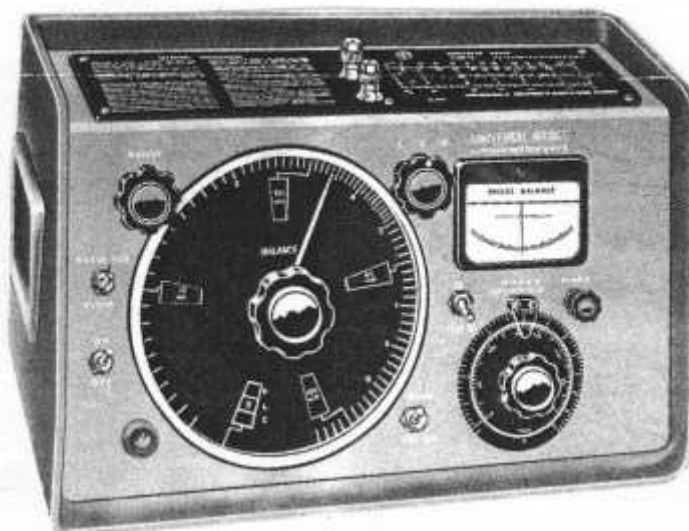


Figura 19 – Marconi 868A



Figura 20 – AVO-B 150

As pontes DC eram para a época importante, pois ela trazia a versatilidade de serem portáteis ganhando uma parte significativa do mercado. A L&N, que era líder no mercado e forte concorrente da GR, inovou ao implementar pontes de Kelvin em caixas de madeira que permitiam que o equipamento fosse levado a qualquer lugar. Uma das mais importantes pontes DC desenvolvida foi o comparador seguidor de linha em inglês *Guidline Current-Comparator* que usava um transformador em um dos braços de sua ponte interna. Essa nova classe de instrumentos DC se tornou popular em 1952, sua inovação aumentou o raio de atuação dos equipamentos da época e ainda substituiu os cursores de década diminuindo possíveis erros provocados por falhas do usuário do equipamento.

2.3.4. DE 1966 – 2000

A invenção dos transistores provocou fortes mudanças na indústria dos equipamentos de medição, as pontes DC também foram impactadas e ganharam circuitos integradores. O pesquisador H. Schmidt em 1966 propôs a modificação nos equipamentos, justificando a necessidade e possibilidade de uso do PWM. O PWM não era apenas um circuito conversor A/D, ele além de fazer a conversão de um sinal de tensão de analógico para digital também fazia a divisão, chamando esse processo de dual-slope integrador, a figura 21 mostra o diagrama elétrico.

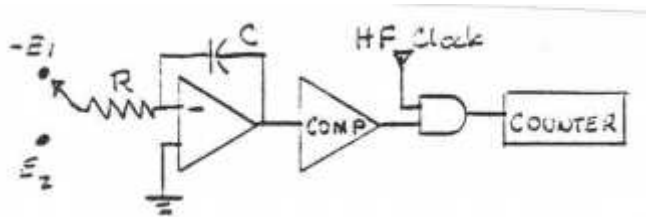


Figura 21 - Dual-slope integrador

Essa topologia foi um importante passo na evolução dos equipamentos DC, hoje ele esta presente em praticamente todos os equipamentos modernos. Entre os equipamentos pioneiros nessa nova revolução temos o *Digital Megohmmeter da Backman L-9* (figura 22) e o *Digital Megohmmeter Guildline 9520* (figura 23). Inicialmente projetados para medir resistores, porém foram sendo aperfeiçoados para medir capacitância e indutância.



Figura 22 - Digital Megohmmeter Backman L-9

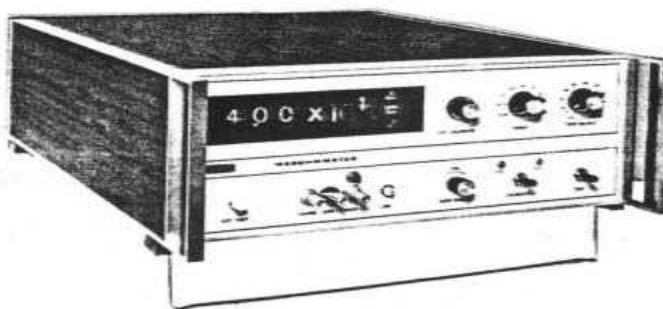


Figura 23 - Digital Guildline 9520

As grandes empresas evoluíram e implementaram sistemas usando computadores. Essa evolução permitiu que os valores negativos de impedância para capacitores fossem medidos. Assim, por causa dos computadores as pontes não faziam medidas diretas no parâmetro desejado e apenas uma ponte era necessária para fazer qualquer tipo de mediação, fossem resistivas, capacitivas ou indutivas. Quando os microprocessadores surgiram eles foram incrementados as pontes como partes essenciais eliminando o uso de um computador externo. A primeira ponte controlada

por microprocessador foi a BEC 76A (figura 24), ele é considerado o pai do RLC modernos.



Figura 24 - BEC 76A

Inúmeras outras pontes RLC surgiram no decorrer dos últimos 40 anos, podemos destacar o RLC Meter fabricado pela HP (figura 25), o Precision RLC Dirigible fabricado pela GR fabricado em 1988 (figura 26), Vector Impedance Meter HP 4193A produzida em 1990 (figura 27) e o Precision LCR Meter QT 7600 fabricada em 1995 (figura 28).

