

Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE

Estudo de Modelos para Definição de um Critério de Início de Corona Através da Análise de Experimentos e Simulações Computacionais

por

Ailton Lopes Souza

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Engenharia de Potência
Linha de Pesquisa: Compatibilidade Eletromagnética e Qualidade de Energia

Orientador: Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes

Belo Horizonte – MG
16 de abril de 2009

Dissertação de Mestrado

Estudo de Modelos para Definição de um
Critério de Início de Corona Através da
Análise de Experimentos e Simulações
Computacionais

Ailton Lopes Souza

Dedico esta dissertação à toda
minha família. À minha mãe
Neuza, ao meu pai Abel, aos meus
irmãos Adilson e Almir, e à minha
namorada Sandra.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus por guardar meus passos nesta caminhada, por ter me concedido a oportunidade de crescer e me aprimorar, com humildade e respeito à todos.

Ao Prof. Dr. Ivan José da Silva Lopes, orientador desta dissertação, por todo seu empenho, sabedoria, compreensão e, acima de tudo, exigência. Gostaria de salientar a sua competência, com participação em discussões, correções, revisões e sugestões que tornaram possível a conclusão deste trabalho. Gostaria de agradecer suas palavras de incentivo e motivação, proferidas sempre em momentos oportunos.

Aos meus colegas de Laboratório, que acompanharam meu aprendizado, crescimento e realização profissional e pessoal. Seus conselhos e opiniões foram sempre precisos e oportunos, contribuindo para melhora deste trabalho.

Aos Funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG, pelo auxílio, cortesia e carinho despendidos no atendimento e esclarecimentos prestados durante o curso, os quais permitiram a realização desta pesquisa.

Aos meus familiares que souberam compreender meus propósitos, sempre apoiando, mesmo que silenciosamente, o meu trabalho.

À todos os meus amigos que sempre estiveram presentes me aconselhando e incentivando com carinho e dedicação.

À minha namorada, Sandra Morais de Resende, companheira e amiga, que soube entender os momentos de ausência, suportando as dificuldades encontradas, sempre ao

meu lado.

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a execução dessa Dissertação de Mestrado.

Resumo

O efeito corona é um fenômeno que pode trazer consequências indesejáveis ao sistema elétrico. Dentre elas, a degradação de superfícies, como é o caso dos isoladores poliméricos, é uma das mais preocupantes. O surgimento deste fenômeno está associado a níveis de campo elétrico elevados, porém não há um consenso sobre tais valores. Os níveis de campo a que os arranjos são expostos atualmente são cada vez mais elevados, graças às diminuições de distâncias elétricas e ao aumento de potência no sistema. Métodos de avaliação destes campos passam a ser determinantes na etapa de projeto e fabricação de novas estruturas, além de consistir em uma forma de manutenção preventiva. Para estimação do campo elétrico (ou da tensão) que leva ao aparecimento do corona, expressões empíricas são geralmente empregadas. Estas expressões para predição do corona são numericamente e experimentalmente avaliadas neste trabalho.

Testes foram realizados em arranjos do tipo ponta-plano e em isoladores poliméricos, onde investigou-se a tensão de início de corona e o campo crítico associado a esta. A dependência com o raio e com o tamanho do *gap* foi analisada para o arranjo ponta-plano. Para o isolador, situações de serviço, como presença de “defeitos” na superfície, foram observadas. A distribuição do campo elétrico também foi verificada, através de simulações computacionais, para os dois casos.

As expressões para os modelos de predição de corona mais conhecidos são apresentadas e discutidas ao longo do trabalho. Entre os modelos estudados, estão as formulações empíricas de Peek e o Fator de Eficiência de Campo de Schwaiger. Os modelos foram aplicados aos arranjos ponta-plano e as tensões previstas por cada um destes foram comparadas aos resultados registrados nos ensaios.

Adicionalmente, um modelo baseado no Fator de Eficiência de Campo e no modelo de Peek foi proposto. Os resultados deste modelo apresentaram boa concordância com os experimentos, se mostrando eficiente na estimação da tensão de início de corona para

arranjos ponta-plano. Por fim, foi sugerido a inserção do caráter estatístico no modelo de predição proposto, conferindo a cada tensão aplicada uma probabilidade de ocorrência de corona.

Abstract

Corona is a phenomenon that may lead to a series of undesirable consequences to power systems. The degradation of surfaces, such as those of polymer insulators, is one of the main concerns. The presence of corona in an arrangement is associated with high levels of electric field. However, there is no clear understanding on the exact value of the field that leads to corona.

This work aims to study the models, proposed in the literature, for corona prediction. Empirical formulations, such as Peek's formula and Schwaiger's non-uniformity factor are discussed, their applicability is investigated, and a modified model is proposed. Additionally, the work aims to stimulate the search for models that can be used in practical arrangements, such as the surface of polymer insulators under operational conditions.

The proposed model is tested computationally and experimentally. The results show good agreement with experiments, indicating the efficiency of the model to estimate the corona onset voltage. Additionally, the statistical nature of corona is taken into account, so that to each applied voltage a probability of corona occurrence is assigned.

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Relevância do Tema	12
1.2	Objetivo do Trabalho	14
1.3	Breve Histórico	14
1.4	Estrutura da Dissertação	15
2	Efeito Corona	17
2.1	Introdução	17
2.2	O Fenômeno	17
2.2.1	Processo de Formação	18
2.2.2	<i>Streamer</i>	20
2.2.3	Tipos de Corona	21
2.2.4	Efeitos	23
2.2.5	Carga Espacial	23
2.2.6	Gradiente Crítico	25
2.3	Modelos de Predição	26
2.3.1	Peek	26
2.3.2	Townsend	27
2.3.3	Fator de Eficiência de Campo	28
2.3.4	Zaengl	29
3	Experimentos	31
3.1	Introdução	31
3.2	Metodologia	32
3.3	Arranjos	33

3.3.1	Arranjo Ponta-plano	33
3.3.2	Isolador Polimérico	34
3.4	Resultados e Discussões	35
3.4.1	Arranjo Ponta-plano	35
3.4.2	Isolador Polimérico	38
4	Simulações Computacionais	41
4.1	Introdução	41
4.2	Método de Elementos Finitos	41
4.3	Modelo Computacional	45
4.3.1	Arranjo Ponta-plano	46
4.3.2	Isolador polimérico	47
4.4	Resultados e Discussões	47
4.4.1	Arranjo Ponta-plano	48
4.4.2	Isolador Polimérico	50
5	Análise dos Modelos de Predição	55
5.1	Introdução	55
5.2	Tensão de Início de Corona	55
5.3	Campo Elétrico Crítico	57
5.4	Modelo de Predição Proposto	58
5.4.1	Descrição	59
5.5	Considerações de Projeto	62
5.5.1	Margem de Segurança	62
5.5.2	Tensão de Início de Corona Estatística	64
5.6	Testes do Modelo de Predição Proposto	67
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	71
6.1	Conclusões	71
6.2	Propostas de Continuidade	73

