



André Ribeiro Gomes

**Projeto de um voltímetro por aproximação para
tensões elétricas alternadas em 60 Hz**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
maio de 2024

André Ribeiro Gomes

**Projeto de um voltímetro por aproximação para
tensões elétricas alternadas em 60 HZ**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação) da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Orientador

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Profa. Elisabeth Costa Monteiro

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Daniel Ramos Louzada

Programa de Pós-graduação em Metrologia – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 02 de maio de 2024

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

André Ribeiro Gomes
Graduado em Matemática pela Universidade Paulista (UNIP), em 2020.

Ficha Catalográfica

Gomes, André Ribeiro

Projeto de um voltímetro por aproximação para tensões elétricas alternadas em 60 Hz / André Ribeiro Gomes ; orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2024.

59 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2024.

Inclui bibliografia

1. Metrologia – Teses. 2. Metrologia para Qualidade e Inovação – Teses. 3. Metrologia. 4. Voltímetro. 5. Tensão alternada. 6. Aproximação. 7. Sem contato. I. Barbosa, Carlos Roberto Hall. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Centro Técnico Científico. Programa de Pós-Graduação em Metrologia. III. Título

CDD: 389.1

A todos que sonharam comigo, pelo apoio, confiança e incentivo.

Agradecimentos

Ao Grande Arquiteto Do Universo por iluminar meu caminho e me dar sabedoria para aprender coisas novas, força para seguir em frente e adornar com beleza a obra finalizada.

Ao meu orientador Carlos Roberto Hall Barbosa, pelos ensinamentos, paciência, dedicação e disponibilidade, em todo o tempo, para o desenvolvimento desta dissertação.

Aos membros da comissão examinadora por suas contribuições a este trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), Manuel Ramos Martins, Evandro Costa dos Reis e Carlos Afonso Pacheco Campos pela ajuda e apoio durante os ensaios experimentais no Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica (LPDE).

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-graduação em Metrologia pelos ensinamentos e pela ajuda.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

À minha mãe, pela ajuda, apoio e compreensão.

À minha namorada Patrícia Batista Vieira, sem a qual eu não teria condições de concluir este estudo.

A todos que de alguma forma contribuíram para esta dissertação se tornar realidade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

Resumo

Gomes, André Ribeiro; Hall Barbosa, Carlos Roberto. **Projeto de um voltímetro por aproximação para tensões elétricas alternadas em 60 Hz.** Rio de Janeiro, 2024. 59 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta dissertação de mestrado foi projetar um voltímetro utilizando a técnica de acoplamento capacitivo para medições de tensão. O design proposto do voltímetro oferece uma alternativa simples e econômica aos métodos tradicionais de medição de tensão. Ao utilizar o acoplamento capacitivo, a necessidade de contato elétrico direto entre o circuito de medição e a fonte de tensão é eliminada, permitindo medições de forma não invasivas. O processo de desenvolvimento envolveu o projeto e a construção de um circuito de acoplamento capacitivo, que possibilitou a transferência do sinal de tensão para um circuito de medição. O circuito de medição incluiu componentes de condicionamento de sinal e um conversor analógico-digital para permitir leituras de tensão com confiabilidade metrológica. O sistema foi calibrado e testado usando uma fonte de valor de tensão conhecido para garantir medições confiáveis e precisas. Os resultados experimentais mostram que o voltímetro obteve desempenho satisfatório para a voltagem usual de 127 V em corrente alternada (127 V CA) e uma distância máxima de 0,2 m do ponto de interesse, mantendo um baixo nível de interferência de ruídos elétricos externos. O design proposto do voltímetro tem potencial para várias aplicações, especialmente em cenários onde o contato elétrico direto com a fonte de tensão é indesejável ou impraticável. Ele oferece uma solução confiável e eficiente para medições, sendo adequado tanto para fins industriais quanto de pesquisa.

Palavras-chave

Metrologia; Voltímetro; Tensão Alternada; Sem Contato.

Abstract

Gomes, André Ribeiro; Hall Barbosa, Carlos Roberto. **Design of a Contactless Voltmeter for Alternating Electrical Voltages in 60 Hz.** Rio de Janeiro, 2024. 59 p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this master's thesis was to develop a voltmeter using the capacitive coupling technique for voltage measurements. The proposed voltmeter design offers a simple and cost-effective alternative to traditional voltage measurement methods. By using capacitive coupling, the need for direct electrical contact between the measuring circuit and the voltage source is eliminated, allowing for non-invasive voltage measurements. The development process involved the design and construction of a capacitive coupling circuit, which enabled the transfer of the voltage signal to a measurement circuit. The measurement circuit included signal conditioning components and an analog-to-digital converter for accurate voltage readings. The system has been calibrated and tested using a known voltage source to ensure reliable and accurate measurements. The experimental results show that the voltmeter obtained satisfactory performance for the usual voltage of 127 V AC and a maximum distance of 0.2 m from the point of interest, maintaining a low level of interference from external electrical noises. The proposed voltmeter design has potential for several applications, especially in scenarios where direct electrical contact with the voltage source is undesirable or impractical. It offers a reliable and efficient solution for voltage measurements, being suitable for both industrial and research purposes.

Keywords

Metrology; Voltmeter; Alternating Voltage; Contactless.

Sumário

| | |
|---|----|
| Sumário | 8 |
| Lista de figuras | 10 |
| Lista de tabelas | 11 |
| Lista de siglas e abreviaturas | 12 |
| 1 Introdução | 13 |
| 1.1 Contextualização | 13 |
| 1.2. Motivação | 14 |
| 1.3 Objetivos: geral e específicos | 15 |
| 1.4 Estrutura da dissertação | 16 |
| 2 Tensão elétrica | 18 |
| 2.1 Conceito e história | 18 |
| 2.2 Unidade de medida | 19 |
| 2.3 Parâmetros de interesse | 19 |
| 2.3.1 Tensão contínua | 20 |
| 2.3.2 Tensão alternada | 20 |
| 2.4 Medição de tensão alternada | 22 |
| 2.4.1 Voltímetro analógico | 23 |
| 2.4.2 Voltímetro digital | 25 |
| 2.4.3 Voltímetros sem contato | 26 |
| 2.4.4 Voltímetros comerciais | 26 |
| 3 Projeto preliminar do voltímetro sem contato | 28 |
| 3.1 Capacitância e acoplamento capacitivo | 28 |
| 3.2 Conceito de medição | 29 |
| 3.3 Placas de Alumínio utilizadas como Sensores Capacitivos | 30 |
| 4. Protótipo do Voltímetro Sem Contato | 38 |
| 4.1 Circuito eletrônico | 38 |
| 4.2 Software de Aquisição | 40 |
| 4.3 Protótipo Montado | 41 |
| 5. Resultados experimentais | 42 |
| 5.1 Medições com as Placas de 0,30 m por 0,30 m | 42 |
| 5.2 Medições com as Placas de 0,20 m por 0,20 m | 43 |
| 5.3 Medições com as Placas de 0,10 m por 0,10 m | 44 |
| 5.4 Medições com as Placas de 0,05 m por 0,05 m | 45 |
| 5.5 Comportamento da tensão da rede | 46 |

| | |
|--|----|
| 6. Conclusões e trabalhos futuros | 48 |
| 6.1 Conclusões | 48 |
| 6.2 Trabalhos futuros | 49 |
| Referências bibliográficas | 50 |
| Anexo A – Artigo Publicado – Congresso Brasileiro de Metrologia 2023 | 53 |

Lista de figuras

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1 - | Onda de tensão alternada com amplitude de 180 V | 21 |
| Figura 2 - | Valores de pico, RMS e pico a pico em suas respectivas posições na onda de tensão alternada | 22 |
| Figura 3 - | Exemplo de voltímetro analógico | 23 |
| Figura 4 - | Circuito divisor de tensão | 24 |
| Figura 5 - | Exemplo de voltímetro digital | 25 |
| Figura 6 - | Exemplo de voltímetro sem contato tipo caneta | 27 |
| Figura 7 - | Esquema de medição do voltímetro sem contato. | 29 |
| Figura 8a - | Capacitâncias entre as placas circulares de 0,3 m de diâmetro. | 31 |
| Figura 8b - | Tensões medidas sobre o resistor com voltímetro | 31 |
| Figura 8c - | Tensões medidas sobre o resistor com osciloscópio (mV). | 31 |
| Figura 9 - | Desenho esquemático do porta-amostras de placas de alumínio projetado em PVC. | 32 |
| Figura 10 - | Foto do porta placas | 32 |
| Figura 11 - | Pares de placas de alumínio confeccionadas para serem utilizadas como sensores capacitivos | 32 |
| Figura 12 - | Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,3 m x 0,3 m. | 33 |
| Figura 13 - | Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,2 m x 0,2 m. | 34 |
| Figura 14 - | Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,1 m x 0,1 m. | 35 |
| Figura 15 - | Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,05 m x 0,05 m. | 36 |
| Figura 16 - | Esquema eletrônico do voltímetro sem contato. | 38 |
| Figura 17 - | Esquema eletrônico do filtro sintonizado. | 39 |
| Figura 18 - | Esquema eletrônico do limitador de tensão. | 40 |
| Figura 19 - | Sinal de saída lido pelo software | 41 |
| Figura 20 - | Foto do protótipo do voltímetro sem contato. | 41 |
| Figura 21 - | Tensões medidas sobre o resistor R_p com as placas de 0,30 m por 0,30 m. | 42 |
| Figura 22 - | Tensões medidas sobre o resistor R_p com as placas de 0,20 m por 0,20 m. | 43 |
| Figura 23 - | Tensões medidas sobre o resistor R_p com as placas de 0,10 m por 0,10 m. | 44 |
| Figura 24 - | Tensões medidas sobre o resistor R_p com as placas de 0,05 m por 0,05 m. | 45 |
| Figura 25 - | Comportamento da tensão da rede durante as medições | 47 |

Lista de tabelas

| | | |
|------------|---|----|
| Tabela 1 - | Compilação de dados dos estudos preliminares | 30 |
| Tabela 2 - | Dados de capacitâncias obtidos com o par de placas de 0,3 m x 0,3 m. | 33 |
| Tabela 3 - | Dados de capacitância obtidos com o par de placas de 0,2 m x 0,2 m. | 34 |
| Tabela 4 - | Dados de capacitância obtidos com o par de placas de 0,1 m x 0,1 m. | 35 |
| Tabela 5 - | Dados obtidos com o par de placas de 0,05 m x 0,05 m. | 36 |
| Tabela 6 - | Dados de tensão de saída do circuito obtidos com o par de placas de 0,30 m por 0,30 m | 43 |
| Tabela 7 - | Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,20 m por 0,20 m | 44 |
| Tabela 8 - | Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,10 m por 0,10 m. | 45 |
| Tabela 9 - | Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,05 m por 0,05 m. | 46 |

Lista de siglas e abreviaturas

| | |
|-----------|--|
| V_{RMS} | Valor Root Mean Square |
| V_p | Valor de pico |
| V_{pp} | Valor de pico a pico |
| R_g | Resistência intrínseca do galvanômetro |
| I_g | Corrente no galvanômetro |
| ADC | Conversor analógico digital |
| R_P | Resistor de prova |
| C_P | Capacitor de prova |
| V_P | Tensão de prova |
| LCR | Indutivo – Capacitivo - Resistivo |
| A/D | Analógico / Digital |

1

Introdução

A medição de tensões elétricas em valores elevados sempre foi um problema para o setor industrial. O uso de energia elétrica oferece uma gama de riscos aos operadores e usuários e medir suas grandezas sempre foi um desafio. Por questões de segurança, as operações para coleta de dados sempre foram demoradas e dispendiosas, uma vez que o maquinário ou a própria indústria é obrigada a ser desligada para acoplamento dos instrumentos de medição. Visando minimizar estas dificuldades, o desenvolvimento de um voltímetro por aproximação para medir tensões alternadas em frequências industriais seria a solução mais adequada e eficaz.

1.1

Contextualização

Voltímetros são medidores largamente utilizados na indústria e no setor de serviços, com o propósito de medir a diferença de potencial elétrico entre dois pontos distintos. Voltímetros possuem princípios de funcionamento muito específicos e, na maioria dos casos, suas formas de medições invasivas alteram o valor real da grandeza a ser medida.

Atualmente, para que sejam determinados os valores de tensões em determinados pontos, utilizam-se voltímetros com pontas de prova acoplados em paralelo com o circuito. De modo a interferir o mínimo possível no mensurando, estes voltímetros devem possuir alta resistência de entrada para que uma corrente de valor diminuto flua pelo seu interior, permitindo, por meio da Lei de Ohm, quantificar o valor de tensão [1, 2].

Vários são os riscos físicos para o ato de medir tensão com um voltímetro convencional, dentre eles destacando-se o choque elétrico, a abertura de arco voltaico, a queima do instrumento ou do equipamento e o curto-circuito [3]. Para

minimizar tais situações, uma forma não invasiva de medir tensões elétricas seria uma alternativa extremamente desejável.

Uma tensão alternada gera no espaço um campo elétrico também alternado, com intensidade diretamente proporcional à amplitude da tensão [1, 2]. Dessa forma, obtendo-se informações sobre esse campo, é possível determinar os valores de tensão que o geraram.

Trabalhos recentes mostram formas não invasivas para medir tensões elétricas por meio de sensores capacitivos e algumas técnicas são apresentadas em outros trabalhos, mas sempre para valores abaixo do mínimo da rede de distribuição [4, 5, 6].

1.2.

Motivação

Considerando-se que as operações para coleta de dados sempre foram demoradas e dispendiosas, uma vez que o maquinário ou a própria indústria é obrigada a ser desligada para acoplamento dos instrumentos de medição, havendo também exposição dos operários aos riscos elétricos diretos e indiretos, observa-se a necessidade de uma forma não invasiva para quantificar a grandeza elétrica tensão, especificamente no caso alternado com frequências usuais (60 Hz e 50 Hz), sem a necessidade de interrupção da operação e com minimização dos riscos à integridade do operador.