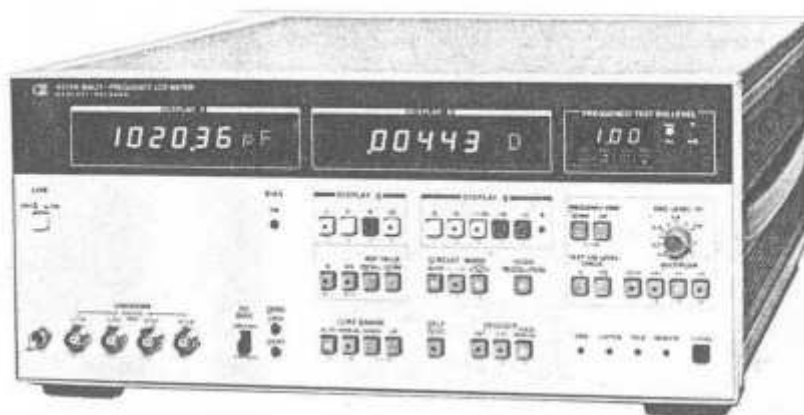


Figura 25- HP 4272



Figura 26 - RLC GR 1693

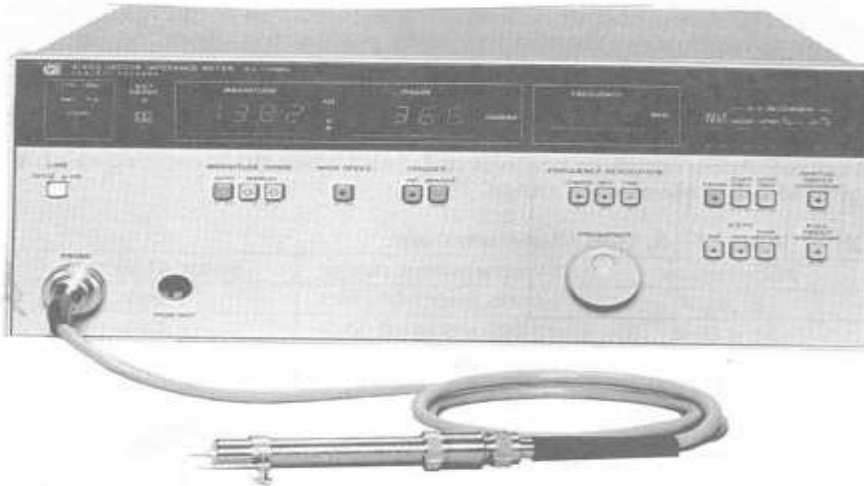


Figura 27 - Vector Impedance HP 4193A



Figura 28 - Precision Meter QT 7600

2.3.5. DIAS ATUAIS

Atualmente temos uma enorme quantidade de equipamentos industrialmente produzidos. Eles atendem todos os públicos, desde o estudante de ensino médio e tecnológico até atividades científicas de ponta.

Os medidores RLC podem custar de algumas dezenas até alguns milhares de reais. Os mais baratos tem precisão, calibragem e escalas limitada enquanto os mais caros podem tem uma maior flexibilidade de escala e maior precisão nas medições.

Além do equipamento presente no Laboratório de Eletrônica Industrial e Acionamentos de Máquinas – LEIAM UFCG o Agilent LCR Meter 4263 A, podemos destacar ainda o Agilent E4990A Impedance Analyzer e o Sourcetric RLC Meter 2810D.

Agilent LCR Meter 4263 A (figura 29). Esse equipamento tem (AGILENT, 2014):

- Precisão básica de 0.1%;
- Medição com velocidade de até 25ms;
- CC e seis frequências (100, 120, 1k, 10k, 20k e 100k Hz);
- Parâmetros de medição: Z, Y, Teta, R, X, G, B C, L, D, Q Rdc, N e M.



Figura 29 - Agilent LCR Meter 4263 A

Também podemos destacar outros medidores de impedância:
Agilent E4990A Impedance Analyzer, ver figura 30:

- Cinco opções de frequência (20, 10M, 20M, 30M, 50M e 120M Hz);
- Precisão de 0.08%;
- Impedância de entrada de 20m Ω a 40M Ω ;
- Parâmetros de medição Z , $|Y|$, θ , R, X, G, B, L, C, D, Q, Complexa Z, Complexa Y, Vac, Iac, Vdc, Idc;
- 4 canais e 4 seguidores com um LCD de 10.4 polegadas;
- Preço: R\$71.914,00.



Figura 30 - Agilent E4990A Impedance Analyzer

Sourcetric LCR Meter 2810D, ver figura 31:

- Frequências de teste: 100, 120, 1k, 10k Hz;
- Medições em 80ms;
- 2 canais;
- Peso 3.7kg;
- Preço: R\$3.217



Figura 31 - Sourcetric LCR Meter 2810D

3. MEDIDORES DE INDUTÂNCIA E CAPACITÂNCIA

3.1. MEDIDORES DE INDUTÂNCIAS E CAPACITÂNCIAS

3.1.1. PROPOSTA DE PHIL RICE

3.1.1.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O equipamento funciona comparando a frequência gerada pela entrada LC provocada pelo acoplamento no *socket* componente a ser mensurada com a frequência gerada por um gerador de frequência interno. Os dados são comparados e o resultado é convertido em valor de capacitância ou indutância mostrado em um LCD.

3.1.1.2. DIAGRAMA DE BLOCOS

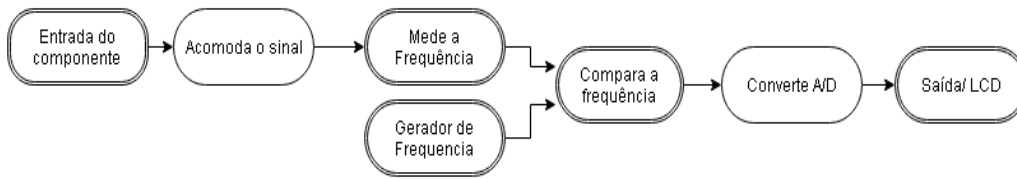


Figura 32 - Diagrama de Blocos

3.1.1.3. CONVERSOR A/D

O microcontrolador usado vai receber o sinal e fazer os devidos ajustes no capacitor de entrada regulando a tensão e entrada.

As equações usadas dentro do microcontrolador basicamente para determinar a frequência em que aquele componente oscila. As equações são divididas para o capacitor e para o indutor.

