

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Paulo Fré

SENSOR REMOTO DE DETECÇÃO DE TENSÃO

Taubaté - SP

2016

Paulo Fré

SENSOR REMOTO DE DETECÇÃO DE TENSÃO

**Dissertação apresentada como requisito para o
Mestrado pelo Curso de Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Coorientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Taubaté - SP

2016

**Ficha Catalográfica elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado
de Bibliotecas / UNITAU - Biblioteca das Engenharias**

F797s Fré, Paulo
Sensor remoto de detecção de tensão. / Paulo Fré -
2016.
44f. : il; 30 cm.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na
área de Automação) – Universidade de Taubaté.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2016
Orientador: Prof. Dr. Marcio Abud Marcelino;
Coorientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami,
Departamento de Engenharia Mecânica.
1. Eletroscópio. 2. Sensor. 3. Remoto. 4. Tensão. I.
Título.

PAULO FRÉ

**Dissertação apresentada como requisito para o
Mestrado pelo Curso de Engenharia Mecânica.**

Área de Concentração: Automação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

Coorientador: Prof. Dr. José Feliciano Adami

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Márcio Abud Marcelino

UNITAU e UNESP

Assinatura _____

Prof. Dr. Luiz Eduardo Nicolini do Patrocínio Nunes

UNITAU

Assinatura _____

Prof. Dr. Teófilo Miguel de Souza

UNESP GUARATINGUETA

Assinatura _____

Prof. Dr. José Feliciano Adami

UNESP GUARATINGUETA

Assinatura _____

Dedico este trabalho a minha querida esposa Cleuza,
que acreditou e me incentivou o tempo todo.

Aos meus pais, Lourenço e Carmélia

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela força nos momentos difíceis.

Aos Profs. Dr. Marcio Abud Marcelino e Dr. José Feliciano Adami pela habilidade com que orientaram esse trabalho.

Aos amigos Leonardo Donizete Sartori e Claudio de Miranda Brito pela dedicação e apoio técnico.

A Universidade de Taubaté pela colaboração nos momentos necessários.

Deus não lhe dá mais do que você pode carregar.

Jesus Cristo

SENSOR REMOTO DE DETECÇÃO DE TENSÃO

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de um sensor remoto de detecção de tensão portátil, apresentando um estudo sobre os princípios físicos, seu funcionamento e aplicação para detecção de tensão sem contato físico, apresentando também um circuito completo e verificando seu potencial de aplicação. Foi realizada uma descrição detalhada do elemento sensor e dos circuitos que fazem parte do detector de tensão sem contato, sendo também realizada uma simulação no *software* PROTEUS 6.2 © da *Labcenter Eletronics* e uma placa foi montada e testada, para a comparação dos dados simulados com o funcionamento do circuito. Os resultados mostraram que o sistema é muito eficiente ao realizar o propósito que é a detecção de tensão sem contato físico, sendo sugeridas várias aplicações. Em edificações novas e antigas é muito comum não se ter a versão final da rede de instalação elétrica e muitas vezes acidentes acontecem no momento de uma manutenção. O sensor remoto de tensão permite a identificação de condutores mesmo que estes não estejam alimentando uma carga, sendo necessário apenas que estejam ligados à rede de energia. Nesse sentido, verificou-se com sucesso que o detector estudado é aplicável na localização de condutores embutidos, detecção de tensão em condutores, localização de interrupções em condutores.

Palavras-chave – Eletroscópio, Sensor, Remoto, Tensão.

REMOTE SENSOR VOLTAGE DETECTION

ABSTRACT

This paper presents an analysis of a remote sensor portable voltage detection, presenting a study on the physical principles, the functioning and application for voltage detection without physical contact, while setting a complete circuit and checking its application potential. A detailed description of the sensor element and circuit forming part of the non-contact voltage detector, a simulation and is also held in PROTEUS software 6.2 © of Labcenter Electronics and a plate was assembled and tested, for comparing the simulated data was performed with the operation of the circuit. The results showed that the system is very effective in accomplishing the purpose is that the voltage detection without physical contact, and suggested various applications. In ready and old buildings it is very common not to have a final version of the wiring network and often accidents happen at the time of maintenance. The remote voltage sensor allows the identification of drivers even if they are not feeding a load, requiring only that are connected to the power grid. Accordingly, we have been successfully studied the detector fits in the specific application location of embedded conductors, voltage detection conductors, locating breaks in conductors.

Keywords – Electroscope, Remote, Sensor, voltage.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	13
1.2	Estado da arte	13
1.3	Justificativa	18
1.4	Descrição dos capítulos	19
2.	SENSOR KELVIN	21
2.1	Princípio de operação do sensor kelvin	21
3.	O MEDIDOR REMOTO DE TENSÃO	24
3.1	Estrutura do sensor kelvin	24
3.2	Amplificador de alto ganho e integrador de tensão	25
3.3	Detector de limiar de tensão	26
3.4	Oscilador	28
4	SIMULAÇÃO	29
5	DADOS EXPERIMENTAIS	33
6	COMENTÁRIOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SENSOR REMOTO	37
7	CONCLUSÃO	40
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Eletroscópio de folha de ouro.	14
Figura 2 – Troca de cargas em um eletroscópio.	14
Figura 3 – Corpo humano usado como condutor elétrico.	15
Figura 4 – Eletroscópio simples blindado.	15
Figura 5 – Detector de tensão sem contato.	18
Figura 6 – Sensor capacitiva por vibração.	22
Figura 7 - Placa sensora.	25
Figura 8 - Circuito amplificador e ceifador para o sensor kelvin.	25
Figura 9 - Detector de limiar de tensão.	27
Figura 10 - Bloco comparador.	27
Figura 11 - Circuito estável.	28
Figura 12 - Circuito simulador.	30
Figura 13 - Formas de onda de saída da simulação.	32
Figura 14 - Saída de tensão no amplificador operacional U2, sensor inativo.	33
Figura 15 - Tensão de saída no amplificador operacional U3, sensor inativo.	34
Figura 16 - Tensão de saída no amplificador operacional U2, sensor ativo.	35
Figura 17 - Tensão de saída no amplificador operacional U3, sensor ativo.	35
Figura 18 - Bancada de testes.	36
Figura 19 - Protótipo do sensor remoto de detecção de tensão.	36

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1** – Medidas realizadas com cabo ligado à rede elétrica 110VAC - sem carga. 37
- Tabela 2** – Medidas realizadas com cabo ligado à rede elétrica 220VAC - sem carga. 37
- Tabela 3** – Procedimentos de testes do sensor remoto de detecção de tensão. 38

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Modelos de eletrômetros.

17

SÍMBOLOS E SIGLAS

NR-10	Norma Regulamentadora 10
LED	<i>Light Emitting Diode</i> (Diodo Emissor de Luz)
SMD	<i>Surface Mount Devices</i> (dispositivos de montagem superficial)
AC	<i>Alternating Current</i> (corrente alternada)
DC	<i>Direct Current</i> (corrente contínua)
ϵ	permissividade elétrica
Hz	hertz
sin	seno
ωt	velocidade angular
nF	nanofarad
M Ω	megaohm
k Ω	kiloohm
kHz	kilohertz
mV	milivolt
V	volt
A	ampere
Vac	tensão em corrente alternada
Vdif	diferença de tensão
Vcc	tensão em corrente contínua

1 - INTRODUÇÃO

1.1 – Objetivo

O objetivo deste trabalho inicialmente foi montar um sensor de tensão sem contato físico, segundo critérios científicos e de baixo custo, utilizando um elemento sensor Kelvin, para ser utilizado na manutenção de rede elétrica em edificações e após estudos e ensaios em laboratório trazer informações sobre aplicações e funcionamento tanto dos sensores quanto do circuito para tratamento do sinal.

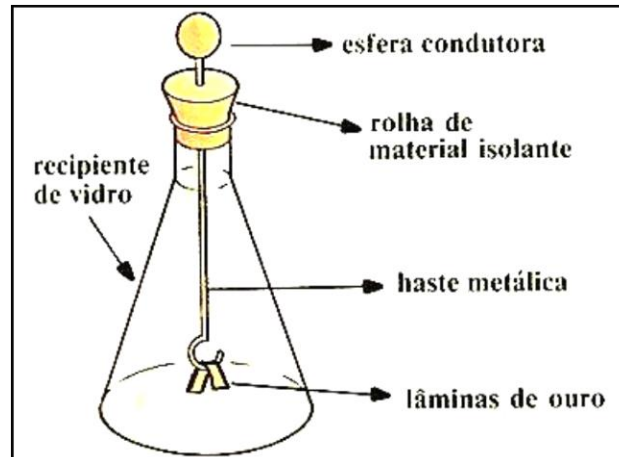
1.2 – Estado da arte

Apesar de sistemas de detecção de tensão potencial já serem bem conhecidos, poucos estudos científicos foram apresentados nesta área, assim como pesquisas para a melhoria e apuração do sistema como um todo. O sistema para verificação de tensão a distância basicamente não mudou desde sua criação devido a ausência de documentos científicos que descrevam o funcionamento físico e eletrônico destes equipamentos.

