

# Desenvolvimento de Sensor Protótipo para Monitoramento Contínuo de Campo Elétrico

Érica T. S. Santana, Georgina A. Cardoso, Angelina L. M. Cunha, Rodrigo C. Santos<sup>1</sup>,  
(Acadêmico DEE), **Ciro J. Egoavil<sup>2</sup> (Professor DEE)**

<sup>1</sup>Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica - DAEE, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Porto Velho, Rondônia, Brasil  
(e-mail: tauanequimica22@gmail.com)

<sup>2</sup>Professor do Curso de Engenharia Elétrica - DAEE, Fundação Universidade Federal de Rondônia, Sala 206 - 2C, Porto Velho, Rondônia, Brasil (e-mail: ciro.egoavil@unir.br)

Autor Correspondente: **Ciro J. Egoavil** (e-mail: ciro.egoavil@unir.br).

**RESUMO** Este projeto pretende construir um sensor protótipo à baixo custo para monitoramento contínuo da intensidade do Campo Elétrico em Subestações e Linhas de Transmissão. Todos os anos são feitas as medições dos níveis de campo elétrico e magnético dentro das subestações e no percurso das linhas de transmissão, executadas segundo a resolução normativa 616 da ANEEL de 2014. Notando a necessidade de um procedimento ou implantação de um sistema que permita o monitoramento contínuo, de tal forma que o registro seja realizado sem a necessidade de exposição à irradiação eletromagnética da equipe envolvida na execução. Em primeiro momento devemos projetar e aperfeiçoar o protótipo sensor de campo elétrico de baixo custo. Uma vez implementado o protótipo os níveis serão registrados no módulo, estando disponíveis para quem operar fazer o download. O sensor foi projetado a partir de um capacitor de placas paralelas eletricamente isoladas, o sinal captado (ddp) é conduzido por um cabo coaxial até um circuito que o amplificará, utilizando-se da diferença de potencial que o campo presente induz na superfície condutora e das deduções matemáticas, com o objetivo de obter a intensidade do campo elétrico existente.

**PALAVRAS CHAVE** Sensor Campo Elétrico, Capacitor Placas Paralelas

## I. INTRODUÇÃO

**C**ampo Elétrico: grandeza que caracteriza a força exercida sobre cargas elétricas, na região em torno de qualquer condutor energizado de uma instalação elétrica. O valor de campo elétrico é expresso em quilovolt por metro (V/m).[1]

Nos dias de hoje, existem várias formas para efetuar o cálculo de campo elétrico. A técnica utilizada para realizar cálculo de campo em linhas de transmissão e subestações faz uso das equações de fontes estacionárias, apesar destas fontes possuírem sua amplitude variante no tempo. Os campos elétricos gerados pelo sistema elétrico geralmente possui a frequência de 50 Hz ou 60 Hz, nesta escala de frequência os campos são considerados desacoplados, independentes e com dinâmica quase estática. Campos com tal dinâmica podem ser calculados com equações de campo estático.[2][3][4]

Para o cálculo, considerando o campo estático, a resultante é um conjunto de vetores constantes em cada

posição do espaço, mas utilizando fontes variantes com dinâmica quase estática, a resultante é um conjunto de vetores alternado, isto é, seu sentido muda para uma mesma posição do espaço. Levando em consideração o ambiente onde há subestações, isto é, um lugar onde se trata de sistema trifásico, os vetores giram em quase todas as direções, exceto em fronteiras como a superfície da terra devido a condutividade que afetam estes vetores.[4]

A compreensão de vetores de campo elétrico é necessária para o entendimento para a distribuição de campo no espaço. Quando se tem vários condutores percorridos por correntes trifásicas, o campo resultante em um ponto do espaço é a soma das contribuições de cada condutor, assim, o campo resultante terá um valor complexo. A intensidade do campo poderá ter alterações em sua fase, esta ocorrência é devida a interação de campos de fases distintas.[5]

Há diversas formas de representar o vetor resultante. De acordo com a situação pode-se decompor estes vetores em coordenadas cartesianas ou cilíndricas, isto ocorre devido a

sua característica tridimensional.