Em um cenário industrial comum, diferentes níveis de tensão são usados em diferentes equipamentos. Tipicamente, existem os níveis de tensão de 127 V, 220 V, 380 V, 440 V e 760 V, todos em corrente alternada (CA). Embora esses valores sejam considerados como baixa tensão [7], o risco de abrir um arco elétrico é muito grande, especialmente a partir de 380 V. Isso implica em uma operação complicada de coleta de dados com baixa segurança, refletindo negativamente na produção e expondo os operadores à possibilidade de acidentes.

A Norma Regulamentadora 10 (NR10) é uma regulamentação brasileira que estabelece as diretrizes e requisitos mínimos de segurança e saúde no trabalho em instalações elétricas [7]. Os riscos elétricos mencionados nesta norma referem-se a perigos associados ao uso e exposição à eletricidade, incluindo: choque elétrico, arco elétrico, incêndios e explosões [3]. As zonas onde os riscos relacionados à

eletricidade podem ocorrer são definidas por esta norma como zona de risco, zona controlada e zona livre, tendo seus raios delimitados diretamente pelo valor da tensão envolvida.

A zona de risco é definida como "os arredores de uma parte energizada, não segregada, acessível até mesmo acidentalmente, cuja aproximação é permitida apenas a profissionais autorizados com a adoção de técnicas e instrumentos apropriados no trabalho" [7]. Esta dissertação de mestrado, por sua vez, levou em consideração valores de tensão que variam de 50 V CA a 1000 V CA, o que delimita o raio da zona de risco em 0,2 m a partir do ponto de interesse [7]. Assim, as medições realizadas com o voltímetro sem contato descrito nesta dissertação variaram de 20 cm a 1 cm entre a sonda e a parte energizada.

O voltímetro sem contato aqui descrito possui duas funções principais: (i) detectar que uma parte de interesse está energizada por corrente alternada com 60 Hz; e (ii) identificar o nível de tensão entre os valores possíveis comumente usados em instalações residenciais e industriais. É importante observar que um sistema com três fases de 127 V teria 220 V entre quaisquer duas fases, e que uma instalação incorreta poderia resultar em 220 V em um ponto que deveria ter 127 V, por isso é importante identificar o nível de tensão entre os valores discretos possíveis. Neste trabalho, utilizou-se apenas 127 V CA como entrada, devido à disponibilidade de energia no laboratório, portanto, o principal objetivo é identificar a presença desse nível de tensão no ponto de interesse.

1.3

Objetivos: geral e específicos

Esta pesquisa de mestrado em Metrologia teve como objetivo geral projetar um voltímetro por aproximação para discriminar valores discretos de tensão alternada rotineiramente utilizados na indústria (127 V, 220 V, 380 V, 440 V e 760 V) em frequências industriais (50 Hz e 60 Hz), que seja eficaz, econômico e com confiabilidade metrológica.

Para alcançar este objetivo geral, definiram-se os seguintes objetivos específicos, devidamente justificados:

- Mapear o estado da arte em medição de tensões alternadas por aproximação, visando identificar a lacuna na literatura;

- Identificar os sensores de campo elétrico existentes que possam ser utilizados para o desenvolvimento de um voltímetro para a medição de tensões alternadas por aproximação;
- Implementar circuitos eletrônicos de excitação e condicionamento dos sensores de campo elétrico existentes que possam ser utilizados para o desenvolvimento de um voltímetro para a medição de tensões elétricas alternadas por aproximação;
- Desenvolver algoritmos de processamento de sinais para resolução do problema inverso, discriminando a tensão elétrica de interesse;
- Realizar testes de bancada e caracterizar metrologicamente o voltímetro por aproximação; e
- Identificar os potenciais benefícios para as indústrias na utilização do equipamento.

1.4

Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos e seus conteúdos são brevemente apresentados a seguir.

No Capítulo 1 é introduzido o problema de pesquisa, apresenta-se a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, bem como seus objetivos (geral e específicos).

No Capítulo 2, definem-se os conceitos de tensão elétrica e sua unidade no Sistema Internacional de Unidades (SI), assim como suas contextualizações no cenário metrológico em nível nacional e internacional, e as principais técnicas para medição.

O capítulo 3 apresenta o projeto preliminar do voltímetro, iniciando pelo princípio de funcionamento dos sensores capacitivos e as características necessárias ao instrumento, assim como as placas de alumínio testadas como sensores.

No capítulo 4 apresenta-se a implementação do protótipo, iniciando pelo projeto detalhado do circuito eletrônico, incluindo as etapas de montagem e simulação, e a integração com o hardware digital, para realização da leitura e processamento dos dados.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios experimentais.

Por fim, no Capítulo 6, resumem-se os resultados atingidos e são apresentadas propostas de trabalhos futuros para aprimoramento do protótipo.

2

Tensão elétrica

2.1

Conceito e história

Toda carga elétrica cria em torno de si um campo eletrostático. Esse campo eletrostático é capaz de movimentar outra carga, atraindo-a ou repelindo-a, gerando assim um trabalho. Quando as cargas possuem sinais contrários haverá entre elas uma diferença de potencial [1, 2].

A diferença de potencial elétrico, ou tensão elétrica, é uma medida da energia potencial elétrica por unidade de carga em um circuito elétrico. Em termos físicos, a tensão elétrica é a quantidade de trabalho que deve ser feito para mover uma carga elétrica entre dois pontos em um campo elétrico [1, 2].

O anatomista italiano Luigi Galvani (1737-1798), após experiências com sapos, determinou, no final do século XVIII, que existia corrente elétrica nos músculos dos animais. Porém, um outro italiano discordou de Galvani.

Alessandro Giuseppe Antonio Anastásio Volta (1745 – 1827) partiu de uma perspectiva diferente da de Galvani. Ele acreditava que a eletricidade tinha sua origem nos metais. Como físico, Volta empreendeu esforços para demonstrar que havia apenas um tipo de eletricidade, aquela que estava sob o escopo da Física tradicional. Para testar essa teoria, ele substituiu os tecidos de organismos vivos por metais como ferro e cobre, além de materiais úmidos. Ao variar os tipos de metais utilizados, ele rapidamente chegou à conclusão de que sua linha de raciocínio estava correta [8].

No ano de 1800, Volta desenvolveu um dispositivo capaz de gerar corrente elétrica de forma contínua, conhecido como a "pilha de Volta.". Ele empilhou discos alternados de zinco e cobre, separando-os com pedaços de material embebido em uma solução de ácido sulfúrico. A pilha de Volta tinha a capacidade de gerar eletricidade sempre que um condutor elétrico era conectado aos discos de zinco e cobre, que estavam posicionados nas extremidades da pilha [8].

2.2

Unidade de medida

No ano de 1881 a unidade de medida de tensão elétrica, o volt (V), foi assim denominada, pelo hoje chamado “Sistema Internacional de Unidades” (SI), em homenagem a Volta [9].

O BIPM (Bureau International des Poids et Measures) é uma instituição internacional que foi estabelecida por meio da Convenção do Metro em 1875. Seu principal propósito é garantir a padronização global das medições. Suas atividades abrangem a definição de padrões fundamentais e escalas de medição, a manutenção dos protótipos internacionais e a facilitação da comparação entre padrões nacionais e internacionais.

O Sistema Internacional de Unidades (SI) estabelece sete grandezas de base (comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de matéria e intensidade luminosa) e suas unidades correspondentes (metro, quilograma, segundo, ampere, kelvin, mol e candela). Sua criação teve como principal objetivo a disponibilidade de um sistema universalmente reconhecido para ser utilizado em relações internacionais, educação, pesquisa científica e aplicações cotidianas, considerando a avaliação da conformidade dos produtos, segurança, saúde, meio ambiente e outras tantas situações.

No (SI) a unidade de medida para diferença de potencial ou tensão elétrica é o volt (V), podendo ser definido em termos das unidades de base como [9]

$$1 \text{ V} = 1 \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-1}. \quad (1)$$

2.3

Parâmetros de interesse

Como descrito anteriormente, diferença de potencial ou tensão elétrica é a capacidade que um sistema elétrico possui de realizar trabalho. Assim, alguns fatores e grandezas associadas são importantes para a total compreensão do termo.

2.3.1

Tensão contínua

A tensão contínua, ou tensão em corrente contínua (CC/DC), é um tipo de tensão elétrica que possibilita um tipo de corrente elétrica em que o sentido do fluxo de elétrons permanece constante ao longo do tempo[10].

A estabilidade e a constância do sentido do fluxo de corrente facilitam o projeto e o funcionamento de muitos dispositivos elétricos, tornando a tensão contínua uma forma importante de energia elétrica em muitas aplicações práticas.

As fontes comuns de tensão contínua incluem baterias e pilhas, células solares e geradores de corrente contínua. Dispositivos eletrônicos como laptops, celulares e muitos circuitos integrados operam com tensão contínua.

É importante ressaltar que, ao contrário da tensão alternada, onde se considera tanto a amplitude máxima quanto o valor eficaz, na tensão contínua, a magnitude ou intensidade é o valor único e constante da tensão ao longo do tempo. Portanto, a intensidade da tensão contínua é o valor numérico da diferença de potencial. Outra característica relevante é que, devido à não variação temporal com uma frequência definida, a tensão contínua não pode ser transformada, ou seja, não pode ter sua amplitude aumentada ou diminuída e, portanto, precisa ser gerada com a amplitude ideal para a aplicação.

2.3.2

Tensão alternada

A tensão alternada, ou tensão em corrente alternada (CA/AC), é um tipo de tensão elétrica na qual o sentido do fluxo de elétrons se alterna periodicamente ao longo do tempo. Isso significa que a polaridade da tensão se inverte em intervalos regulares, criando uma forma de onda que se repete. A tensão alternada é fundamental em sistemas elétricos de distribuição de energia, sendo comumente utilizada em redes elétricas residenciais e industriais.

A frequência é o número de ciclos completos da forma de onda que ocorrem em um segundo. No SI, a unidade de medida da frequência é o hertz (Hz). No Brasil, a frequência da rede é de 60 Hz, ou seja, a onda de tensão alternada se repete 60 vezes a cada segundo. Essa oscilação é de extrema importância para o

funcionamento de diversos tipos de equipamentos como motores e dispositivos de contagem real de tempo. Além disso, é devido à frequência de alternância da rede que dispositivos como os transformadores de tensão conseguem alterar o valor de tensão da rede melhorando o transporte de energia ou ajustando esse valor para diversas aplicações.

A equação que representa um sinal de tensão alternada é [10]:

$$E = E_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t) = E_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(2\pi f t) \quad (2)$$

Ou seja, a tensão alternada é uma forma de onda senoidal, com frequência angular ω (expressa em rad/s) e frequência temporal f (expressa em Hz). Dessa forma, como o seno é um valor que varia entre -1 e +1, a tensão alternada senoidal possui forma de onda como ilustrada na Figura 1:

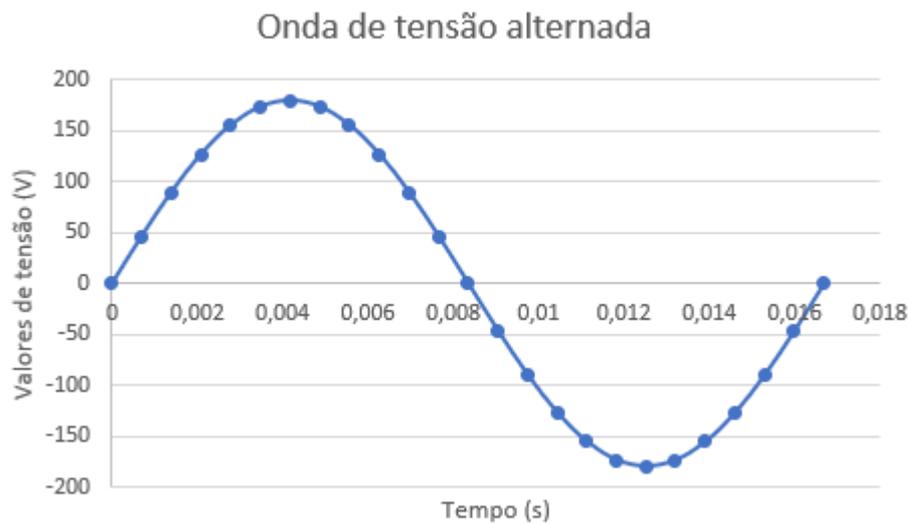


Figura 1 - Onda de tensão alternada com amplitude de 180 V

Alguns parâmetros desta forma de onda merecem destaque: (i) valor RMS; (ii) valor de pico e (iii) valor pico a pico, conforme ilustra a Figura 2:

- (i) O valor RMS (*root mean square*), V_{rms} , também conhecido como valor eficaz, corresponde ao valor de tensão contínua capaz de produzir o mesmo trabalho que a tensão alternada. Ocorre quando o ângulo de geração é de 45° e, devido à periodicidade da onda, se repete

nos ângulos de 135° , e com sinal negativo nos ângulos de 225° e 315° . No caso de uma tensão puramente senoidal, pode ser calculada dividindo o valor de pico pela raiz quadrada de 2;

- (ii) O valor de pico V_p corresponde à amplitude máxima da onda, ou seja, ao valor máximo de tensão que pode ser atingido. Ocorre quando o ângulo de geração é 90° e se repete, com valor negativo, em 270° ;
- (iii) O valor pico a pico (V_{pp}) corresponde à variação máxima de tensão da onda.