Esse equipamento foi desenvolvido inicialmente com as pesquisas dos eletrômetros e posteriormente os eletroscópios, surgindo o elemento detector sensor capacitivo kelvin (KELVIN, 1898) (smartech, 2015).

O eletroscópio é um instrumento usado para revelar a presença de cargas elétricas sendo que o instrumento mais antigo, o eletroscópio de folha de ouro, que é formado por duas lâminas de ouro, muito finas, suspensas a uma barra metálica com uma esfera em uma das extremidades e introduzidos em um recipiente de vidro conforme ilustrado na figura 1 (FRIEDMAN, 1971).

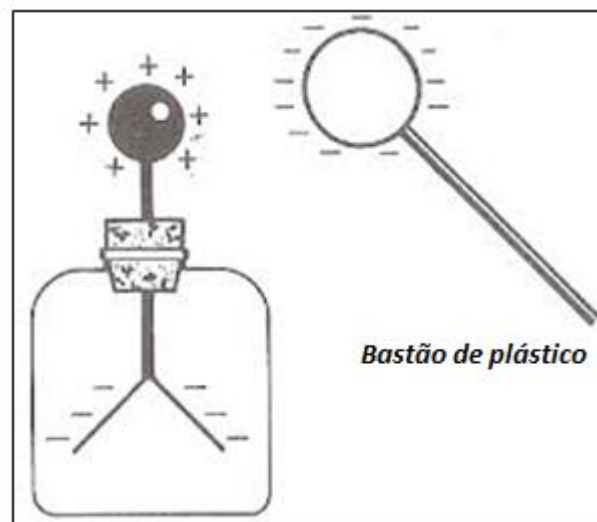
Figura 1 – Eletroscópio de folha de ouro.



Fonte: Site ezuim, 2015.

Ao tocar com um bastão de plástico carregado com carga negativa a pequena esfera metálica situada na extremidade superior da barra metálica do eletroscópio, as lâminas de ouro se afastam porque ambas ficaram com a mesma carga, a negativa, conforme apresentado na figura 2.

Figura 2 – Troca de cargas em um eletroscópio.



Fonte: site cienciasacm, 2015.

Ao tocar a esfera do eletrômetro com uma esfera carregada, sustentada por uma haste isolante, as folhas se aproximam um pouco porque retira-se alguma carga. Se o eletroscópio estiver carregado e depois tocá-lo com o dedo, as folhas se juntam, devido ao fato de que parte do excesso da carga do eletroscópio passa para

o seu corpo. Pode acontecer também que, através de seu corpo, elas passem para a Terra, entretanto, mesmo que seus sapatos sejam isolantes, as folhas do eletroscópio se juntam. Neste caso conclui-se que o corpo humano funciona como um condutor elétrico ao terra, conforme apresentado na figura 3.

Figura 3 – Corpo humano usado como condutor elétrico.



Fonte: site macao, 2016.

Quando as folhas de ouro de um eletroscópio estão encerradas em um frasco de vidro, o eletroscópio é sensível a quaisquer cargas que estejam nas proximidades. Tais cargas exercem forças sobre as folhas diretamente ou por indução. Pode se eliminar efeitos elétricos não desejados, se for substituído o recipiente de vidro por uma caixa metálica e usado um isolante para manter a caixa e as folhas eletricamente separadas, conforme apresentado na figura 4.

Figura 4 – Eletroscópio simples blindado.



Fonte: Site thesaurusonline, 2016.

Nesta condição o eletroscópio está completamente envolvido por uma blindagem metálica, fazendo com que as folhas fiquem insensíveis às cargas do lado de fora, no entanto, ao se aproximar um corpo carregado devidamente, induzirá cargas que exercem forças sobre as folhas.

Um eletroscópio blindado é, portanto, um instrumento de maior confiabilidade, pois é insensível a influências elétricas externas que não interessam.

Os eletroscópios que dispõem de uma escala, de modo que pode se fazer medidas quantitativas, são denominados eletrômetros (FRIEDMAN, 1971). O quadro 1 ilustra alguns modelos de eletroscópios que foram utilizados em estudos de detecção de cargas elétricas.

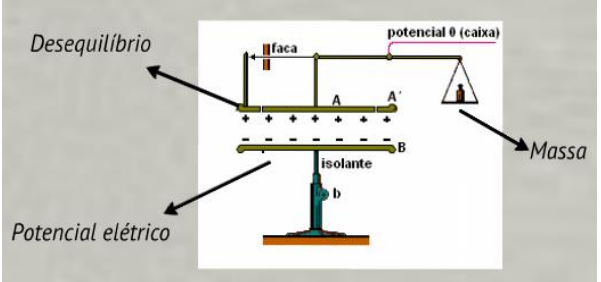
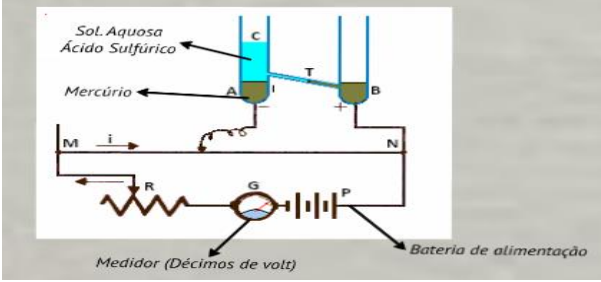
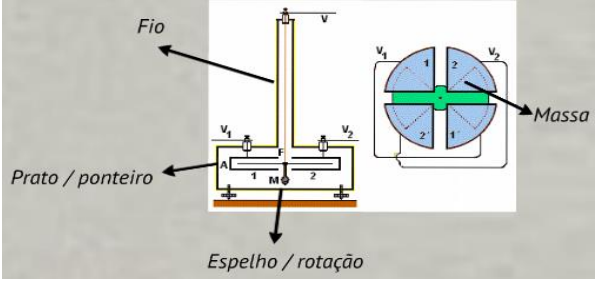
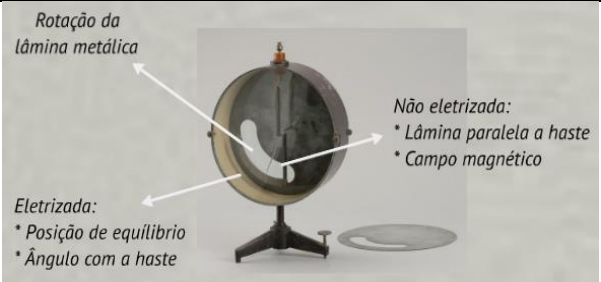
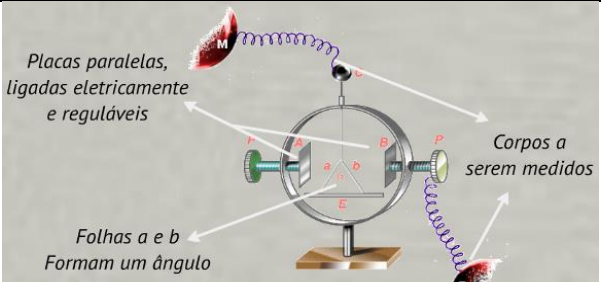
O eletroscópio eletrônico não possui elementos móveis, funciona eletronicamente. Ele detecta variações de campo elétrico gerado por cargas elétricas em corpos quando estes se aproximam ou afastam de seu elemento sensor. O circuito eletrônico amplia os sinais captados pelo sensor e aciona ou não o circuito conforme o campo elétrico aproxima ou se afasta do sensor.

Um LED (Diodo Emissor de Luz) e uma pequena buzina (*buzzer*) entram em funcionamento quando cargas positivas aproximam-se do sensor ou cargas negativas afastam-se do sensor. A vantagem do eletroscópio eletrônico é a sua sensibilidade à campos elétricos de baixas intensidades.

SANTOS et al, apresentaram um sistema de transmissão simplex por fibra óptica plástica para medição de potenciais elétricos em sistemas de alta tensão, que embora tenha a isolação da fibra, realiza a medição através de contato físico e somente a transmissão é ótica e isolada. O mais comum para medição de tensão é a utilização de um multímetro que, através de contato verifica a presença de tensão no condutor. Existem várias técnicas e dispositivos para verificar a presença de tensão em um condutor, porém sempre através de contato físico. Alguns medidores atualmente utilizam sensores de efeito Hall, porém medem apenas tensões em circuitos que tenham correntes circulantes (HAYT, 2013).

O sensor de tensão apresentado nesta pesquisa, diferentemente dos descritos anteriormente, não necessita de contato físico com os condutores, e realiza a medição somente por aproximação, mesmo que o circuito esteja aberto sendo que os condutores podem estar embutidos em uma parede ou não.

Quadro 1 – Modelos de eletrômetros.