### A. LEI DE COULOMB E A INTENSIDADE DE CAMPO ELÉTRICO

Considerando uma carga  $Q_1$ , fixa em uma posição, e movendo-se uma segunda carga lentamente em volta, nota-se que existe em todo lugar uma força atuando nessa segunda carga, isto é, essa segunda carga está evidenciando a existência de um campo de força associado com a carga  $Q_1$ . A esta segunda carga adota-se o nome de carga de teste  $Q_t$ .

Utilizando a Lei de Coulomb obtêm-se a força na carga:

$$F_t = \frac{Q_1 Q_t}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t}$$

Escrevendo essa força como uma força por unidade de carga, tem-se a intensidade de campo elétrico,  $E_1$  surgindo de  $Q_1$ :

$$E_1 = \frac{F_t}{Q_t} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_{1t} \quad (1)$$

$E_1$  é interpretado como o vetor força, tendo  $Q_1$  como fonte, que age sobre uma carga de teste positiva. De forma mais geral adota-se a seguinte expressão de definição:

$$E = \frac{F_t}{Q_t} \quad (2)$$

Nesta definição  $E$ , a intensidade de campo elétrico avaliado no ponto onde a carga teste está localizada, que surge de todas as outras cargas da vizinhança- isso significa que o campo elétrico gerado pela própria carga teste não está incluído em  $E$ .

A unidade  $E$  corresponde à força por carga (Newton por Coulomb), haja vista que pode-se medir a intensidade de campo elétrico nas unidades práticas de volt por metro (V/m). Considerando o campo elétrico gerado por uma única carga pontual têm-se:

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R^2} a_R \quad (3)$$

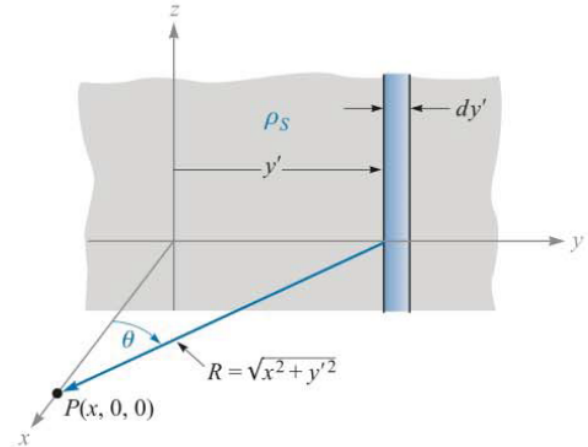
$R$  é a intensidade do vetor  $R$ , o segmento de reta orientado do ponto onde a carga pontual  $Q$  está posicionada até o ponto onde  $E$  é desejado, e de que  $a_R$  é o vetor unitário na direção de  $R$ . Posicionando  $Q_1$  no centro do sistema de coordenadas esféricas, então o vetor  $a_R$  se torna o vetor unitário radial  $a_r$ , e  $R$  é  $r$ . Logo:

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r^2} a_R \quad (4)$$

### B. CAMPO DE UMA LÂMINA DE CARGA

Nesta configuração de lâminas infinitas de cargas tem uma densidade uniforme de  $\rho_s$  C/m<sup>2</sup>. Esta distribuição de cargas pode ser utilizada frequentemente para aproximar a distribuição encontrada nos condutores de uma linha de transmissão do tipo fita ou em um capacitor de placas paralelas, haja vista que cargas estáticas posicionam-se na

superfície dos condutores, não no interior dos mesmos. Por essa razão,  $\rho_s$  é comumente onhecida como como densidade superficial de carga.