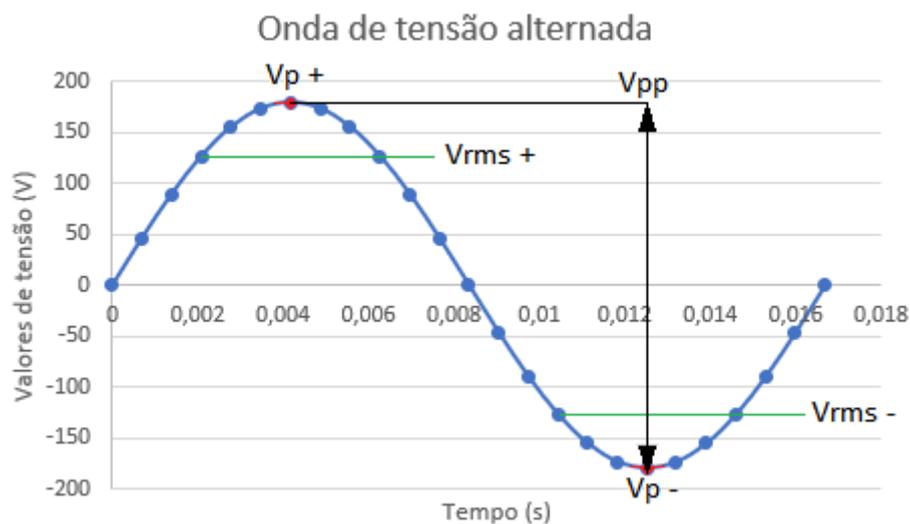


Figura 2 - Valores de pico, RMS e pico a pico em suas respectivas posições na onda de tensão alternada

2.4

Medição de tensão alternada

A medição de tensão elétrica desempenha um papel fundamental no domínio da eletricidade, sendo essencial para garantir a segurança e o funcionamento adequado de sistemas elétricos. A medição da referida grandeza é crucial para identificar variações no potencial elétrico de um circuito, permitindo o diagnóstico de problemas, a verificação do desempenho dos dispositivos e a prevenção de falhas.

Diversos instrumentos são empregados para realizar essa medição, incluindo multímetros, voltímetros e osciloscópios, cada um adequado a diferentes aplicações. Contudo, é imperativo destacar que a medição de tensão elétrica não

está isenta de riscos, uma vez que a exposição inadequada a circuitos energizados pode resultar em choques elétricos graves ou curtos-circuitos que podem ferir potencialmente o operador além de danificar o instrumento de medição ou o próprio circuito [11, 12, 13].

2.4.1

Voltímetro analógico

Um voltímetro analógico convencional, instrumento comumente utilizado no setor de serviços para medir tensão elétrica, é constituído por um galvanômetro (medidor de corrente elétrica) associado em série com uma alta resistência e duas pontas de prova que são inseridas em paralelo no circuito. A corrente elétrica que circula pelo instrumento fará a bobina móvel do galvanômetro defletir o ponteiro do mostrador sobre uma escala graduada, indicando o valor de tensão medido [14], como ilustrado na Figura 3.



Figura 3 - Exemplo de voltímetro analógico

A Figura 4 mostra o esquema elétrico de um voltímetro analógico convencional, onde R_g é a resistência intrínseca do galvanômetro e R'' é uma resistência acrescentada para ajustar a corrente máxima de acordo com o nível de tensão que se deseja medir.

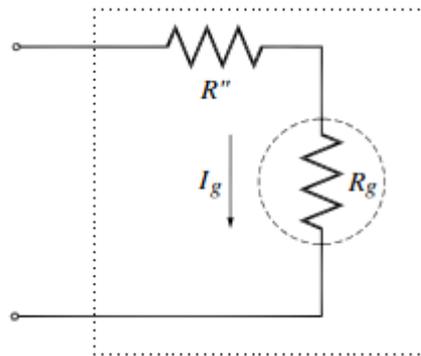


Figura 4 - Circuito divisor de tensão

Quando uma tensão V é aplicada entre os terminais da Figura 4, a corrente I_g é proporcional a seu valor e causa a deflexão do ponteiro do galvanômetro de acordo com a expressão[15]:

$$V = (R'' + R_g).I_g \quad (3)$$

Para tensões alternadas o princípio de medição é o mesmo, porém, exige o uso de componentes adicionais que convertem a forma de onda CA em uma forma de onda CC equivalente, e então o voltímetro mede a amplitude média dessa forma de onda.

Diversos métodos podem ser empregados para efetuar essa conversão. Um método bastante utilizado consiste na aplicação de um retificador de onda completa composto por diodos. Nesse processo, os diodos atuam permitindo apenas a passagem da parte positiva da onda, eliminando a componente negativa. Esse procedimento resulta em uma forma de onda que pode ser prontamente medida por um circuito projetado para medir tensões contínuas.

Adicionalmente, em voltímetros CA modernos, é comum a utilização de um componente integrado denominado RMS (*Root Mean Square*). Este componente realiza o cálculo da raiz quadrada da média dos quadrados dos valores instantâneos da forma de onda. O valor RMS obtido é diretamente proporcional ao valor eficaz da onda CA, proporcionando uma leitura eficaz da tensão alternada.

Dois parâmetros metrológicos são de extrema importância quando se trabalha com voltímetros analógicos. São eles: (i) Faixa de medição e (ii) resolução

- (i) A faixa de medição indica os limites máximo e mínimo de tensão que o voltímetro pode medir com precisão. É importante verificar a faixa apropriada para evitar danos ao instrumento e garantir leituras precisas; e
- (ii) A resolução refere-se à menor variação de tensão que o instrumento pode detectar e exibir. Quanto menor a resolução, mais detalhada será a leitura. Geralmente, a resolução é expressa em volts [14].

2.4.2

Voltímetro digital

Em essência, um voltímetro digital compartilha o princípio básico de medição de tensão com um voltímetro analógico, mas incorpora um estágio adicional crucial: o conversor analógico-digital (ADC). Enquanto o voltímetro analógico utiliza um ponteiro para indicar a tensão em uma escala graduada, o voltímetro digital converte a tensão medida em um sinal digital, exibindo a leitura numericamente em um display, como ilustrado na Figura 5. Este acréscimo do ADC é fundamental para a precisão e a capacidade de leitura rápida dos voltímetros digitais.



Figura 5 - Exemplo de voltímetro digital

Em um voltímetro digital os parâmetros metrológicos mais importantes, além de faixa de medição e resolução já explicados, são: (i) Número de dígitos e (ii) taxa de amostragem.

- (i) O número de dígitos refere-se à quantidade de algarismos que o display do voltímetro possui para exibir a leitura. Por exemplo, um voltímetro digital de 4

dígitos, como o ilustrado na Figura 5, terá tipicamente 3 dígitos inteiros e 1 dígito para exibir valores decimais;

(ii) Em voltímetros digitais, especialmente aqueles com capacidade para medir sinais dinâmicos, a taxa de amostragem é importante. Ela determina com que frequência o instrumento atualiza sua leitura, sendo crucial para capturar variações rápidas.

2.4.3

Voltímetros sem contato

Alguns protótipos de voltímetros sem contato foram desenvolvidos para aplicações muito específicas, em geral, para valores de tensão muito elevados. Em [16] o autor propõe um método de medição de tensão para linhas aéreas de 10 kV utilizando o princípio da divisão de tensão por capacitância espacial. O sensor utilizado neste trabalho sofre influência da altura das linhas de transmissão e temperatura e umidade do ambiente. Em [17] é apresentado outro modelo de medição de tensão sem contato, por acoplamento capacitivo, e uma faixa de aplicação variando de 0,5 kV a 5 kV em 50 Hz.

Devido ao campo elétrico gerado pela tensão elétrica no ponto de interesse, o princípio de acoplamento capacitivo é comum à maioria dos voltímetros sem contato já propostos[18]. Problemas como faixa de aplicação, distância e outros fatores influenciadores são tratados conforme o objetivo específico de cada trabalho.

2.4.4

Voltímetros comerciais

Voltímetros comerciais operam, essencialmente, por contato, ou seja, o operador precisa inserir conectar o aparelho aos pontos energizados.

Alternativamente ao uso dos voltímetros, se o objetivo for somente detectar a existência de tensão, há os sensores tipo caneta, como ilustrado na Figura 6.

O princípio de funcionamento também é o acoplamento capacitivo mas, diferentemente dos voltímetros, esses detectores de tensão não quantificam a

grandeza tensão elétrica e também precisam estar em contato com o ponto de interesse.



Figura 6 - Exemplo de voltímetro sem contato tipo caneta

3

Projeto preliminar do voltímetro sem contato

3.1

Capacitância e acoplamento capacitivo

O voltímetro sem contato apresentado nesta dissertação de mestrado é baseado no acoplamento capacitivo, explorando a característica elétrica chamada capacitância. A capacitância, em termos gerais, é a medida da capacidade de armazenar carga elétrica de um objeto ou sistema. É definida como a razão entre a carga elétrica armazenada (q) e a diferença de potencial elétrico aplicada (tensão) (V), ou seja,

$$C = q/V \quad (3)$$

A unidade de medida de capacitância no Sistema Internacional de Unidades (SI) é o farad (F) que é definido por: $F = \text{kg}^{-1}\text{m}^{-2}\text{s}^4\text{A}^2$ [9]. O exemplo mais comum de um dispositivo que exibe capacitância é o capacitor, que é composto por duas placas condutoras separadas por um material isolante chamado dielétrico. Quando uma diferença de potencial elétrico é aplicada ao capacitor, uma carga elétrica se acumula em cada uma das placas, gerando um campo elétrico entre elas. A magnitude da capacitância do capacitor depende da área (A) e da separação das placas (d), bem como do material isolante [1, 2], caracterizado por sua constante dielétrica ϵ_0 , conforme expresso por

$$C = \epsilon_0 A/d . \quad (4)$$

O acoplamento capacitivo é um modo de conexão elétrica no qual a transferência de sinal ou energia entre dois circuitos ocorre por meio de uma estrutura capacitiva. É amplamente utilizado em circuitos eletrônicos para transferir sinais de um ponto para outro sem a necessidade de uma conexão física entre eles [4]. No acoplamento capacitivo, uma das placas do capacitor é colocada na saída de um circuito e a outra na entrada de um outro circuito. Assim, quando um sinal é aplicado à saída do primeiro circuito, ele carrega o capacitor, que então transfere essa carga para a entrada do circuito receptor. Dessa forma, o sinal é transmitido sem a necessidade de um cabo ou qualquer outro tipo de conector entre os dois circuitos.

Vale mencionar que o acoplamento capacitivo pode introduzir distorções no sinal devido à sua resposta não linear em frequência, o que pode afetar a qualidade do sinal transmitido. Por esse motivo, é importante selecionar uma estrutura capacitiva adequada para a aplicação e projetar o circuito com cuidado para minimizar essas distorções.

Outra restrição refere-se à necessidade de o sinal a ser transmitido variar no tempo, pois a corrente elétrica é proporcional à derivada da tensão aplicada ao capacitor, sendo a capacitância a constante de proporcionalidade, ou seja,

$$I = C \, dV/dt . \quad (5)$$

3.2

Conceito de medição

Para medir efetivamente uma diferença de potencial elétrico por acoplamento capacitivo, um capacitor deve ser formado pelo ponto de interesse energizado e pelo sensor do voltímetro. Assim, a sonda (sensor) do voltímetro é basicamente composta por uma placa quadrada plana de alumínio. Essa placa é conectada em série com um resistor de valor elevado R_p , normalmente $100 \, \text{k}\Omega$, que completará a parte sensora do voltímetro, conforme mostrado na Figura 7. Dessa forma, o resistor atua como um shunt e fornece um ponto de medição de voltagem que permite estimar, indiretamente, a voltagem de entrada.

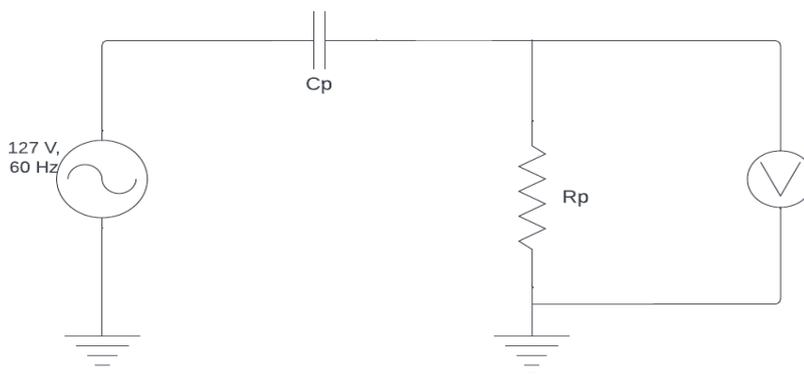


Figura 7 - Esquema de medição do voltímetro sem contato.

Na Figura 7, a fonte senoidal representa uma fase V_0 de tensão alternada com $f = 60 \, \text{Hz}$, no exemplo com um valor eficaz de $127 \, \text{V}$. O capacitor C_p representa

simultaneamente o ponto energizado (placa esquerda) e a sonda do voltímetro sem contato (placa direita). O valor da tensão V_p no resistor, medida pelo voltímetro V , é dado por:

$$V_p = \frac{R_p}{R_p + X_c} V_0 \quad (6)$$

onde X_c é a reatância capacitiva, dada por:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (7)$$

3.3

Placas de Alumínio utilizadas como Sensores Capacitivos

Como descrito anteriormente, o voltímetro sem contato apresentado nesta dissertação de mestrado funciona por acoplamento capacitivo. Desse modo, testes de laboratório foram realizados com placas de alumínio de tamanhos diferentes funcionando como pontas de prova.

Inicialmente foram utilizadas placas circulares de 0,3 m de diâmetro e um circuito eletrônico bem reduzido, sem amplificador e filtro, apenas para verificação da real possibilidade de medição, funcionando como prova de conceito.

O circuito mostrou-se funcional, mas a falta de um suporte adequado não permitiu testes com distâncias entre placas maiores que 0,08 m, com a capacitância variando entre 11,2 pF e 42,55 pF, como apresentado na Tabela 1 e na Figura 11.

