



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EFEITO CORONA: CARACTERIZAÇÃO E CÁLCULO DO
GRADIENTE CRÍTICO VISUAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR**

DIEGO COUTINHO RODRIGUES

Orientador: José Maurício de Barros Bezerra

RECIFE, AGOSTO / 2014

Universidade Federal de Pernambuco-UFPE
Centro de Tecnologia e Geociências-CTG
Departamento de Engenharia Elétrica-DEE
Curso de Engenharia Elétrica



**EFEITO CORONA: CARACTERIZAÇÃO E CÁLCULO DO
GRADIENTE CRÍTICO VISUAL**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
POR**

Diego Coutinho Rodrigues

Professor Orientador: José Maurício de Barros Bezerra

Agosto/2014

Catálogo na fonte
Bibliotecária: Rosineide Mesquita Gonçalves Luz / CRB4-1361 (BCTG)

R696e Rodrigues, Diego Coutinho.
 Efeito Corona: caracterização e cálculo do gradiente crítico visual /
Diego Coutinho Rodrigues. – Recife: O Autor, 2014.
 44f., il., figs., gráfs., tabs.

 Orientador: Prof. Dr. José Maurício de Barros Bezerra.
 TCC (Gaduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.
 Inclui Referências.

 1. Engenharia Elétrica. 2. Efeito Corona. 3. Gradiente. 4. Cálculo. 5.
Efeito. 6. Corona. I. Bezerra, José Maurício de Barros (Orientador). II.
Título.

621.3CDD (22.ed) UFPE/BCTG-2014/ 222

AGRADECIMENTOS

Á Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

Ao meu orientador, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube.

Aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Tendo em vista o que foi exposto neste trabalho, pode-se concluir que o efeito corona é caracterizado por descargas parciais que ocorrem quando o valor do gradiente de potencial superficial de um condutor excede o valor do gradiente crítico ali presente, produzindo ruídos e luminescência. Tal efeito pode ocorrer em diversos equipamentos elétricos. No que diz respeito às linhas de transmissão e seus componentes, a ocorrência de corona pode causar ao sistema e ao meio ambiente algumas consequências como: ruídos auditivos, rádio interferência, tv Interferência e perdas de energia.

Foi mostrado que paralelamente aos avanços tecnológicos no âmbito da engenharia, várias pesquisas e estudos sobre o fenômeno corona vêm sendo realizadas, estas visam métodos para a redução do efeito corona e suas consequências. Dentre as mais bem sucedidas, podemos citar o desenvolvimento do equipamento chamado de anel anti-corona, o qual além de melhorar significativamente a distribuição de tensão ao longo da cadeia de isoladores, reduz a manifestação do efeito corona em suas ferragens. Outros equipamentos como fitas e vernizes anti-corona também foram desenvolvidos nestes últimos anos. Entretanto, uma das técnicas de projeto para combater o corona mais utilizada está no redimensionamento da geometria da linha, introduzindo-se feixes de condutores por fase, o que permite a redução do gradiente superficial imposto aos condutores, principal grandeza elétrica responsável pela manifestação do efeito corona.

Por fim, este trabalho fez uma descrição matemática do efeito corona visual, caracterizando como se dá o cálculo analítico de um dos fatores fundamentais para a sua ocorrência, o gradiente crítico visual. Sobre este foi analisada situações problemas onde seu valor influenciava diretamente no surgimento ou não do efeito corona, e como parâmetros simples como a temperatura e a conservação de cabos poderia influenciar neste surgimento. Finalizando com a proposta de uma nova pesquisa baseada no uso de ferramentas computacionais, que fizesse o uso do método dos elementos finitos, para calcular o valor do gradiente superficial dos condutores de uma linha de transmissão.

Palavras-chave: Corona. Gradiente. Cálculo. Efeito.

ABSTRACT

In view of what has been stated in this paper, we can conclude that the corona is characterized by partial discharges that occur when the value of the gradient being of a conductive surface potential exceeds the critical value of the gradient present there, producing noise and luminescence. This effect can occur in various electrical equipment. With regard to the transmission lines and components, the occurrence of corona can cause to system some result as audio noise, radio interference, television interference and energy loss.

It was found that several surveys and studies on corona phenomenon have been carried out of these methods aim to reduce the corona effect and its consequences. Among the most successful, we can mention the development of equipment called anti-corona ring, which in addition to significantly improve the stress distribution along the insulator string, reduces the manifestation of the corona effect on their hardware. Other equipment such as tapes and varnishes anti-corona have also been developed in recent years. However, one of the design techniques to combat the corona is used in scaling the geometry of the line, introducing bundles of conductors per phase, which allows to reduce the gradient imposed on the conductive surface, the main electrical quantity responsible for the manifestation of the effect corona.

Finally, this paper made a mathematical description of the visual corona, featuring the analytical calculation of one of the key factors for its occurrence, the critical gradient visual. This situation was examined problems that value of gradient has directly influence in appearance or not of the corona effect, and as temperature and conservation of cables could influence the appearance. Ending with the proposal of a new approach based on the use of computational tools research, which made use of the finite element method to calculate the surface gradient of the conductors of a transmission line.

Keywords: Corona. Gradient. Calculation. Effect.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	3
RESUMO.....	5
ABSTRACT.....	6
SUMÁRIO	7
LISTA DE FIGURAS	8
INTRODUÇÃO	10
1 Efeito corona	11
1.1 <i>Alusão histórica.....</i>	<i>11</i>
1.2 <i>Caracterização.....</i>	<i>12</i>
2 Consequencias.....	15
2.1 <i>Introdução às consequências: Um olhar geral</i>	<i>15</i>
2.2 <i>Introdução às consequências: Efeito Corona.....</i>	<i>16</i>
2.3 <i>Ruídos Auditivos</i>	<i>17</i>
2.4 <i>Rádio Interferência.....</i>	<i>20</i>
2.5 <i>TV Interferência</i>	<i>22</i>
2.6 <i>Perdas Por Corona</i>	<i>23</i>
3 Possíveis Soluções.....	24
3.1 <i>O contexto</i>	<i>24</i>
3.2 <i>Alternativas: Anel Anti-Corona.....</i>	<i>25</i>
3.3 <i>Alternativas: Vernizes e Fitas Anti-Corona</i>	<i>26</i>
3.4 <i>Alternativas: Atenuador de Efeito Corona.....</i>	<i>27</i>
3.5 <i>Alternativas: Capas de Neoprene e Geometria dos Condutores</i>	<i>28</i>
4 Gradiente Crítico Visual.....	29
4.1 <i>Definição.....</i>	<i>29</i>
4.2 <i>Gradiente de Potencial na superfície dos Condutores</i>	<i>31</i>
4.3 <i>Cálculo do Gradiente Crítico Visual: Situação Problema.....</i>	<i>34</i>
4.1.1 <i>Situação Problema: 1</i>	<i>35</i>
4.1.2 <i>Situação Problema: 2.....</i>	<i>36</i>
4.1.3 <i>Situação Problema: 3.....</i>	<i>39</i>
5 Proposta de Novas Pesquisas	41
6 Conclusão	42
7 Referências Bibliográficas	43

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Representação do Fogo de Santelmo pelos marinheiros do séc. XVI
Fonte: Termolay- Manutenção de transformadores.
Disponível em : <http://www.termolay.com.br/curiosidades.html>.....10
- Figura 2. Efeito Corona
Fonte: LEÃO, R. M. Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão [recurso eletrônico]. Porto Alegre, EDIPUCRS, 2008.p.146.....11
- Figura 3. Interferência na TV causada por linha de alta tensão
Fonte: ANACOM- Autoridade Nacional de Comunicações, Portugal.
Disponível em : <http://www.electronica-pt.com/content/view/244/>.....22
- Figura 4. Anel Anti-Corona (em liga de alumínio)
Fonte: Indústria de Conectores Elétricos NEMA Ltda.
Disponível em : <http://nemaconectores.com.br/home/?portfolio=09>.....25
- Figura 5. Arco entre o anel anti-corona e o isolador de porcelana
Fonte: Print Screen de vídeo do home page termonautas.
Disponível em :
<https://www.facebook.com/video/video.php?v=121585297989200>.....26
- Figura 6. Fita Anti-Corona
Fonte: Chhaperia Mica Product.
Disponível em :
http://www.micagroup.net/inner_pages/pet_fabric_anti_corona_tape.html.....28
- Figura 7. Verniz Anti-Corona
Fonte: DREIGOT
Disponível em :
http://www.dreigot.com/index.php?main_page=product_info&cPath=2&products_id=37&zenid=g4r57olq3uvrqjncso9605j774.....28
- Figura 8. Atenuador de efeito corona
Fonte: PLP - PREFORMED LINE PRODUCTS COMPANY.
Disponível em :

<http://www.plp.com.br/site/telecomunicacoes-catalogo/item/17-atenuador-de-efeito-corona-corona-coil>.....29

Figura 9. Deformação de uma gota de água sob ação de um campo elétrico de um condutor

Fonte: TALYULI, V.S. Apostila de Sistemas Elétricos de Potência II. CEFETES.

Vitória,2005.....32

Figura 9. Campo elétrico de um condutor cilíndrico no espaço

Fonte: TALYULI, V.S. Apostila de Sistemas Elétricos de Potência II. CEFETES.

Vitória,2005.....33

Figura 11. Campo Elétrico de Condutores Paralelos com Cargas de Sinais Opostos

Fonte: FUCHS, R.D. Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. P 473. Rio de Janeiro,1977.....34

INTRODUÇÃO

Vários fenômenos que até pouco tempo não eram explicados pela ciência, hoje além de possuírem explicações a respeito de sua origem, são objetos de estudos mais avançados, tornando possível em alguns casos até mesmo o seu controle.