**Figura 1.** Uma lâmina infinita de cargas no plano yz, um ponto genérico  $P$  no eixo  $x$  e a linha de cargas de largura diferencial utilizada como o elemento na determinação do campo em  $P$  por  $dE = \rho_s dy' a_R / (2\pi\epsilon_0 R^2)$  (6)

Posicionando uma lâmina de cargas no plano yz considerando a simetria. Observa-se primeiramente que o campo não pode variar com  $y$  ou com  $z$ , e assim têm-se os componentes  $y$  e  $z$ , originados pelos elementos de carga simetricamente posicionados em relação ao ponto no qual deseja-se calcular o campo, se cancelam. Logo apenas  $E_x$  está presente, e esse componente é função de  $x$  somente. Diante dos vários métodos para avaliar esse componente utilizar-se-á o campo de uma linha infinita de cargas [Eq.5] dividindo a lâmina infinita em fitas de largura diferencial. Uma fita desse tipo é mostrada na Figura 1. A densidade linear de carga, ou carga por unidade de comprimento, é  $\rho_l = \rho_s dy'$ , e a distância dessa linha de cargas até o ponto genérico  $P$  no eixo  $x$  é  $R = \sqrt{x^2 + y'^2}$ . A contribuição para  $E_x$  em  $P$  dessa fita de largura diferencial é:

$$E = \frac{\rho_l}{2\pi\epsilon_0 R} a_R \quad (5)$$

$$dE_x = \frac{\rho_s dy'}{2\pi\epsilon_0 \sqrt{x^2 + y'^2}} \cos\theta = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} \frac{xdy'}{x^2 + y'^2} \quad (6)$$

Adicionando o efeito de todas as fitas,

$$E_x = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{xdy'}{x^2 + y'^2} = \frac{\rho_s}{2\pi\epsilon_0} tg^{-1} \frac{y'}{x} \quad (7)$$

Se o ponto  $P$  tivesse sido escolhido no lado negativo do eixo  $x$ , então

$$E_x = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} \quad (8)$$

pois o campo está sempre direcionado de forma a sair da carga positiva. Essa dificuldade no sinal é quase sempre superada pela especificação de um vetor unitário  $a_N$ , o qual

é normal à lâmina e direcionado no sentido para fora, ou para longe dela. Então

$$E = \frac{\rho_s}{2\epsilon_0} a_N \quad (9)$$

Esse é um resultado surpreendente, pois o campo é constante em intensidade, em direção e sentido. Ele é tão forte a um milhão de quilômetros da lâmina quanto é junto a superfície. [6]

De posse dos conceitos apresentados, algumas considerações devem ser feitas para realizar o cálculo de campo elétrico para condutores finitos, são elas:

- A permissividade relativa do ar é considerada unitária conforme a equação (110), entretanto uma correção deve ser feita para tratar de correntes alternadas acima do solo, pois o solo é um condutor de eletricidade;
- Os condutores de uma subestação se encontram a uma altura finita do solo e deste isolado, de maneira que o campo elétrico é afetado pela proximidade do solo. Os condutores comportam-se como capacitores;
- a permissividade relativa do ar é considerada unitária, conforme é ilustrado na equação (110);
- a terra é considerada como um condutor perfeito, isto é válido devido a reatância dielétrica do ar, que para os campos quase estáticos (60 Hz) é dado pela equação (111). [7]

## II. JUSTIFICATIVA

A energia elétrica está intrínseca ao cotidiano de bilhões de pessoas. E juntamente com o fluxo da energia temos o Campo Eletromagnético gerado pelos condutores e equipamentos elétricos. O campo eletromagnético desde o final da década de 70, é objeto de estudos a cerca das interações do mesmo com o corpo humano, as opiniões se dividem e as conclusões ainda estão longe de chegarem ao fim.

Existem muitos trabalhadores em diferentes ocupações que estão sujeitos à exposição de um alto campo elétrico. Assim como civis que eventualmente morem no entorno de linhas de transmissão ou qualquer outra situação que os coloque em contato com Campos Eletromagnéticos. Considerando a exposição desses trabalhadores e civis, e os estudos a cerca deste assunto, uma das soluções encontradas é observar os níveis suportáveis para a exposição humana – (população geral, ocupacional).

No Brasil, esses níveis foram determinados e estão dispostos desde 2009 na Lei nº 11.934 que definiu limites à exposição humana a campos elétricos e magnéticos associados ao funcionamento de sistemas de energia elétrica. Os limites adotados pela Lei baseiam-se nos indicadores recomendados pela Organização Mundial de Saúde – OMS, que têm como fundamento estudos científicos biológicos e epidemiológicos sobre os possíveis efeitos dos campos elétricos e magnéticos no ser humano.