Tabela 1 - compilação de dados dos estudos preliminares

| Placas circulares com diâmetro de 0,3 m | | | |
|---|--------------------------|--|--|
| Distância entre placas (m) | Capacitância medida (pF) | Tensão sobre o resistor medida com voltímetro (mV) | Tensão sobre o resistor medida com osciloscópio (mV) |
| 0,020 | 42,55 | 335 | 334 |
| 0,034 | 25,03 | 237 | 230 |
| 0,048 | 17,73 | 187 | 189 |
| 0,062 | 13,73 | 170 | 166 |
| 0,076 | 11,20 | 133,5 | 137 |

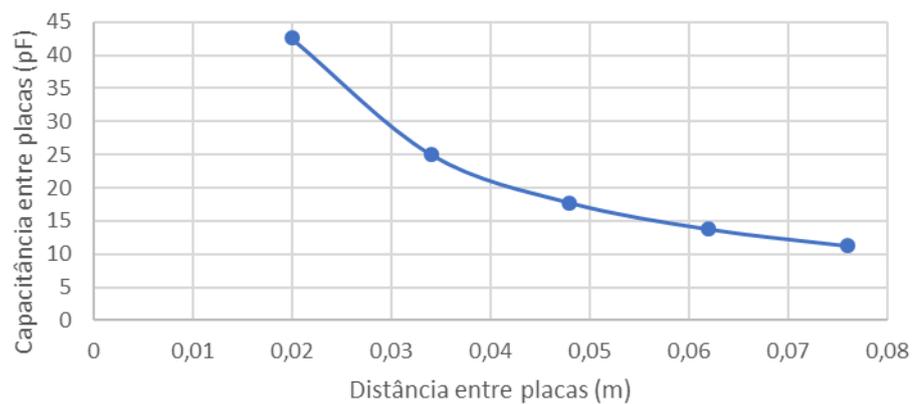


Figura 8a - Capacitâncias entre as placas circulares de 0,3 m de diâmetro.

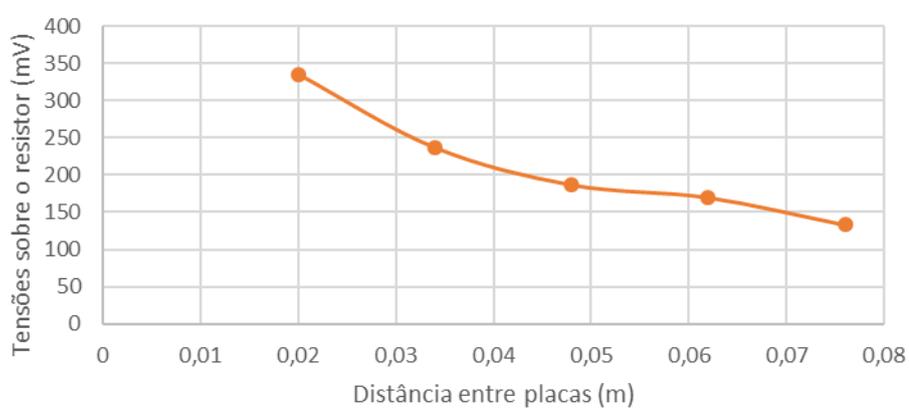


Figura 8b – Tensões medidas sobre o resistor com voltímetro.

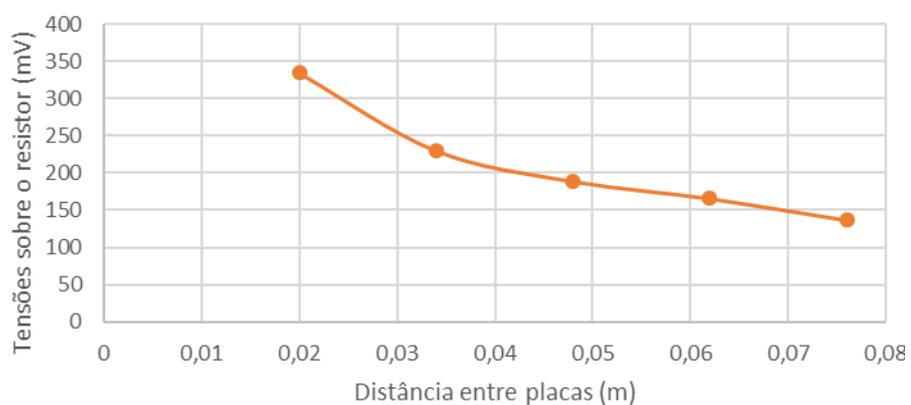


Figura 8c - Tensões medidas sobre o resistor com osciloscópio (mV).

A seguir, um suporte apropriado para sustentação das placas foi usinado em PVC, como mostrado nas Figuras 9 e 10.

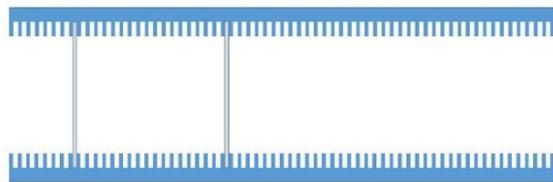


Figura 9 - Desenho esquemático do porta-amostras de placas de alumínio projetado em PVC.

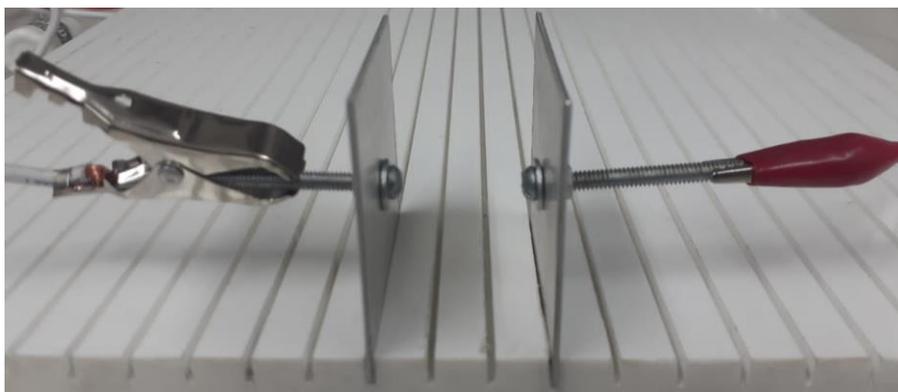


Figura 10 - Foto do porta placas

Foram confeccionados pares de placas quadradas de alumínio com lados medindo 0,3 m, 0,2 m, 0,1 m e 0,05 m, como ilustrado na Figura 11.

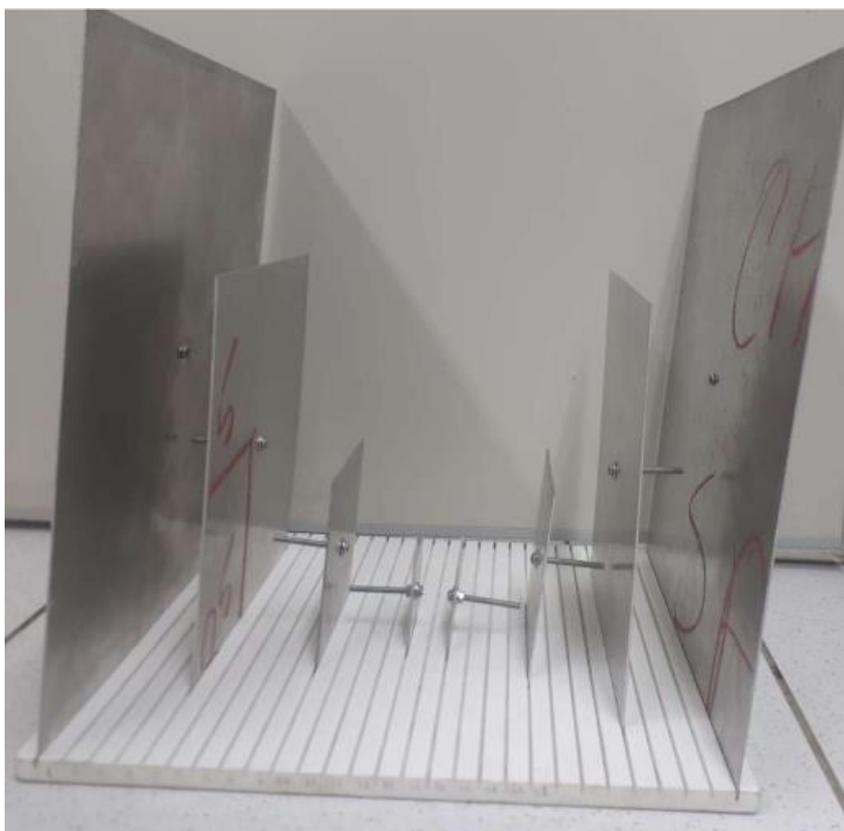


Figura 11 – Pares de placas de alumínio confeccionadas para serem utilizadas como sensores capacitivos

Com o auxílio de um medidor LCR da marca Keysight modelo U1733C e o porta-amostras mostrado nas Figuras 9 e 10, os valores das capacitâncias dos pares de placas de alumínio foram medidos para as distâncias típicas de operação de 0,01 m a 0,20 m, como mostrado nas Tabelas 2 a 5 e nas Figuras 12 a 15.

Tabela 2 – Dados de capacitâncias obtidos com o par de placas de 0,3 m x 0,3 m.

| Par de placas de alumínio de 0,3 m x 0,3 m | |
|--|-------------------|
| Distância entre placas (m) | Capacitância (pF) |
| 0,01 | 118,54 |
| 0,02 | 69,3 |
| 0,03 | 53,06 |
| 0,04 | 45,47 |
| 0,05 | 41,56 |
| 0,06 | 38,51 |
| 0,07 | 36,8 |
| 0,08 | 36,59 |
| 0,09 | 34,9 |
| 0,1 | 33,64 |
| 0,11 | 32,75 |
| 0,12 | 31,87 |
| 0,13 | 31,2 |
| 0,14 | 31,08 |
| 0,15 | 30,29 |
| 0,16 | 29,9 |
| 0,17 | 29,23 |
| 0,18 | 28,74 |
| 0,19 | 27,18 |
| 0,2 | 26,92 |

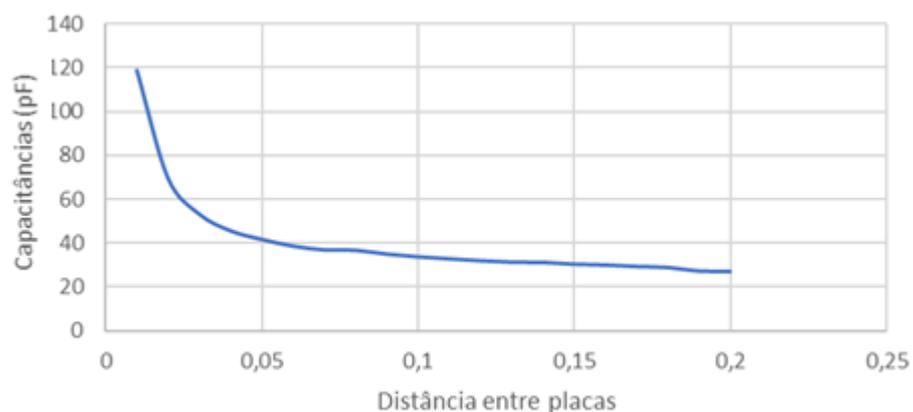


Figura 12 - Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,3 m x 0,3 m.

Tabela 3 - Dados de capacitância obtidos com o par de placas de 0,2 m x 0,2 m.

| Par de placas de alumínio de 0,2 m x 0,2 m | |
|--|-------------------|
| Distância entre placas (m) | Capacitância (pF) |
| 0,01 | 64,67 |
| 0,02 | 40,1 |
| 0,03 | 33,23 |
| 0,04 | 29,58 |
| 0,05 | 27,42 |
| 0,06 | 25,82 |
| 0,07 | 24,52 |
| 0,08 | 24,17 |
| 0,09 | 23,43 |
| 0,1 | 23,09 |
| 0,11 | 22,88 |
| 0,12 | 22,68 |
| 0,13 | 22,38 |
| 0,14 | 22,12 |
| 0,15 | 21,85 |
| 0,16 | 21,3 |
| 0,17 | 21,25 |
| 0,18 | 21,16 |
| 0,19 | 20,98 |
| 0,2 | 20,86 |

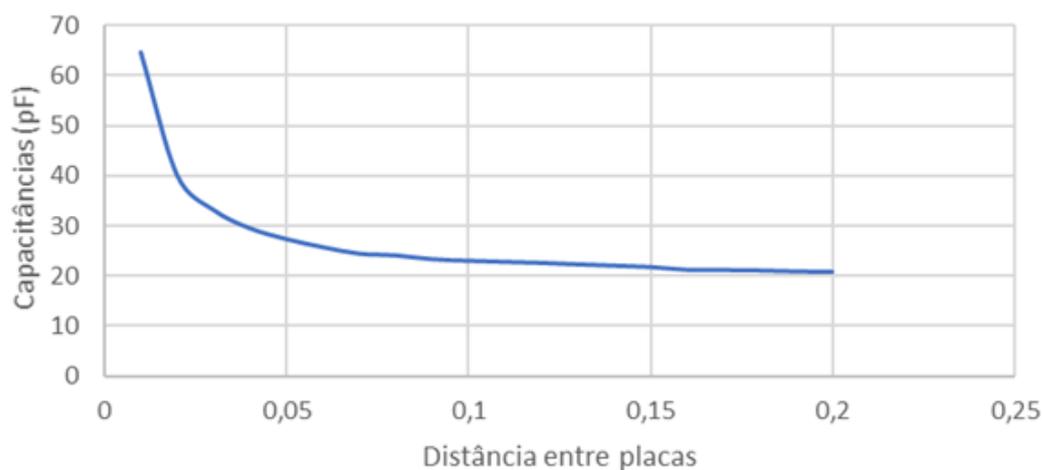


Figura 13 - Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,2 m x 0,2 m.