ELETRÔMETROS	
MODELO	EXEMPLO
Eletrômetro de pratos (Prezi, 2016).	
Eletrômetro capilar (Prezi, 2016).	
Eletrômetro de quadrantes (Prezi, 2016).	
Eletrômetro de Braum (Prezi, 2016).	
Eletrômetro de Exner (Prezi, 2016).	

Fonte: O Autor.

Este sensor é base para vários equipamentos de detecção de tensão sem contato como: aparelhos como eletrocardiograma, eletroencefalograma, monitores de tensão elétrica em placas de circuito eletrônico e ponteiras de detecção de tensão.

No mercado atual o equipamento detector de tensão sem contato tem circuitos proprietários e quase sempre integrados (SMD – *Surface Mounting Device*), conforme figura 5, o que os torna completamente desconhecidos cientificamente.

Figura 5 – Detector de tensão sem contato.



Fonte: Site flir, 2016.

1.3 Justificativa

Diariamente técnicos tem contato com sistemas de alta, média e baixa tensão que apresentam perigo potencial à vida humana, sendo que muitos acidentes ocorrem no momento da amostragem da tensão, ou muitas vezes por desconhecimento de que os condutores próximos estão energizados, ou também por não utilizar corretamente a norma reguladora, a NR-10 (BRASIL, 2012). Apesar de sistemas de detecção de tensão potencial já serem bem conhecidos poucos estudos científicos foram apresentados nesta área até então, assim como pesquisas para a melhoria e apuração do sistema como um todo, principalmente devido ao valor comercial deste tipo de conhecimento, o que torna os circuitos proprietários e

confidenciais. O sistema para verificação de tensão a distância basicamente não mudou desde sua criação devido à ausência de documentos científicos que descrevam o funcionamento físico e eletrônico.

O motivador para este trabalho é o conhecimento do princípio de funcionamento desses equipamentos e, a justificativa, a falta de literatura, além do fato dos equipamentos lançados no mercado serem quase sempre integrados (SMD - *Surface Mounting Device*).

Esses aparelhos comerciais foram desenvolvidos inicialmente com as pesquisas dos eletrômetros e posteriormente dos eletroscópios, surgindo logo após o elemento detector sensor capacitivo kelvin (USAMA, 2011) (NORAS, 2002). Ao estudar e procurar entender o seu funcionamento foram encontradas dificuldades no levantamento e aquisição de dados devido às proteções comerciais envolvidas e, portanto, a consequente falta de dados científicos.

Utilizando o *software* de circuitos PROTEUS ©, foi realizado uma simulação de circuitos e depois foi montada uma placa protótipo com a mesma característica, e seus resultados estão apresentados neste trabalho.

1.4 Descrição dos capítulos

No capítulo 2 tem-se a demonstração do princípio de funcionamento do sensor kelvin, principal componente do detector de tensão sem contato.

No capítulo 3 apresenta-se o medidor remoto de tensão, dividindo o estudo em quatro etapas, sendo elas: Sensor kelvin; Amplificador de alto ganho e Integrador de tensão; Detector de limiar de tensão; Oscilador.

No capítulo 4 uma simulação do circuito foi realizada, com o intuito de uma verificação quantitativa e, para tal foi utilizado o programa PROTEUS 6.2 © da *Labcenter Eletronics* e os resultados foram apresentados.

No capítulo 5 os dados experimentais estão apresentados, sendo que, foi montada uma placa para a comparação dos dados simulados com o funcionamento do circuito e foi usado para realizar a avaliação do comportamento do circuito um osciloscópio digital *Agilent* DOS 3062.

No capítulo 6 descreve-se alguns comentários sobre o sensor remoto de tensão observados durante o processo de estudo de funcionamento.

No capítulo 7 são apresentadas as principais conclusões dos conhecimentos adquiridos com este trabalho e apresenta-se sugestões de aplicações e futuros trabalhos.

2 SENSOR KELVIN

2.1 Princípio de operação do sensor kelvin

O sensor capacitivo kelvin é conhecido pela sua eficácia na investigação de medidas de potencial de carga superficial. O princípio de funcionamento já vem sendo estudado há muito tempo e foi proposto por Lord Kelvin em 1898 (Kelvin, 1898) (Noras, 2002), sendo que a construção original de Kelvin vem sendo modificada e melhorada, dando origem a dispositivos mais precisos e fáceis de usar, permitindo a identificação de cargas superficiais ou tensões por um método não destrutivo, sem contato (smartech, 2015) (scitation, 2015).

A partir da equação (1) da capacitância de um capacitor dá-se origem ao princípio de funcionamento do sensor kelvin.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1)$$

Onde:

C = A capacitância de um capacitor em faraday;

Q = A carga elétrica acumulada pelo capacitor em coulomb;

U = A tensão entre os eletrodos do capacitor em volts.

Geralmente um capacitor é constituído por duas placas condutoras planas e paralelas, sendo que a capacitância depende de alguns fatores como (NORAS, 2002):

- A área da superfície dos planos;
- A distância que separa as placas;
- O meio que separa as placas;
- O campo elétrico entre os eletrodos.

Quando aplica se uma voltagem U em um capacitor, a quantidade de carga armazenada é diretamente proporcional à tensão (NORAS, 2002), de acordo com a expressão (2):

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 A}{d} \quad [F] \quad (2)$$

Onde:

C = A capacitância de um capacitor em faraday;

ϵ = Permissividade elétrica relativa do material entre os eletrodos, ($\epsilon \approx 1$ para o ar);

ϵ_0 = Permissividade elétrica no vácuo, ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m);

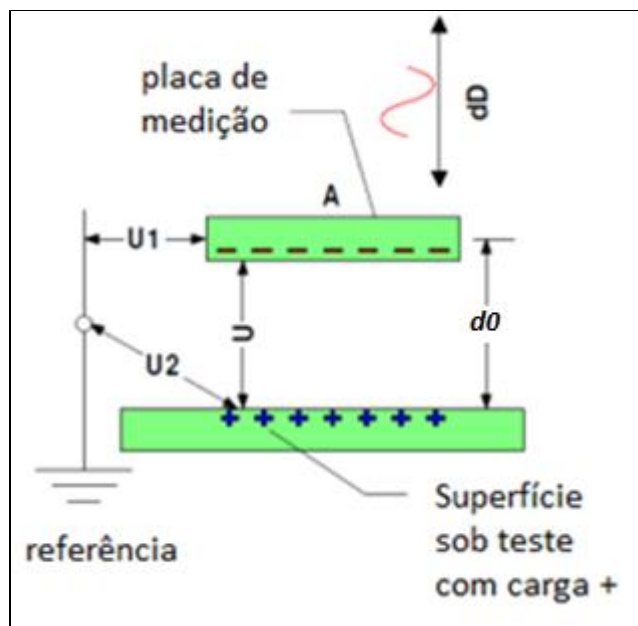
A = A área da placa sensora;

d = Distância entre os eletrodos.

A capacitância é criada pela ponta sensora kelvin e o plano em teste.

A Figura 6 apresenta uma ponta de prova capacitiva utilizada em medições de potenciais elétricos sem contato físico, utilizando o princípio do sensor Kelvin (resource, 2015).

Figura 6 – Sensor capacitiva por vibração.



Fonte: NORAS, 2002.

As diferenças de potenciais das placas foram representadas por U e a área da placa sensora foi representada por A.

A sonda vibra na direção perpendicular à superfície testada e a corrente flui proporcionalmente à amplitude e frequência de vibração. Se a vibração é senoidal a distância D é representada pela expressão (3):

$$d = d_0 + d_1 \cdot \sin(\omega t) \quad [m] \quad (3)$$

A distância d_0 é uma constante que representa posição de referência, d_1 representa a amplitude da vibração [m], ω é a frequência de vibração, sendo: $\omega = 2\pi f$ [rad / s] e f é a frequência definida em Hz.

Da expressão (2) a capacitância equivalente da configuração da placa é representada pela expressão (4) (ZISMAN, 1932):

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 A}{d = d_0 + d_1 \cdot \sin(\omega t)} \quad [F], \quad (4)$$

Sendo $\epsilon = 1$ a permissividade elétrica do ar, e ϵ_0 a permissividade elétrica no vácuo ($8,85 \times 10^{-12}$ F/m).

Uma ampla variedade de modelos para os circuitos de detecção de corrente foi proposta a fim de melhorar a qualidade da carga de superfície e leituras dos potenciais (NORAS, 2002).

Existem muitos fatores que determinam a sensibilidade e precisão do sensor kelvin e a influência de alguns deles pode ser limitada por projeto, blindagem e a utilização de circuitos eletrônicos especiais. Entre eles estão ruído, capacitância parasita e problema de espaçamento, porém para simples detecção de tensão, objeto deste trabalho estes fatores não são preponderantes.

3 – O MEDIDOR REMOTO DE TENSÃO

Foi realizado um estudo sobre o funcionamento físico do sensor remoto de detecção de tensão, assim como os fundamentos teóricos envolvidos no processo (SHAOLIANG, 2011).