A exemplo disto temos o efeito corona, efeito causado pelas descargas parciais de condutores eletrizados que podem vir a causar uma luminescência ao redor do condutor, ruídos audíveis e interferências eletromagnéticas no ambiente, que era considerado como fenômeno divino pelos marinheiros do século XVII e hoje possui grande influência no que se refere à sistemas elétricos de potência.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma caracterização de tal fenômeno, tornando possível um melhor entendimento do mesmo. Para isso o trabalho foi dividido em uma caracterização de seu surgimento, abordando fatos históricos e etapas detalhadas de sua formação, tornando possível à compreensão do que é o efeito corona. Em seguida temos dois capítulos mais atuais, baseado no que representa o efeito corona do ponto de vista atual, onde é abordado os efeitos negativos do efeito corona, tanto para o sistema elétrico como para os mais diversos públicos, e em seguida foi comentado as possíveis soluções para reduzir o fenômeno corona..

Por fim, foi realizada uma abordagem matemática sobre o gradiente crítico visual, parâmetro esse de suma importância para o efeito corona, por ser determinante para o surgimento ou não do efeito visual do corona.

1 EFEITO CORONA

“Marinheiros alegam ver “chamas” azuis saindo como tochas das extremidades de mastros desde tempos primórdios. Eles deram a esse misterioso fenômeno o nome do patrono dos marinheiros - Santo Erasmo, que foi corrompido para Santelmo. Os marinheiros consideravam o fogo de santelmo um bom presságio, pois ele significava que uma tempestade estava se acalmando [...] [24]”.

1.1 Alusão histórica

Dentro de todo o contexto que se aloca os estudos no ramo da eletricidade e suas subáreas, encontram-se alguns fenômenos que para alguns leigos ou pouco entendidos de algumas características elétricas, poderiam causar desde um espanto, até uma admiração ao certo fenômeno em questão. O possível motivo desse misto de sentimentos pode ser atribuído ao fato de que a eletricidade nos dias atuais é algo tão comum, mas ao mesmo tempo de tão difícil compreensão, isso se tomarmos como base para esse argumento o princípio básico que não somos capazes através da visão, ratificar varias coisas das quais somos habituados a escutar, como ‘corrente elétrica’, ‘campo eletromagnético’, ‘campo elétrico’ etc.

Entretanto toda essa atmosfera de mistério acerca dos fenômenos elétricos não é de agora, no livro *Os Lusíadas*, de 1572 [1], encontramos relatos sobre um fenômeno elétrico até então misterioso:

*“Vi, claramente visto, o lume vivo
Que a marítima gente tem por santo,
Em tempo de tormenta e vento esquivo,
De tempestade escura e triste pranto.
Não menos foi a todos excessivo
Milagre, e cousa, certo, de alto espanto,
Ver as nuvens, do mar com largo cano,
Sorver as altas águas do Oceano.”*

Vale salientar que historicamente na etapa de desenvolvimento humano, as coisas que não conseguiam ser explicadas pelo homem, eram atribuídas a divindades, Deus ou deuses, e nesse caso não foi diferente, o nome dado pelos navegantes ao fenômeno descrito por camões em seu livro, foi de “fogo de santo elmo”, fazendo alusão ao santo invocado pelos marinheiros do Mediterrâneo sob uma tempestade. Hoje com o avanço da tecnologia e estudos na área elétrica, chegamos a descoberta que o “fogo de santelmo” que amedrontava aque-

les marinheiros do século XVI nada mais era do que o fenômeno descrito como Efeito Corona.



Figura 1 – Representação do Fogo de Santelmo pelos marinheiros do séc. XVI

1.2 Caracterização

Na realidade o que ocorria geralmente nos navios, era que em ocasiões de fortes trovoadas as pontas metálicas dos mastros dos navios ficavam eletrizadas, acarretando uma alta concentração do campo elétrico atmosférico ao seu redor, assim as moléculas do ar ao redor dessas pontas metálicas eram ionizadas, provocando o surgimento de pequenas descargas elétricas (irradiações luminosas) muitas vezes acompanhadas de ruído sonoro, efeito muito similar ao que ocorre nas linhas de médias e altas tensões, denominado de efeito corona.

Para descrever o efeito corona presente nas linhas de médias e altas tensões vamos supor a seguinte situação: um condutor aéreo que possui um certo valor de corrente, pela lei de Gauss sabemos que surgirá em torno do condutor um campo elétrico, que obedece a seguinte equação [3]:

$$q = \varepsilon \oint E dA \quad (1.1)$$

onde,

$$q = \text{carga elétrica}$$

$\varepsilon = \text{constante de permissividade elétrica no vácuo}$

$E = \text{campo elétrico}$

Quando o valor desse gradiente de potencial, campo elétrico, possuir valor maior que um valor limitante denominado gradiente crítico visual, os átomos do ar irão se ionizar, em outras palavras, quando o campo é forte o suficiente é iniciada a formação de partículas carregadas, através de choques entre os elétrons livres que existem na atmosfera em uma relação proporcional. Quanto maior o valor do potencial existente maior será os choques e consequentemente o efeito na forma de luminescência, provocando uma coloração azul violeta sob a forma de uma coroa ao redor do condutor, caracterizando assim o efeito corona [2].

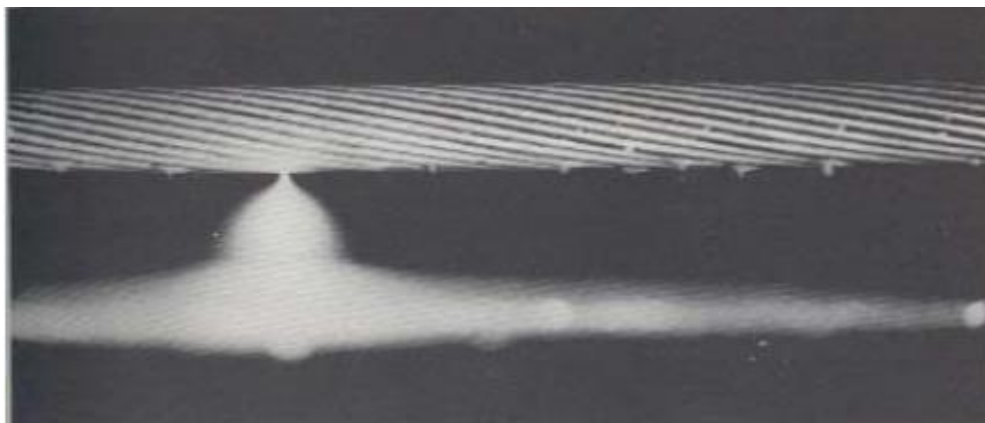


Figura 2 – Efeito corona em um condutor energizado

Logo podemos afirmar que a formação do efeito corona é totalmente dependente do valor do campo elétrico presente, pois os elétrons que ali estejam irão adquirir energia suficiente para dar início ao processo justamente proveniente deste campo. Vale salientar algumas características do campo elétrico citado, este possui valor máximo na superfície do condutor e tem sua intensidade reduzida inversamente proporcional a distância de um ponto ao centro do condutor. Ainda temos que para campos que não apresentam uniformidades em torno do condutor, a divergência de campo ali presente representará uma contribuição ao valor do campo, e que matérias externas como gotículas de água e poeira serão fontes pontuais de descargas.

Quanto aos elétrons, os mesmos podem produzir novos elétrons a partir do choque com outros átomos, a este processo é dado o nome de ionização por impacto, onde durante sua movimentação no campo elétrico, os elétrons livres colidem com átomos presentes na atmosfera, perdendo, nesses choques, parte de sua energia. Eventualmente, um elétron pode colidir com um átomo próximo com uma força necessária para excitá-lo, fazendo com que

o átomo atingido passe para um estado de energia mais elevado, alterando o estado orbital inicial, acarretando perda de parte da sua energia, para criar esse estado. Em sequência, o átomo atingido pode retornar ao seu estado inicial, liberando o excesso de energia em forma de calor, luz, energia acústica e radiações eletromagnéticas [4].

Apesar da total dependência do efeito corona à presença de um campo elétrico, o seu surgimento não está condicionado a qualquer valor de campo. Pelo contrário, o corona aparece na superfície dos condutores apenas quando o valor do gradiente de potencial aí existente excede o valor do gradiente crítico disruptivo do ar. Entretanto este valor de gradiente não é de natureza constante para todas as condições possíveis, podendo sofrer alterações sob diversas condições, tais como a pressão do ar, a presença do vapor d'água, o tipo de tensão aplicada e a fotoionização incidente, etc [5].

Uma observação pertinente é a respeito das condições climáticas, visto que é essa a condição que interfere com mais frequências os condutores das linhas elétricas, pelo simples fato da grande maioria deles ser aéreo e exposto. O gradiente disruptivo do ar tem seu valor reduzido na presença de chuva, facilitando assim o surgimento do efeito corona isso porque quando chove é criada uma trilha de água que adere ao condutor mesmo após o fim dessa chuva, essa trilha formada irá se separar formando gotículas até evaporar. Em alguns casos a água adere com maior força no condutor (hidrofilia) criando uma camada mais homogênea, em outra situação a força de adesão não é de valor tão elevado, criando uma camada irregular (hidrofobia), em relação ao gradiente o que temos é que a hidrofobia aumenta o valor de tensão interfacial entre a água e o condutor contribuindo para a redução do gradiente crítico disruptivo. Porém, o valor do gradiente limitante sob chuva não depende apenas do índice de precipitação, mas também da quantidade de gotículas de água que conseguem aderir à superfície dos condutores, tendo nos condutores novos o maior número de adesão [6][7][8][10].