Lista de Tabelas

3.1	Tensão de início de corona para arranjos ponta-plano	37
3.2	Distâncias utilizadas para experimentos com isolador polimérico	39
3.3	Tensões de início de corona para diferentes distâncias dos defeitos	39
4.1	Campo elétrico máximo simulado	50
4.2	Campo Elétrico Máximo	51
5.1	Tensões de início de corona - calculadas e medidas (kV pico)	56
5.2	Tensões de início de corona - Fator modificado (kV pico)	57
5.3	Campo elétrico crítico - simulado e calculado (kV/cm pico)	58
5.4	Predição de corona adotando-se margem de segurança de 20%	64
5.5	Predição de Corona - modelo estatístico proposto	67
5.6	Tensão de Início de Corona Ponta 4 (kV pico)	68
5.7	Previsão para Tensão de Início de Corona na Ponta 4 Utilizando Margem de segurança de 20% - (kV pico)	69
5.8	Tensão de Início de Corona Estatística para Ponta 4 - (kV pico)	69

Lista de Figuras

2.1	Relação entre corrente e tensão durante processo de ionização	18
2.2	Processo de ionização por colisão [12]	19
2.3	Distorção no campo elétrico causado pela carga espacial da avalanche de elétrons [5]	20
2.4	Corona Negativo - Pulsos de Trichel, <i>Glow</i> negativo e <i>Streamers</i> negativos [10].	22
2.5	Corona Positivo - Pulsos <i>Onset</i> , <i>Glow</i> positivo e <i>Streamers</i> positivos [10].	22
2.6	Distorção do campo elétrico causada pela carga espacial: a) ponta positiva b) ponta negativa [5]	24
2.7	Regiões de ionização [11]	25
3.1	Montagem Experimental - Visão geral	32
3.2	Eletrodos de raios r1, r2 e r3, utilizados nos arranjos ponta-plano	33
3.3	Isolador polimérico de 13,8kV utilizado nos experimentos	34
3.4	Descargas de corona observadas para arranjo ponta-plano, para <i>gap</i> de 3cm, eletrodos r1, r2 e r3 e tensões aplicadas de 5.5kV, 8kV e 15.5kV	36
3.5	Tendência para as tensões de início de corona observadas para arranjos ponta-plano	37
3.6	Distâncias esquemáticas - isolador	38
3.7	Corona no Isolador	38
4.1	Exemplo de malha - detalhe à direita	42
4.2	Elemento de malha	43
4.3	Modelo Computacional Para Arranjo Ponta-planos Utilizado na Simulação	46
4.4	Modelo Computacional Para Isolador Polimérico Utilizado na Simulação	47

4.5	Potencial e Campo Elétrico obtidos para Ponta r_3 e gap de 7cm.	48
4.6	Intensidade de Campo Elétrico - variação com o raio de curvatura do eletrodo	49
4.7	Intensidade de Campo Elétrico - variação com o tamanho do gap	49
4.8	Campo Elétrico para Início de Corona	50
4.9	Distribuição de Campo Elétrico - Efeito das semiesferas	51
4.10	Potencial - Efeito das semiesferas	52
4.11	Distribuição de Campo Elétrico - Corona entre semiesferas	53
4.12	Potencial - Corona entre semiesferas	53
4.13	Distribuição de Campo Elétrico - Corona gap ferragem-esfera	54
4.14	Potencial - Corona gap ferragem-esfera	54
5.1	Fator de Eficiência de Campo	57
5.2	Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Ajuste Global	60
5.3	Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Ajuste Local	61
5.4	Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Compara- ção entre Ajustes Global e Local	62
5.5	Margem de Segurança Estabelecida Para Fins de Projeto	63
5.6	Distribuição Gaussiana Assumida para Tensão de Início de Corona	65
5.7	Fator de Eficiência de Campo - Modelo proposto	66
5.8	Eletrodo $r_4 = 0.0950\text{cm}$	67
5.9	Tensões de início de corona - Previsão Ponta 4	68
5.10	Tensão de Início de Corona - Comparação entre Medições e Previsão	70

1.1 Relevância do Tema

Após o advento do sistema elétrico, com o decorrer do tempo, observou-se que não era suficiente o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, mas sim que esta também fosse de qualidade e confiável. Além disto a diminuição de custos é fator preponderante na geração e a distribuição de energia elétrica. Deve-se, portanto, haver um compromisso entre a qualidade, a confiabilidade e o custo da energia.

Cada vez mais, busca-se um sistema elétrico mais estável e menos susceptível a fenômenos naturais. Porém, a necessidade de menor utilização espacial, seja por questões urbanas, ambientais ou por redução de custos, bem como o aumento da demanda energética, fazem com que se busquem novas soluções, nas quais a confiabilidade e a qualidade da energia devem ser mantidas. Neste contexto, se insere a utilização de estruturas compactas de transmissão e a repotencialização de sistemas de transmissão [1]. Em ambos os casos, aumenta-se consideravelmente as chances de ocorrência do efeito corona, já que tanto a diminuição das distâncias de isolamento quanto a elevação da potência transmitida contribuem para o processo de formação do fenômeno. Este, por sua vez, pode causar danos a estruturas condutoras e isolantes. Os tipos de danos variam de acordo com o tempo de exposição e o material. Nos piores casos, a degradação do material pode levar a fissuras e posterior falha mecânica, ocasionando a interrupção do fornecimento de energia, causando uma série de prejuízos.

De fato, uma das preocupações acerca do efeito corona está relacionada aos isoladores poliméricos, já que este tipo de material é mais propenso à corrosão oriunda deste fenômeno [2]. O uso de isoladores poliméricos em estruturas compactas é bastante comum, pois estes são menores que os isoladores convencionais e possuem manuseio e transporte

mais prático. Como a utilização de polímeros no sistema elétrico vem crescendo de forma acentuada nos últimos anos em todo o mundo [3], a discussão em torno do efeito corona torna-se mais intensa e necessária.

Outro ponto a ser considerado é o emprego de novos materiais isolantes. O próprio polímero não possui composição totalmente pré-estabelecida por norma, ficando a cargo do fabricante a definição de materiais, formato e procedimentos utilizados na confecção do isolador polimérico [4]. As propriedades isolantes e mecânicas são garantidas por meio de ensaios; o tempo de vida estimado ainda é incerto, pois a degradação depende do tempo de exposição ao corona e do tipo de material. Como são materiais recentes, quando comparados com os convencionais, cerâmico e vidro, ainda não se tem base para se estabelecer este tempo. Uma das formas de se obter a prolongação do tempo de vida destes materiais é evitar a exposição destes ao corona.