O sistema analisado é constituído de um sensor kelvin, um amplificador de alto ganho, um integrador de tensão, um detector de limiar de tensão e um oscilador, que, em conjunto, possibilitam a detecção de tensão remotamente (NORAS. 2002).

Para conhecer a composição de cada uma das partes e o respectivo funcionamento, a apresentação foi dividida em duas etapas:

A primeira descreve a análise do elemento sensor;

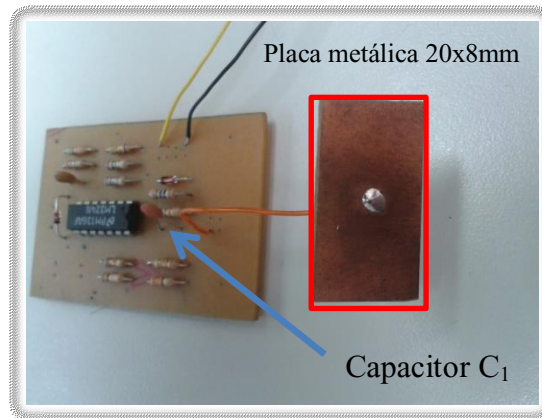
A segunda realiza uma análise do circuito, objetivando elaborar uma documentação científica e melhorias nas informações sobre o objeto em estudo.

Após esta etapa é apresentado o resultado da simulação e os resultados dos ensaios realizados em laboratório e, finalmente, uma análise comparativa entre eles.

3.1 – Estrutura do sensor kelvin

O sensor desenvolvido é composto de uma placa metálica de 20 x 8mm, conforme apresentado na figura 7, ligada a um capacitor cerâmico 100nF. A placa metálica pode ser compreendida como um condutor de comprimento infinito que, devido à ação de um campo variável gera tensão no terminal conectado ao capacitor C_1 , que por sua vez, acopla o nível DC da tensão induzida (PREETHICHANDRA, 2001), (REITZ, 1982). O segundo estágio do circuito é um amplificador de alto ganho, que é responsável por adequar o sinal ao próximo estágio.

Figura 7 - Placa sensora.



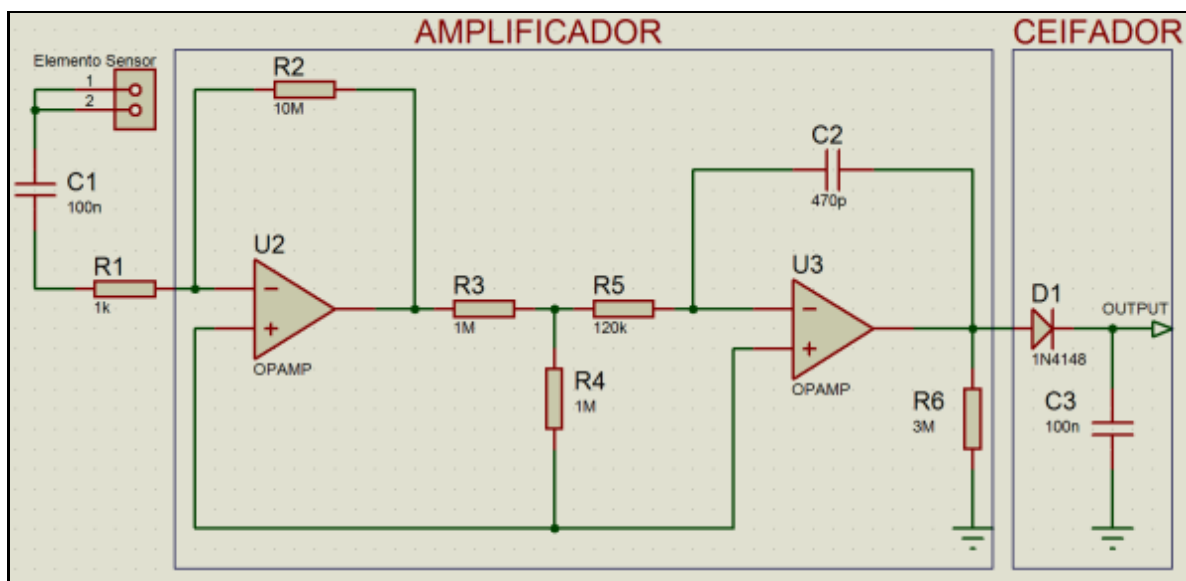
Fonte: O Autor.

3.2 – Amplificador de alto ganho e integrador de tensão

Um amplificador de alto ganho realizado pelo amplificador operacional U_2 , é uma etapa necessária devido ao baixo nível de tensão induzida pela rede elétrica.

O projeto deste amplificador não é usual, devido à ausência do terra na medição da tensão induzida e, desta forma, é realizada uma comparação com a integral do sinal gerado na etapa seguinte, realizada pelo amplificador operacional U_3 , conforme se observa na figura 8.

Figura 8 - Circuito amplificador e ceifador para o sensor kelvin.



Fonte: O Autor.

Tem-se um circuito amplificador na configuração de inversor, onde a saída é dada pela expressão (BOYLESTAD, 2009) (SEDRA, 2009).

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i \quad [\text{V}] \quad (5)$$

Onde:

V_o = Tensão de saída do amplificador em volts;

V_i = Tensão de entrada do amplificador em volts;

R_2 = A resistência de realimentação em ohms;

R_1 = A resistência de entrada em ohms.

A resistência de realimentação utilizada (R_2) tem um valor de 10 M Ω e a resistência de entrada (R_1) tem um valor de 1 k Ω , resultando em um ganho de 10000. Este ganho é necessário para se aumentar a sensibilidade do equipamento. Na saída é necessário um circuito ceifador para se obter o valor médio do sinal medido, o que também indiretamente limita a faixa de frequência do sinal a ser medido.

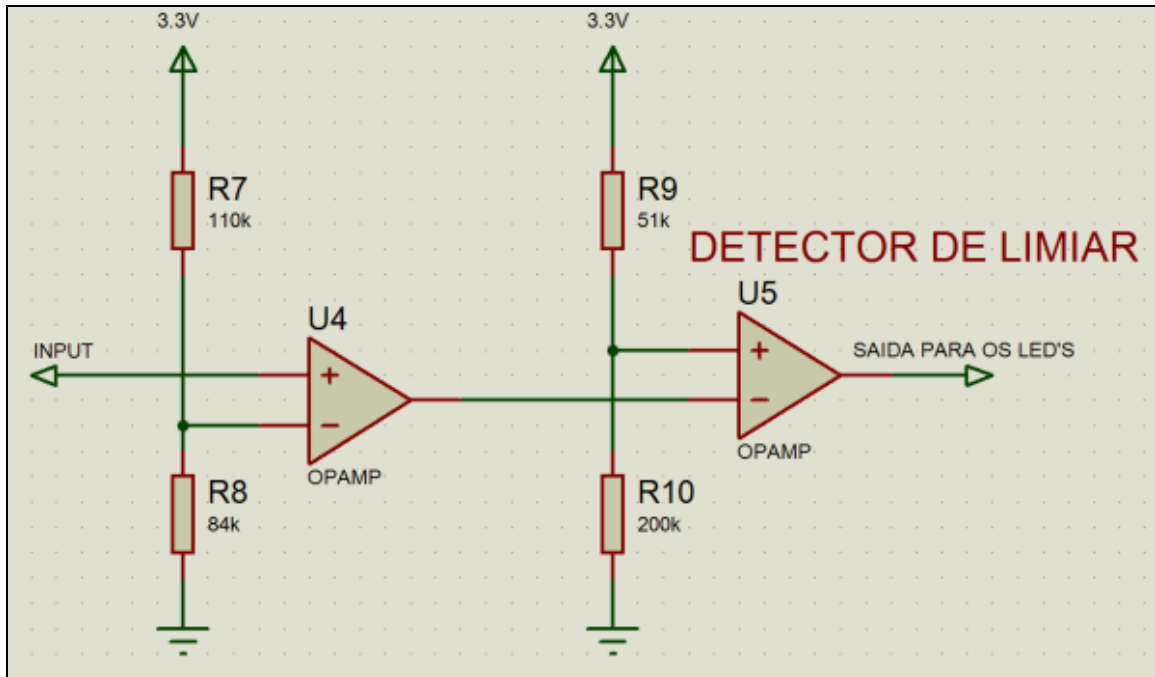
3.3 – Detector de limiar de tensão

Nesta etapa do circuito é onde, utilizando-se um amplificador operacional na configuração de comparador (U_4), o sistema indica se a tensão amplificada ultrapassa um valor limite, definido pelos resistores R_7 de 110 k Ω e R_8 de 84 k Ω , como mostra a figura 9.