A OMS, por sua vez, adota os limites recomendados pela Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação

Não Ionizante – ICNIRP para a exposição humana a campos elétricos e magnéticos em baixa frequência. [10]

|                       | Instalações em 50 Hz  |                      | Instalações em 60 Hz  |                      |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
|                       | Campo Elétrico (kV/m) | Campo Magnético (μT) | Campo Elétrico (kV/m) | Campo Magnético (μT) |
| Público em Geral      | 5,00                  | 200,00               | 4,17                  | 200,00               |
| População Ocupacional | 10,00                 | 1000,00              | 8,33                  | 1000,00              |

**Figura 2.** Níveis de Referência de Campo Elétrico e Magnético para Instalações em 60 Hz - NBR 416/2010

## III. OBJETIVOS

### A. OBJETIVO GERAL

Elaborar um sensor protótipo com capacidade de monitoramento contínuo do Campo Elétrico com base em estudos do comportamento do mesmo com aplicação em locais que necessitem da observância dos níveis da fonte - subestações, linhas de transmissão e áreas urbanas próximas de LT - para os parâmetros permitidos para exposição humana.

### B. OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Construir um sensor com capacitores de placas paralelas;
- Testar o funcionamento e realizar as correções;
- Redigir os relatórios de acompanhamento e o artigo sobre o trabalho.

## IV. METODOLOGIA

Para a realização projeto foram realizadas pesquisas de material em linguagem adequada e atualizada para dimensionamento de capacitores e compreensão do funcionamento dos sensores de medição do campo elétrico, Usuário visualiza dados.

### A. MEDIDOR DE CAMPO ELÉTRICO

O Medidor de Campo Elétrico (EFM - do inglês Electric Field Mill) é um sistema de medição de alta tensão ou mais precisamente de intensidade de campo elétrico. É usado às vezes a bordo do avião por agências de meteorologia medindo o potencial do campo elétrico em nuvens, a bordo de satélites para medir campos elétricos no espaço e também utilizado por indústrias para proteção de equipamentos sensíveis e funcionários em campo.[11]

### B. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Se uma placa condutora for conectada em um resistor de carga de valor elevado que está conectado à terra, e em seguida, exposta a um campo elétrico, será induzida uma carga na placa, conforme apresentado na Figura 2 [8].

A corrente que flui em  $R_L$  é resultado da carga na placa de medição, que produz uma tensão (V) através do resistor  $R_L$ . Esta tensão pode então ser amplificada com uma eletrônica sofisticada. Na prática, o resistor  $R_L$  é substituído por um amplificador. De acordo com o diagrama.

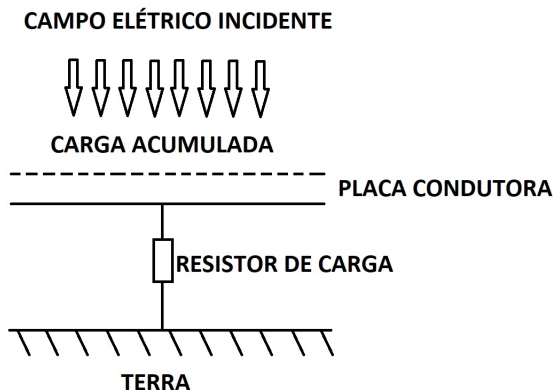


Figura 3. Princípio de funcionamento do sensor

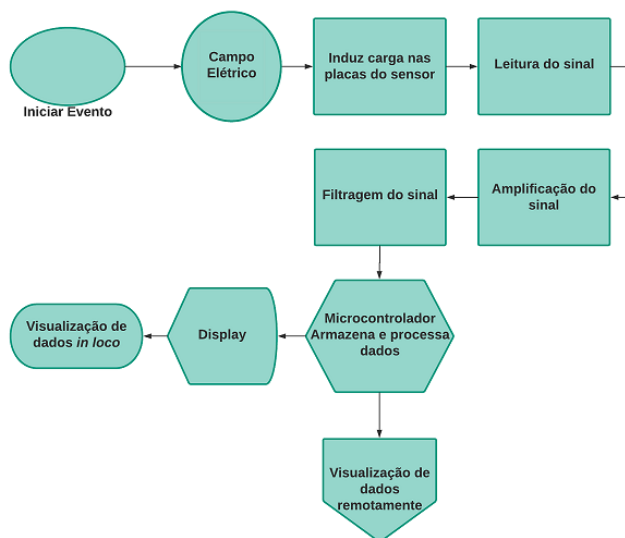


Figura 4. Fluxograma do funcionamento do protótipo

### C. MONTAGEM DO GERADOR DE CAMPO

Material utilizado:

- Transformador de forno micro-ondas;
- Fios condutores (2,5mm – 6mm)
- Plug

Para realização dos experimentos com o protótipo do sensor, utilizou-se o transformador de um forno micro-ondas, que gera uma tensão senoidal de 2kV. Em primeiro momento foram testados os enrolamentos pra verificar o funcionamento e garantir usar a tensão alta e senoidal que interessa ao projeto.

Em seguida a tensão é aplicada a duas placas de vidro, cujos dois lados estão envoltos em material condizente (papel laminado). As placas tem uma área total de  $1764\text{cm}^2$ , a área do material condizente é de  $1764\text{cm}^2$ .

Nessas condições tem-se um Campo Elétrico de 12,9V/m, 60Hz.

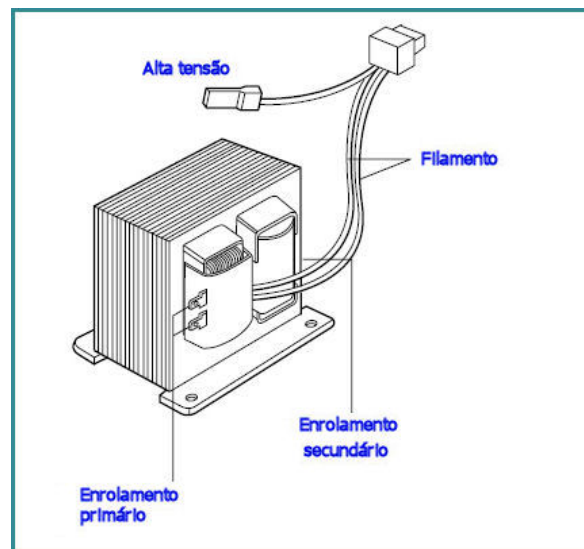


Figura 5. Esquema básico de um transformador de micro-ondas

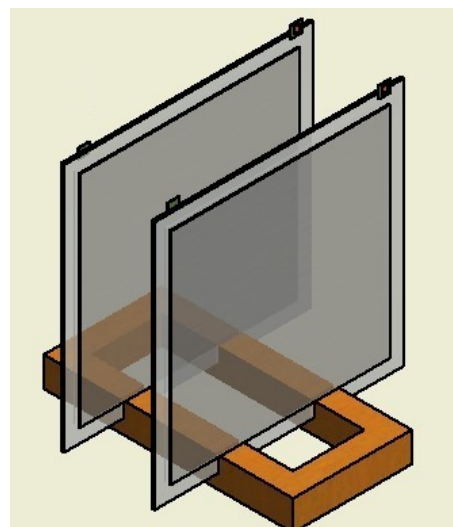


Figura 6. Placa utilizada para gerar o campo elétrico

### D. DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE CAMPO ELÉTRICO (FIEL MILL, EFM)

Material utilizado:

- Placa de fenolite 20x30cm Espessura 0,8mm;
- Cabo coaxial
- Multímetro

O sensor foi montado utilizando placa de fenolite e cabo coaxial. A área do sensor foi feita a partir do processo de corrosão da placa com perclorato de ferro. A área do cobre ficou definida como  $1\text{cm}^2$ , os cabos são conectados numa área à parte de  $0,25\text{cm}^2$ . As placas são postas paralelas com o material condizente para dentro. Utilizamos uma régua para fixar as placas a distância de 0,5cm uma da outra.