Para o capacitor

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (63)$$

$$F_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_{cal})}} \quad (64)$$

$$F_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_u)}} \quad (65)$$

$$C_u = \frac{\left(\frac{F_1}{F_3}\right)^2 - 1}{\left(\frac{F_1}{F_2}\right)^2 - 1} \quad (66)$$

Para o indutor

$$F_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (67)$$

$$F_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_{cal})}} \quad (68)$$

$$F_3 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C(L + L_u)}} \quad (69)$$

$$L_u = \left[\left(\frac{F_1}{F_3} \right)^2 - 1 \right] \times \left[\left(\frac{F_1}{F_2} \right)^2 - 1 \right] \times \frac{1}{C_{cal}} \times \left(\frac{1}{2\pi F_1} \right)^2 \quad (70)$$

O PIC 16F84 possui 13 pinos com função de entrada/saída half-duplex, isto é, quando acionadas so so funcionam em um sentido, e controle individual. OS 13 pinos são utilizados onde RB0-RB3 são usados para transmissão de dados para o display, RA0 e RA0 para controle do relógio interno e do sinal do condicionador de sinal, RB7 é usado para identificar o modo do sinal capacitivo ou indutivo, RB6 e RB4 são usados como chaves que permitem fazerem testes e calibração do PIC, RA3 envia o sinal reset para o display e RA2 envia o comando para limpar o sinal do display.

A conversão ASCII é feito pelo microcontrolador através do código implementado, ele discretiza o valor digitalizado pelo comparador e transforma em uma stream de bits. Essa stream vai ser enviada por dois dos 4 canais de comunicação de dado do microcontrolador com o display.

3.1.1.4. OPERAÇÃO DO CIRCUITO

O modelo do medidor de indutância e capacitância foi proposto por Phil Rice na *Amateur Radio Magazine* da Universidade da Austrália em abril de 2004. Este equipamento surpreendeu o próprio idealizador devido a grande precisão de suas medições e o baixo custo. O modelo proposto tem um oscilador, um comparador com realimentação positiva e com saída digital. O oscilador possibilita gerar frequências que serão comparadas com a frequências gerada pelo circuito LC interno e pelo configuração do indutor ou capacitor de entrada em conjunto com o indutor e capacitor interno.

No projeto, o microcontrolador usado é o PIC 16F84A que mede e compara a frequência de entrada e converter para o display LCD com 16 caracteres. O circuito usado para fornecer dados ao microcontrolador foi inicialmente proposto no laboratório da Radiofrequência da Universidade do Oeste Australiano e foi modificado por Rice, o circuito inicial veio de outro projeto de um medidor de frequência publicado por Phil Rice na revista *Amateur Radio Magazine* e foi ajustado para medir impedâncias reativas. Alguns outros projetos baseados no modelo de Phil Rice foram construídos por pesquisadores e entusiastas em eletrônica.

Os intervalos de medições foram melhorados em consideração ao projeto de Phil Rice (figura 33), a tabela 1 apresenta os intervalos.

| | |
|-----------|------------------|
| Indutor | Range de medição |
| | 10nH – 1000nH |
| | 1uH – 1000uH |
| Capacitor | 0.1pF – 1000pF |
| | 1nF – 900nF |
| | |

Tabela 1

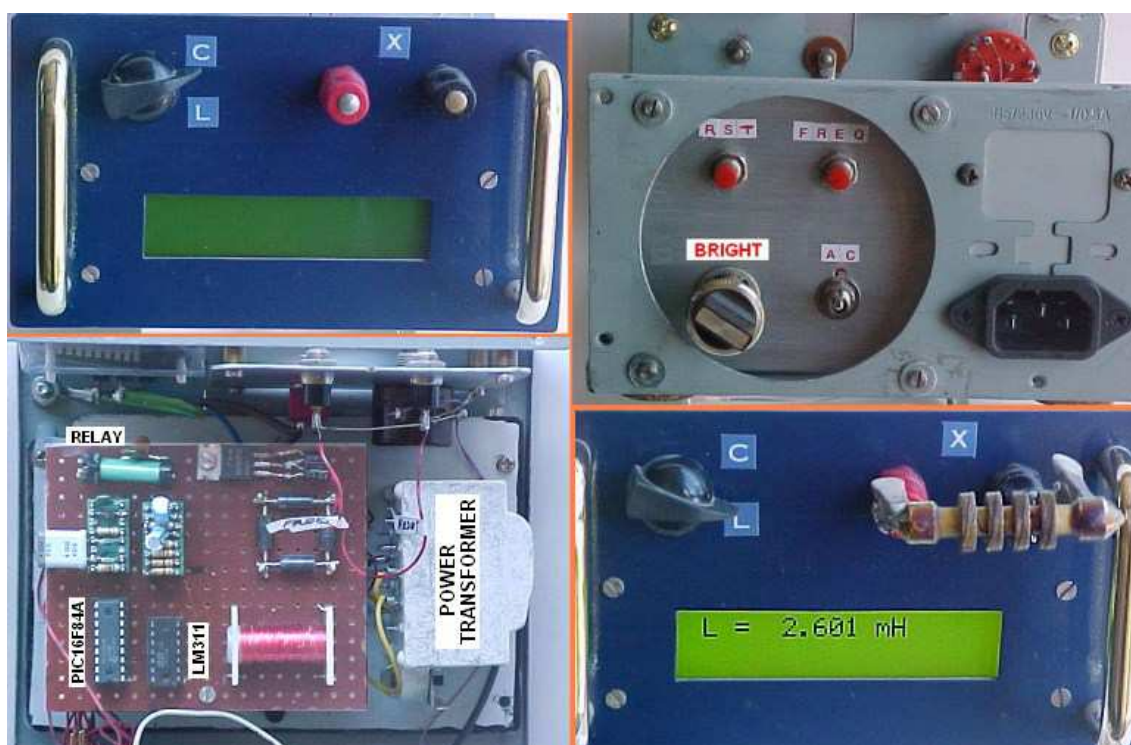


Figura 33 - Projeto de Frank Hughes

3.1.2. PC METER PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O processamento das informações obtidas da entrada do sistema necessita de um software que faça o tratamento do dado.