O sinal de tensão induzido foi primeiramente tratado por um circuito ceifador, o qual transforma a tensão amplificada em um valor DC equivalente ao seu valor máximo. O amplificador seguinte tem a função de acionar os LED's de saída, por exemplo: Se a tensão de saída do estágio comparador for positiva (tensão detectada) a saída do amplificador operacional U_5 aciona o LED verde (D3), indicando tensão na linha, e subseqüentemente o comparador seguinte desliga o

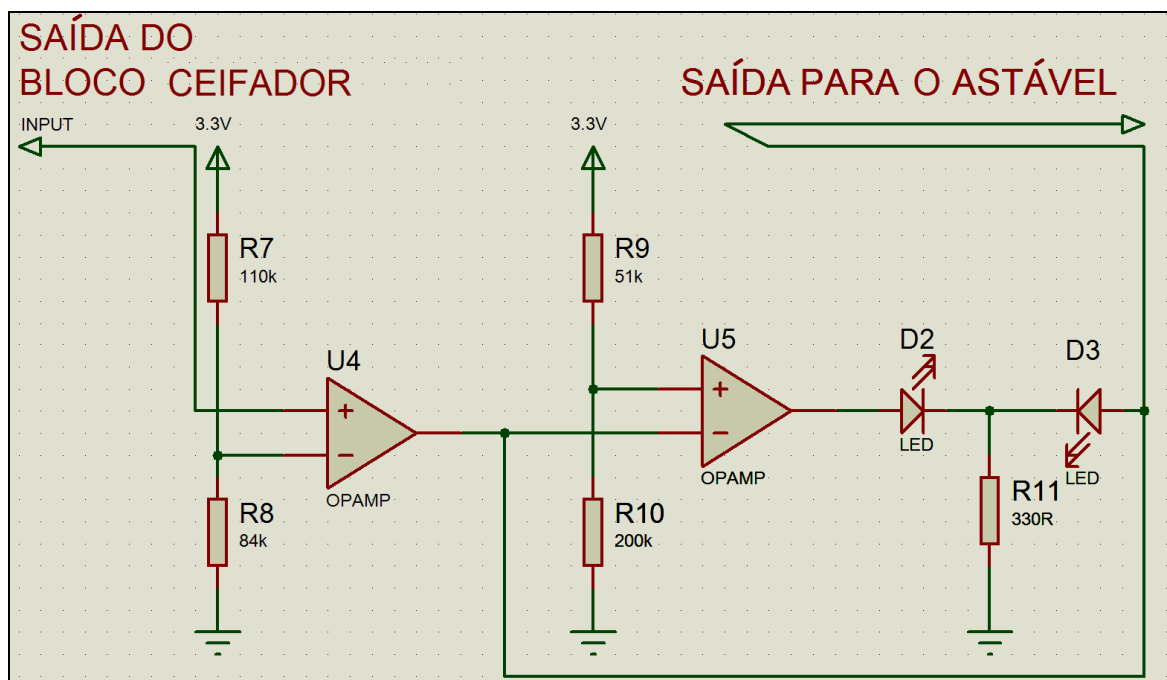
LED vermelho (D2). Por outro lado, se não for detectado tensão, a saída do estágio comparador é zero, ligando o LED vermelho e desligando o verde. A figura 10 mostra os LEDs.

Figura 9 - Detector de limiar de tensão.



Fonte: O Autor.

Figura 10 - Bloco comparador.

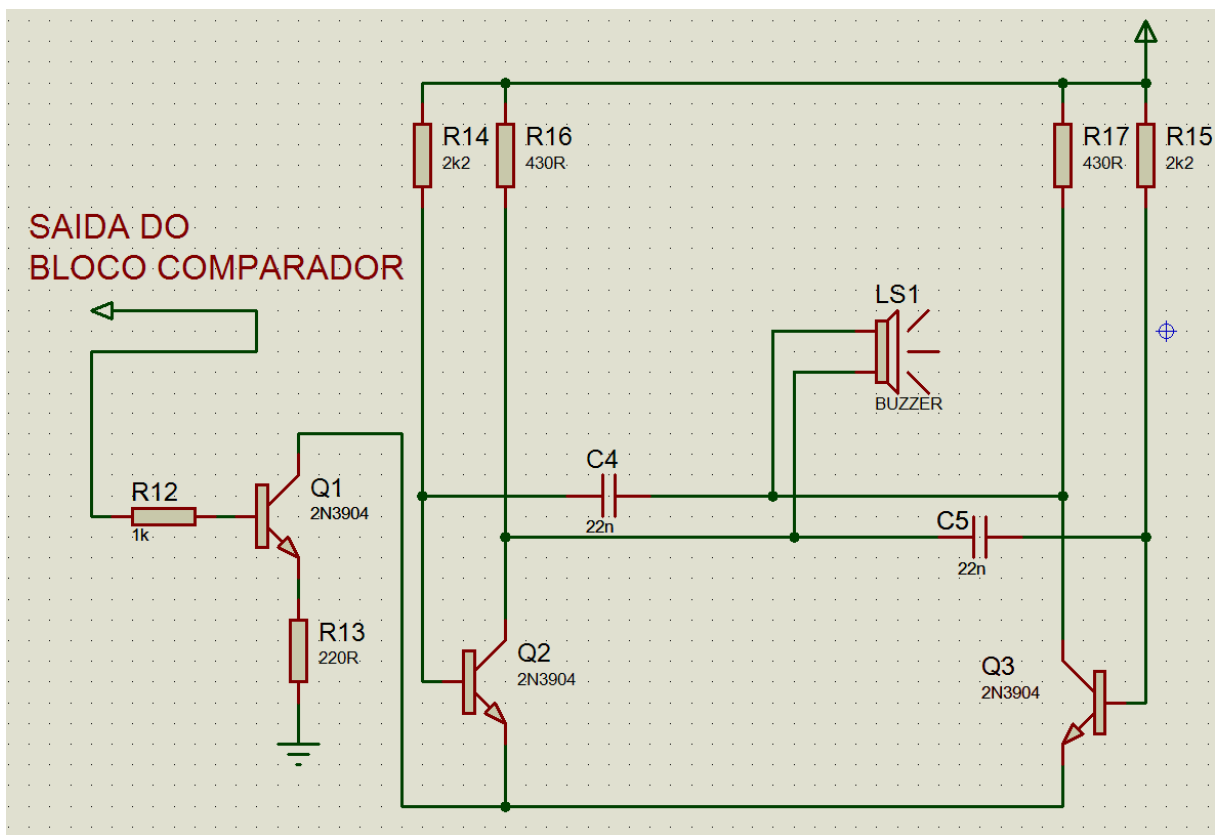


Fonte: O Autor.

3.4 - Oscilador

O sistema pode ter um alarme sonoro opcional para indicar a presença de tensão no condutor medido. Este sinal sonoro é proveniente de um *buzzer*, que por sua vez é acionado por um circuito astável na frequência de 10 kHz, alimentado pela saída do bloco comparador, como ilustra a figura 11.

Figura 11 - Circuito astável.



Fonte: O Autor.

4 - SIMULAÇÃO

Foi realizada uma simulação do circuito, com o intuito de uma verificação quantitativa e, para tal foi utilizado o programa PROTEUS 6.2 © da *Labcenter Electronics* e os resultados foram equivalentes aos sinais medidos nos circuitos montados. A figura 12 mostra o circuito utilizado para a simulação.

Foi simulada a tensão na saída do bloco amplificador U3 (conforme figura 8, página 25), com uma tensão de entrada de 10 mV equivalente a 127 V_{ac} de tensão detectada, que apresentou a forma de onda observada na figura 13 (VSM *Osciloscópio-Scope input*): Para amostrar a tensão de saída foi necessário usar um amplificador na configuração de instrumentação, para combinar a sua alta impedância de entrada com o fato de sua saída ser uma subtração dos sinais de entrada.

Utilizou-se um gerador de tensão para simular a entrada da tensão pelo elemento sensor. O proteus-isis simula o osciloscópio não ideal, então foi necessário se isolar e amplificar o sinal oriundo do gerador. O circuito composto pelos amplificadores operacionais U1 e U6 isola o sinal, servindo de *buffer* e pré-amplificador. Na situação de realimentação dos amplificadores, a tensão no terminal não-inversor de U1 e U6 é aproximadamente a tensão em seus terminais inversores, o que transfere a diferença de tensão V_{dif} diretamente para R_{15} , originando uma corrente definida na expressão (6):