Até aqui, o corona foi citado apenas como efeito indesejável ao sistema, todavia há casos em que este é desejável. Este fato ocorre em algumas aplicações industriais, como é o caso da utilização do corona em precipitadores eletrostáticos e no processo de esterilização de alimentos [5, 6]. Nestes casos, o objetivo do processo é criar o corona de forma mais eficiente e econômica. Os precipitadores eletrostáticos utilizam o corona para eletrificação de partículas sólidas, para posterior remoção destas por captação. No caso da esterilização de alimentos, as descargas de corona produzidas têm por objetivo eliminar micro-organismos indesejáveis.

Seja para prevenção, seja para geração do efeito corona, a definição de um critério de início de corona com mais rigor é de grande interesse.

Há ainda algumas questões acerca do efeito corona cujas respostas se encontram em aberto, não sendo bem definidas nem totalmente aceitas. Algumas destas questões são relacionadas aqui:

- sob quais condições (nível de campo, nível de tensão) ocorre corona?
- quais são as condições para extinção do corona?
- qual a relação entre nível de corona, tempo de exposição e efeitos causados no sistema?

Esta pesquisa tem seu foco na primeira questão. De fato, não há um consenso sobre o nível de campo elétrico necessário para se tentar evitar a formação do corona. Atualmente, os fabricantes utilizam alguns valores de referência, que variam de acordo com as normas vigentes, condições e tipo de arranjo [7].

Tendo como base as motivações apresentadas, conclui-se que o estudo do efeito corona é de interesse ao meio acadêmico, à indústria e à sociedade como um todo.

1.2 Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem por objetivo o estudo de modelos de predição de corona presentes na literatura. Além da verificação da aplicabilidade destes através de experimentos e simulações, uma proposição de um modelo modificado será abordada.

Um produto indireto deste trabalho é a reunião de informações em um único documento, relacionando os modelos de predição de corona. Este fato é de grande interesse visto que estas informações se encontram diluídas em diversos textos, por vezes de difícil acesso.

Esta pesquisa visa ainda instigar a busca por modelos de predição de corona que contemplem configurações de arranjos diversos, alguns não abordados na literatura, como é o caso de defeitos em isoladores poliméricos.

1.3 Breve Histórico

Existe vasto material disponível na literatura abordando o efeito corona em seus mais diversos aspectos. Um breve histórico é apresentado, relacionando os trabalhos mais relevantes nos estudos acerca do corona.

Um dos primeiros trabalhos onde o efeito corona foi estudado cientificamente, com metodologia e diagnóstico bem definidos, foi o de Lichtenberg, em meados do século XVIII. Lichtenberg fez o registro das formas do corona em um plano fotográfico para um arranjo constituído de um bastão e um plano. As formas registradas são conhecidas como figuras de Lichtenberg. Nestas figuras, foi constatado que as formas variavam com a magnitude, com a forma de onda e com a polaridade da tensão aplicada [8, 9]. Além do pioneirismo, Lichtenberg estabeleceu o método de diagnóstico ainda hoje utilizado.

No início do século passado, Townsend apresentou estudos sobre o processo de ionização em gases. Dentre suas publicações, *Electricity in Gases*, de 1914, aborda os diversos mecanismos envolvidos na formação e propagação de descargas elétricas em gases. Townsend realizou as primeiras formulações para cálculo da tensão associada ao corona [8, 9], além das equações utilizadas atualmente na descrição do processo de ionização.

As formulações mais conhecidas relacionadas ao efeito corona foram desenvolvidas por Peek. Em seu trabalho, *Dielectric phenomena in High-voltage Engineering* (1929), Peek estimou o campo elétrico crítico para formação de descargas de corona através de equações empíricas, para arranjos determinados, como cilindros coaxiais e condutores paralelos [8, 10]. Ainda hoje, suas expressões são largamente empregadas devido à simplicidade e aos resultados satisfatórios destas.

Em torno de 1960, Loeb apresentou estudos detalhados acerca do corona, em seu livro *Electrical Coronas*. Loeb ainda publicou diversos trabalhos relacionados ao processo de

descargas elétricas, com contribuições na teoria de formação de descargas [5, 8, 9].

Mais recentemente, Zaengl apresentou formulações para o cálculo do campo elétrico crítico. A expressão de Zaengl apresenta correções para os desvios ocorridos nas equações de Peek para condutores de diâmetros de valores elevados [5].

Os mecanismos presentes no processo de ionização são apresentados detalhadamente em diversos trabalhos [5, 8, 11, 12, 13]. A teoria relacionada a descargas elétricas em gases é abordada, desde os fundamentos da teoria de gases até os complexos mecanismos de ionização e disrupção. Além da física do processo de disrupção, em gases e sólidos, estudos relacionando as descargas elétricas e os materiais dielétricos são apresentados por Raju [11]. A formação do corona e sua interação com superfícies é tratada por Goldman e Sigmond [9]. O EPRI (Electric Power Research Institute) aborda as formulações empíricas estudadas com uma visão aplicada, analisando a influência do corona no sistema elétrico [10].

Este é um breve histórico relacionando alguns trabalhos referentes ao efeito corona. O Capítulo 2 aborda, em detalhes, o fenômeno e os modelos de predição encontrados nestas referências.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está estruturada em seis capítulos, dispostos sequencialmente como: *Introdução, Efeito Corona, Experimentos, Simulações Computacionais, Análise dos Modelos de Predição, Conclusões e Trabalhos Futuros*.

O Capítulo 2 trata da física do fenômeno, detalhando o processo de formação do corona. Os tipos de corona de acordo com a natureza da tensão aplicada são apresentados. A formação de carga espacial e sua influência na distribuição de campo elétrico também é abordada. As principais formulações referentes aos modelos de predição estudados são apresentadas.

O Capítulo 3 aborda os experimentos realizados na pesquisa. São descritos as diferentes topologias dos arranjos utilizados, as montagens, a metodologia empregada nos ensaios. As tensões de início de corona são levantadas e seus valores discutidos.

O Capítulo 4 complementa a análise realizada com os experimentos, através da realização de simulações computacionais para os mesmos arranjos ensaiados. Neste capítulo, é realizada uma breve discussão acerca de métodos numéricos. Análises do campo elétrico simulado na condição de corona são realizadas.

O Capítulo 5 apresenta análise dos modelos apresentados no Capítulo 2. É proposto um modelo de predição de corona, a partir da modificação de expressões dos modelos de predição estudados. Testes são realizados para avaliar este modelo e seus resultados

descritos. Adicionalmente, é sugerida a incorporação do caráter probabilístico do efeito corona ao modelo proposto.

O Capítulo 6 encerra o texto retomando os principais pontos abordados durante o trabalho e as conclusões obtidas a partir do estudo realizado. As propostas de continuidade para o trabalho são apresentadas.