O tratamento do dado é feito usando o PCMETER. O código foi desenvolvido em C++ e tem em sua rotina uma série de equação que usa determinados parâmetros para calcular tensão, corrente, potência fator de qualidade e frequência. (MONTERO, 2001)

As equações internas do PCMETER são:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{CT} \int_0^{CT} v^2(t) dt} \quad (71)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{CT} \int_0^{CT} i(t)^2 dt} \quad (72)$$

$$P = \frac{1}{CT} \int_0^{CT} v(t)i(t)dt \quad (73)$$

Onde a onda gerada na entrada do PCMETER (figura 34) tem o seus coeficientes determinados por:

$$CT = N_s T_s + T_i - T_f \quad (74)$$

- N_s é a soma do tempo que o sinal leva para passar duas vezes pelo valor zero;
- T_i é o tempo inicial da amostragem;
- T_f é o tempo final da amostragem.

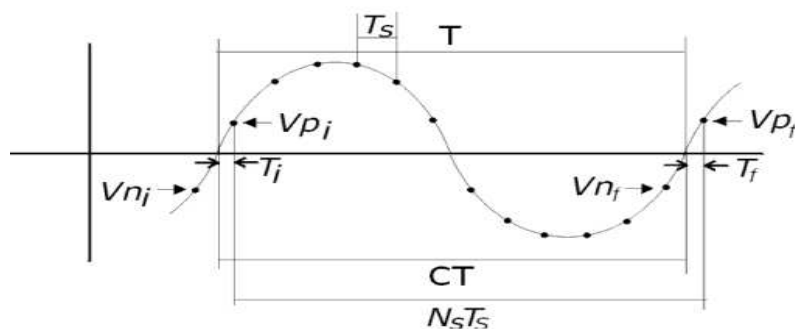


Figura 34 - Componentes da forma de onda na entrada do PCMETER

O diagrama de blocos que descreve (figura 35) a rotina executada pelo PCMETER

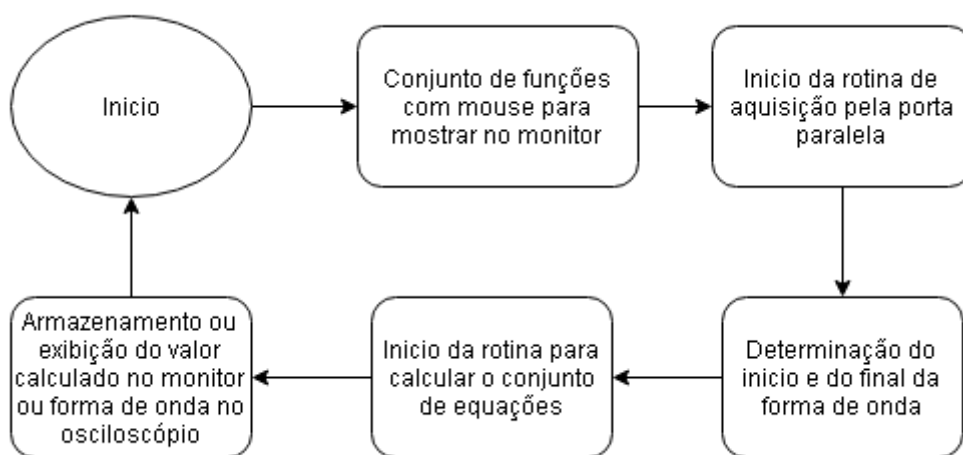


Figura 35 - Diagrama de bloco do PCMETER

A interface do PCMETER onde é possível selecionar a função desejada, salvar os dados e plotar a saída, a tela que mostra o osciloscópio e a porta paralela usada na comunicação com o computador são apresentadas na figura 36, figura 37. e figura 38.