Além disso, o efeito produz ozônio - um gás corrosivo que destrói equipamentos de linhas de potência e coloca em perigo a saúde humana, gera ruídos auditivos e interferências nos sinais de tv e rádio [20].

2 CONSEQUÊNCIAS

“A desembargadora Maria Erotides Kneip Baranjak, integrante da Terceira Câmara Cível do Tribunal de Justiça de Mato Grosso, determinou em decisão liminar a paralisação das obras de instalação das torres de transmissão de energia elétrica de 138kv da Subestação Cidade Alta [...] A magistrada firmou entendimento que a agravada, no caso a Rede Cemat, não observou os ditames da Lei nº 11.934/2009, que dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos (Agravado de Instrumento nº 499/2013, Comarca de Cuiabá [25]).

2.1 Introdução às consequências: Um olhar geral

Não é de hoje que os efeitos da exposição a campos elétricos e magnéticos ao ser humano vêm sendo estudados, existem documentos de meados da década de 60 [12] que demonstram a preocupação dos cientistas e estudiosos da época em relação ao assunto.

Basicamente existem dois tipos principais de radiações, as radiações ionizantes e as não ionizantes. As do tipo ionizantes são ondas eletromagnéticas de altíssima frequência (acima de 3 PHz) que possuem energia fotônica para gerar ionização, enquanto que as radiações não ionizantes fazem parte, em geral, da parcela do espectro eletromagnético em que a energia fotônica não possui valor suficiente para romper as ligações atômicas [13]. Em outras palavras, a radiação ionizante quando entra no corpo humano faz estragos, ela rompe as ligações entre moléculas, faz surgirem cargas elétricas onde antes não existia, e gera uma instabilidade no organismo de tal maneira que doenças como o câncer possa vir a surgir. Já a do tipo não ionizante, como as de uma linha de alta tensão, não provocam esses estragos, entretanto a exposição a ela por um longo período de tempo gera doença e como seria causada essa doença até hoje não foi totalmente provado.

Atualmente de acordo com estudos da Organização Mundial de Saúde (OMS), não há evidências de que a exposição humana a campos de caráter elétrico e eletromagnéticos cause efeitos adversos à saúde, desde que respeitados determinados limites. Esses limites aqui no Brasil são estabelecidos a partir de uma série de documentos da ICNIRP, Comissão Internacional de Proteção Contra Radiação Não Ionizante, entidade criada com o intuito de estudar e investigar as consequências ligadas a exposição de radiações não ionizantes ao corpo humano, entretanto outras entidades possuem alguns trabalhos na área como o Con-

selho Nacional em Proteção e Medidas de Radiação (NCRP), o Instituto Nacional Americano de Padrões (ANSI), e o Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) [14].

No que diz respeito a regulamentação deste assunto em território brasileiro, até o fim da década de 1990, não existia um instrumento normativo que estabelecesse as limitações da exposição à radiação eletromagnética não-ionizante. Apenas algumas normas do Ministério do Trabalho que tinham o intuito de estabelecer padrões de segurança para pessoas expostas à radiação em virtude de seu trabalho. Já em 1999, a Anatel aprovou o documento “Diretrizes para Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo (até 300 GHz)”, adotando na íntegra as orientações propostas pela IC-NIRP, posteriormente em 2002 a Resolução n.º 303 da Anatel, aprovou o Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 3 GHz [15]. E finalmente em 2009 foi criada a lei federal Lei nº 11.934/2009, que dispõe sobre limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, veja abaixo um trecho desta lei:

“O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Art. 1º Esta Lei estabelece limites à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, associados ao funcionamento de estações transmissoras de radiocomunicação, de terminais de usuário e de sistemas de energia elétrica nas faixas de frequências até 300 GHz (trezentos gigahertz), visando a garantir a proteção da saúde e do meio ambiente.

Parágrafo único. Estão sujeitos às obrigações estabelecidas por esta Lei as prestadoras de serviço que se utilizarem de estações transmissoras de radiocomunicação, os fornecedores de terminais de usuário comercializados no País e as concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviços de energia elétrica.

Art. 2º Os limites estabelecidos nesta Lei referem-se à exposição:

I – da população em geral aos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos; e

II – de trabalhadores aos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos em razão de seu trabalho.”

2.2 Introdução às consequências: Efeito Corona

A partir da descrição, e principalmente, do entendimento dos princípios básicos que determinam o surgimento do efeito corona, juntamente com uma visão geral das problemáti-

cas que envolvem o elevado campo elétrico e magnético que intrinsicamente está presente no efeito corona, daremos continuidade a este capítulo com uma abordagem das consequências ocasionadas pelo corona.

Além dos efeitos visuais, já descritos, o efeito corona provoca os seguintes fenômenos: ruídos auditivos, rádio interferência, tv Interferência e perdas de energia. As três primeiras apresentam caráter de poluição ambiental e ferem direitos da população em geral. Já as perdas devido ao efeito corona representam problemas econômicos. Geralmente esses efeitos ocorrem ao mesmo tempo, e estão diretamente relacionados com o valor do gradiente de potencial dos condutores

2.3 Ruídos Auditivos

Estudos apontam que a maior fonte de ruídos de um sistema elétrico de potência é proveniente dos transformadores e subestações, assim as linhas de transmissão pouco contribuíam para o aumento do nível de ruído. Entretanto com o aumento dos níveis de tensões, novas pesquisas apontaram que para níveis de tensões acima de 500 kV, a contribuição das linhas de transmissão devem ser consideradas.

Na prática um dos tipos de ruídos causados por uma linha de transmissão é devido a presença do efeito corona no condutores desta linha. Já que efeito corona, como já vimos, quando campo elétrico associado a um condutor de alta tensão possui um valor elevado, esse ioniza o ar próximo ao condutor, fazendo com que o ar ionizado tenha coloração azul e produza sons audíveis em forma de "estalos", só que esses “estalos” do efeito corona geralmente segue um padrão, se iniciando e parando 120 vezes por segundo, assim produzindo os ruídos denominados por muitos de “zumbido”. Geralmente aparece continuamente ao longo de um intervalo grande de frequências, entretanto, pode ir e vir produzindo ruídos, além de gerar ozônio, um gás corrosivo que destrói equipamentos de linhas de potência [2].

A seguir temos um depoimento de um morador vizinho a uma linha de transmissão, que serve como exemplo de um transtorno causado pelos ruídos de uma linha de transmissão, especificamente o causado pelo corona:

“[...] O ruído era contínuo (noite e dia) e semelhante ao som de uma abelha (Bzzzzzz) e mudava de tom aleatoriamente. Comecei a investigar o problema e descobrir que não era problema da instalação elétrica de minha casa [...] Na certeza de que o ruído era proveniente da rede elétrica de alta tensão que passa em frente de casa, entrei em contato com a ELE-TROPAULO (empresa de energia elétrica do Estado de São Paulo) [...] técnicos descobriram algumas fontes do problema como: objetos presos na rede elétrica de alta tensão como linhas de papagaio, arames (o que produz o chamado "efeito corona", ou seja, a propagação de energia para o ar devido a uma superfície pontiaguda presa à linha de energia)[...] . “ [Matéria extraída da lista de discussão radioescutas@yahoo.com.br]

A intensidade do ruído está relacionada com o valor do gradiente superficial de campo elétrico nos condutores e com a tensão de transmissão, níveis de perturbações do ruído audíveis crescem de acordo com o aumento do nível de tensão de operação dos sistemas de transmissão, além disso outro fator que interfere o nível de ruído são as condições superficiais e atmosférica em torno do condutor, assim o ruído aumenta com a umidade e chuva porque tornam o ar mais condutivo [2].

Em geral os ruídos causados pelo efeito corona acarretará num aumento do valor de pico dos ruídos totais, crescendo até cerca de 5 dB [2] , esse valor passa a ser bastante significativo se tomarmos como base que o ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), em seu submódulo 2.4 – Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão Aéreas [18], estabelece uma limitação para os níveis de ruídos auditivos no que diz respeito as linhas de transmissão, apresentando as seguintes condições :

“ 7.6.3 Ruído audível

7.6.3.1 O ruído audível no limite da faixa de segurança, quando a LT estiver submetida à tensão máxima operativa, deve ser, no máximo, igual a 58 dB (A) em qualquer uma das seguintes condições não simultâneas:

- (a) durante chuva fina (<0,00148 mm/min);*
- (b) durante névoa de 4 (quatro) horas de duração; ou*
- (c) durante os primeiros 15 (quinze) minutos após a ocorrência de chuva.”*

Fazendo a análise com uma subestação a contribuição sonora do ruído por corona também é significativa. Sabe-se que os transformadores foram projetados para funcionarem com baixo nível de ruído, esse nível é normalizado pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) na NBR-5356 onde os seguintes valores são encontrados [16] [17]:

- 75 dB - para transformadores de 30 MVA
- 77 dB - para transformadores de 40 MVA

O acréscimo de ruídos provenientes de corona ou qualquer outro efeito pode fazer com que o nível de ruído ultrapasse os limites aceitáveis visto que será adicionado ao ruído já existente, podendo trazer males tanto para trabalhadores da área como para a vizinhança, assim sendo a NR 15 estabelece valores aceitáveis para ruídos contínuos ou intermitentes que devem ser respeitados para a segurança de todos expostos [19], como é apresentado na tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Limites de Tolerância (LTs) para ruído contínuo ou intermitente.