2.1 Introdução

Um dos primeiros relatos do aparecimento do efeito corona foi chamado “*St. Elmo’s fire*”, relacionado às descargas ocorridas nos mastros de navios em alto mar. Este fenômeno logo foi atribuído ao protetor dos navegadores, *Saint Elmo* [9, 14]. A origem do termo corona (palavra do Latim para coroa) geralmente é atribuída à semelhança entre a descarga ocorrida em eletrodos pontiagudos e a ponta das coroas de reis (do inglês *crown*), embora possa se relacionar o termo ao poder místico da coroa ou ao aparecimento “misterioso” de chamas luminosas como o *St. Elmo’ fire*. Anos mais tarde, o mesmo fenômeno foi observado em laboratório e em aparelhos elétricos. Embora o efeito corona seja de conhecimento da humanidade há bastante tempo, somente na última metade do século XVIII este começou a ser estudado cientificamente. Este capítulo aborda o processo de formação e as características do corona, aspectos necessários para seu entendimento e observação.

2.2 O Fenômeno

Diante das diversas definições encontradas na literatura para o fenômeno, destaca-se aquela utilizada por Goldman e Sigmond e por G. Raju [9, 11], na qual o corona é definido como uma descarga elétrica auto-sustentada onde um campo elétrico Laplaciano (geométrico) confina o processo de ionização a regiões de campo intenso, próximo a estruturas energizadas ou isolantes. Ou seja, a intensidade elevada do campo elétrico ultrapassa a rigidez dielétrica do ar, geralmente próximo a condutores, ocasionando o surgimento de descargas. Por este motivo, o corona também é conhecido como descarga parcial. A

forma assumida pelo corona varia com a polaridade da tensão aplicada, bem como com sua intensidade e forma de onda. O corona pode ser identificado por possuir brilho de coloração azulada, e por emitir ruído sonoro característico. Esta definição caracteriza o efeito corona de forma geral.

2.2.1 Processo de Formação

O processo de formação do corona, independente do seu tipo, tem início no mecanismo de avalanche de elétrons, descrito por Townsend [9]. A Figura 2.1 exibe a corrente durante o processo de ionização, onde se observa as variações decorrentes em função da tensão aplicada.

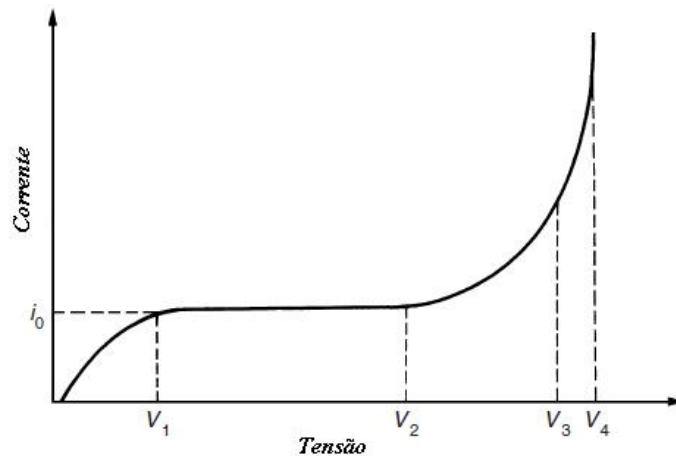


Figura 2.1: Relação entre corrente e tensão durante processo de ionização

Townsend observou que, inicialmente a corrente aumenta proporcionalmente com a tensão aplicada até um valor onde esta corrente permanece constante a um valor I_0 . Este valor corresponde à corrente devido aos elétrons livres presentes no ar, resultantes da ionização de moléculas neutras por fótons de radiações cósmicas ou ultravioleta.

Sob a ação de um campo elétrico, os elétrons livres são acelerados. A energia cinética adquirida por estes elétrons pode ser suficiente para que, ao colidirem com partículas neutras, estas sejam ionizadas (colisão elástica). Quando esta energia é insuficiente para a ionização, as partículas neutras a absorvem, alcançando um estado de alta excitação ou de vibração (colisão inelástica) [5, 10, 12]. Na ionização, a molécula neutra libera um elétron, tornando-se um íon positivo. Este elétron é acelerado, repetindo o processo descrito anteriormente, multiplicando, a cada nova colisão, o número de elétrons. Este processo é chamado de ionização por colisão, e pode ser visto na Figura 2.2. O aumento exponencial na corrente, ocorrido no trecho entre V_2 e V_3 , na Figura 2.1, é explicado por este processo.

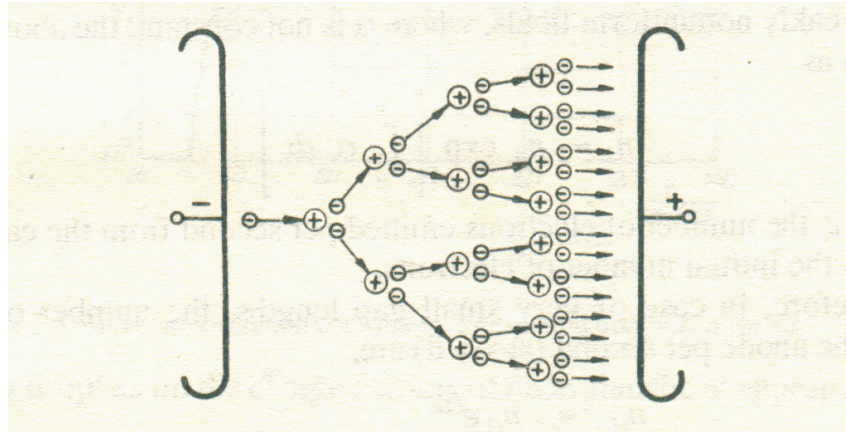


Figura 2.2: Processo de ionização por colisão [12]

Townsend descreveu, por meio de um coeficiente, o número de colisões produzidos por um único elétron, por unidade de comprimento, se movendo na direção de um campo elétrico aplicado. Este é o primeiro coeficiente de ionização de Townsend, α . Este coeficiente varia com a intensidade de campo, com a pressão e tipo do gás, além da umidade. A corrente de ionização será dada pela Equação 2.1:

$$I = I_0 e^{\alpha d}, \tag{2.1}$$

onde I_0 é a corrente inicial que deixa o catodo, e d a distância entre catodo e anodo.

Paralelamente ao processo de liberação de elétrons, pode ocorrer a captação destes por certos tipos de átomos ou moléculas presentes no gás, formando um íon negativo estável. Este processo é descrito pelo *attachment coefficient*, η , definido como o número de elétrons captados no caminho de um único elétron na direção do campo, por unidade de comprimento [9, 5].