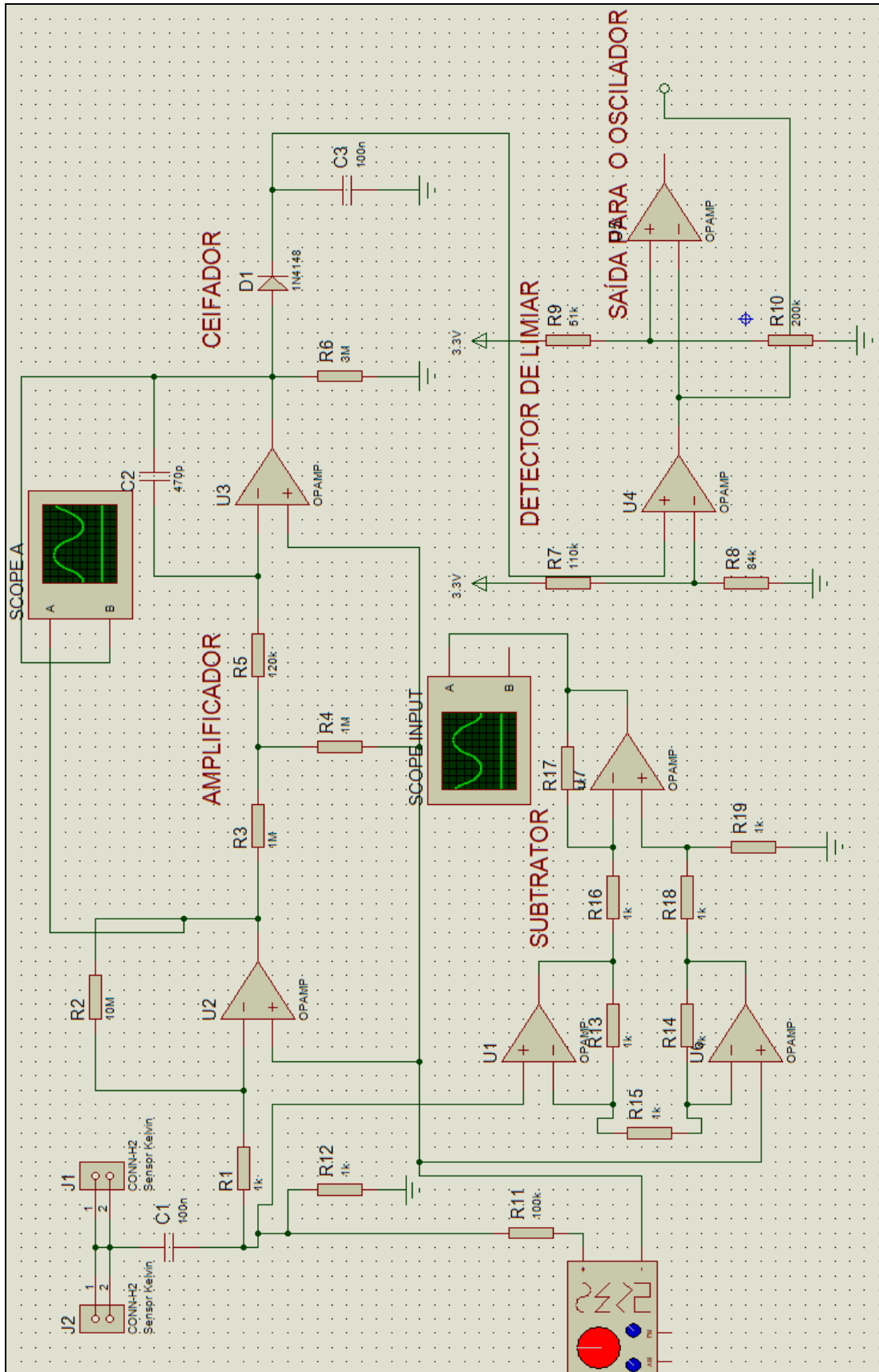
$$I = \frac{V_{dif}}{R_{15}} \quad [A] \quad (6)$$

Desta forma, a tensão de saída (V_t) nos amplificadores U1 e U6 se torna de acordo com a expressão (7):

$$V_t = I \cdot R_{13} + I \cdot R_{15} + I \cdot R_{14} \quad [V] \quad (7)$$

A tensão de saída no amplificador operacional U7 é novamente referenciada ao terra utilizando um circuito subtrator (U7).

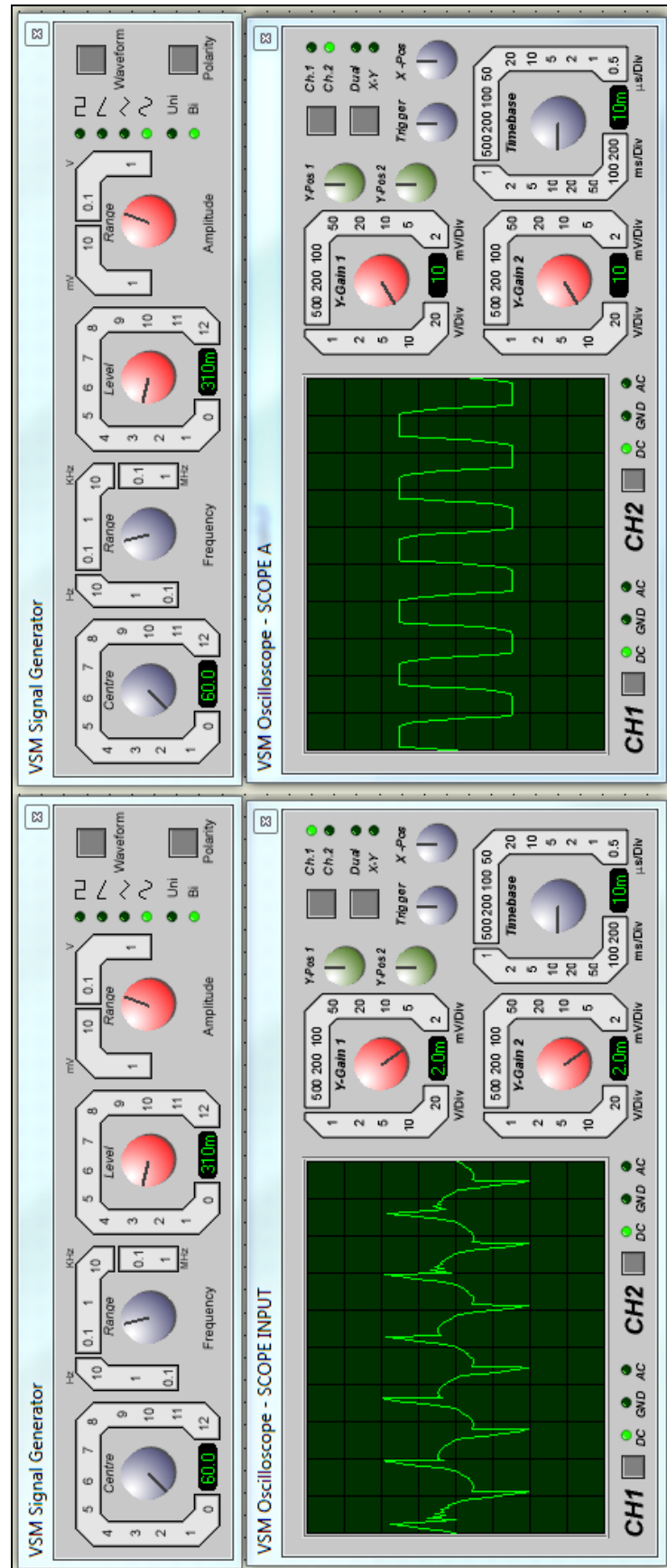
Figura 12 - Circuito simulado.



Fonte: O Autor.

Na figura 13, o sinal *SCOPE INPUT* equivale a tensão de entrada no sensor kelvin, e o *SCOPE A* equivale à tensão de saída na primeira e na segunda etapa do estágio amplificador.

Figura 13 - Formas de onda de saída da simulação



Fonte: O Autor.

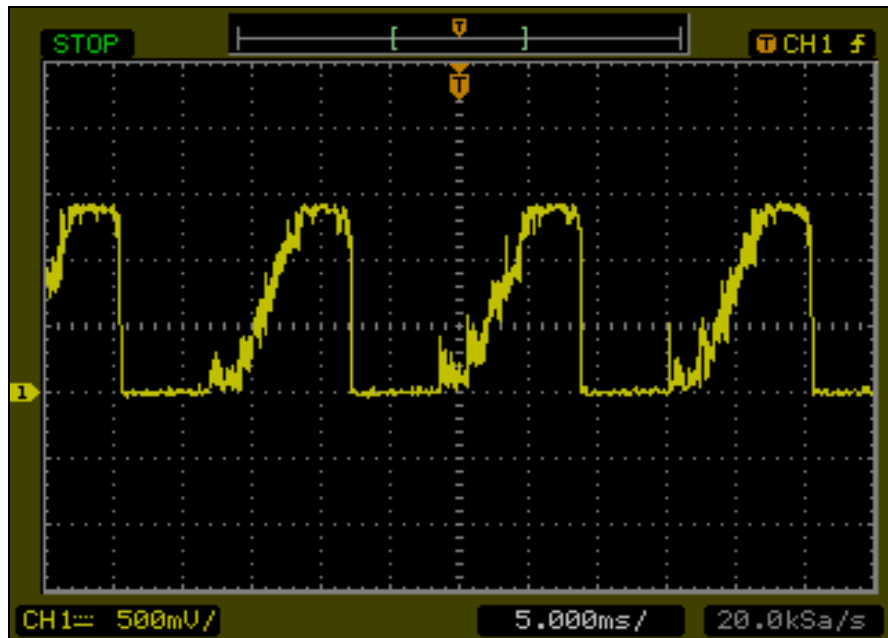
5 - DADOS EXPERIMENTAIS

Foi montada uma placa para a comparação dos dados simulados com o funcionamento do circuito. Para realizar a avaliação do comportamento do circuito foi utilizado um osciloscópio digital *Agilent* DOS 3062. O canal 1 foi conectado na saída de U2 e o canal 2 em U3 (conforme figura 8, página 25), e foram obtidos os seguintes dados:

- Com o sensor inativo sem tensão nos fios:

Na saída de tensão do amplificador operacional U2 foi obtido a tensão pré-amplificada com uma baixa tensão (1.5 mV) no sensor kelvin (conforme figura 14). Pode-se observar o baixo valor médio da tensão de saída, o que é condizente com a simulação do circuito indicado na figura 8, sendo o valor de detecção de 3.3 V.