Fonte: NR 15 [19]

Nível de ruído dB(A)	Máxima exposição diária permissível
85	8 horas
86	7 horas
87	6 horas
88	5 horas
89	4 horas e 30 minutos
90	4 horas
91	3 horas e 30 minutos
92	3 horas
93	2 horas e 30 minutos
94	2 horas
95	1 hora e 45 minutos
98	1 hora e 15 minutos
100	1 hora
102	45 minutos
104	35 minutos
105	30 minutos
106	25 minutos
108	20 minutos
110	15 minutos
112	10 minutos
114	8 minutos
115	7 minutos

2.4 Rádio Interferência

As descargas oriundas do efeito corona provocam pulsos de tensão e corrente de curta duração que são transmitidos pelas linhas de transmissão, causando o surgimento de campos eletromagnéticos próximos do condutor. As descargas ocorrem durante todo o ciclo da tensão aplicada, entretanto durante os semiciclos positivos são capazes de gerar ruídos que podem vir a interferir na recepção de ondas de rádio nas faixas de frequência das transmissões em amplitude modulada (AM), com mais frequência no intervalo de 500 a 1.600 kHz. Logo nos ciclos positivos é que são originadas as maiores interferências em ondas de rádio devido ao efeito corona [5].

Na teoria a rádio interferência proveniente das linhas de transmissão pode interferir em qualquer sinal de rádio frequência, sofrendo variação de acordo com uma série de fatores, tais como a distância da linha para o dispositivo de recepção, orientação da antena de recepção, geometria dos condutores da LT e condições climáticas [2].

O Operador Nacional do Sistema Elétrico, em seu submódulo 2.4 – Requisitos Mínimos para Linhas de Transmissão Aéreas [18], estabelece uma limitação para a rádio interferência permitida nas linhas de transmissão da seguinte forma:

“ 7.6.2 Rádio interferência

7.6.2.1 A relação sinal/ruído no limite da faixa de segurança, quando a LT estiver submetida à tensão máxima operativa, deve ser, no mínimo, iguala 24 dB, para 50% do período de 1 (um) ano. O sinal adotado para o cálculo deve ser o nível mínimo de sinal na região atravessada pela LT, conforme norma DENTEL ou sua sucessora.”

Nota-se que a norma é estabelecida não pela quantidade de ruído diretamente, e sim a partir de uma relação sinal/ruído que pode ser calculado seguindo uma determinada linha de raciocínio, que se inicia em saber que nos estudos relacionados com rádio interferência, a unidade padrão de medida de sinais, equivalente para interferência, é o decibel (dB), calculada da seguinte maneira:

$$dB = 20 \text{ Log } \frac{V_1}{V_2} \quad (2.1)$$

onde:

V_1 [μV/m]= intensidade de campo do sinal (ou da interferência);

V_2 [μV/m]= unidade de referência, geralmente igual a 1 [μV/m];

Com isso, se admitirmos uma hipótese que em determinado ponto de uma linha de transmissão durante a medição de um sinal de uma respectiva emissora qualquer, encontramos um valor de sinal V_S e um valor de ruído V_R , teremos que :

$$S(\text{dB}) = 20 \text{ Log } \frac{V_S}{1} \quad (2.2)$$

$$R(\text{dB}) = 20 \text{ Log } \frac{V_R}{1} \quad (2.3)$$

Como a relação desejada é Sinal/Ruído, encontraremos que :

$$S/R(\text{dB}) = 20 \text{ Log } \frac{V_S/V_R}{1} = 20 \text{ Log } \frac{V_S}{1} - 20 \text{ Log } \frac{V_R}{1} \quad (2.4)$$

Resultando em:

$$S/R(\text{dB}) = S(\text{dB}) - R(\text{dB}) \quad (2.5)$$

A tabela a seguir, extraída do livro de “Transmissão de energia elétrica; Fuchs, Rubens Dario” [5], dá uma noção dos efeitos diretos do valor desta relação (Sinal/Ruído).

Tabela 2 - qualidade de recepção em função da relação sinal/ruído

Fonte: Livro Transmissão de energia elétrica, pag.493 [5]

Relação Sinal/Ruído (dB)	Qualidade de Recepção	Classe de Recepção
32	Inteiramente satisfatória	A
27 a 32	Muito boa, fundo não obstrutivo	B
22 a 27	Razoavelmente boa, fundo bem evidente	C
16 a 22	Fundo muito evidente, voz humana facilmente inteligível	D
6 a 16	Voz humana inteligível, somente com intensa concentração	E
7	Voz humana ininteligível	F

Percebe-se que aquele valor de 24 dB mínimo estabelecido pela ONS, cai na faixa de valores em quem a relação sinal/ruído determina a qualidade do sinal como: “Razoavelmente boa, fundo bem evidente”, entretanto não é um sinal de boa qualidade por isso a determinação na norma de que esse sinal só permaneça nesta faixa por um período de 50% em um ano.

É importante ressaltar que o valor do ruído relacionado à rádio interferência não é um valor fixo, podendo esse sofrer variações. A partir do resultado de pesquisas e estudos na área, foi descoberto que a radio interferência está diretamente relacionada com vários fatores, logo tais fatores estão presentes em muitas das fórmulas utilizadas para o cálculo da rádio interferência, tais como: fator de superfície; frequência da energia irradiada; resistividade do solo; umidade relativa; densidade relativa do ar; velocidade do vento [5].

2.5 TV Interferência

As interferências do campo magnético presente no efeito corona em sinais de tv's são raras, isso se deve porque a largura da faixa de servidão, principalmente de linhas de transmissão e distribuição, é calculada levando em conta os níveis máximos de campo eletromagnético, exatamente para evitar este tipo de problema, além disso, é obrigação das concessionárias de energia manterem o nível de interferência abaixo dos níveis recomendados.

Entretanto o fato de ser "raro" não descarta totalmente a existência de tal interferência, assim o efeito corona, que também pode ocorrer em outros componentes das linhas, a exemplo dos isoladores e ferragens, pode a vir provocar o efeito denominado como TV Interferência, que nada mais é do que a interferência do sinal de campo provocado pelo efeito corona nas ondas de transmissão da TV. Normalmente ferragens com problemas, pinos foras de ajustes ou soltos criam a situação perfeita para o surgimento do efeito corona, este por sua vez podem vim a gerar pulsos eletromagnéticos nas faixas das frequências de "TV", provocando interferência ou ruídos nas recepções [4].



Figura 3 – Interferência na TV causada por linha de alta tensão

2.6 Perdas Por Corona

Para o surgimento de uma descarga corona, é necessária certa energia de gatilho para o início do efeito, essa energia necessária para tal efeito é proveniente do campo elétrico da linha. Com isso o sistema tem um decréscimo de energia, ocasionando prejuízo, visto que o campo presente nos condutores é grande parte inteiramente alimentado pela fonte de geração, esse fato causa um impacto ao sistema provocando de maneira geral uma perda de energia, justamente para alimentar o campo para o efeito da descarga corona. Todo esse processo despertou o interesse de cientistas e pesquisadores da área e ao estudar esse decréscimo ou perda de energia, pesquisadores constataram que as perdas por efeito corona em linhas, com altas tensões, podem variar de baixos valores de quilowatts por quilômetro até algumas centenas de quilowatts por quilômetro, a partir de variáveis tipos de condições atmosférica, ganhando certo destaque as condições de garoa ou chuva. As pesquisas também concluíram que as perdas médias representam apenas pequenas partes das perdas por efeito Joule, no entanto os valores de perdas máximas podem ter grande importância nas demandas dos sistemas elétricos, já que a geração precisaria de um reforço adicional para suprir essa nova demanda [2].

Para exemplificar o que foi dito, em estudos realizado nas linhas trifásicas de 500kV na Rússia, foi obtido os seguintes valores para perdas ocasionadas por efeito corona : perdas médias anuais da ordem de 12 kW/km de linha com o tempo bom ; valores de perdas máximas da ordem de 313 kW/km sob chuva e finalmente um valor de perda máxima na ordem de 374 kW/km sob garoa, adiantando um estudo que ainda faremos neste trabalho que tem como intensão mostrar que sob garoa o efeito corona é de certa forma mais crítico do que sob chuva [2].

3 POSSÍVEIS SOLUÇÕES

“7.6 Emissão eletromagnética

7.6.1 Corona visual

7.6.1.1 A LT, com seus cabos e acessórios, bem como as ferragens das cadeias de isoladores, quando submetida à tensão máxima operativa, não deve apresentar corona visual em 90% do tempo para as condições atmosféricas predominantes na região atravessada pela LT.” [18]

3.1 O contexto

A necessidade de reduzir os efeitos corona parte de vários fatores, que no geral estão relacionados com a redução de custos, segurança e bem estar do público ocupacional e geral, reduzir as perdas de energia e atender leis normativas vigentes. Um exemplo disso é o trecho da introdução deste capítulo, retirado de um dos submódulos da ONS, onde encontramos uma determinação normativa que estabelece o valor limite de existência de corona visual em torno das linhas de transmissões e seus equipamentos. Cabendo à concessionária de energia, seja esse o caso, propor alternativas e soluções para atender este normativo, estando sujeito caso não seja atendida a solicitação, de multa ou paralização do uso da linha. Além dessa questão normativa, vimos no capítulo anterior que a corona pode vir a causar interferências e ruídos e esses efeitos também estão limitados, assim sendo também sofrível de penalidades caso não sejam atendidos. Por fim , quando tratamos das perdas por efeito corona, atribuímos que a geração é a responsável por alimentar o campo durante o efeito corona, causando uma perda de energia no sistema, tendo esse que ser dimensionado com um valor excedente, justamente para suprir perdas ocasionais, resultando num impacto financeiro maior.