Deste modo, o número de elétrons efetivamente liberados é representado através do coeficiente de ionização efetiva, $\alpha' = \alpha - \eta$.

Entretanto, Townsend observou em seus experimentos que, em tensões elevadas, a corrente aumentava mais rapidamente que o previsto pela Equação 2.1 [5]. Este fato é descrito pelo trecho $V3 - V4$ da Figura 2.1. Para explicar este aumento, foi proposto um mecanismo secundário de ionização, no qual há emissão de elétrons por bombardeamento de íons positivos, por átomos neutros excitados (metaestáveis), ou por fótons. Este processo pode ser resumido pelo segundo coeficiente de Townsend, γ . Este mecanismo é responsável pelo processo de realimentação de elétrons, necessário para que a descarga se auto-sustente na região de ionização. Assim, re-escrevendo a corrente de ionização tem-se a Equação 2.2.

$$I = I_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \tag{2.2}$$

Quando a descarga se torna auto-sustentada, a corrente I se torna indeterminada, e o denominador na Equação 2.2 será nulo. Levando ainda em consideração a captação de elétrons, tem-se:

$$\gamma(e^{\alpha'd} - 1) = 1 \tag{2.3}$$

Deste modo, o critério descrito pela Equação 2.3 define o limite para a descarga, quando igual a 1 ela se auto-sustenta, quando maior que 1 a descarga cresce muito rapidamente, e quando menor que 1 a descarga não é capaz de se sustentar.

2.2.2 Streamer

O mecanismo de ionização descrito por Townsend é incapaz de explicar algumas observações ocorridas em determinados casos. Os maiores conflitos estão relacionados ao tempo requerido para formação da descarga auto-sustentada, à influência das cargas espaciais no processo de ionização e à interpretação do processo para altos valores de pd (pressão pelo comprimento do *gap*). A influência das cargas espaciais será abordado posteriormente, no decorrer deste capítulo. Para explicar o processo que ocorre para altos valores de pd um outro mecanismo é proposto, a teoria de *streamer*.

Durante o processo de ionização por colisão, a carga formada pelos elétrons e íons liberados apresenta um campo elétrico local, o que causa uma distorção no campo elétrico externo aplicado. A Figura 2.3 mostra a distorção no campo elétrico aplicado devido à carga espacial da avalanche de elétrons.

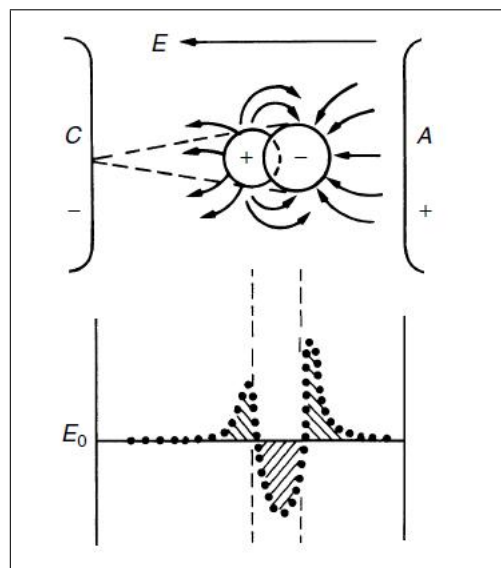


Figura 2.3: Distorção no campo elétrico causado pela carga espacial da avalanche de elétrons [5]

Quando o campo elétrico devido à carga espacial formada durante a avalanche de elétrons possui intensidade significativa em relação ao campo elétrico externo aplicado, uma condição instável é criada, a qual pode conduzir ao início da formação de um canal de ionização, conhecido como *streamer*. O aumento do campo elétrico, observado na 'ponta' da avalanche de elétrons, faz com que se intensifique o processo de ionização local, conduzindo à um rápido desenvolvimento do canal através do *gap*. O número de elétrons estimados para dar início ao *streamer* é em torno de 10^8 .

O processo de desenvolvimento do *streamer* se dá em intervalo de tempo menor que o mecanismo de Townsend, o que esclarece um dos pontos de conflito apresentado. Além disto, a teoria de *streamer* está de acordo com as observações do fenômeno para valores elevados de pd , registradas por meio de fotografias.

Deve-se ressaltar que, em um campo elétrico uniforme tanto a avalanche de elétrons, quanto o *streamer* conduz à disrupção no *gap*, deste modo, só é possível a formação do corona em campos não uniformes.

2.2.3 Tipos de Corona

De acordo com a natureza da tensão aplicada, pode-se falar em corona do tipo d.c., a.c. ou impulsivo [5, 10, 11]. Ainda pode-se falar sobre corona unipolar ou bipolar dependendo da presença de um ou dois eletrodos ativos. No caso de corona unipolar, ainda fala-se em corona negativo ou positivo dependendo da polaridade da tensão aplicada ao eletrodo ativo.

O corona impulsivo é gerado por tensões aplicadas em curtos intervalos de tempo, não permitindo o acúmulo nem o deslocamento de cargas. Por este motivo, a formação de descarga para corona impulsivo é semelhante ao processo de ionização que ocorre em campo uniforme.

O corona d.c. e a.c. (60Hz), por ser originado de tensões aplicadas durante um tempo longo, permite o acúmulo e deslocamento de cargas, o que ocasiona distorção no campo elétrico.

Outra diferença entre os tipos de corona consiste na disponibilidade de elétrons para o início do fenômeno. Quando a tensão aplicada possui tempo de subida lento, coronas d.c. e a.c., possibilita que haja quantidade de elétrons suficientes para iniciar e dar continuidade ao processo ionização. Quanto menor o tempo em que se aplica a tensão, maior a energia necessária para que os elétrons acelerem e realizem colisões efetivas. Deste modo, no caso de tensão impulsiva ocorrerá um atraso, denominado tempo de atraso estatístico, que é o tempo necessário para que os elétrons adquiram energia suficiente para iniciar a ionização.

No corona d.c., o mecanismo de formação se difere basicamente para polaridades positivas e negativas. Para uma mesma polaridade, tem-se diferentes manifestações do

fenômeno ou modos de corona, dependendo da tensão aplicada, do formato do eletrodo e condições da superfície. Cada modo possui diferentes características (forma da corrente, magnitude, etc).

A Figura 2.4 apresenta as formas de corona negativo, enquanto as formas para o corona positivo são vistas na Figura 2.5 [10].