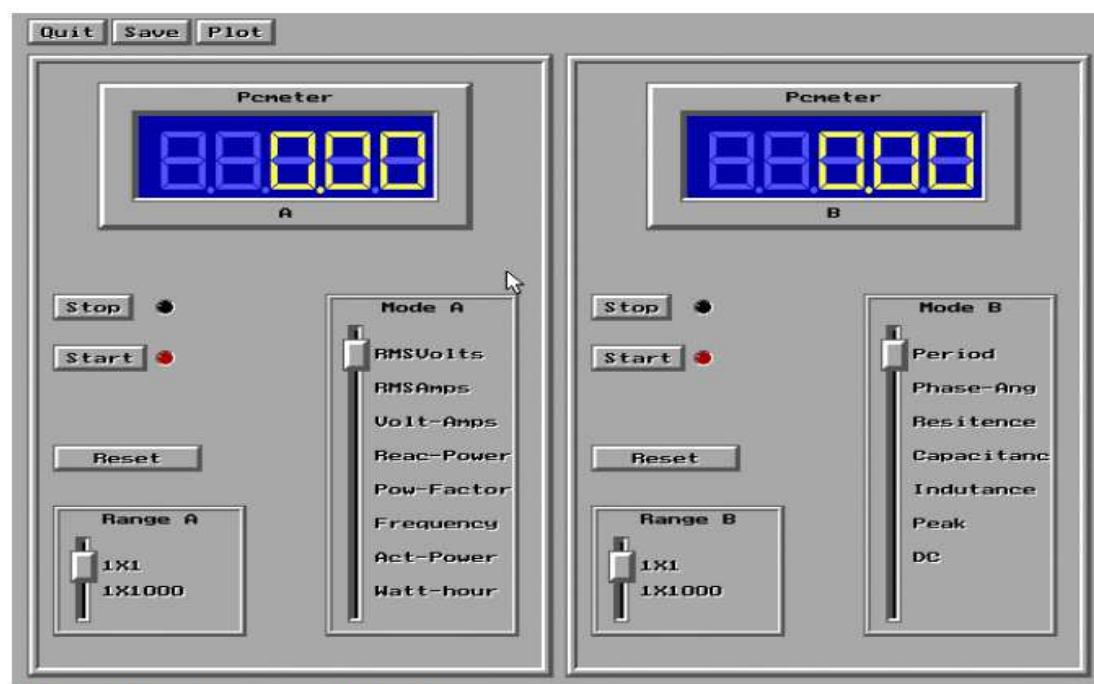


Figura 36 - Tela do PC METER

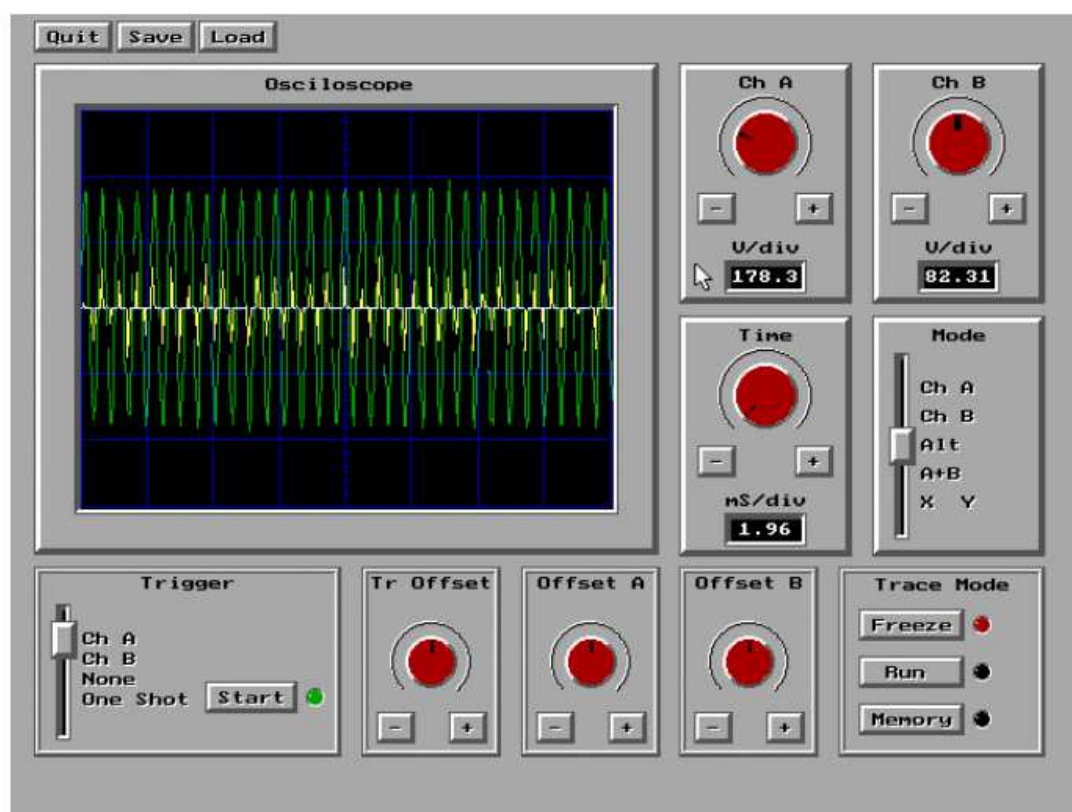


Figura 37 - Osciloscópio do PCMETER

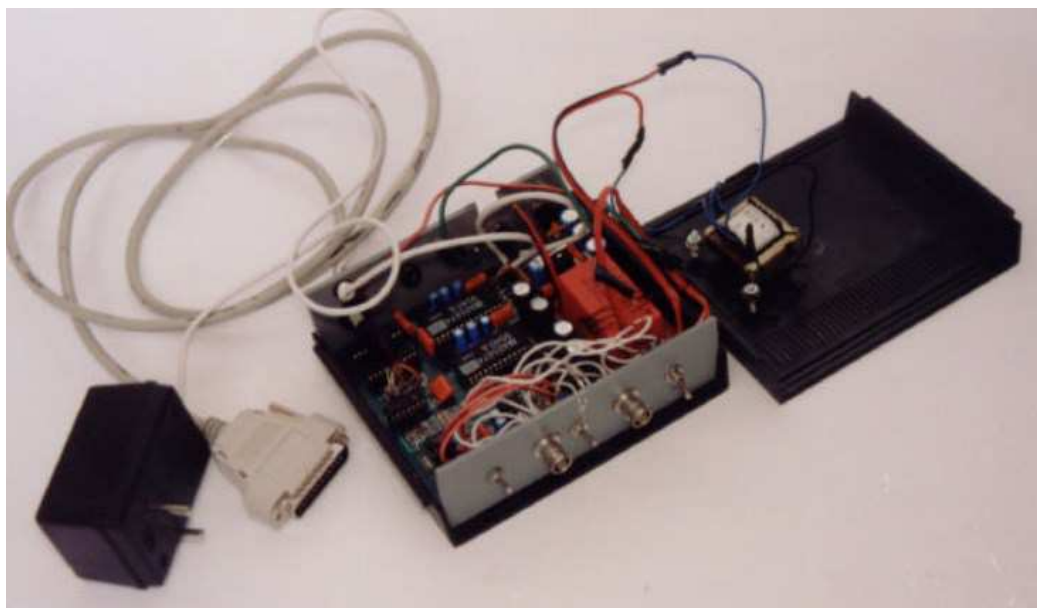


Figura 38 - Porta paralela usada na comunicação do PC METER

4. MODELO PROPOSTO PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM MEDIDOR DE INDUTÂNCIA MUTUA E PRÓPRIA E MEDIDOR DE CAPACITÂNCIA

4.1. OPERAÇÃO DO CIRCUITO

A ideia principal de um Medidor LC que permitir que medições de componentes indutivos e capacitivos sejam feitas de maneira rápida na bancada de trabalho. O circuito compara a frequência da entrada gerada pelo gerador a cristal operando na frequência de 8MHz e a do componente a ser medido em paralelo com o componente interno do circuito.