Diante disso vários métodos foram aplicados afim de amenizar o corona e consequentemente seus efeitos, atendendo todos os normativos existentes e reduzindo os custos e prejuízos decorrentes do efeito.

3.2 Alternativas: Anel Anti-Corona

Para reduzir os efeitos coronas pode ser previsto no projeto ou posteriormente por necessidade a adição de um novo componente ao sistema elétrico, o chamado anel anti-corona. Esse anel anti-corona pode ser construído por qualquer material condutor como ferro ou alumínio, podendo apresentar formatos das mais variadas formas (ovais, retangulares, circulares, triangulares e interrompidos, etc.) e dimensões variáveis, entretanto normalmente ele é mais encontrado na forma de um círculo. Sua principal função é de realizar uma distribuição adequada do campo eletromagnético, que geralmente possui característica pontual, no caso de um isolador, por exemplo, se concentrando na região do terminal, aumentando a probabilidade do surgimento do efeito corona naquele ponto [20].



Figura 4 – Anel Anti-Corona (em liga de alumínio)

No entanto a presença do anel anti-corona não garante 100% a não ocorrência do fenômeno corona, visto que para valores altos de tensões, mesmo com a distribuição de potencial feita pelos anéis equalizadores os valores podem atingir o valor do gradiente crítico e permitir a ocorrência do efeito corona, como na imagem abaixo, o efeito se manifestou entre o anel anti-corona e o isolador.

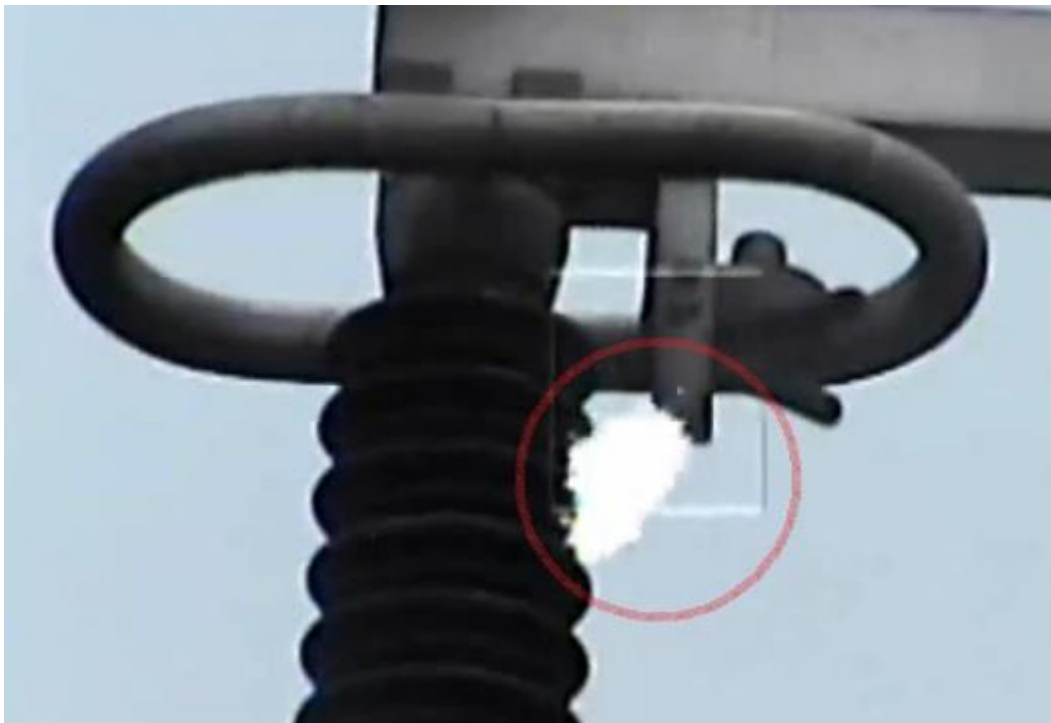


Figura 5 – Arco entre o anel anti-corona e o isolador de porcelana

3.3 Alternativas: Vernizes e Fitas Anti-Corona

O efeito corona pode vir a surgir nos enrolamentos de uma máquina elétrica ou em outras de suas partes, quando isso ocorre, a solução normalmente empregada para evitar um novo surgimento das descargas de corona, é a aplicação de fitas ou tintas com características específicas de condutividade elétrica sobre a superfície externa do isolamento, essas irão agir diretamente sobre a região desejada reduzindo o valor do gradiente de potencial local, visto que altera a condutividade do condutor, dificultando o surgimento do efeito corona.



Figura 6 – Fita Anti-Corona

A fita anti-corona é confeccionada a partir de tecido de fibra de poliéster interligada com fibra de vidro e impregnado com verniz anti-corona, tendo como objetivo prevenir o surgimento do efeito corona e prolongar a vida útil das máquinas elétricas e aparelhos elétricos. (Onde geralmente é utilizada as fitas) [21].



Figura 7 – Verniz Anti-Corona

3.4 Alternativas: Atenuador de Efeito Corona

O Atenuador de Efeito Corona (Corona Coil) é um equipamento projetado com a finalidade de reduzir os efeitos elétricos (efeitos corona) nas pontas das varetas metálicas de proteção dos conjuntos de ancoragem e suspensão para cabos de fibra óptica aéreo, esses cabos quando são instalados próximos as linhas de transmissões fica submetidos à campos elétricos gerados pelas LT, assim ficando susceptível ao surgimento de uma descarga e corona decorrente deste aumento de valor de campo [22].

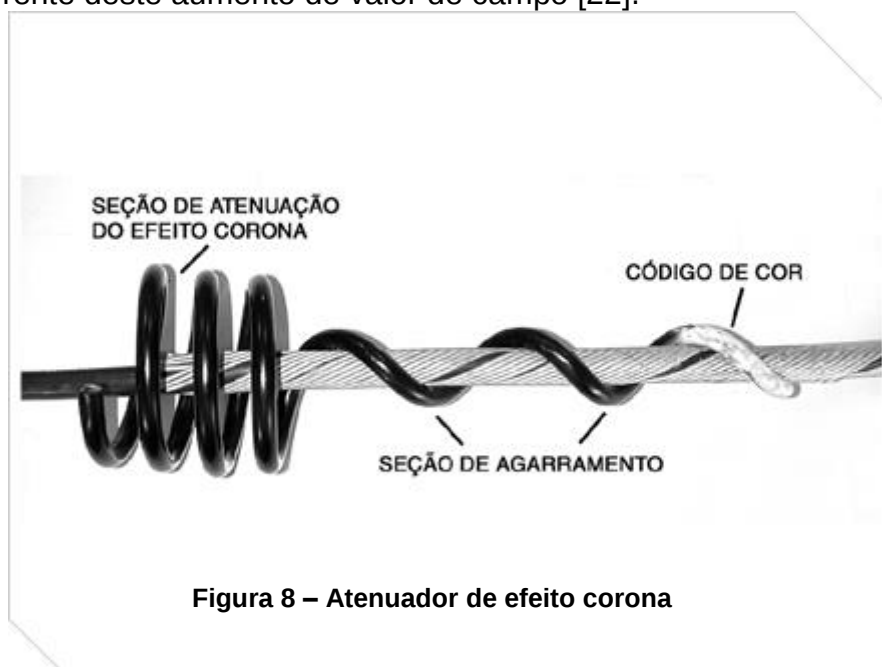


Figura 8 – Atenuador de efeito corona

3.5 Alternativas: Capas de Neoprene Geometria dos Condutores

Além de equipamentos e componentes especiais para a atenuação do efeito corona, outros métodos que não são a adição de um novo equipamento vêm sendo estudadas, uma delas é o envolvimento do condutor em capas de neoprene, tendo a função de reduzir o valor de campo, entretanto o alto custo desta solução impede o seu uso em grande escala. As pesquisas mais recentes apontam que a disposição dos condutores possuem relação direta com o valor do campo, e que a forma de polígono irregular vem sendo investigada como meio de reduzir os gradientes de potencial. O objetivo das pesquisas é encontrar a forma de melhor resultado, ou seja, a posição para cada subcondutor na periferia de um círculo, de forma que o gradiente resultante seja mínimo. Resultados preliminares dos estudos neste tema, apontam os parâmetros que têm maior influência nos níveis de campo são o; número de condutores em um feixe da fase e o diâmetro dos condutores da fase [2].

4 GRADIENTE CRÍTICO VISUAL

“Peek [9] verificou experimentalmente que o fenômeno das descargas de Corona somente se inicia com valores de gradientes mais elevados nas superfícies dos condutores, quando também se iniciam as manifestações luminosas. A esse valor de gradiente denominou gradiente crítico visual.” [5]

4.1 Definição

Previamente, para as posteriores análises é bastante interessante ter em mente alguns valores como referência, dos quais citamos: o gradiente crítico disruptivo do ar atmosférico, E_0 , é da ordem de 30,5 kV/cm em atmosfera-padrão de 20°C e pressão barométrica de 760 mm de Hg, e para a corrente alternada, o valor eficaz do gradiente disruptivo tem valor igual à $E_0 = 21,6$ kV/cm [5].