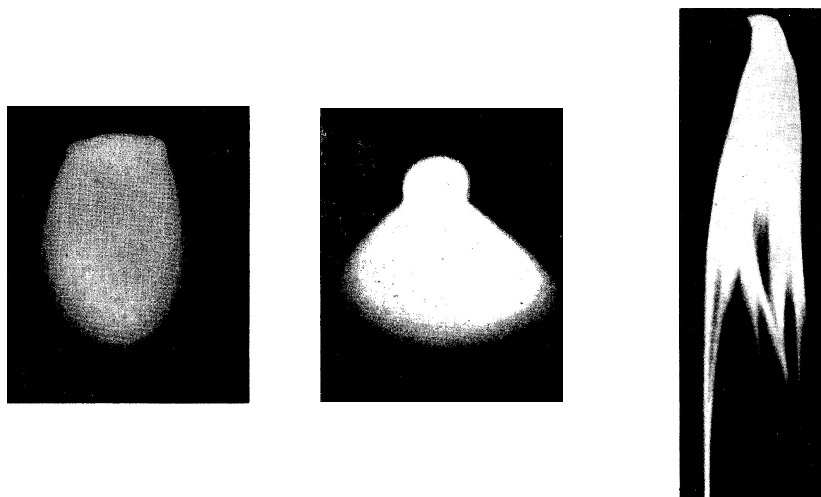


Figura 2.4: Corona Negativo - Pulsos de Trichel, *Glow* negativo e *Streamers* negativos [10].

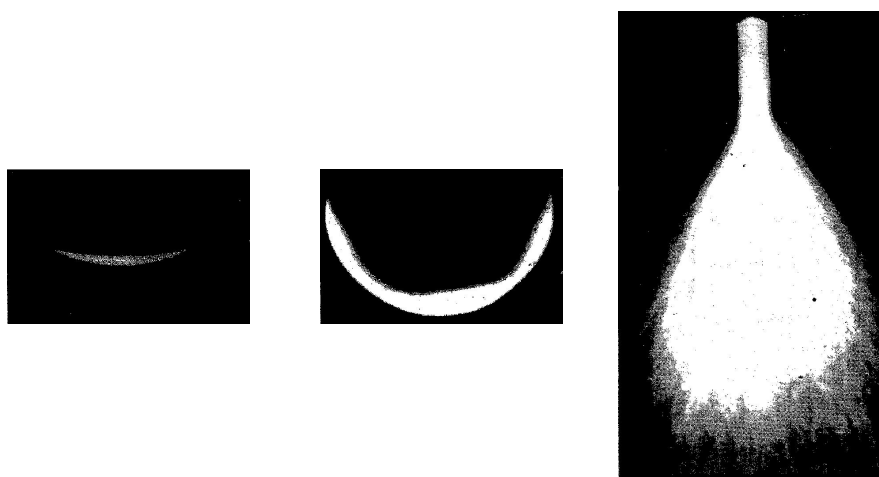


Figura 2.5: Corona Positivo - Pulsos *Onset*, *Glow* positivo e *Streamers* positivos [10].

O corona negativo é mais comumente caracterizado por pulsos de Trichel, mas também se manifesta sob as formas de *glow* negativo e *streamers* negativos. Deve-se ressaltar que a tensão de início de corona negativo é menor que a tensão para formação de corona positivo. A razão para isto se deve parcialmente ao fato de que os elétrons iniciais, durante formação do corona negativo, se encontram em uma região de campo elétrico intenso, próximo ao eletrodo [11]; em contraposição, os elétrons iniciais para o corona positivo,

são originados a partir de um volume. Com o aumento da tensão, o volume aumenta, contribuindo para maior número de elétrons iniciais. Outro motivo está na distorção do campo pela formação de cargas espaciais, aspecto que será abordado no decorrer do trabalho.

O corona positivo possui três formas distintas: pulsos *onset*, *glow* positivo (*Heimstein's glow*) e *streamers* positivos, sendo esta última forma predominante [10]. O corona positivo avança muito mais rapidamente que o corona negativo, devido à presença de processos de ionização que ocorrem para esta polaridade de tensão aplicada, como a emissão de elétrons pelo catodo por bombardeamento de íons.

Sob tensão alternada, todos os modos de corona podem estar presentes. Porém a formação de carga espacial durante meio ciclo pode modificar o tipo e a intensidade do corona do meio ciclo seguinte.

2.2.4 Efeitos

Como já mencionado, o corona está associado a campos elétricos elevados e pode produzir luz, ruído audível e ozônio, produtos facilmente detectados por nossos sentidos. Além destes, as descargas de corona podem gerar outros efeitos [14], tais como:

- radiação ultravioleta;
- ácido nítrico, na presença de umidade;
- calor devido à descarga, ocasionando perda de energia;
- erosão mecânica devido ao bombardeamento de íons;
- interferência nas frequências de rádio, causando problemas na comunicação.

Dentre os efeitos citados, destacam-se aqueles que ocasionam a degradação química ou mecânica de materiais localizados na região onde o fenômeno ocorre. Estas são as razões principais que tornam indesejáveis as descargas produzidas por corona.

2.2.5 Carga Espacial

Os mecanismos descritos por Townsend para o processo de ionização, sofrem influência da presença de carga espacial, quando os campos não são uniformes. Em campo elétrico não uniforme, os processos de colisão são muito mais intensos nas proximidades dos eletrodos do que nas demais regiões, devido à assimetria do campo elétrico.

A carga espacial presente na região de corona causa uma distorção do campo elétrico, conforme pode-se observar na Figura 2.6. As curvas pontilhadas representam o campo

elétrico sem presença de carga espacial, enquanto que as curvas contínuas representam o campo elétrico distorcido pela presença da carga espacial.

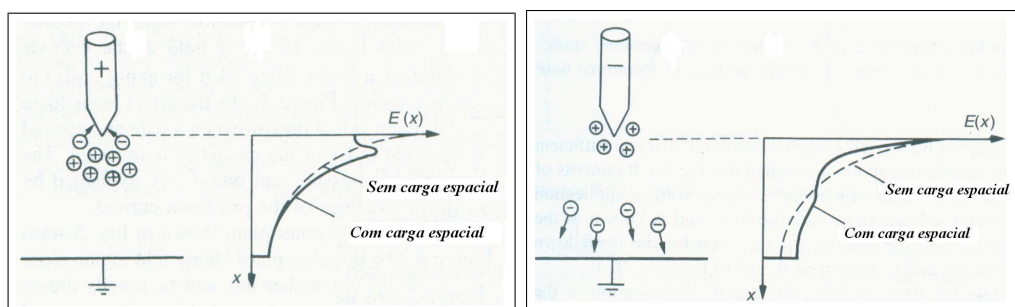


Figura 2.6: Distorção do campo elétrico causada pela carga espacial: a) ponta positiva b) ponta negativa [5]

Para um eletrodo ativo positivo, os elétrons, devido à alta mobilidade, serão rapidamente captados pelo eletrodo, deixando a carga positiva para trás. A carga espacial irá reduzir a intensidade de campo próximo ao eletrodo, e ao mesmo tempo aumentará este campo no restante do *gap*.