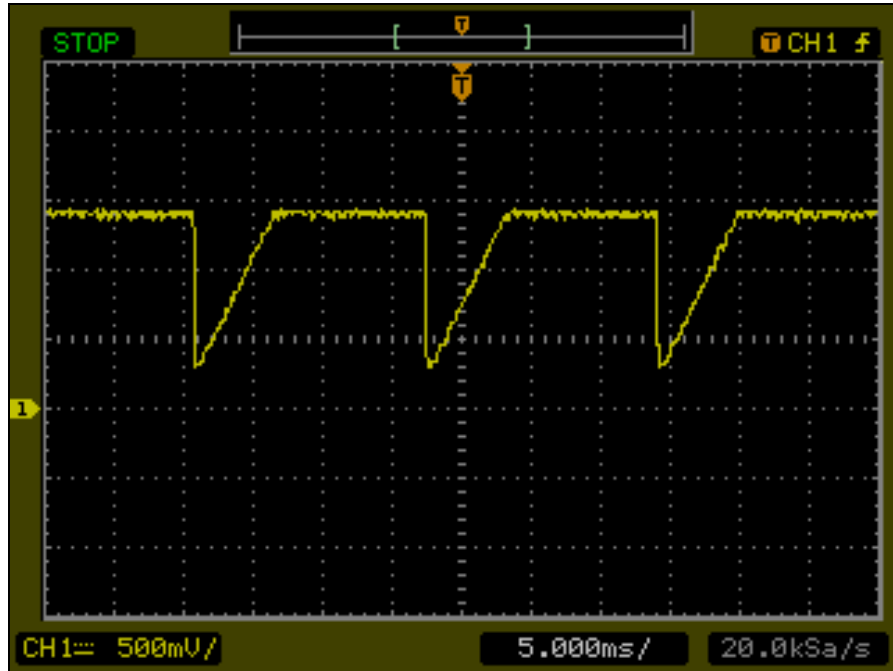
Figura 14 - Saída de tensão no amplificador operacional U2, sensor inativo.



Fonte: O Autor.

Este sinal permite que o próximo estágio ilustrado na figura 15 mostre a integração do sinal de U2.

Figura 15 - Tensão de saída no amplificador operacional U3, sensor inativo



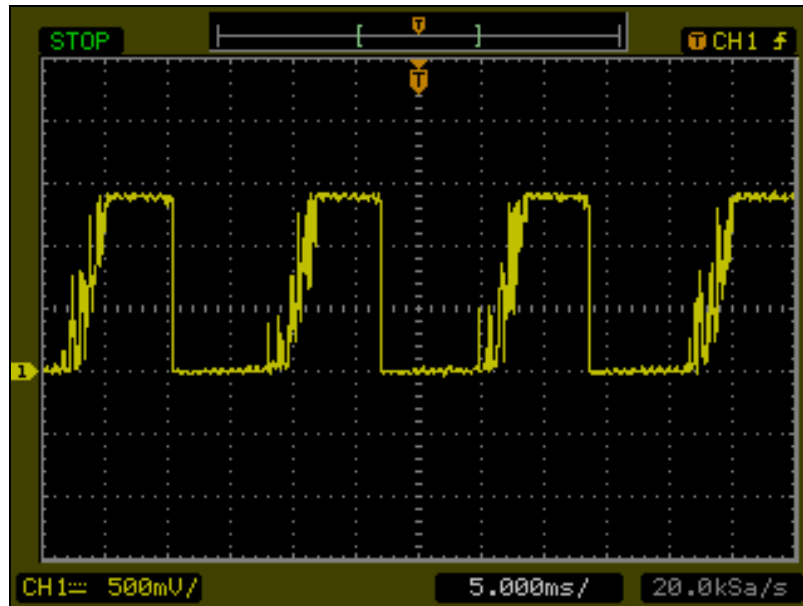
Fonte: O Autor.

O integrador tem como função amplificar sinais com gradiente maior (saída do sensor, em caso da ausência de sinal).

- Com sensor ativo e com tensão presente:

Durante os ensaios com a presença de tensão as amostras do sinal com sensor ativo ocasionaram em um aumento da tensão média de saída, tanto no amplificador operacional U2 quanto no amplificador operacional U3, o que é condizente com o funcionamento geral do sistema e o acionamento do bloco detector de limiar, em U2 e U3, conforme figura 12, página 30. Pode ser observado que a subida do sinal em U2 (conforme figura 16) tornou-se mais brusca e devido à saturação do amplificador operacional pode-se ver o ceifamento do sinal de entrada.

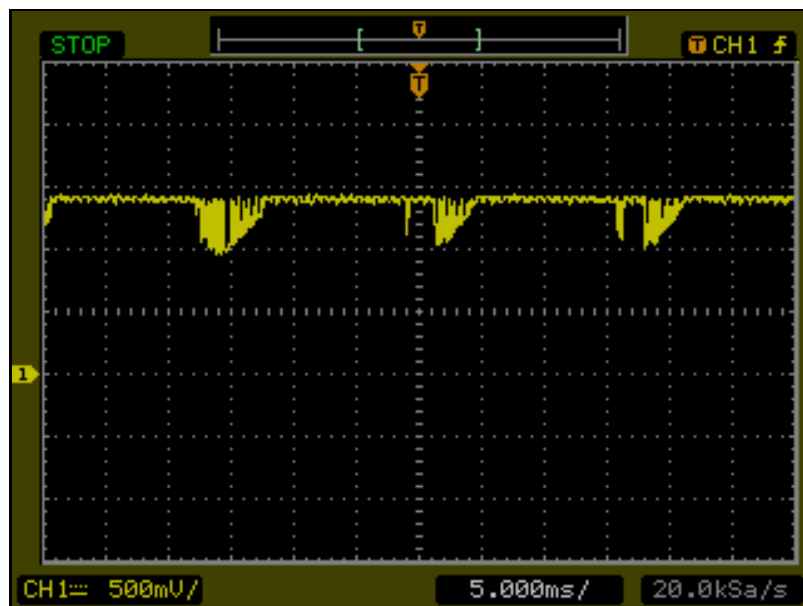
Figura 16 - Tensão de saída no amplificador operacional U2, sensor ativo.



Fonte: O Autor.

A tensão em U3 também teve um aumento (conforme figura 17) e devido ao gradiente de tensão maior em U2, teve quase 100% do sinal em V_{cc} . Este sinal aumenta o nível de tensão no ceifador (conforme figura 8, página 25) fazendo com que o detector de limiar acione a saída do sistema (LED e astável, conforme figura 10, página 27 – 1 mV).

Figura 17: Tensão de saída no amplificador operacional U3, sensor ativo.



Fonte: O Autor.

Estes sinais podem ser observados na simulação em *SCOPE B* na figura 13, página 32.

A placa usada no protótipo do sensor remoto de detecção de tensão teve seu layout confeccionado no programa PROTEUS ARES®, e foi necessário um cuidado especial devido ao baixo nível de tensão presente no sensor.

A bancada de testes com os equipamentos pode ser visualizada na figura 18.

Figura 18 - Bancada de testes.

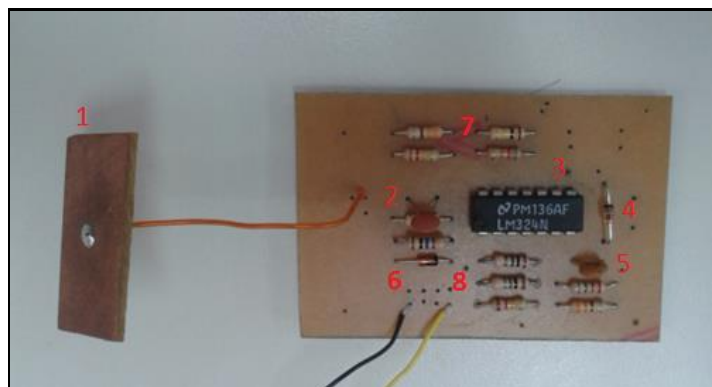


Fonte: O Autor.