Tabela 4 - Dados de capacitância obtidos com o par de placas de 0,1 m x 0,1 m.

| Par de placas de alumínio de 0,1 m x 0,1 m | |
|--|-------------------|
| Distância entre placas (m) | Capacitância (pF) |
| 0,01 | 27,44 |
| 0,02 | 20,5 |
| 0,03 | 18,65 |
| 0,04 | 17,97 |
| 0,05 | 17,23 |
| 0,06 | 17,15 |
| 0,07 | 16,85 |
| 0,08 | 16,52 |
| 0,09 | 16,47 |
| 0,1 | 16,43 |
| 0,11 | 16,26 |
| 0,12 | 16,22 |
| 0,13 | 15,95 |
| 0,14 | 15,67 |
| 0,15 | 15,39 |
| 0,16 | 14,95 |
| 0,17 | 14,89 |
| 0,18 | 14,88 |
| 0,19 | 14,84 |
| 0,2 | 14,69 |

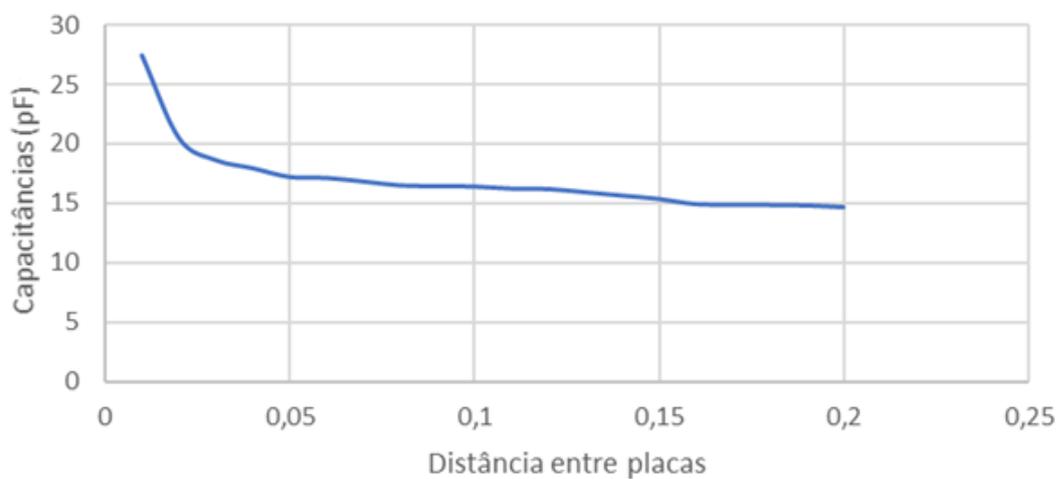


Figura 14 - Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,1 m x 0,1 m.

Tabela 5 - Dados obtidos com o par de placas de 0,05 m x 0,05 m.

| Par de placas de alumínio de 0,05 m x 0,05 m | |
|--|-------------------|
| Distância entre placas (m) | Capacitância (pF) |
| 0,01 | 17,57 |
| 0,02 | 15,32 |
| 0,03 | 14,58 |
| 0,04 | 14,92 |
| 0,05 | 14,92 |
| 0,06 | 14,57 |
| 0,07 | 14,25 |
| 0,08 | 14,16 |
| 0,09 | 13,7 |
| 0,1 | 13,65 |
| 0,11 | 13,59 |
| 0,12 | 13,41 |
| 0,13 | 13,24 |
| 0,14 | 13,23 |
| 0,15 | 13,2 |
| 0,16 | 13,14 |
| 0,17 | 13,03 |
| 0,18 | 13,02 |
| 0,19 | 13,02 |
| 0,2 | 13,01 |

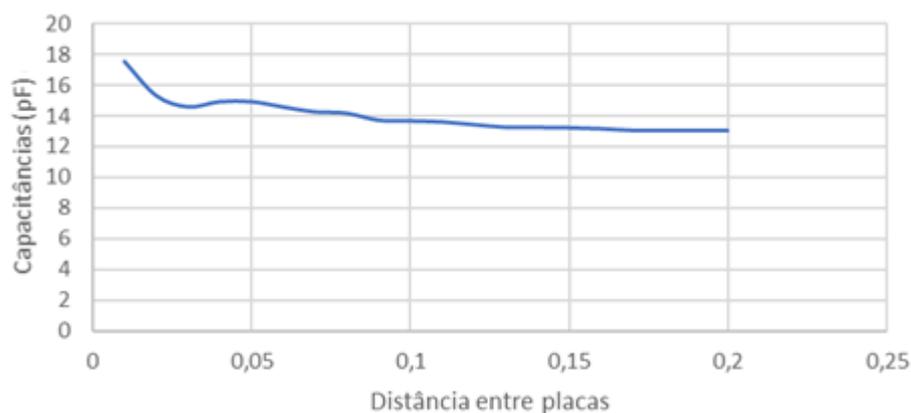


Figura 15 - Capacitâncias obtidas com o par de placas de 0,05 m x 0,05 m.

Observa-se que as capacitâncias estão na faixa de 13,01 pF a 17,57 pF, o que resulta em valores típicos de reatância capacitiva na faixa de 203,99 M Ω a 22,39 M Ω na frequência de 60 Hz, o que, por sua vez, gera correntes da ordem de microamperes. Dessa forma, ao utilizar um resistor R_p com 100 k Ω , são obtidas

diferenças de potencial na faixa de centenas de milivolts, permitindo assim, em princípio, uma medição de tensão satisfatória, como será detalhado nos Capítulos 4 e 5.

4.

Protótipo do Voltímetro Sem Contato

4.1

Circuito eletrônico

A Figura 16 mostra o esquema eletrônico completo do voltímetro sem contato desta dissertação de mestrado.

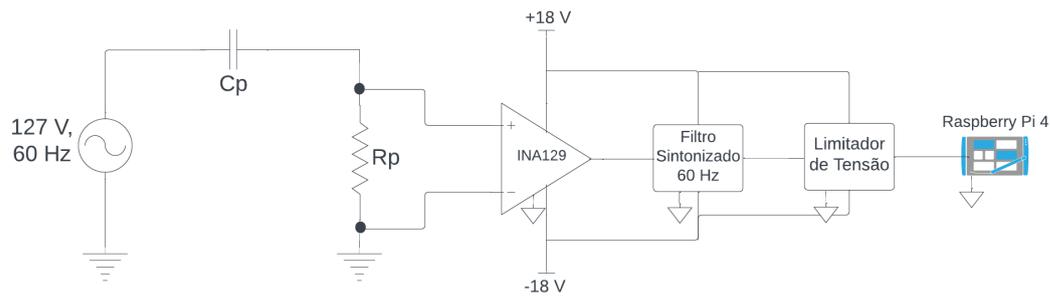


Figura 16 - Esquema eletrônico do voltímetro sem contato.

O primeiro estágio é composto por um amplificador de instrumentação adequado para sinais diferenciais de baixa amplitude, modelo INA 129 da Texas Instruments, com ganho de tensão de 5 V/V e operando na faixa de frequência de 0,1 Hz a 10 kHz [19].

O sinal obtido, apesar de ter uma boa amplitude para medição, apresenta interferências de outras faixas de frequência do ambiente externo que afetam diretamente a coleta de dados. Como as habituais tensões alternadas têm frequências conhecidas, esse problema foi resolvido com a aplicação de um filtro resistivo-capacitivo passa-banda (sintonizado) com a topologia Sallen-Key[20, 21, 22], detalhado na Figura 17.

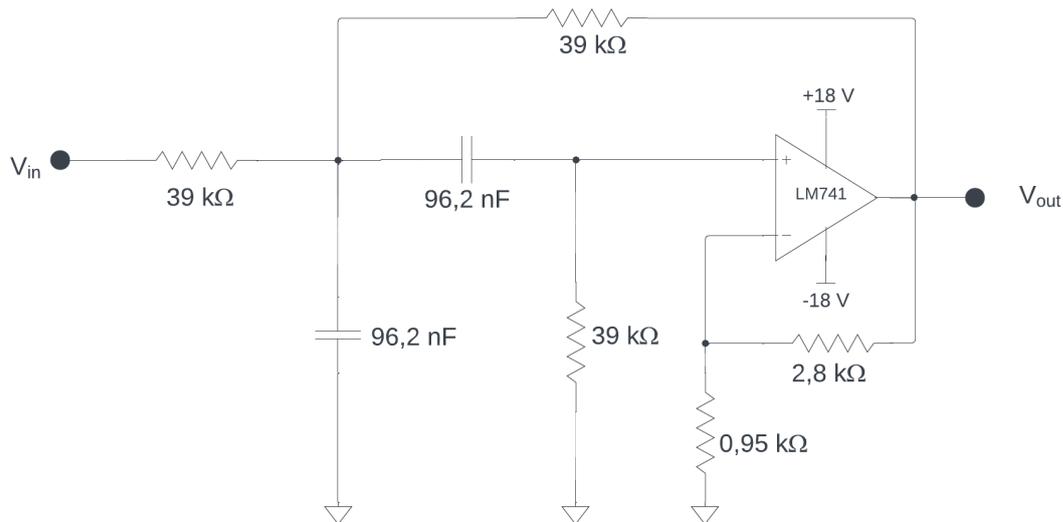


Figura 17 – Esquema eletrônico do filtro sintonizado.

Esse filtro permite que um intervalo específico de frequências passe pelo circuito, neste caso, variando de 55 Hz a 65 Hz, enquanto as frequências fora desse intervalo são bloqueadas [23]. Este filtro também aplica um ganho de 4 V/V, resultando em um ganho total de 20 V/V. Assim, o sinal de entrada, que normalmente varia de 354 mV a 401 mV, é amplificado para valores que variam de 0,5 V a 1,5 V, dependendo da distância entre a placa de sensoriamento e o ponto de interesse.

Para evitar sobreposições e interferências, toda a eletrônica do voltímetro é alimentada por uma fonte independente com valores de -18 V CC a +18 V CC e um terra distinto em relação ao condutor neutro da rede CA. Assim, na saída do filtro de frequência, o sinal estará sempre contido na faixa de -18 V a +18 V.

O último bloco do circuito é um atenuador de tensão baseado em uma topologia de amplificador operacional inversor [24], detalhado na Figura 18, com uma atenuação de 7,2 V/V e um deslocamento de aproximadamente +2,5 V, fazendo com que o sinal de entrada para o Raspberry Pi 4 esteja sempre contido na faixa de 0 a +5 V, evitando assim danificar seu conversor A/D, cuja faixa de operação também é de 0 a +5 V.

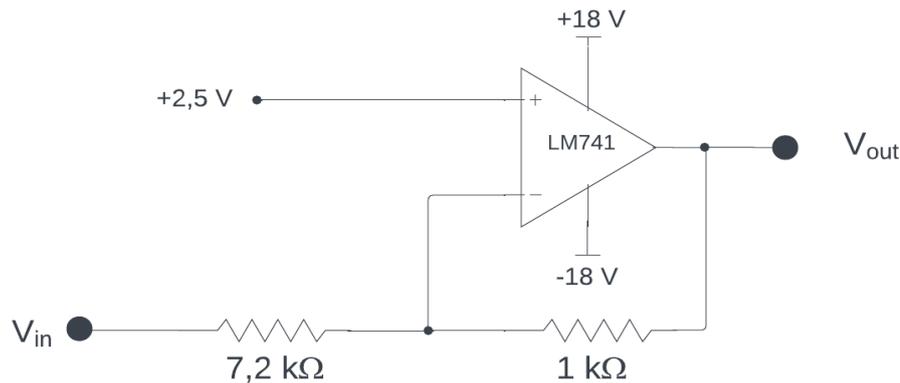


Figura 18 - Esquema eletrônico do limitador de tensão.

Finalmente, o sinal é medido por um microcontrolador Raspberry Pi, ao qual um conversor A/D ADS1115 [25] foi conectado, com 15 bits de resolução e frequência de aquisição de 860 Hz, sendo responsável pela aquisição de janelas de tensão de 0,25 s e pelo cálculo do valor RMS desse sinal senoidal, o qual está relacionado com a tensão de entrada a ser medida.

4.2

Software de Aquisição

O software de aquisição foi elaborado em linguagem Python. Uma linguagem de programação de alto nível, de propósito geral e código aberto [18].

O programa simula o funcionamento de um osciloscópio e mede o sinal de saída do conversor A/D, que é uma onda de tensão em CA, de frequência igual a 60 Hz, amplitude máxima de 5 V em CA e proporcional ao valor de entrada do circuito, ou seja, o valor de tensão sobre o resistor R_p .

Devido à frequência de aquisição de dados, a cada 0,25 s o software atualiza a informação de saída, ou seja, o valor eficaz de tensão da onda ilustrada na Figura 19. Com um cálculo aritmético simples, é exibido um valor em mV proporcional ao valor eficaz da rede de entrada – 127 V em CA.

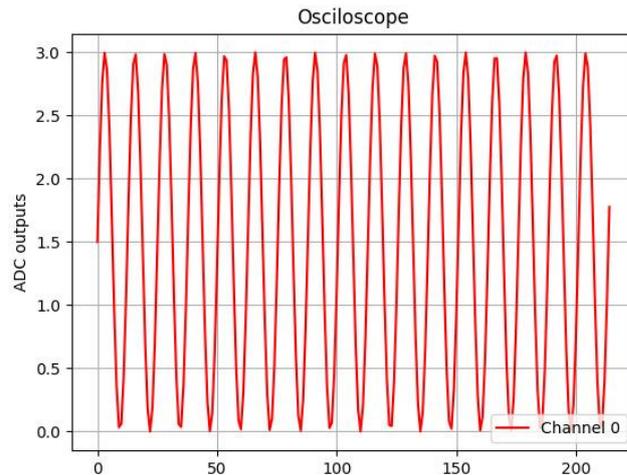


Figura 19 - Sinal de saída lido pelo software

4.3

Protótipo Montado

O protótipo utilizado para os testes em laboratório foi montado em uma protoboard conforme ilustrado na Figura 20. Na imagem estão destacados cada um de seus blocos componentes: Em 1 tem-se o resistor R_p , cuja diferença de potencial em seus terminais é o sinal de entrada do circuito. Em 2 aparece o amplificador de instrumentação INA 129, no destaque 3 está o filtro passa-banda sintonizado em 60 Hz, em 4 aparece o atenuador de tensão e em 5 o conversor A/D. O cabo tipo flat multicolorido faz a conexão do circuito com o Raspberry Pi.