Para o eletrodo ativo negativo, os elétrons são repelidos para a região de campo de intensidade baixa, fazendo com que a carga positiva permaneça no espaço entre a carga negativa e o eletrodo. O efeito da carga espacial é o de aumentar a intensidade do campo próximo à ponta, porém reduz a região de ionização.

Desta forma, em campos não uniformes, para polaridade positiva é necessário maior tensão aplicada quando comparada à polaridade negativa, para se iniciar o processo de ionização.

Considerando a formação de carga espacial, ao se observar o fenômeno, pode-se dividir o *gap* entre eletrodos em três regiões distintas [11]. Estas regiões são observadas na Figura 2.7. Os limites de cada região variam de acordo com o formato e dimensões dos eletrodos, com a tensão aplicada e com as características do gás isolante.

Estas regiões são descritas como:

- Região de Brilho, onde a ionização ocorre, usualmente localizada próxima ao eletrodo ativo;
- Região de Deriva, onde o campo elétrico não possui intensidade suficiente para acelerar os elétrons, e portanto, não ocorre ionização;
- Região de carga livre, onde o campo elétrico possui baixa intensidade, e a carga sofre pouca influência deste.

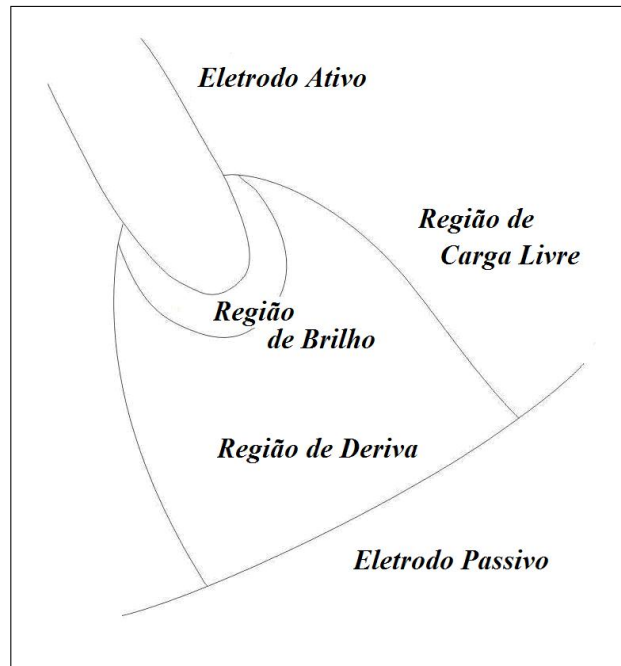


Figura 2.7: Regiões de ionização [11]

Na região de brilho, também chamada de região ativa, a ionização por colisão ocorre e a descarga auto-sustentada existe. Aplicando-se o critério de Townsend tem-se a Equação 2.4. A integral em 2.4 é utilizada porque o campo elétrico varia espacialmente, fazendo com que o primeiro coeficiente de ionização não seja constante.

$$\gamma(e^{\int_0^{d_0} \alpha' dx} - 1) = 1 \quad (2.4)$$

Onde d_0 é o limite da região onde a ionização ocorre, e γ e α' descritos como na Equação 2.3.

2.2.6 Gradiente Crítico

As formas para se avaliar a presença ou não de corona se utilizam da tensão ou do campo elétrico na superfície do eletrodo ativo. O campo elétrico necessário para o início do processo de formação do corona é conhecido por gradiente crítico.

Frequentemente, se encontra na literatura que o campo elétrico para disrupção do ar é 30kV/cm [8]. Segundo experimentos conduzidos por Schumann, para placas paralelas observou-se que o campo elétrico para disrupção do ar era 30kV/cm somente para uma distância de 2cm entre placas, sendo muito mais elevado quanto menor o *gap*.

Ao observar uma configuração de duas esferas de raio r , separadas por um *gap* de comprimento S , Schumann constatou que o valor de 30kV/cm foi excedido em todos os experimentos [8]. A faixa observada para S/r variava entre 0.06 e 2.0, para r entre 0.25cm

e 12.5cm. Portanto, dependendo da configuração, o valor 30kV/cm para ionização, pode ser utilizado apenas para propósitos de estimação do corona, já que este valor pode ser maior.

As descargas parciais sempre surgem a tensões menores que para a disrupção, já que este fenômeno precede a disrupção. Portanto, durante as descargas parciais, tanto para tensão quanto para o gradiente crítico, espera-se comportamento semelhante à disrupção. Deste modo, diferentes valores de campo elétrico crítico são utilizados como referência dependendo do tipo do arranjo e material [7].

2.3 Modelos de Predição

Para estimar a tensão de início de corona, expressões empíricas foram desenvolvidas. Estas expressões são aqui nomeadas de modelos de predição de corona. A maior parte destas expressões visam o cálculo do gradiente crítico, sendo a tensão calculada posteriormente em função do tipo de arranjo. Os modelos estudados são apresentados a seguir.

2.3.1 Peek

Peek, em 1929, desenvolveu através de seus experimentos, uma expressão empírica para cálculo do campo elétrico crítico. Esta expressão é amplamente utilizada atualmente para os mais diversos arranjos, porém foi originalmente desenvolvida para cilindros concêntricos.

O campo elétrico na superfície de um condutor (valor de pico dado em kV/cm) necessário para produzir corona visual no ar, é dado por:

- Cilindros concêntricos:

$$E_c = 31m\delta \left(1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta a}} \right) \quad (2.5)$$

- Condutores paralelos:

$$E_c = 30m\delta \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta a}} \right) \quad (2.6)$$

Para ambas equações, a é raio do condutor em centímetros, m é o fator de irregularidade da superfície e δ a densidade relativa do ar. A diferença entre as duas expressões apresentadas está apenas na alteração de duas constantes. Portanto, segundo estas formulações, o comportamento do campo crítico é semelhante para estes dois arranjos.

Para condutores inteiramente polidos, o fator de irregularidade é definido como a unidade. Para cabos ou condutores encordoados (*stranded*), como o corona surge gradualmente a partir de pontos específicos, m assume valores variando de 0.72 à 0.82. Além disto, a presença de poeira, umidade e óleo faz com que o gradiente em que o corona se inicie diminua, este efeito é expresso pela redução do fator de irregularidade [8].

Pela análise das expressões de Peek, observa-se que o gradiente crítico é dependente somente do raio do condutor e independente do espaçamento. Esta independência da separação é esperada para grandes distâncias, deste modo o campo na superfície do condutor seria pouco afetado pela presença do eletrodo passivo.

A tensão para início de corona pode ser obtida a partir do campo elétrico crítico, substituindo este na formulação convencional para o potencial em cilindros concêntricos, o que resulta na Equação 2.7, e para condutores paralelos na Equação 2.8.