Pois bem, como foi escrito pelo livro do Fuchs e também comentado no primeiro capítulo deste trabalho, o condutor carregado atinge o gradiente crítico visual (E_{CRV}) quando o valor do gradiente crítico disruptivo é ultrapassado, a certa distância da superfície do condutor, isso é preciso para que o campo armazene energia suficiente para desencadear o processo. A essa distância é dada o nome de distância de energia e possui a seguinte formula:

$$Distância\ de\ Energia = \frac{0,301}{\sqrt{r}}\ cm \quad (4.1)$$

assim sendo Peek [9] conseguiu determinar o valor do gradiente crítico visual pelas seguintes expressões [5]:

$$E_{crv} = 30,5 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \ [kV/cm] \quad (4.2)$$

e para valores eficazes:

$$E_{crv} = 21,6 \left(1 + \frac{0,301}{\sqrt{r}} \right) \ [kV/cm] \quad (4.3)$$

Além de Peek outros pesquisadores empenharam-se nos estudos referentes ao gradiente crítico visual, entre eles C.J.Miller.Jr [11] que descobriu que o valor de E_{CRV} possui maior complexidade que a formula descrita por Peek. Por exemplo, o valor do gradiente crítico depende de fatores externos como a condição física que se encontrava os condutores. Assim sendo, foi formulada por Miller uma tabela reproduzida neste trabalho na Tabela 3 que mostra o valor de um “fator de superfície”. Nas formulas é atribuída a letra ‘m’ a esse fator,

que como o próprio nome infere está relacionada com as condições da superfície do condutor.

Tabela 3 – fatores de superfície segundo Miller
Fonte: Livro Transmissão de energia elétrica, pag.469 [5]

Condições superficiais dos condutores	Fatores de superfície (m)
Condutores cilíndricos, polidos e secos	1,00
Cabos novos, secos, limpos e sem abrasão	0,92
Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera limpa	0,82
Cabos de cobre expostos ao tempo em atmosfera agressiva	0,72
Cabos de alumínio novos, limpos e secos, com condições de superfície decorrentes do grau de cuidado com que foram estendidos nas linhas (médias 0,60)	0,53 a 0,73
Cabos molhados, novos ou usados	0,16 a 0,25

A partir dos valores encontrados da Tabela 3 e tendo conhecimento que a relação entre o fator de superfície e o gradiente crítico visual (E_{CRV}) é diretamente proporcional, notamos que o valor do E_{CRV} diminui consideravelmente quando os cabos estão molhados, podendo essa redução ser de até 84% do valor para condições normais. Os outros valores mais baixos onde estão envolvidos os cabos novos e secos devem-se ao fato de que estes, em geral, além de apresentarem pequenas irregularidades superficiais (arranhões, farpas, etc...), que a oxidação provocada pelo próprio efeito corona irá eliminar com o tempo, possuem também óleos ou graxas em sua superfície, assim facilitando a adesão de partículas de poeira ou gotículas de chuvas (representada na Figura 9) que representam fontes de corona puntiformes [5].



Figura 9 – Deformação de uma gota de água sob ação de um campo elétrico de um condutor

Miller foi mais além, ele desenvolveu ferramentas matemáticas para calcular o gradiente para diversas espessuras de condutores, do qual o que se aplica para as dimensões utilizadas nas linhas de transmissões usuais apresenta a seguinte formula [5]:

$$E_{crv} = 18,11 \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r}} \right) \quad [kV/cm] \quad (4.4)$$

Onde se consideramos o fator de superfície, m , e a pressão atmosférica relativa, δ , teremos a seguinte expressão geral:

$$E_{crv} = 18,11 \cdot \delta \cdot m \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r} \cdot \delta} \right) \quad [kV/cm] \quad (4.5)$$

Onde

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot b}{273 + t'} \right) \quad (4.6)$$

Sendo:

$b = 760 - 0,086 \cdot h$ [mm Hg], sendo h em [m], sob o nível do mar, a altitude média;

t' = Temperatura ambiente em [°C] (temperatura média anual).

4.2 Gradiente de Potencial na superfície dos Condutores

Diante do que já foi exposto anteriormente, quando o valor do gradiente superficial do condutor for maior que o gradiente crítico visual, irá ocorrer a manifestação visível do efeito corona, então se faz necessário compreender como se calcula esse valor de gradiente superficial.

Para a análise do valor desse gradiente iremos considerar um condutor cilíndrico reto, de raio r (metros), de comprimento extenso, isso se faz necessário para que o condutor não seja afetado por quaisquer efeitos das extremidades, este condutor possui carga Q (coulomb/km), distribuída de forma uniforme sobre a superfície do mesmo. O esquema do campo elétrico pode ser visualizado de forma similar na Figura 10, onde as linhas de forças que emanam naturalmente da superfície do condutor a qual o valor proporcional é igual a Q . Enfim, se considerarmos um cilindro concêntrico com o condutor de espessura infinitesimal e a

uma distância R (metros) de seu centro, o mesmo número de linhas de força que emanam da superfície do condutor de raio r também atravessará o cilindro, distribuindo-se sobre sua superfície uniformemente [5].

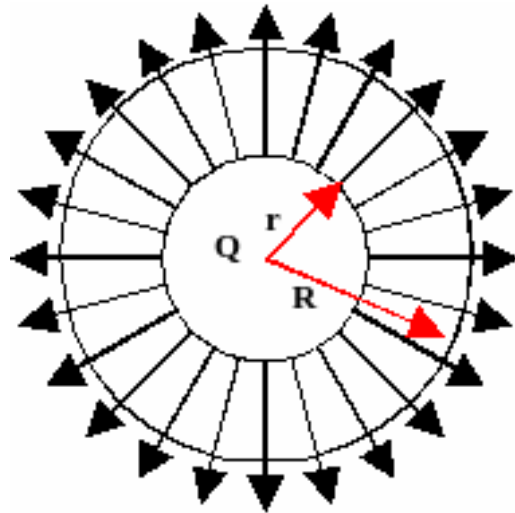


Figura 10 – Campo elétrico de um condutor cilíndrico no espaço

Sabendo que a densidade de fluxo do cilindro, para um comprimento unitário, pode ser calculada com a seguinte fórmula derivada da lei de gauss:

$$D = \frac{Q}{2.\pi .R} \quad (4.7)$$

E que existe uma relação entre o gradiente de potencial e a densidade de fluxo de tal forma que:

$$E = \frac{D}{\varepsilon} \quad (4.8)$$

Chegamos a uma equação geral do gradiente de potencial para os condutores:

$$E = \frac{Q}{2.\pi .r \varepsilon} \quad (4.9)$$

Onde

ε = constante de permissividade elétrica no vácuo

Entretanto, tanto o valor do gradiente como sua forma sofrem mudanças significativas na presença de outro condutor, como pode ser visto na figura 11, a colocação de um condutor paralelo a outro, este por sua vez com carga contrária.

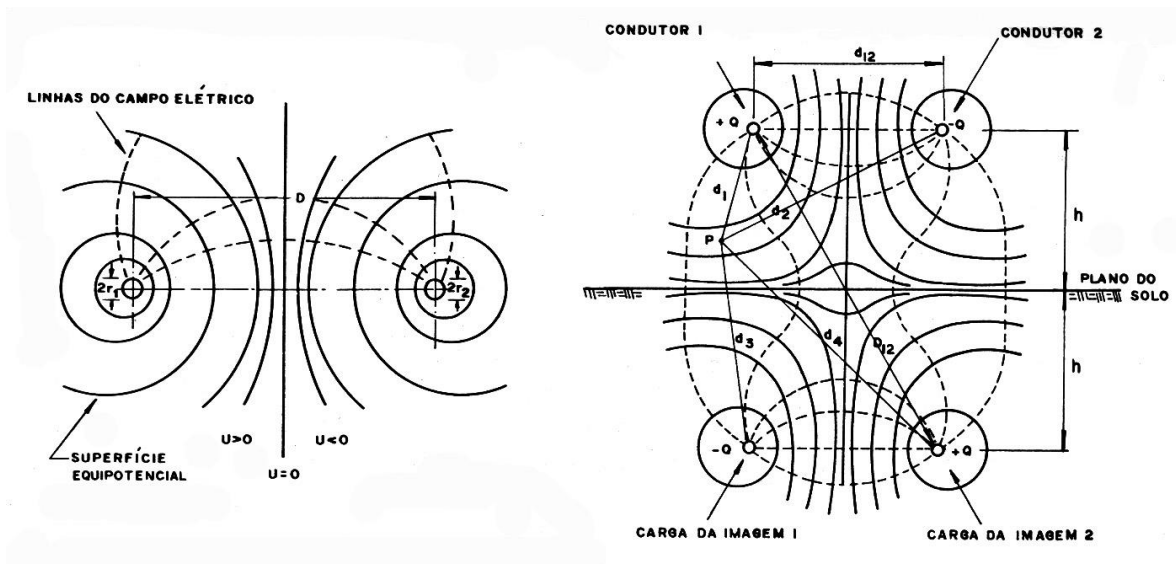


Figura 11 – Campo Elétrico de Condutores Paralelos com Cargas de Sinais Opostos

Assim, na presença de outros condutores, o “r” da expressão (8) é substituído por um raio equivalente (r_{eq}), que será o responsável por tornar o cálculo do gradiente na presença de outros condutores possível. Por definição esse raio equivalente para condutores múltiplos é: um raio de um condutor cilíndrico fictício que, se colocado com seu eixo longitudinal coincidindo com o do condutor múltiplo, apresentará o mesmo gradiente médio que aquele existente na superfície dos subcondutores [5].