O microcontrolador efetua cálculos fundamentais para determinar a frequência de operação do circuito LC. As equações programadas no microcontrolador são

$$F = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (75)$$

$$L = \frac{1}{4\pi^2 F^2 C} \quad (76)$$

$$C = \frac{1}{4\pi^2 F^2 L} \quad (77)$$

Para medir um componente é necessário que seja selecionado a chave para o tipo de componente a ser medido, a chave fará o ajuste do componente interno do microcontrolador que ficará em paralelo ao componente a ser mensurado permitindo que a configuração de saída tenha comportamento de um oscilador. Com o componente devidamente posicionado no equipamento e a chave seletora na posição correta. A onda gerada irá passar por um resistor do tipo pull up que tem como saída um sinal de onda quadrada. Esse sinal será comparado com a frequência do gerador de sinal interno. A

saída será convertida usando as equações 73 – 75 e enviada na forma de código de 8 bits do LCD que pode ser interligado ao barramento do microcontrolador. Uma porta USB ligada na saída do microcontrolador também permite que o código de 8 bits seja enviado para o computador ou smartphone.

4.2. DIAGRAMA DE BLOCOS

A seguinte sequência apresenta o diagrama de blocos da ideia de funcionamento do projeto.

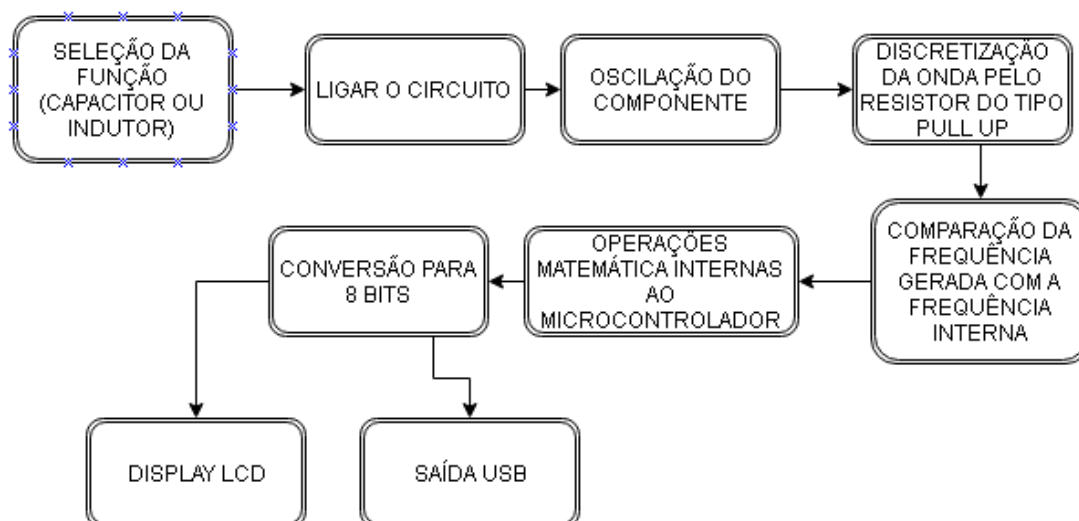


Figura 39 - Diagrama de Blocos do Modelo Proposto

4.2.1. SELEÇÃO DA ENTRADA

Uma chave seletora será usada para determinar o tipo de entrada que será usado. Essa chave deve ser de dois estados e possuir a menor impedância em seus terminais de modo que interfira o mínimo possível nas medições.

4.2.2. LIGAR O CIRCUITO

Consiste de um chave analógica do tipo liga/desliga que possibilita alimentar o circuito pela fonte de 5V ou desliga-lo da fonte.

4.2.3. OSCILAÇÃO DO COMPONENTE

A oscilação do componente ocorre quando a entrada é selecionada e a alimentação também é acionada. A combinação dessas duas situações irá permitir que o circuito formado por um indutor e um capacitor irá ressonar em uma determinada frequência.

4.2.4. DISCRETIZAÇÃO: RESISTOR PULL UP

O resistor do tipo Pull Up irá receber em sua entrada a onda gerada pela configuração LC formada pelo indutor ou capacitor interno e o dispositivo a ser mensurado. Esse sinal tem a forma de uma senóide que será convertida num sinal de onda quadrada pelo resistor Pull Up.

4.2.5. ACOMODAÇÃO DO SINAL

Um transformador de potência faz a isolação da tensão. O isolamento da corrente é feito usando um sensor de corrente. O sento de corrente consiste de um sensor de efeito hall (figura 40).

Esse sensor não invasivo permite acomodar o sinal protegendo os circuitos que estão ligados na porta do conversor, que opera em pequenos valores de tensão.

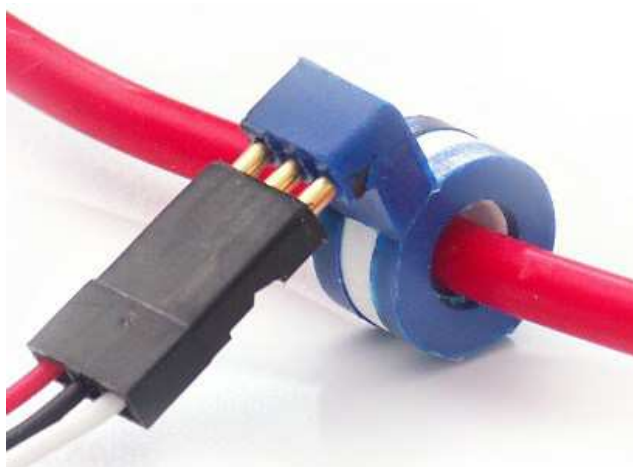


Figura 40- Sensor de Efeito Hall

4.2.6. GERADOR DE SINAL

Um cristal de 8MHz é ligado ao PIC possibilitando que a parti da onda quadrada gerada na saída do cristal seja convertida, integrando ou derivando o sinal, em qualquer tipo de sinal. O sinal gerado pode ser convertido em um sinal DC, triangular e senoidal.