O protótipo do sensor remoto de detecção de tensão pode ser visto na figura 19, onde:

- 1 – Placa sensora kelvin – sensor kelvin;
- 2 - Capacitor cerâmico 100 nF – sensor kelvin;
- 3 – Circuito integrado LM328N – amplificador operacional;
- 4 – Diodo 1N4148 – circuito ceifador;
- 5 – Capacitor cerâmico 100 nF - circuito ceifador;
- 6 – Diodo 1N4148 – proteção de inversão da bateria;
- 7 – Resistores do circuito comparador;
- 8 – Resistores do circuito amplificador;

Figura 19 - Protótipo do sensor remoto de detecção de tensão



Fonte: O Autor.

6 – COMENTÁRIOS SOBRE O FUNCIONAMENTO DO SENSOR REMOTO.

Os sinais obtidos através de medições após ensaios realizados com diversos níveis de tensão AC foi possível observar que o sistema é capaz de detectar pequenos valores de campo elétrico variáveis através do sensor Kelvin combinado com um conjunto de circuitos amplificadores de alto ganho e de tratamento de sinais. Pode-se observar que o protótipo foi capaz de detectar tensões a partir de 10 VAC até 220 VAC com muita precisão. As tabelas 1 e 2 mostram detalhes destes ensaios onde foi utilizado um cabo ligado à rede elétrica com 110 VAC e 220 VAC respectivamente.

Tabela 1 – Medidas realizadas com cabo ligado à rede elétrica 110VAC sem carga.

Medidas com cabo ligado à rede sem carga				
Tensão	Frequência	Valor pico a pico	Distância do sensor ao cabo	Local da medição
110 VAC	60 Hz	1,38 a 1,46 V	5 mm	Saída do amplificador operacional U2
110 VAC	60 Hz	2,54 a 2,56 V	5 mm	Saída do amplificador operacional U3

Fonte: O Autor.

Tabela 2 – Medidas realizadas com cabo ligado à rede elétrica 220VAC sem carga.

Medidas com cabo ligado à rede sem carga				
Tensão	Frequência	Valor pico a pico	Distância do sensor ao cabo	Local da medição
220 VAC	60 Hz	2,48 a 2,60 V	5 mm	Saída do amplificador operacional U2
220 VAC	60 Hz	3,54 a 3,66 V	5 mm	Saída do amplificador operacional U3

Fonte: O Autor.

A diferença de potencial entre fase e neutro gera um campo elétrico entre a fase e a placa “ligada” ao terra através do operador, o que induz uma tensão que é por sua vez amplificada com ganho de 10000 na entrada do circuito (o amplificador inversor na entrada do sistema). Para se verificar esta hipótese, uma das principais conclusões desse trabalho, foram executados vários procedimentos descritos na tabela 3, que enriquece com alguns detalhes o funcionamento do sensor remoto.

Tabela 3 – Procedimentos de testes do sensor remoto de detecção de tensão.

PROCEDIMENTOS DE TESTE DO SENSOR REMOTO DE DETECÇÃO DE TENSÃO	
Medidas e testes	Resposta
A resistência elétrica do operador foi removida, isolando o sistema através de uma alta impedância (deixando o sistema “flutuando”) através de uma luva de isolamento de alta tensão.	O sistema foi incapaz de detectar a tensão.
Utilizando-se uma bateria e um circuito isolado da rede.	O sistema foi incapaz de detectar a tensão, devido a ausência de uma malha para se fechar o circuito.
o <i>gap</i> entre a placa metálica (sensor) foi preenchido com um isolante suficientemente grande.	O sistema foi incapaz de detectar a rede indicando que o sistema funciona com tensão elétrica induzida, se o acoplamento fosse eletromagnético o sistema seria capaz de detectar a tensão sem problemas.
Utilizando-se um ímã de alto falante	Ao movimentar o ímã na direção do sensor o sistema foi incapaz de detectar cargas.
Utilizando-se o condutor desligado	O sistema foi incapaz de detectar a tensão ou outras cargas.
Condutor fase	O sistema detecta tensão.
Condutor neutro	O sistema detecta o início do condutor fisicamente no circuito, exemplo: circuito de iluminação.
Condutor em tubulação de aço	O sistema foi incapaz de detectar a tensão.
Condutor em tubulação de plástico	O sistema detecta tensão.

Fonte: O Autor.

O detalhe que merece menção é que nos ensaios realizados observou-se que condutores embutidos são detectados se estiverem condicionados em dutos plásticos. Se estiverem em dutos metálicos, não mais utilizados em instalações embutidas, não é detectada a presença de tensão, obviamente pela absorção do campo elétrico pelo metal do duto.

7 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um sensor remoto de detecção de tensão. Nos ensaios realizados verificou-se que o sistema é eficiente ao detectar a presença de tensão minimizando o risco de choque elétrico por contato para o operador, atendendo a Norma Reguladora NR 10, por não necessitar de contato físico. Deste modo, mesmo em situações típicas na manutenção de sistemas elétricos de potência, a presença da tensão pode ser verificada de uma forma muito simples, pela aproximação do dispositivo aos condutores sem, contudo, ser necessário efetuar qualquer contato físico, ou utilizar um multímetro para verificar a presença de tensão.

Nas simulações verificou-se que a placa do sensor remoto de detecção de tensão foi capaz de detectar tensão ou pulsante em condutores com carga ou mesmo sem carga, podendo este condutor estar exposto ou em tubulação de plástico.

Confirmou-se, através dos procedimentos realizados com a placa sensora, a hipótese de que a diferença de potencial entre fase e neutro gera um campo elétrico entre a fase e a placa ligada ao terra através do operador, o que induz uma tensão, que é amplificada, pelo sistema eletrônico do sensor de detecção de tensão.

Como sugestões de aplicações para o protótipo desenvolvido mostrou-se satisfatório, sendo capaz de detectar o condutor fase em diversas instalações elétricas, detectar tensão em condutores expostos sem necessidade de contato, localizar condutores embutidos ou localizar interrupções em condutores.

Para trabalhos futuros a sugestão é calibrar a resposta de saída do equipamento para ser apresentada em um medidor embutido com mostrador de tensão.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

BOYLESTAD, R.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos**, Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 11ª edição 2009/2013.

BRASIL, Legislação. **NR – 10 Norma Regulamentadora de Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**: Guia Prático de análise e Aplicação. São Paulo: Érica, 2012.

FRIEDMAN, F. L. **Física Parte IV**: Physical Science Study Committee. São Paulo: Edart, 1971.

HAYT, W.H., **Eletromagnetismo**, 8ª edição, Editora Mc Graw Hill p. 232-233, 2013.

KELVIN, LORD; **Contact electricity of metals**. Philos. Mag., 46:82-120, 1898.

NORAS, M. **Non-contact surface charge/voltage measurements Capacitive probe-principle of operation**; trek Application Notes number 3001 and 3002; 2002 www.trekinc.com.

PREETHICHANDRA, D.M.G. **A simple interface circuit to measure very small capacitance charge in capacitive sensors**. IEEE Trans. Instrum. Meas. 50(6) 1583-1586, 2001.

REITZ, J. R. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**, Rio de Janeiro: Campus, 1982.

SANTOS, A.; MARCELINO, M.A.; PRADO, P.P.L. **Transmissão simplex por fibra óptica plástica de medição de potenciais elétricos em sistemas de alta tensão**, Revista SODEBRAS, V. 8.P.69-76,2013.

SEDRA, A.; SMITH, K. C. **Microelectronics Circuits**, Londres: Oxford Univ. Press, 2009.

Site: http://macao.communications.museum/eng/exhibition/secondfloor/MoreInfo/2_3_7_VanGraafGenerator.html - Acessado em 04/01/2016.

Site: <https://prezi.com/tvyia0z-puaa/sensores-de-tensao-corrente-e-potencia/> - Acessado em 11/01/2016.

Site: http://resource.npl.co.uk/docs/networks/electromagntecs/071129/dclf_wright/prance_.pdf - Acessado em 26/06/2015.

Site: <http://scitation.aip.org/content/avs/journal/jvsta/29/5/10.1116/1.3611004> - Acessado em 26/06/2015.

Site: https://smartech.gatech.edu/bitstream/handle/1853/19862/dukic_megan_m_200712_mast.pdf - Acessado em 10/06/2015.

Site: <http://thesaurusonline.museus.ul.pt/ficha.aspx?t=o&id=220> - Acessado em 04/01/2016.

Site: http://www.cienciasacm.xpg.com.br/ESTUDO%20DA%20ELETRICIDADE%20-%20PAG_1.htm - Acessado em 24/10/2015.

Site: <http://www.ezuim.com/hotpotatoes/teoria7.htm> - Acessado em 24/10/2015.

Site: <http://www.flir.com.br/instruments/display/?id=61255> - Acessado em 04/01/2016.

SHAOLIANG, W.; ZHANG, L.; GAO, W.; CAO, Z.; **Non – Contact Voltage Measurement Based on Eletric-Field Effect**, 1177- 7058 Elsevier 2011.

USAMA Z., BHUSHAN; COCCETTI F.,_J. Vac. Sci. Technol. A, Vol. 29, No. 5, Sep/Oct, 2011.

ZISMAN,W.A. Rev. Sci. Instrum., 3:367.368, 1932.