Portanto a expressão para o cálculo do gradiente se torna:

$$E = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon \cdot r_{eq}} \quad (4.10)$$

Para calcular esse raio equivalente vamos utilizar o método descrito pelo livro de Rubens Dario Fuchs [5], sendo importante lembrar que a formula da capacitância para linhas trifásicas com condutores múltiplos é dada por:

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D_m}{R_e}} \quad (4.11)$$

onde D_m [m] – distância média geométrica entre fases;

R_e [m] – raio médio geométrico capacitivo do condutor múltiplo;

Para o condutor equivalente valerá:

$$C = \frac{1}{\text{Ln} \frac{Dm}{req}} \quad (4.12)$$

Se lembrarmos de que:

$$Q = C \cdot U \quad (4.13)$$

e substituirmos na expressão do gradiente, (9), teremos:

$$E = \frac{U}{n. r. \text{Ln} \frac{Dm}{Re}} \quad (4.14)$$

$$E = \frac{U}{req. \text{Ln} \frac{Dm}{req}} \quad (4.15)$$

Entretanto ambas devem representar o mesmo condutor múltiplo, assim sendo, se igualarmos as equações (13) e (14) obteremos uma equação transcendental, onde a partir delas poderemos definir o valor do raio equivalente, obtido por método de resolução numérica :

$$\frac{Dm}{req} = \left(\frac{Dm}{Re} \right)^{\frac{n.r}{req}} \quad (4.16)$$

4.3 Cálculo do Gradiente Crítico Visual: Situações Problemas

Em síntese o que podemos analisar é que o valor do gradiente crítico visual para um determinado condutor, de uma forma geral, depende da geometria do condutor e das condições atmosféricas em que ele se encontra para um determinado momento de tempo, enquanto o gradiente de potencial do condutor se caracteriza como uma variável que primordialmente depende da geometria das estruturas da linha de transmissão. Assim temos que quando o campo elétrico superficial nos condutores for maior que o gradiente crítico visual,

irá ocorrer o efeito visual do corona e suas consequências mais intensas, conduzindo à necessidade de que os projetistas procurem assegurar que o gradiente superficial dos condutores seja sempre inferior ao gradiente crítico visual.

$$E < E_{CRV} \quad (4.17)$$

Com base nisso vamos supor algumas situações problemas para ser realizada uma análise.

4.1.1 Situação Problema: 1

É pedido que seja determinado o gradiente crítico visual dos condutores de uma linha de transmissão de 69kV, construída com cabos CA de código OXLIP e com altitude média de 800 metros sob o nível do mar. Adotando-se que no momento do cálculo o tempo era bom, fazendo em média 20°C de temperatura, e que os cabos são novos. (Exemplo baseado, no exemplo 1, do capítulo 10 da página 507 do livro “Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente” [5]).

Solução: A forma mais usual e abordada neste trabalho se faz uso da equação de Miller, equação (4.5):

$$E_{crv} = 18,11 \cdot \delta \cdot m \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{r} \cdot \delta} \right) \quad [kV/cm]$$

Entretanto, previamente se faz necessário consultar a tabela do fabricante dos cabos, para determinar o valor do raio do condutor, nesse exemplo especificamente o valor de ‘r’ para os cabos CA de código OXLIP é igual a 6,629 mm.

Voltando para a fórmula de Miller o segundo passo é definir o valor da constante ‘δ’, a partir da equação (4.6) temos:

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot b}{273 + t'} \right)$$

Substituindo os valores:

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot 800)}{273 + 20} \right) = 0,9106$$

Finalmente a última variável restante é o fator de superfície, m , que pode ser definido a partir da tabela 3, se considerarmos que os cabos são novos e está sob condições de tempo bom, porem estão expostos a sujeiras, um valor aceitável para m é de 0,60. Assim sendo o gradiente ficará da seguinte forma:

$$E_{crv} = 18,11 \cdot 0,9106 \cdot 0,60 \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{0,6629 \cdot 0,9106}} \right) \quad [kV/cm]$$

Resultando num valor de ECRV igual a 16,7954 kV/cm .

Comentários: Esta situação problema abre espaço para uma análise numérica de bastante utilidade para reiterar o que foi exposto no corpo deste trabalho. Muito foi dito durante o estudo do fenômeno corona que em condições climáticas de chuva, a ocorrência do efeito é maior e suas consequências também, pois bem, fazendo uma alteração na situação Problema 1, ao invés de “tempo bom” para condições climáticas, alterarmos para “sob chuva”, alteraremos o valor da constante ‘ m ’, possuindo agora valores aceitáveis para o problema na ordem de 0,16 á 0,25 (consultar tabela 3). Efetuando a alteração para a pior situação possível, o novo valor de ECRV será :

$$E_{crv} = 18,11 \cdot 0,9106 \cdot 0,16 \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{0,6629 \cdot 0,9106}} \right) \quad [kV/cm]$$

ECRV igual a 4,4787 kV/cm .

Uma redução do valor do gradiente crítico de aproximadamente 73% do seu valor para tempo bom, confirmando assim que sob chuva os condutores estarão mais sujeitos à ocorrência do fenômeno corona.

4.1.2 Situação Problema: 2

Nesta situação problema é pedido que se calcule o valor do ECRV dos condutores de uma linha de transmissão (LT) de 345kV, para 3 casos :

- Caso 1 : LT sob o nível do mar, com uma temperatura média de 25°C.
- Caso 2 : LT 1000 m acima do nível do mar, com uma temperatura média de 25°C.
- Caso 3 : LT sob o nível do mar, com uma temperatura média de 50°C.

Dados da linha: Formada por condutores múltiplos (dois por fase), com condutores cilíndricos, polidos e secos ; distância média geométrica entre fases igual a 12,6 m; raio médio geométrico capacitivo do condutor múltiplo igual a 7,0917 cm; raio de um único condutor igual a 1,2573cm.(Situação adaptada, do exemplo 2, do capítulo 10 da página 508 do livro “Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente” [5]).

Solução: A partir dos dados da linha podemos determinar o valor de “req”, já que por se tratar de condutores múltiplos o “r” da formula de Miller será substituído por “req”, sendo necessária a determinação desta variável. A equação (4.16) fornece uma maneira mais simples de determina-la:

$$\frac{D_m}{r_{eq}} = \left(\frac{D_m}{R_e} \right)^{\frac{n \cdot r}{r_{eq}}}$$

Substituindo os valores:

$$\frac{12,6}{r_{eq}} = \left(\frac{12,6}{0,0792} \right)^{\frac{2 \cdot 0,012573}{r_{eq}}}$$

Resultando num valor de req igual a 2,02 cm.

Assim o valor do gradiente crítico visual será determinado por:

$$E_{crv} = 18,11 \cdot \delta \cdot 1 \left(1 + \frac{0,54187}{\sqrt{2,02 \cdot \delta}} \right) \quad [kV/cm]$$

O valor de “m” foi igual a 1 por se tratar de condutores cilíndricos, polidos e secos.

Com as alterações na formula de Miller efetuada, para os dados da linha em questão, podemos calcular o valor do gradiente crítico visual para os 3 casos como descrito no problema.

Caso 1, LT sob o nível do mar, com uma temperatura média de 25°C,

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot 0)}{273 + 25} \right) = 0,9844$$

$$E_{crv} = 24,6644 \text{ kV/cm}$$

Caso 2, LT 1000 m acima do nível do mar, com uma temperatura média de 25°C, substituindo os valores encontramos:

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot 1000)}{273 + 25} \right) = 0,8730$$

$$E_{crv} = 22,249 \text{ kV/cm}$$

Caso 3, LT sob o nível do mar, com uma temperatura média de 50°C, substituindo os valores encontramos:

$$\delta = \left(\frac{0,386 \cdot (760 - 0,086 \cdot 0)}{273 + 50} \right) = 0,9082$$

$$E_{crv} = 23,015 \text{ kV/cm}$$

Comentários: Esta situação problema permite que analisemos a influência da altitude e da temperatura no cálculo do gradiente crítico visual. Se compararmos o caso 1 com o caso 3, iremos observar que para uma mesma altitude, um aumento de temperatura causará uma redução do valor do gradiente crítico visual, de 24,6644 para 23,015 kV/cm, chegando a conclusão que o aumento da temperatura reduz o valor do ECRV, propiciando o surgimento do efeito corona.

Já se a comparação for realizada com o caso 1 e 2, ambos com temperaturas constantes e sofrendo apenas variação na altitude notaremos uma redução do ECRV, conforme o aumento da altitude, Ecrv=24,6644 kV/cm sob o nível do mar (caso 1) e Ecrv=22,249 kV/cm à uma altitude de 1000 metros acima do mar (caso 2). Assim sendo, chegamos à conclusão quanto ao surgimento de efeito corona, as linhas de transmissão operam melhor ao nível do mar e com temperaturas baixas [5].

4.1.3 Situação Problema: 3

Imaginemos que a linha de transmissão de 345kV da situação Problema 2, apresenta um gradiente de potencial médio dos condutores por fase de $19,872 \text{ kV/cm}$. Esta linha está localizada a uma altitude média de 500 metros sobre o nível do mar. É pedido que se defina se haverá manifestação de efeito corona com tempo bom, com a utilização de cabos novos e com a utilização de cabos usados, para as diversas faixas de temperaturas (0°C , 25°C , 50°C).

Observação: Considerar o fator de superfície dos condutores novos e usados igual a 0,60 e 0,70 respectivamente. (Situação adaptada, do exemplo 10, do capítulo 10 da página 513 do livro “Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente” [5]).

Solução: Para resolver este problema devemos primeiramente calcular o gradiente crítico visual, fazendo uso da equação de Miller, equações (4.5) e (4.6), similarmente ao que foi feito na situação Problema 1 e 2, para posteriormente compararmos os valores encontrados com o valor do gradiente de potencial médio dos condutores. Para efeitos práticos, os resultados do ECRV foram calculados sob o nível do mar e organizados em forma de tabela, como podemos ver abaixo:

Tabela 4- Valores dos Ecrv ao nível do mar

	0°C	25°C	50°C
Cabos Novos	16,335	15,155	14,152
Cabos Usados	19,058	17,681	16,510

Com base nesses valores de gradientes crítico e tendo conhecimento do valor médio do gradiente de potencial dos condutores, temos condições de fazer uma análise quanto à ocorrência de efeito corona.