4.2.7. COMPARADOR DE FREQUÊNCIA

O comparador de frequência é uma operação interna do PIC que permite que a frequência gerada pela configuração do oscilador LC e a frequência gerada pelo cristal interno seja comparada e determinada. A informação dada pelo comparador é o item fundamental para a determinação do componente. Esse sinal será usado nas equações (74) e (75).

4.2.8. CONVERSÃO A/D

O conversor A/D é responsável em transformar a informação gerada pela saída do comparador de frequência em um número binário de 8 bits. Essa informação permitirá que esse número seja enviado para a porta USB e para o display LCD 16x2(preferível).

4.2.9. PORTA USB

A aquisição de dados é feita com uma porta USB. Para conectar a porta USB ao computador é necessário usar um microcontrolador. O esquema que mostras as conexões elétricas de um dispositivo USB é mostrado na figura x e são apresentadas às funções de cada ligação do cabo USB na tabela 41.

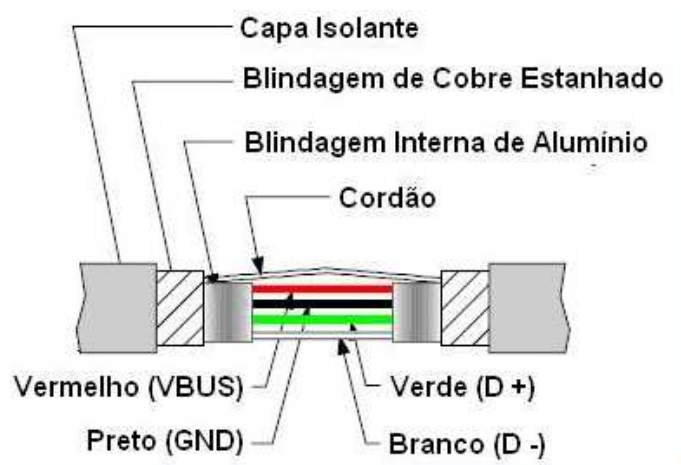


Figura 41 - Esquema Elétrico do cabo USB

| Pin | Signal | Color | Description |
|-----|--------|-------|-------------|
| 1 | VCC | | +5V |
| 2 | D- | | Data - |
| 3 | D+ | | Data + |
| 4 | GND | | Ground |

Tabela 2 – pinos usb

4.2.10. DISPLAY LCD

O Display LCD permite que os valores medidos sejam exibidos sem a necessidade de conexão direta com o computador. É útil quando o equipamento for usado em bancadas e em situações que não tenham a necessidade de armazenar os valores de saída.

4.2.11. DIAGRAMA ELÉTRICO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O diagrama elétrico (figura 42) traz as conexões entre os dispositivos. A entrada de 5V é controlada por uma chave do tipo liga/desliga e alimenta tanto o dispositivo a ser mensurado quanto o circuito ressonante complementar. A chave seletora SW1 deve ser posicionada para a correta categoria de dispositivo. O dispositivo a ser mensurado é acoplado nos terminais J2 e J3. O sinal gerado pelo dispositivo e pela indutância ou capacitância interna passa por um resistor pull up e é enviado para a entrada analógica do PIC 18F4550. As ligações entre o PIC 18F4550 e conector USB permitem que sejam

enviados pela porta USB para o computador os dados recebidos e convertidos pelo PIC 18F4550. O oscilador do PIC 18F4550 é composto por um oscilador a cristal 8MHz.

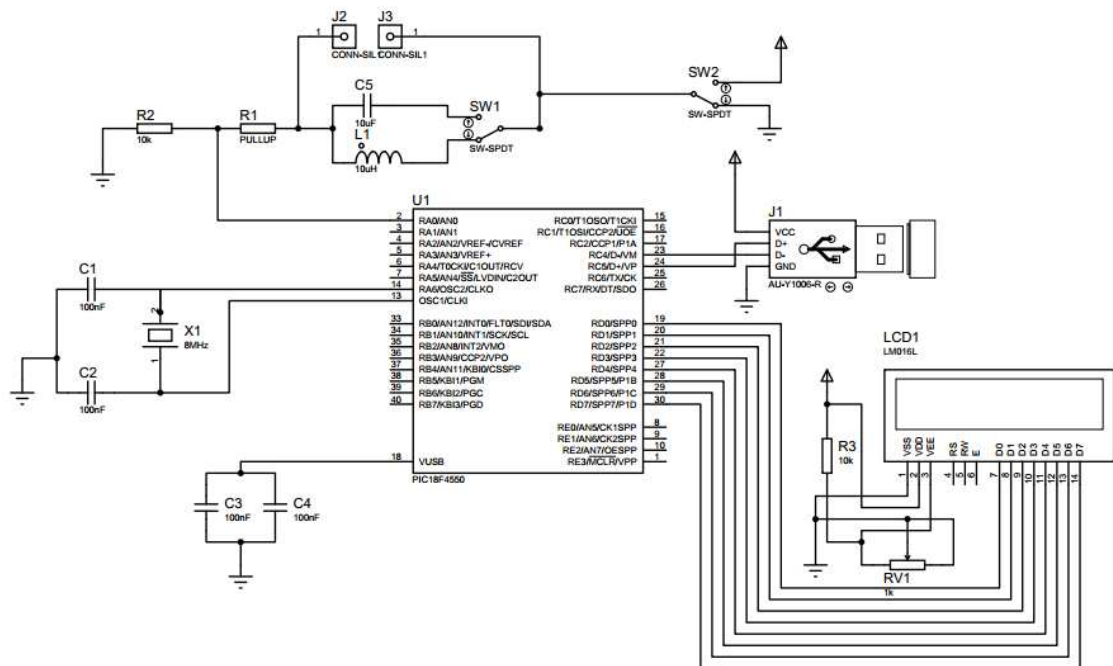


Figura 42 - Esquema Elétrico Proposto

5. CONCLUSÃO

A pesquisa sobre avanço no desenvolvimento dos medidores de indutância e capacitâncias teve como objetivo mostrar o árduo trabalho dos pioneiros e suas tecnologias limitadas para os dias atuais e quão a frente do seu tempo estavam aqueles pesquisadores. Na busca por imagem que mostrassem o trabalho desenvolvido por eles ficou claro como até um protótipo para aqueles tempos eram difíceis. Nas pesquisas da literatura, escassíssima, nomes de grandes físicos e engenheiros foram encontrados, tais como Wheatstone, Kelvin, Lenz e Faraday. Na década de 40 viu-se quando a guerra impulsionou a Engenharia Elétrica, o poder de construção e precisão dos equipamentos das empresas pioneiras surgidas no início do século XX aumentou de forma exponencial. Equipamentos pela primeira vez quebram a barreira da precisão maior que 99%.