O uso do cabo coaxial se deve ao fato dele ser constituído por um fio de cobre condutor, revestido por um material isolante e rodeado de uma blindagem. Visando

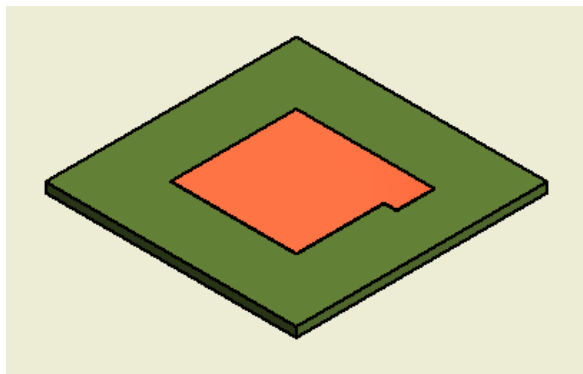


Figura 7. Placas do sensor (capacitor de placas paralelas)

assim diminuir os efeitos de sinais externos sobre o sinal que se desejava transmitir.

Assim que fixadas as placas do sensor (placas de fenolite), na distância determinada, e pronta a ligação do transformador às placas grandes - gerando o campo elétrico, o sensor era posicionado entre as placas maiores, e era possível ver a tensão no multímetro. Procedimento acontecia conforme as fotos a seguir:

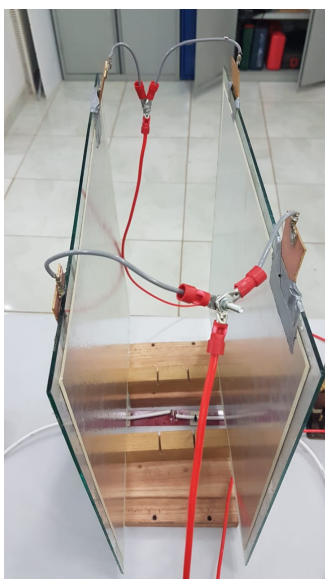


Figura 8. Ligação do Transformador para as placas maiores

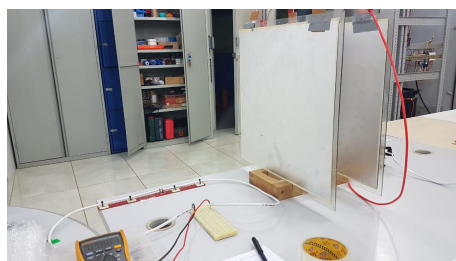


Figura 9. Sensor sendo testado próximo ao campo gerado

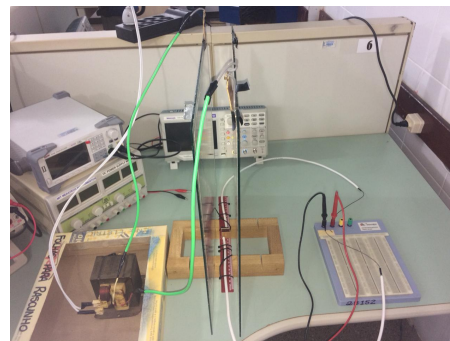


Figura 10. Teste 1

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões medidas durante os experimentos estão relacionadas na tabela abaixo. Percebemos que mesmo com a utilização de um cabo blindado, o sensor ainda sofre bastante interferência, dependendo da distância e da posição em que se encontra do campo elétrico gerado.

| Nº da leitura | Campo Gerado         |                       |                                |                                | Capacitor de Placas Paralelas |                                |         |            | Obs:                                                      |
|---------------|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------|------------|-----------------------------------------------------------|
|               | Tensão Aplicada (kV) | Área das Placas (cm²) | Distância entre as placas (cm) | Intensidade Campo Gerado (V/m) | Área das Placas (cm²)         | Distância entre as placas (cm) | Posição | Tensão (V) |                                                           |
| 1             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 1                              | PERP.   | 2,19       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 2             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,8                            | PERP.   | 2,3        | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 3             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,6                            | PERP.   | 2,4        | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 4             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PERP.   | 1,5        | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 5             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PERP.   | 1,2        | Ao lado das Placas Grandes. Posição perpendicular. D=14cm |
| 6             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PARAL.  | 4,32       | Ao lado das Placas Grandes. Posição perpendicular. D=14cm |
| 7             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PERP.   | 0,394      | Ao lado das Placas Grandes. Posição perpendicular. D=1m   |
| 8             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PARAL.  | 0,939      | Ao lado das Placas Grandes. Posição perpendicular. D=1m   |
| 9             | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 1                             | 0,5                            | PARAL.  | 0,616      | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 10            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 4                             | 1                              | PERP.   | 6,2        | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 11            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 4                             | 0,8                            | PERP.   | 7,76       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 12            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 9                             | 1                              | PERP.   | 10,3       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 13            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 9                             | 0,8                            | PERP.   | 12,4       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 14            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 16                            | 1                              | PERP.   | 14,5       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |
| 15            | 2                    | 1764                  | 15,5                           | 12,9                           | 16                            | 0,8                            | PERP.   | 15,1       | Entre as Placas Grandes. Posição perpendicular.           |