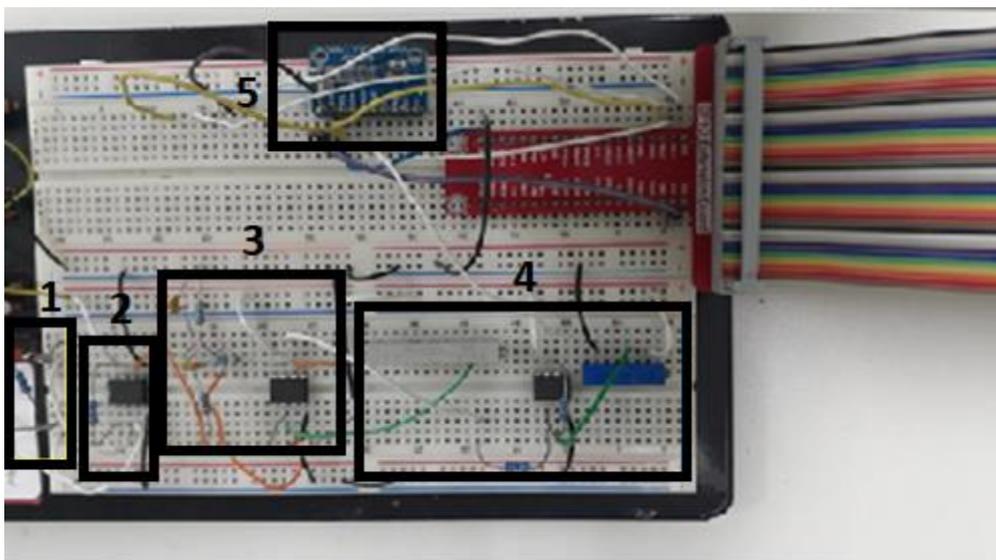


Figura 20 - Foto do protótipo do voltímetro sem contato.

5.

Resultados experimentais

Em todas os ensaios o protótipo foi montado em conjunto com o porta-amostras, de maneira que uma das placas fosse ligada ao fio fase da rede elétrica do laboratório e a outra fosse colocada em série com o resistor R_p , como ilustrado na Figura 16. Para complementação da diferença de potencial, a outra extremidade do resistor R_p foi conectada ao neutro da mesma rede elétrica. A tensão eficaz da rede elétrica foi medida por um voltímetro digital Fluke, modelo 87V, simultaneamente com a tensão eficaz medida pelo conjunto circuito eletrônico+Raspberry Pi.

5.1

Medições com as Placas de 0,30 m por 0,30 m

Os testes foram iniciados com as placas de 0,30 m de lado. A facilidade da montagem e a maior capacitância oferecida pelo par de placas foram determinantes para essa escolha inicial. A Figura 21 e a Tabela 6 mostram o comportamento da tensão eficaz de saída de acordo com a variação da distância entre as placas.

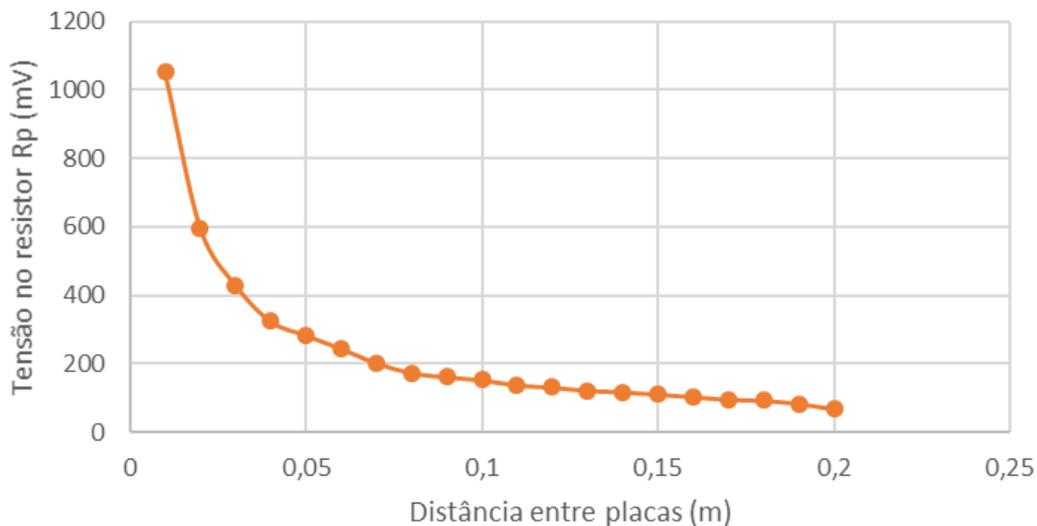


Figura 21 - Tensões medidas sobre o resistor R_p com as placas de 0,30 m por 0,30 m.

Tabela 6 - Dados de tensão de saída do circuito obtidos com o par de placas de 0,30 m por 0,30 m

| Distância entre placas (m) | Tensão da rede (V) | Tensão de saída (mV) |
|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 0,01 | 129,3 | 1053 |
| 0,02 | 129,6 | 597 |
| 0,03 | 129,4 | 430 |
| 0,04 | 129,1 | 324 |
| 0,05 | 128,8 | 283 |
| 0,06 | 128,8 | 244 |
| 0,07 | 128,9 | 202 |
| 0,08 | 128,6 | 173 |
| 0,09 | 128,7 | 161 |
| 0,1 | 128,7 | 152 |
| 0,11 | 128,4 | 137 |
| 0,12 | 128,4 | 131 |
| 0,13 | 128,7 | 121 |
| 0,14 | 128,6 | 117 |
| 0,15 | 128,9 | 110 |
| 0,16 | 128,8 | 103 |
| 0,17 | 128,9 | 95 |
| 0,18 | 128,9 | 92 |
| 0,19 | 129,0 | 83 |
| 0,2 | 129,1 | 67 |

5.2

Medições com as Placas de 0,20 m por 0,20 m

Continuando os testes, utilizaram-se as placas de 0,20 m de lado. Os dados obtidos estão descritos na Tabela 7 e a Figura 22 mostra o comportamento da tensão eficaz de saída.

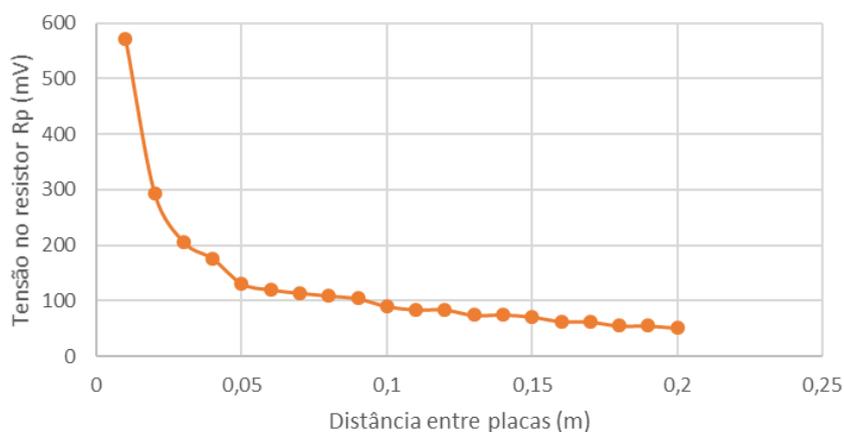


Figura 22 - Tensões medidas sobre o resistor Rp com as placas de 0,20 m por 0,20 m.

Tabela 7 - Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,20 m por 0,20 m

| Distância entre placas (m) | Tensão da rede (V) | Tensão de saída (mV) |
|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 0,01 | 128,5 | 571 |
| 0,02 | 128,8 | 293 |
| 0,03 | 128,9 | 206 |
| 0,04 | 136,6 | 176 |
| 0,05 | 129,3 | 131 |
| 0,06 | 129,0 | 120 |
| 0,07 | 129,1 | 114 |
| 0,08 | 128,8 | 109 |
| 0,09 | 127,9 | 104 |
| 0,1 | 128,1 | 90 |
| 0,11 | 128,1 | 84 |
| 0,12 | 128,2 | 84 |
| 0,13 | 128,4 | 74 |
| 0,14 | 128,3 | 75 |
| 0,15 | 128,1 | 71 |
| 0,16 | 128,3 | 63 |
| 0,17 | 128,3 | 62 |
| 0,18 | 128,3 | 55 |
| 0,19 | 128,5 | 55 |
| 0,2 | 128,4 | 51 |

5.3

Medições com as Placas de 0,10 m por 0,10 m

Em seguida, utilizaram-se as placas de 0,10 m de lado. A Tabela 8 e a Figura 23 mostram os novos dados e o comportamento da tensão de saída.

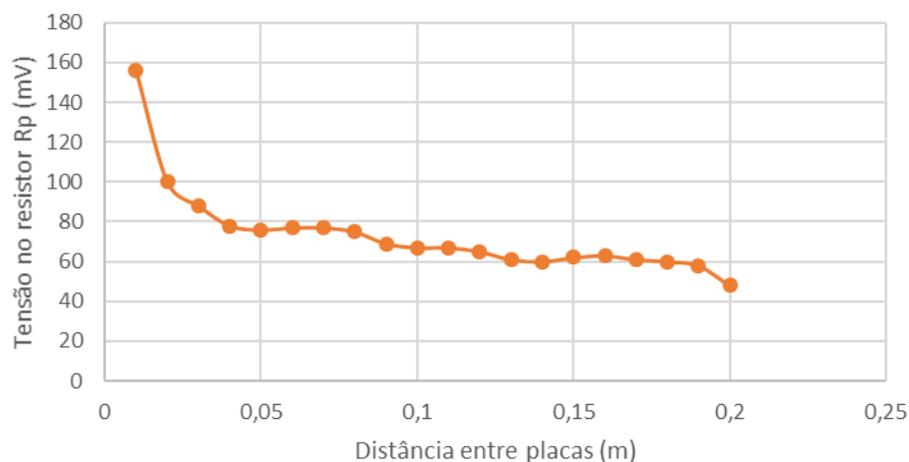


Figura 23 - Tensões medidas sobre o resistor Rp com as placas de 0,10 m por 0,10 m.

Tabela 8 - Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,10 m por 0,10 m.

| Distância entre placas (m) | Tensão da rede (V) | Tensão de saída (mV) |
|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 0,01 | 129,3 | 156 |
| 0,02 | 129,4 | 100 |
| 0,03 | 129,4 | 88 |
| 0,04 | 129,1 | 78 |
| 0,05 | 129,1 | 76 |
| 0,06 | 128,8 | 77 |
| 0,07 | 129,2 | 77 |
| 0,08 | 128,7 | 75 |
| 0,09 | 128,8 | 69 |
| 0,1 | 128,9 | 67 |
| 0,11 | 129,0 | 67 |
| 0,12 | 129,1 | 65 |
| 0,13 | 129,1 | 61 |
| 0,14 | 129,0 | 60 |
| 0,15 | 129,0 | 62 |
| 0,16 | 129,0 | 63 |
| 0,17 | 128,8 | 61 |
| 0,18 | 128,9 | 60 |
| 0,19 | 128,9 | 58 |
| 0,2 | 129,0 | 48 |

5.4

Medições com as Placas de 0,05 m por 0,05 m

Finalmente, a Tabela 9 e a Figura 24 com o comportamento da tensão de saída com placas de 0,05 m de lado.

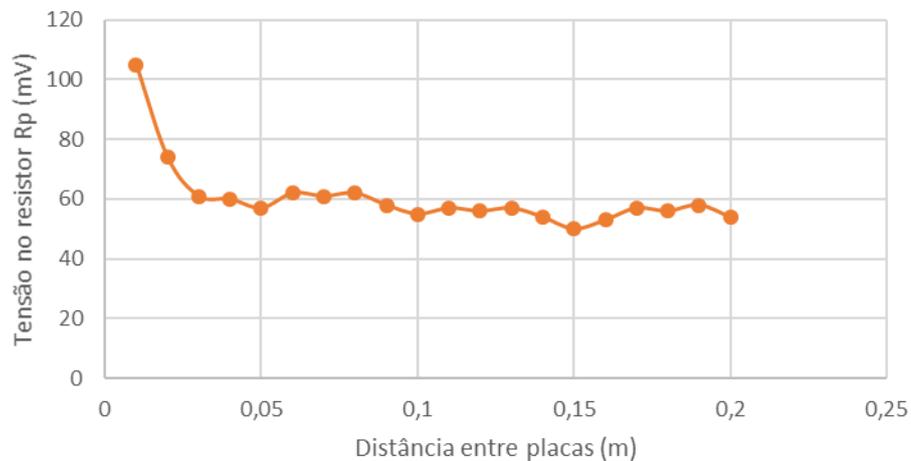


Figura 9 - Tensões medidas sobre o resistor Rp com as placas de 0,05 m por 0,05 m.

Tabela 9 - Dados de tensão obtidos com o par de placas de 0,05 m por 0,05 m.

| Distância entre placas (m) | Tensão da rede (V) | Tensão de saída (mV) |
|----------------------------|--------------------|----------------------|
| 0,01 | 129,3 | 105 |
| 0,02 | 129,5 | 74 |
| 0,03 | 129,5 | 61 |
| 0,04 | 129,3 | 60 |
| 0,05 | 129,4 | 57 |
| 0,06 | 129,1 | 62 |
| 0,07 | 129,5 | 61 |
| 0,08 | 129,6 | 62 |
| 0,09 | 129,7 | 58 |
| 0,1 | 129,9 | 55 |
| 0,11 | 129,9 | 57 |
| 0,12 | 129,8 | 56 |
| 0,13 | 129,5 | 57 |
| 0,14 | 129,6 | 54 |
| 0,15 | 129,4 | 50 |
| 0,16 | 129,8 | 53 |
| 0,17 | 129,7 | 57 |
| 0,18 | 129,7 | 56 |
| 0,19 | 129,6 | 58 |
| 0,2 | 129,6 | 54 |

5.5

Comportamento da tensão da rede

Para verificar a estabilidade da entrada de tensão alternada, a Figura 25 mostra os valores RMS da tensão de entrada medidos por um voltímetro comercial (Fluke, Modelo 87V) simultaneamente com as medições realizadas pelo voltímetro sem contato aqui apresentado. A série de valores tem um valor médio de 129,00 V e um desvio padrão de 0,48 V (0,37 %), caracterizando assim uma excelente estabilidade durante os testes.