A evolução dos componentes possibilitou que novos meios de medição surgissem e entre eles estavam os baseados em sensores e microcontroladores. Os microcontroladores permitiram integrar a ferramenta computacional ao mundo analógico e mais uma gama de equipamentos de medição surgiu. Agora os medidores microcontrolados que permitem executar rotinas internas sem a necessidade de um computador ou fazer a conexão entre o computador e o ambiente analógico.

Inspirado na construção de um medidor de impedâncias para o Laboratório de Conversão Eletromecânica e entendendo a dificuldades desenvolver um projeto de grande porte, foi proposto um equipamento capaz de medir indutância e capacitância usando a comunicação USB do computador e do microcontrolado. O projeto não foi implementado porquê a ideia deste não foi de apresentar equipamento e sim mostrar um meio para desenvolvimento.

Por fim, foi necessário entender muitos conceitos apresentados nas disciplinas de conversão eletromecânica, eletrônica analógica e digital. Conceito esses que se tornaram mais sólidos. Fica a proposta para a construção do medidor de impedância baseado na frequência ressonante do circuito LC e com microcontrolador PIC.

6. REFERÊNCIAS

- AGILENT. Medidor de LCR, 100 Hz a 100 kHz. **Agilent**, 2014. Disponível em: <<http://www.keysight.com/en/pd-1000000850%3Aepsg%3Apro-pn-4263B/lcr-meter-100-hz-to-100-khz?cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 22 maio 2016.
- AGILENT. E4990A Impedance Analyzer, 20 Hz to 10/20/30/50/120 MHz. **Keysight.com**, 2016. Disponível em: <<http://www.keysight.com/pt/pd-2405177-pn-E4990A/impedance-analyzer-20-hz-to-10-20-30-50-120-mhz?nid=-33831.1089074&cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 22 Maio 2016.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamentos**. 2º. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BOYLESTAD, L. **Introdução à Análise de Circuitos**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.
- CHUANG, N.; GALE, T.; LANGMAN, R. **Measuring Inductances on a DC Machine**. University of Tasmania. Hobart, p. 5. 2005.
- HALL, H. P. The History of Z Measurement. **ietlabs**, 1999. Disponível em: <http://www.ietlabs.com/pdf/GenRad_History/A_History_of_Z_Measurement.pdf>. Acesso em: 30 junho 2016.
- JONES, C.. **The Unified Theory of Electrical Machines**. 1º. ed. London: Butterworths, 1967.
- KEYSIGHT. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5964-6181E.pdf?id=1000030852:epsg:dow>>. Acesso em: 21 julho 2016.
- KEYSIGHT TECHNOLOGIES. LCR Meters, Impedance Analyzers and Test Fixtures. **Site da Keysight.com**, 2016. ISSN 5952-1430E. Disponível em: <<http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952-1430E.pdf?id=1000001995:epsg:apn>>. Acesso em: 21 julho 2016.
- MEDEIROS, S. F. **Fundamentos de Medidas Elétricas**. 2ª. ed. Rio de Janeiro: Guanabara S. A., 1981.
- MICHIGAN, U. D. **The Scientific Papers of Sir Charles Wheatstone**. [S.l.]: Taylor & Francis, 1879.
- MICROCHIP. 35007b. **microchip.com**, 2014. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/35007C.pdf>>. Acesso em: 09 junho 2016.
- MONTERO, L. R. R. **Versatile Multifunction Electrical Digital Meter Based on Personal Computer**. 11th IMEKOTC-4. Lisboa: [s.n.]. 2001. p. 4.
- MONTERO, L. R. R.; LIMA, P. T. B. D. **INSTRUMENTOS PARA MEDIR GRANDEZAS ELÉTRICAS - SEUS PRINCÍPIOS E APLICAÇÕES**. VI

SEMINÁRIO DE ELETROTÉCNICA APLICADA À SUSTENTABILIDADE.
CAMPINA GRANDE: [s.n.]. 2013.

RICE, P. Digital LC Meter. **Amateur Radio Magazine**, Crawley, April 2004.

SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª. ed. [S.l.]: McGrawHill, 2013.

SILVA, R. S. **Notas de Aula**. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2015.

SKELTON, E. **Homebrew Cookbook**. London: Realsociety of Grain Breain, v. Único, 2010.

SOURCETRONIC. LCR Meter 2810D. **sourcetronic**, 2014. Disponível em:
<http://www.sourcetronic.com/shop/en/lcr-meter-2810d.html?gclid=CjwKEAjwsYW6BRCTzvu5y8DPhi0SJABnGLIH960kMXcpXvIJjN8r1adCOs63PGFMUWQ-cL28QU4IBhoC_U3w_wcB>. Acesso em: 22 Maio 2016.

SOURCETRONICS. LCMETER. **sourcetronics**, 2014. Disponível em:
<http://www.sourcetronic.com/shop/en/lcr-meter-2810d.html?gclid=CjwKEAjwsYW6BRCTzvu5y8DPhi0SJABnGLIH960kMXcpXvIJjN8r1adCOs63PGFMUWQ-cL28QU4IBhoC_U3w_wcB>. Acesso em: 21 julho 2016.
TIPLER, P. A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6ª. ed. [S.l.]: LTC, v. 2, 2010.

USB - Conexão Elétrica. **Fassi**. Disponível em:
<<http://www.fassi.com.br/artigos/usb000/usb002>>. Acesso em: 14 Outubro 2016.