Figura 11. Tabela de Medições.

Neste gráfico é apresentado o comportamento dos valores acima tabelados:

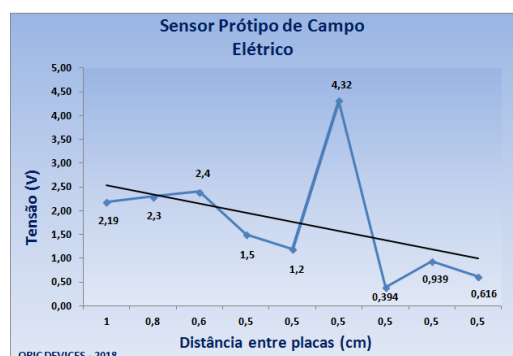


Figura 12. Curva da tensão x distância entre as placas do sensor.

## VI. RECURSOS NECESSÁRIOS

Uso de materiais de baixo custo visando a otimização do projeto; Gasto inicial de R\$ 189,00 kit básico Arduino.

## VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do projeto obteve-se um largo conhecimento no funcionamento de campos eletromagnéticos. Contudo, o objetivo principal não foi alcançado: o protótipo final do sensor.

A relação entre o Campo Elétrico gerado e o sinal (ddp ou tensão) captada pelo sensor (capacitor de placas paralelas), não ficou estabelecida com o resultado dos experimentos realizados até a data de entrega do trabalho final. Dessa forma, continuar-se-á a buscar fundamentações teóricas para comprovação da ideia inicial do projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### Referências

- [1] ANEEL, Resolução Normativa nº 398/2010. Dispon [www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf](http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010398.pdf)
- [2] DENO, D. W. Transmission Line Fields. IEEE Transaction on Power Apparatus and System, vol. PAS-95, no. 5, Oct. 1976.
- [3] KANYA, M. K.; RASJESH, K. O.; NAMBUDIRI, P. V. et al. Computation of Electrical Environmental Effects os Transmission Lines. IEE High Voltage Enginneering Symposium, v. 2, n. 467, p. 160 – 163, Aug. 1999.
- [4] HITCKCOCK, R. TIMOTHY.; PATTERSON, M. ROBERT. Radio-Frequency and ELF Electromagnetic.1. Ed. John Wiley Sons, Inc., 1995.
- [5] LOPES, A. A. Cálculo da Distribuição de Campo Elétrico e Indução Magnética em Subestações de Energia e Linhas de Transmissão. Recife, 2009.
- [6] HAYT, W. H. Eletromagnetismo [recurso eletrônico]. Revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. – 8 ed. Porto Alegre, 2013.
- [7] MELO NETO, M. T. Rearranjo Otimizado dos Feixes de Condutores de Linhas de Transmissão com o FocoCentrado na Minimização de Impactos Eletromagnéticos. Recife, 2007.
- [8] P.W. Winn. Eletric field meter - e 100 principle of operation.In Disponível em: <http://www.ee.nmt.edu/~langmuir/E100.html>.
- [9] VITOLDO, S. F. Desenvolvimento de um Sensor de Campo Elétrico Alternado com Transmissão por Fibra-Óptica. Curitiba, 1996.
- [10] ANEEL AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/campos-eletricos-e-magneticos1> acesso em: 05 de dezembro
- [11] SILVA, Valéria C.;Sensor para medição do campo elétrico - Campinas, SP: [s.n.], 2009.