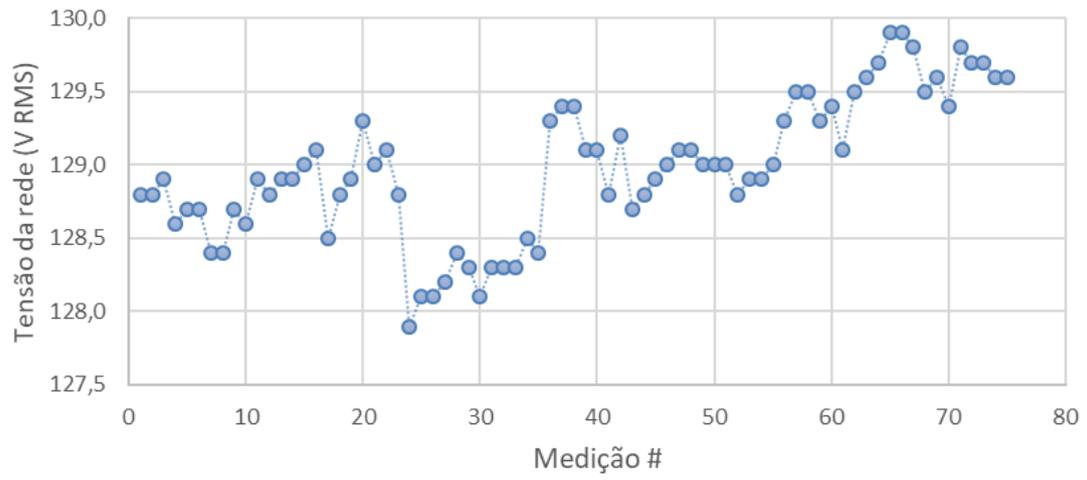


Figura 25 – Comportamento da tensão da rede durante as medições

6.

Conclusões e trabalhos futuros

6.1

Conclusões

O voltímetro por acoplamento capacitivo, cujo primeiro protótipo foi apresentado aqui, tem o potencial de oferecer uma solução viável e segura para a medição de tensão elétrica alternada em frequências industriais. O dispositivo elimina a necessidade de contato direto com a fonte de tensão, o que é especialmente relevante em situações de alto risco ou em locais de difícil acesso. Essa abordagem não invasiva pode simplificar operações de coleta de dados, garantir a segurança do operador e reduzir custos.

Os resultados dos testes mostram um desempenho satisfatório para a voltagem usual de 127 V CA e distância máxima de medição de 0,2 m, com baixa susceptibilidade à interferência eletromagnética ambiente.

O voltímetro apresentou comportamento semelhante em quatro situações diferentes: com placas de teste de 0,30 m por 0,30 m, 0,20 m por 0,20 m, 0,10 m por 0,10 m e 0,05 m por 0,05 m, como demonstram as Figuras 21, 22, 23 e 24.

Como resultado, obtém-se uma faixa de valores que é, de acordo com a Equação 6, proporcional à tensão existente no ponto de interesse.

Considerando especificamente o caso das placas de menores dimensões, com 0,05 m de lado, cujos resultados experimentais foram apresentados na seção 5.4, pode-se considerá-lo um bom modelo para o caso prático de aplicação, em que o operador do sistema elétrico estaria com uma das placas em sua luva de proteção, e a outra placa representaria a superfície de um equipamento possivelmente energizado. Nas maiores distâncias, a tensão de saída do voltímetro por aproximação flutua em torno de 60 mV, mas ao aproximar além de 20 cm a 5cm, sobe rapidamente, permitindo a detecção da energização e a emissão de um alarme sonoro ou visual.

6.2

Trabalhos futuros

O projeto tem potencial para várias aplicações industriais e de pesquisa, abrindo possibilidades para futuras melhorias e desenvolvimentos como:

- (i) Realizar testes para outros níveis de tensão alternada de valores e frequências usuais;
- (ii) Aumentar a distância entre a placa de teste e o ponto de interesse para aumentar a segurança na medição; e
- (iii) Diminuir ainda mais o tamanho das placas de prova, podendo miniaturizar o instrumento de medida.

Referências bibliográficas

- [1] HALLIDAY, D.; RESNICK, R. Fundamentos de Física - Eletromagnetismo. 8.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
- [2] H. D. Young & R. A. Freedman, "Física III: Eletromagnetismo, 12a. ed." Pearson, São Paulo, Brasil, 2009..
- [3] MARTINHO, Edson. DE SOUZA, Danilo Ferreira; MARTINHO, Meire Biudes; MARTINS JR. Walter Aguiar. MORITA, Lia Hanna Martins; MAIONCHI, Daniela de Oliveira (Org.). ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2024 – Ano base 2023. Salto-SP: Abracopel, 2023. DOI: 10.29327/5388685
- [4] M. Reza and H. A. Rahman, "Non-Invasive Voltage Measurement Technique for Low Voltage AC Lines," 2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET), 2021, pp. 143-148, doi: 10.1109/ICET51757.2021.9450978.
- [5] T. Wang et al., "Capacitive voltage sensor array for detecting transient voltage distribution in transformer windings," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 23, no. 5, pp. 3182-3189, October 2016, doi: 10.1109/TDEI.2016.7736884.
- [6] B. Li, B. Ling, C. Peng, Z. Chu, Z. Zhang and S. Xia, "A novel MEMS-based integrated current and voltage sensor," 2017 IEEE SENSORS, 2017, pp. 1-3, doi: 10.1109/ICSENS.2017.8234146.
- [7] BRAZIL. Ministry of Labor and Employment. Regulatory Standard 10: Safety in Installations and Services in Electricity. Brasília, DF: MTE, 2004.
- [8] SILVA, Márcio Thelio Fernandes da. Projeto & Desenvolvimento de um Padrão para Alta Tensão em Corrente Contínua na Faixa de 1 kV a 50 kV. 2011. Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.
- [9] BIPM. Bureau Int des Poids et Mesures <<https://www.bipm.org/en>>, Access: SET 19, 2023.
- [10] Gussow, Milton. Eletricidade Básica. 3ª edição. São Paulo: Editora LTC, 2012.
- [11] GAO, Ming et al. A Novel Method for Measurement of AC Voltage Based on the Nonlinear Frequency Response of a Resonator. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 68, n. 9, pp. 3474-3481, 2019. DOI: 10.1109/TIM.2019.2896516.
- [12] LU, Shoufeng et al. Analysis and Design of a Wideband AC Voltage Measurement Method Based on the Impedance Compensation Technique. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, v. 66, n. 4, pp. 757-766, 2017. DOI: 10.1109/TIM.2016.2633363.

- [13] Wang, Kaihong et al. A High-Accuracy AC Voltage Measurement Method Based on Synchronous Sampling and Fourier Analysis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 68, n. 12, pp. 4871-4879, 2019. DOI: 10.1109/TIM.2019.2904894.
- [14] Capuano F G, Marino M A M. *Laboratory of Electricity and Electronics*. São Paulo: Érica, 2014.
- [15] Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo. (2010). Instrumentos de Medidas Elétricas I. Disponível em: <https://www.ifsc.usp.br/~strontium/Teaching/Material2010-2%20FFI0106%20LabFisicaIII/08-InstrumentosdeMedidasEletricas-I.pdf>. Acessado em: [28/09/2023].
- [16] Chunguang Suo, Rujin Huang, Guoqiong Zhou, Wenbin Zhang, Yanyun Wang, Mingxing He. "Self-Calibration Sensor for Contactless Voltage Measurement Based on Dynamic Capacitance." *Sensors* 2023, 23(8), 3851; <https://doi.org/10.3390/s23083851>.
- [17] Tan, X., Zhang, W., He, M., Li, W., Ao, G., Zhou, F. (2023). Non-Contact Adaptive Voltage Sensor Based on Electric Field Coupling Principle. *Sensors*, 23(19), 8316. <https://doi.org/10.3390/s23198316>
- [18] S. Ren, H. Nakahara, K. Thongpull, P. Phukpattaranont and K. Chetpattananondh, "A development of capacitive voltage sensor for non-intrusive energy meter," 2018 15th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Rai, Thailand, 2018, pp. 776-779, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8620004.
- [19] TEXAS INSTRUMENTS. INA129: High Precision, Low Power Instrumentation Amplifier. Available in: <<https://www.ti.com/document-viewer/ina129/datasheet>>. Accessed: April 03, 2023
- [20] Gupta, Chirag; Sharma, Kulbhushan. Design and Analysis of an Active Low-Pass Filter with Improved Performance using Sallen-Key Structure. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, volume 7, issue 5, May-2016.
- [21] Yazgan, Ayhan; Baysal, Murat. Design of Butterworth and Chebyshev Filters Using a Modified Sallen-Key Circuit. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, volume 41, issue 5, May 2013. DOI: 10.1002/cta.1860.
- [22] Cheng, Kuo-Hsing; Chen, Yi-Siang; Wang, Yu-Cheng. Design and Implementation of Biquad Filters Using Two-Stage Sallen-Key Structure. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, volume 39, issue 4, April 2011. DOI: 10.1002/cta.644
- [23] MALVINO, Albert; BATES, David. *Electronics-Vol. II*. 8th edition. McGraw-Hill Publishing, 2007.

[24] FRANCO, Sergio. Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits. 4ª edição. McGraw-Hill Education, 2014.

[25] ADS1115 Datasheet-Texas Instruments. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/292735/TI/ADS1115.html>. Accessed: April 17, 2023.

[26] Matthes, Eric. Python Crash Course. 1st ed., No Starch Press, 2015.

[27] Sweigart, Al. Automate the Boring Stuff with Python: Practical Programming for Total Beginners. No Starch Press, 2015.

Anexo A – Artigo Publicado – Congresso Brasileiro de Metrologia 2023



Development of a contactless voltmeter based on capacitive coupling

A Gomes and C R H Barbosa

Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Postgraduate Program in Metrology,
Rio de Janeiro, Brazil

Email: aribeiro@aluno.puc-rio.br; hall@puc-rio.br

Abstract. The aim of this study was to develop a voltmeter using the capacitive coupling technique for voltage measurements. The proposed voltmeter design offers a simple and cost-effective alternative to traditional voltage measurement methods. By using capacitive coupling, the need for direct electrical contact between the measuring circuit and the voltage source is eliminated, allowing for non-invasive voltage measurements. The development process involved the design and construction of a capacitive coupling circuit, which enabled the transfer of the voltage signal to a measurement circuit. The measurement circuit included signal conditioning components and an analog-to-digital converter for accurate voltage readings. The system has been calibrated and tested using a known voltage source to ensure reliable and accurate measurements. The experimental results show that the voltmeter obtained satisfactory performance for the usual voltage of 127 V AC and a maximum distance of 0.2 m from the point of interest, maintaining a low level of interference from external electrical noises. The proposed voltmeter design has potential for several applications, especially in scenarios where direct electrical contact with the voltage source is undesirable or impractical. It offers a reliable and efficient solution for voltage measurements, being suitable for both industrial and research purposes.

1. Introduction

The use of voltmeters by the electrical industry and the service sector is extremely relevant. The purpose is to measure the difference in electrical potential between two points to ensure the correct functioning of the equipment and the safety of users and operators.

In general, for these measurements to be made, the voltmeter needs to be placed in contact with the energized points between which the potential difference is desired, which characterizes an intrusive method of quantifying the value of said quantity and which can sometimes become extremely complicated, expensive and dangerous.

A conventional analog voltmeter consists of a galvanometer (electric current meter) associated in series with a high resistance (typically 10 M Ω) and two probes that are inserted in parallel with the circuit. The electric current circulating through the instrument causes the moving coil of the galvanometer to deflect the pointer on a graduated scale, indicating the measured voltage value [1].



In a common industrial scenario, different voltage levels are used in different equipment. Typically, one has the voltage levels of 127 V, 220 V, 380 V, 440 V and 760 V, all in alternating current (AC). Although these values are considered as low voltage [2], the risk of opening an electric arc is very large, especially from 380 V. This implies a complicated operation of data collection with low safety, reflecting negatively on production and exposing operators to the possibility of accidents.

Measuring electrical voltage in a non-invasive way is possible and can minimize such problems. Using capacitive coupling techniques it is possible to measure the voltage levels of an alternating voltage electrical network without the need to strip or even touch the conductors [3].

The Regulatory Standard 10 – NR10 is a Brazilian regulation that establishes the guidelines and minimum requirements of safety and health at work in electrical installations [2]. The electrical hazards mentioned in this standard refer to hazards associated with the use of and exposure to electricity, among which are: electric shock, electric arc, fires, and explosions. The zones where risks related to electricity may occur are defined by this standard as risk zone, controlled zone and free zone, having their radii delimited directly by the voltage value involved.

The risk zone is defined as the “surroundings of an energized part, not segregated, accessible even accidentally, whose approximation is allowed only to authorized professionals with the adoption of appropriate techniques and instruments at work” [2]. This work took into account voltage values ranging from 50 V AC to 1000 V AC, which delimits the radius of the risk zone at 0.2 m from the point of interest [2]. Thus, the measurements performed with the contactless voltmeter ranged from 20 cm down to 1 cm between the probe and the energized part.

The contactless voltmeter herein described has two main functions: (i) detecting that a part of interest is energized by alternating current with 60 Hz; and (ii) identifying the voltage level among the possible values commonly used in residential and industrial installations. It is worth noting that a system with three 127 V phases would have 220 V between any two phases, and that a wrong installation could yield 220 V in a point that should have 127 V, so it is important to identify the voltage level among the discrete possible values. In this work we used only 127 V AC as input, due to power availability at the laboratory, so the main goal is to identify the presence of such a voltage level at the point of interest.

This work is divided into five sections, including this introduction. In the next section fundamental concepts are presented, such as the principle of measuring the voltmeter by approximation based on capacitive coupling, as well as the nature of capacitance and the concept of capacitive coupling, highlighting its application in the transfer of signals and energy between circuits. It also addresses considerations about the nonlinear frequency response of capacitive coupling and the importance of selecting suitable capacitors and designing circuits carefully to minimize distortions.

Section 3 presents the details of the capacitive voltmeter design. The concept of measurement is described, which involves the formation of a capacitor between the energized point of interest and the voltmeter. Information is provided on the components used, such as the aluminum flat plate and the high-value resistor, which make up the voltmeter. Also presented is the electronic circuit, including an instrumentation amplifier and an active tuned filter, which amplify the input signal and reduce unwanted interference.