Comentários: No corpo deste trabalho foi citado que os cabos novos possuem uma capacidade maior de adesão, assim acumulando poeiras e/ou gotículas de chuva, criando regiões de corona puntiformes, ou seja, regiões críticas que aumentam a ionização decorrente do gradiente de campo fazendo com que os valores de Ecrv decresçam quando comparados aos mesmos cabos só que já usados, que não possuem mais esta característica de adesão. Numericamente, ratificamos o que foi dito, existe uma alteração no valor do gradiente crítico,

a certo ponto significativa, apenas quando trocamos um cabo novo por um cabo usado, esta alteração de valores esta presente em todas as faixas de temperaturas.

Quanto a situação Problema 3, anteriormente vimos que o aumento de altitude média em relação ao nível do mar iria diminuir os valores de gradiente crítico, assim sendo, foram efetuados os cálculos para a melhor condição possível, sob o nível do mar, e o resultado não foi positivo. Como o valor do gradiente de potencial médio dos condutores por fase é de $19,872 \text{ kV/cm}$, para todas as faixas de temperatura a relação $E > E_{CRV}$ permanecerá constante. Assim sendo, mesmo com tempo bom a linha operará permanentemente sob efeito corona visual, infringindo as normas estabelecidas pela ONS, sendo preciso o uso de técnicas para melhorar as condições do sistema, como um redimensionamento dos condutores, fazendo uso de novos valores de bitolas dos subcondutores.

5 PROPOSTA DE NOVA PESQUISA

Com o avanço da tecnologia é possível se determinar o valor de um gradiente superficial com o auxílio de ferramentas computacionais. Gradiente esse que representa um “vilão” para o surgimento do efeito corona e todas as suas consequências, visto que seu alto valor acarreta perdas e consequências negativas para o sistema. Uma boa proposta de estudo seria o uso de softwares que fossem capazes de efetuar o cálculo desse valor de gradiente para os condutores eletrizados de uma linha de transmissão, através de métodos numéricos, não sendo necessárias as técnicas matriciais tradicionais.

A exemplo do que foi dito, pode se fazer uso de uma ferramenta computacional que trabalhasse com o método dos elementos finitos, ou seja, um software capaz de através de manipulações das equações de Maxwell [3], parâmetros dos condutores e outras variáveis que regem o comportamento do campo, determinasse o valor do gradiente superficial nos condutores, resolvendo conjuntos de equações.

O método dos elementos finitos consiste em diversos métodos numéricos que aproximam a solução de problemas de valor de fronteira descritos tanto por equações diferenciais ordinárias quanto por equações diferenciais parciais por meio da subdivisão da geometria do problema em elementos menores, chamados elementos finitos, nos quais a aproximação da solução exata pode ser obtida por interpolação de uma solução aproximada [23].

Por fim seria interessante concluir o estudo realizando um comparativo dos resultados, avaliando parâmetros como os erros relativos obtidos pelos dois métodos: o método utilizando os elementos finitos e as técnicas matriciais tradicionais.

6 CONCLUSÃO

Com base no que foi apresentado, este trabalho se propôs a realizar uma caracterização do efeito corona abordando características do seu surgimento, suas consequências e propondo possíveis soluções. Também foi realizada uma análise do ponto de vista matemático quanto ao efeito.

Foi evidenciado que a influência do efeito corona, principalmente em linhas de transmissões, é de caráter negativo, pois o fenômeno corona pode gerar diversos incômodos tanto aos moradores vizinhos as linhas de transmissões quanto a própria concessionária responsável pela transmissão da energia, no que se refere à multas e perdas de energia. Esses fatos devem-se aos impactos que o corona causa, dos quais podemos citar: ruídos auditivos, rádio interferência e tv Interferência.

As possíveis soluções foram abordadas tendo como base os avanços tecnológicos no ramo elétrico que vêm permitindo alternativas para combater tanto o surgimento do corona como suas consequências, criando tanto equipamentos que aderem fisicamente as estruturas das linhas, a exemplo do anel anti corona e atenuadores corona, como alternativas de projeto, essa última diz respeito principalmente à geometria das linhas, com alterações como número de condutores em um feixe da fase e o diâmetro dos condutores da fase é possível diminuir a energia de campo que alimenta o fenômeno corona.

Diante disso, surgiu a necessidade de se aprofundar ainda mais no conhecimento das variáveis que determinam o aparecimento do efeito, assim estudos de situações problemas envolvendo o gradiente crítico visual, se tornaram imprescindíveis para este trabalho, pois é esse valor de gradiente um dos limiares entre o surgimento ou não do fenômeno visual do corona.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CAMÕES, L.D. Os Lusíadas. 1.^a ed. Lisboa: Rei dos Livros, 2002. Canto nº V
- [2] LEÃO, R. M. Rádio interferência proveniente de linhas de alta tensão [recurso eletrônico]. Porto Alegre, EDIPUCRS, 2008.p.146
- [3] SADIKU, M.N.O. Elementos de Eletromagnetismo. Porto Alegre: Bookman, 3a Edição, 2004
- [4] WEDY, G.F. Inclusão do Efeito Corona em Modelos de Linhas de Transmissão Bifásica Utilizando a Técnica de Variáveis de Estado. São Paulo, 2009. (Mestrado - Engenharia Elétrica da Universidade Estadual Paulista-Júlio de Mesquita Filho).
- [5] FUCHS, R.D. Transmissão de energia elétrica: linhas aéreas; teoria das linhas em regime permanente. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos; Itajubá, Escola Federal de Engenharia, 1977.
- [6] BELEVTSSEV, A.A. Modern Theory of Corona Discharge. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991.
- [7] CARNEIRO, S. JR; DOMMEL, H.W; MARTI, J.R; BARROS, H.M. An Efficient Procedure for the Implementation of Corona Models in the Electromagnetic Transients Program. In: Proc. of IEEE PES Summer Meeting, 93SM401-0 PWRD, 1993
- [8] FILHO, E.B.G. Estudo da Aplicação dos Condutores Compactos em Linhas Urbanas de 138 kV: Aspectos Elétricos de Corona e RI. Belo Horizonte, 2005. (Mestrado - Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais)
- [9] PEEK, F.W. Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering. Editora McGraw Hill, 1915.
- [10] BPA. Transmission Line Reference Book, 345kV and Above. 2 ed.: Electric Power Research Institute, 1982.

[11] MILLER, C. J. Mathematical Prediction of Radio Interference and Corona Characteristics of Smooth, Bundled Conductors. IEE, October, 1956.

[12] ASANOVA, T.P; A.M. Rakov. Health conditions of workers exposed to electrical fields on open switchboard installations of 400-500 kV – Preliminary Report. 1966

[13] Instituto Magnus de Domoterapia. Fonte: The Federal Communications Commission (FCC) ,EUA. Disponível em: <http://domoterapia.com.br/website/conceito-de-radiacao-ionizantes-e-nao-ionizantes/>

[14] Agência Nacional de Telecomunicações, disponível em:
<http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNivelDois.do?codItemCanal=1547&nomeVisao=Cidad%E3o&nomeCanal=Ondas%20de%20r%E1dio&nomeItemCanal=Exposi%E7%E3o%20a%20Campos%20Eletromagn%E9ticos>

[15] COIMBRA, T, R. Tutoriais Regulamentação: Radiação Ionizante e Radiação Não-Ionizante. Brasília, 2005. Disponível em:
http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialespecradio/pagina_3.asp

[16] Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Eletrobrás. Disponível em:
<http://www.cem.cepel.br/perguntas.htm#q12>

[17] Associação Brasileira de normas técnicas. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/>

[18] Operador Nacional do Sistema Elétrico. Submódulo 2.4, Requisitos mínimos para linhas de transmissão aéreas, Disponível em:
http://www.ons.com.br/download/procedimentos/modulos/Modulo_2/Subm%C3%B3dulo%202.4_Rev_1.1.pdf

[19] Normas Regulamentadoras. Atividades e Operações Insalubres, 1990. Disponível em:
<http://portal.mte.gov.br/legislacao/norma-regulamentadora-n-15-1.htm>

- [20] SILVA, H. A. B; MOTA, A. A; MOTA, L.T.M. Interferência da variação do anel anti-corona na distribuição do campo elétrico em isoladores da classe de tensão de 500 kV”. Em: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2012, Goiânia, GO. Anais Eletrônicos (CD), 2012.
- [21] FOGAÇA, A.J.N. – “Efeito Corona em Bobinas Estatóricas – Uma abordagem numérica. Curitiba, 2003. (Mestrado - Métodos Numéricos em Engenharia, Universidade Federal do Paraná)
- [22] Catálogo de equipamento: atenuador corona. Disponível em:
<http://www.plp.com.br/site/telecomunicacoes-catalogo/item/17-atenuador-de-efeito-corona-corona-coil>
- [23] SOUZA, R. M. O Método dos Elemento Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor. Universidade Federal do Pará. Belém, Maio, 2003.
- [24] SEED, Schlumberger Excellence in Educational Development. Disponível em:
<http://www.planetseed.com/pt-br/relatedarticle/relampagos-fogo-de-santelmo>
- [25] Fonte: Publicado por Tribunal de Justiça do Mato Grosso, em 2013. Extraído pelo site:
<http://tj-mt.jusbrasil.com.br/noticias/100289877/magistrada-suspende-obras-de-linha-de-transmissao>