Next, section 4 presents the results obtained with the voltmeter by capacitive approximation in different situations. The variations in the dimensions of the test plates and how this affects the range of measurement values are mentioned, in addition to the plots that demonstrate the consistency of the results and the possible applications of the voltmeter, as well as possible errors associated with the measurements.

Finally, the conclusions highlight the relevance and effectiveness of the voltmeter by capacitive coupling-based approach as a non-invasive solution to detect and measure electrical voltage. The main benefits of this device are summarized, such as simplifying the maneuvers required for data collection, ensuring the safety of operators and reducing costs. Possible areas for future improvements and developments related to the capacitive voltmeter are also identified.



2. Background

The contactless voltmeter presented in this work is based on capacitive coupling, exploiting the electrical characteristic called capacitance [4]. Capacitance, in general terms, is the measure of the ability to store electrical charge of an object or system. It is defined as the ratio of the stored electric charge (q) to the applied electric potential difference (voltage) (V), i.e.,

$$C = \frac{q}{V} \quad (1)$$

The unit of measurement of capacitance in the International System of Units (SI) is the farad (F) [5]. The most common example of a device that exhibits capacitance is the capacitor, which is composed of two conductive plates separated by an insulating material, called a dielectric [6,7]. When an electric potential difference is applied to the capacitor, electric charge accumulates on each of the plates, generating an electric field between them. The magnitude of the capacitance of the capacitor depends on the area (A) and separation of the plates (d), as well as the insulating material [6,7], characterized by its dielectric constant ϵ_0 , as expressed by

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2)$$

Capacitive coupling is a mode of electrical connection in which the transfer of signal or energy between two circuits occurs through a capacitive structure [4]. It is widely applied in electronic circuits to transfer signals from one point to another without the need for a physical connection between them [6]. In capacitive coupling, one of the capacitor plates is placed at the output of one circuit and the other plate at the input of another circuit. Thus, when a signal is applied to the output of the first circuit, it charges the capacitor, which then transfers that charge to the input of the receiving circuit. In this way, the signal is transmitted without the need for a cable or any other type of connector between the two circuits.

It is worth mentioning that capacitive coupling can introduce distortions in the signal due to its nonlinear frequency response, which can affect the quality of the transmitted signal. For this reason, it is important to select a suitable capacitive structure for the application and to design the circuit carefully to minimize these distortions.

Another restriction refers to the need for the signal to be transmitted to be variant in time, because the electric current is proportional to the derivative of the voltage applied to the capacitor [6][7], with the capacitance being the constant of proportionality, that is,

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (3)$$

3. Capacitive voltmeter design

3.1. Measurement concept

In order to effectively measure an electric potential difference by capacitive coupling, a capacitor must be formed by the energized point of interest and the voltmeter sensor. Thus, the probe (sensor) of the voltmeter is basically made up of a flat square plate of aluminum. This board is connected in series with a high-value R_p resistor, typically 100 k Ω with 1 % tolerance, which will complete the sensing part of the voltmeter, as shown in figure 1. In this way, the resistor acts as a shunt and provides a voltage measurement point that allows to estimate, indirectly, the input voltage.

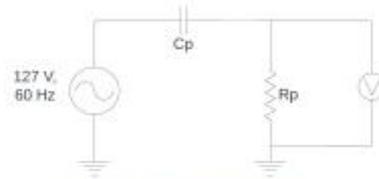


Figure 1. Basic Measurement Circuit

In figure 1, the sinusoidal source represents a V_0 power phase of alternating voltage with $f = 60$ Hz, in the example with 127 V of root mean square (RMS) value. In this work, the energized point of interest was represented also by a flat square aluminium plate, as shown in figure 2 for the case with 5 cm dimension.

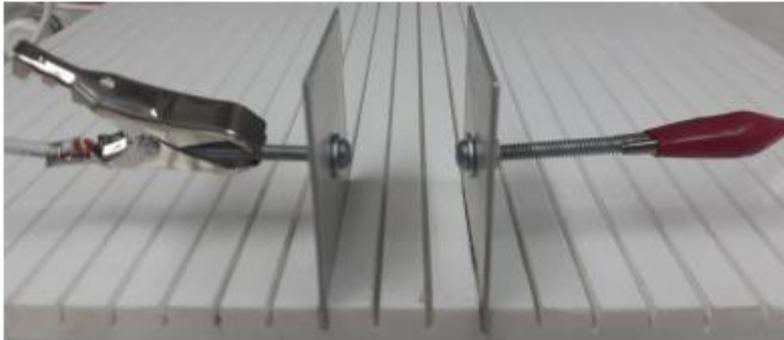


Figure 2. Flat square 5 cm cx 5 cm aluminium plates that represent, respectively, the energized point of interest (left plate) and the contactless voltmeter probe (right plate).

The capacitor C_p in figure 1 jointly represents the energized point (left plate) and the probe of the contactless voltmeter (right plate).

The value of voltage V_p on the resistor, measured by the voltmeter V, is given by

$$V_p = \frac{R_p}{R_p + X_C} \cdot V_0 \quad (4)$$

where X_C is the capacitive reactance, given by

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5)$$

The value of capacitance C was measured with the aid of a capacimeter, being in the range from 26.29 pF to 22.29 pF for the typical operating distances ranging from 0.01 m to 0.20 m. This results in typical capacitive reactance values in the range of 100 M Ω to 119 M Ω , subsequently generates currents on the order of microamperes. Therefore, when using a resistor, R_p , of 100 k Ω , potential differences within the range of hundreds of millivolts are obtained, allowing for adequate measurement.



3.2. Electronic circuit

Figure 3 shows the schematic diagram of the complete electronic circuit of the contactless capacitive voltmeter.

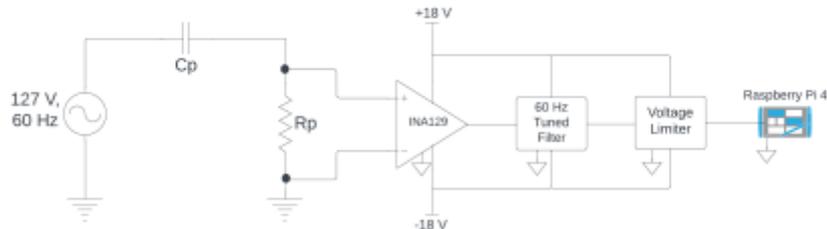


Figure 3.- Complete Measuring Circuit

The first stage is based on an instrumentation amplifier suitable for low amplitude differential signals, model INA129 from Texas Instruments, with voltage gain of 5 V/V and operating in the frequency range of 0.1 Hz to 10 kHz [8].

The signal obtained, despite a good amplitude for measurement, suffers from interference from other frequency bands of the external environment that directly affects data collection. As the usual alternating voltages have known frequencies, this problem was solved with the application of a bandpass resistive-capacitive filter. This filter allows a specific range of frequencies to pass through the circuit, in this case ranging from 55 Hz to 65 Hz while frequencies outside that range, including eventual harmonics, are blocked [9]. This filter also applies a gain of 4 V/V, yielding a total gain of 20 V/V. Thus, the input signal, which typically ranges from 354 mV to 401 mV, is amplified to values ranging from 0.5 V to 1.5 V depending on the distance between the sensing board and the point of interest.

To avoid overlaps and interference, all the electronics of the voltmeter are powered by independent source with values from -18 V direct current (DC) to +18 V DC and a distinct ground in relation to the neutral conductor of the AC network. Thus, at the output of the frequency filter, the signal will always be less than +18 V DC.

The last block of the circuit is a voltage attenuator based on an operational amplifier inverter topology, with an attenuation of 3.6 V/V, ensuring that the Raspberry-Pi 4 never receives input signals greater than 5 V, thus avoiding damaging its analog/digital (A/D) converter.

Finally, the signal is measured by a Raspberry Pi microcontroller, to which an ADS1115 [10] A/D converter has been connected, with 15 bits of resolution and 860 Hz of acquisition frequency, which is responsible by the acquisition of 0.25 s voltage windows and for the calculation of the RMS value of this sinusoidal signal, which is related to the input voltage to be measured.

4. Results

The voltmeter showed similar behaviour in four different situations: with test plates of 0.30 m by 0.30 m; 0.20 m by 0.20 m; 0.10 m by 0.10 m; and 0.05 m by 0.05 m. As a result, one obtains a range of values that is, according to equation 4, proportional to the voltage value at the point of interest. The consistency of the results can be seen in the figures 4 to 7.

Also, in order to verify the stability of the voltage input, figure 8 shows the RMS values of the input voltage measured by a commercial voltmeter (Fluke, model 87V) simultaneously with the measurements performed by the contactless voltmeter herein presented. The series of values have an average value of 129.00 V and a standard deviation of 0.48 V (0.37 %), thus characterizing an excellent stability during the tests.

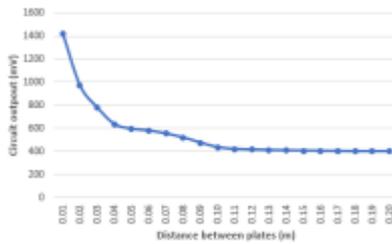


Figure 4. Plates 0.3 m x 0.3 m.

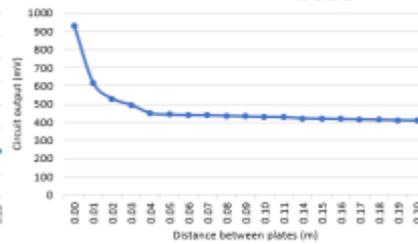


Figure 5. Plates 0.2 m x 0.2 m

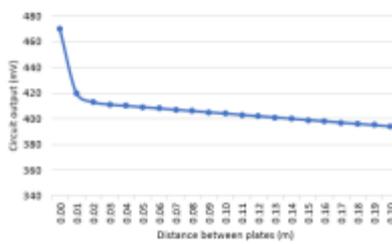


Figure 6. Plates 0.1 m x 0.1 m

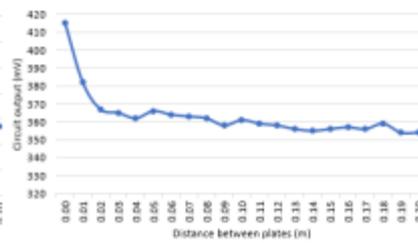


Figure 7. Plates 0.05 m x 0.05 m

As can be seen in the graphs, within the radius of the risk zone established by NR-10, the voltmeter has a stable behaviour with all probes tested, rapidly increasing once within the risk zone (< 0.2 m), and thus allowing a fast and reliable detection of an energized point that could pose a risk to the operator.

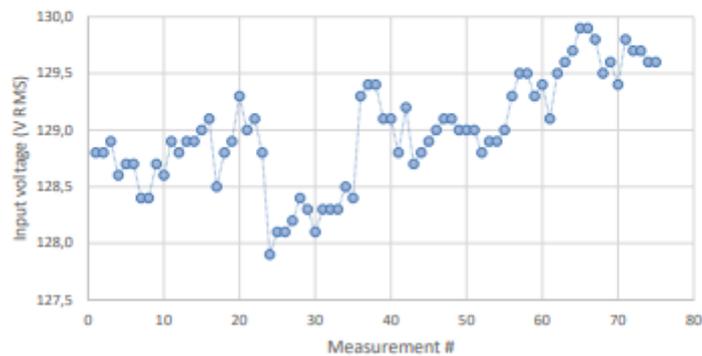


Figure 8. Input voltages measured by a conventional voltmeter simultaneously with each measurement performed by the contactless voltmeter.



5. Conclusions

The contactless voltmeter, which first prototype was herein presented, offers a viable and safe solution for the measurement of alternating electrical voltage at industrial frequencies. The device eliminates the need for direct contact with the voltage source, which is especially relevant in high-risk situations or in hard-to-reach locations. The voltmeter is composed of a capacitive coupling circuit and a measuring circuit with adequate amplification and filtering. The test results show a satisfactory performance for usual voltage of 127 V AC and maximum measuring distance of 0.2 m, with low interference from external electrical noises. This non-invasive approach can simplify data collection operations, ensure operator safety, and reduce costs. The project has potential for various industrial and research applications, opening possibilities for future improvements and developments, however tests are needed for other levels of alternating voltages of usual values and frequencies, as well as increasing the distance between the test plate and the point of interest.

Acknowledgements

The authors thank for the financial support provided by the Brazilian funding agencies CNPq, FINEP, and FAPERJ. This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) - Finance Code 001.

References

- [1] Capuano F G, Marino M A M. *Laboratory of Electricity and Electronics*. São Paulo: Érica, 2014.
- [2] BRAZIL. Ministry of Labor and Employment. Regulatory Standard 10: Safety in Installations and Services in Electricity. Brasília, DF: MTE, 2004.
- [3] Ren S, Nakahara H, Thongpull K, Phukpattaranont P and Chetpattananonh K, "A development of capacitive voltage sensor for non-intrusive energy meter," 2018 15th Int Conf on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2018, (Chiang Rai, Thailand), pp. 776-779, doi: 10.1109/ECTICon.2018.8620004.
- [4] Reza M and Rahman H A. "Non-Invasive Voltage Measurement Technique for Low Voltage AC Lines," 2021 IEEE 4th Int Conf on Electronics Technology (ICET), 2021, (Chengdu, China), pp. 143-148, doi: 10.1109/ICET51757.2021.9450978.
- [5] BIPM. Bureau Int des Poids et Mesures <<https://www.bipm.org/en>>, Access: Feb 21, 2023.
- [6] Young H D, Freedman R A. *Physics 3*. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.
- [7] Halliday D, Resnick R, Walker J. *Fundamentals of Physics - Volume 3*. 9. ed. (Rio de Janeiro, LTC), 2013.
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. INA129: High Precision, Low Power Instrumentation Amplifier. Available in: <<https://www.ti.com/document-viewer/ina129/datasheet>>. Accessed: April 03, 2023.
- [9] Malvino A, Bates D. *Electronics-Vol. II*. 8th edition. McGraw-Hill Publishing, 2007.
- [10] ADS1115 Datasheet-Texas Instruments. Available at: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/292735/TI/ADS1115.html>. Accessed: April 17, 2023.