- Cilindros concêntricos:

$$V_c = E_c a \ln \left(\frac{R}{a} \right) \quad (2.7)$$

- Condutores paralelos:

$$V_c = E_c a \ln \left(\frac{S}{a} \right) \quad (2.8)$$

Onde R e a são os raios dos cilindros externo e interno, respectivamente, para cilindros concêntricos. Para condutores paralelos, a é o raio dos condutores e S a separação entre estes. Observa-se que a dependência com o comprimento do *gap* só é expressa na formulação para a tensão, sendo campo elétrico crítico dependente somente do raio do condutor.

2.3.2 Townsend

O campo elétrico no qual tem início o corona pode ser estimado pelo método de Townsend, que assume que o espaço pode ser dividido em duas regiões, de acordo com este campo. Deste modo, para uma geometria qualquer onde o campo elétrico não apresenta uniformidade, tem-se que na região próxima ao eletrodo ativo, o ar é altamente ionizável até uma distância onde o campo alcança o valor de 30kV/cm. Como visto anteriormente, este valor pode ser utilizado para propósitos de estimativa. Para o restante do *gap*, o campo elétrico é considerado baixo para ionização.

O campo elétrico E , a qualquer raio r de distância de uma linha, é fornecido pela Equação 2.9.

$$\frac{E}{E_c} = \frac{a}{r} \quad (2.9)$$

Onde E_c é o campo elétrico na superfície de uma linha de raio a .

O raio na região de ionização (r_i) é dado pela equação 2.10, enquanto que o campo médio no envelope de corona (média aritmética entre o campo na superfície do eletrodo e o campo na região limite de ionização) é dado pela Equação 2.11.

$$r_i = \frac{E_c a}{30} \quad (2.10)$$

$$E_{medio} = \frac{E_c + 30}{2} \quad (2.11)$$

O campo elétrico para disrupção (E_s) é dado pela formulação empírica de Townsend, Equação 2.12.

$$E_s = 30 + \frac{1.35}{d} \quad (2.12)$$

Onde d é o comprimento do *gap*.

Considerando que na região de ionização ocorre uma disrupção, tem-se que $E_s = E_{medio}$ e $d = r_i - a$. Fazendo as devidas substituições, obtém-se a expressão para o campo crítico (Equação 2.13).

$$E_c = 30 + \frac{9}{\sqrt{a}} \quad (2.13)$$

O desenvolvimento desta expressão é apresentado em [8]. Observando esta expressão, verifica-se que esta é muito similar à formulação empírica de Peek.

2.3.3 Fator de Eficiência de Campo

O Fator de Eficiência de Campo Elétrico η , foi proposto por Schwaiger em 1922, como medida da uniformidade do campo, sendo definido pela Equação 2.14 [12]. Este fator também é conhecido na literatura como Fator de Utilização, sendo algumas vezes empregado seu inverso, chamado Fator de não-uniformidade.

$$\eta = \frac{E_{medio}}{E_{max}} \quad (2.14)$$

O Fator de Eficiência de Campo compara duas configurações de eletrodos, com o mesmo espaçamento e tensão aplicada. Seu valor depende da geometria do arranjo, variando entre 1 e um valor muito próximo de 0. O campo elétrico médio é o campo uniforme entre placas paralelas, para mesma tensão e espaçamento do arranjo comparado. Deste

modo, em um campo uniforme, η é igual a 1, e para campo não uniforme é menor que 1. Assim, quanto mais próximo de 1 é o η , mais uniforme o campo elétrico para o arranjo em questão.

A tensão de início de corona pode ser estimada pela Equação 2.15 [15], onde o campo elétrico máximo na superfície do condutor é substituído pelo campo crítico E_c e o campo médio por V_c/d .

$$V_c = E_c \cdot d \cdot \eta \quad (2.15)$$

Diversas expressões para o cálculo de η são propostas para diferentes configurações em [12]. Uma expressão foi sugerida por Y. Qiu [16], baseada em técnicas de aproximação de curvas, onde o cálculo de η pode ser feito em função do raio do condutor r e da distância do *gap* entre eletrodos d . A Equação 2.16 apresenta esta expressão.

$$\eta = [0.45 \cdot (d/r) \cdot \ln(6 \cdot (d/r)) / \ln(d/r)]^{-1} \quad (2.16)$$

Para aplicação da Equação 2.15, é necessário o conhecimento prévio do campo elétrico crítico ou da tensão de início de corona, dependendo do objetivo. Assim, esta expressão só pode ser utilizada em experimentos ou aliada a outras expressões empíricas que forneçam a variável necessária.

2.3.4 Zaengl

Mais recentemente, Zaengl *et al.* desenvolveram uma expressão baseada na relação dada por Schumann (Equação 2.17), combinada com critério de Townsend (Equação 2.3) [5]. Na expressão de Schumann, E e E_o são campos elétricos, onde E_o é o valor no limite da região de ionização; p é a pressão, α' o coeficiente de ionização efetiva e C uma constante.

$$\frac{\alpha'}{p} = C [(E/p) - (E_o/p)]^2 \quad (2.17)$$

Simplificando a expressão de Schumann e aplicando o critério de Townsend, chega-se às expressões 2.18.

$$\begin{aligned} \frac{\alpha'}{\delta} &= C [E/\delta - E_o]^2 \\ \int_a^{d_o} C \delta [(E/\delta) - E_o]^2 dr &= k \end{aligned} \quad (2.18)$$

O campo elétrico E , é função do raio para configuração de dois cilindros coaxiais, como visto na equação 2.19.

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon r} = k_q/r \quad (2.19)$$

Fazendo a substituição da equação 2.19 em 2.18 e avaliando a integral, observando que $E_o = k_q/(\delta r_o)$ e que $E_c = k_q/a$, tem-se a equação 2.20 para o campo crítico.

$$(E_c/\delta)^2 - 2(E_c/\delta)E_o \ln(E_c/\delta E_o) - E_o^2 = \frac{k}{C\delta a} \quad (2.20)$$

O desenvolvimento desta expressão é apresentado em [5, 17]. Os valores utilizados por Zaengl para as constantes são $E_o = 24.36kV/cm$ e $K/C = 42kV^2/cm$.

A Equação 2.20 apresenta resultados similares à formulação de Peek, porém é considerada mais precisa para condutores de diâmetros mais realísticos. Para $\delta r > 1$, a expressão de Peek apresenta valores mais elevados do que os observados experimentalmente. Isto se deve ao fato da expressão empírica de Peek ter sido baseada em medições em condutores de raio pequeno [5, 17].

As formulações apresentadas neste capítulo para os modelos de predição foram utilizadas para cálculo da tensão de início de corona dos experimentos realizados. Os experimentos, bem como os resultados e discussões pertinentes, são apresentados no capítulo seguinte.

3.1 Introdução

Existem diversos métodos propostos na literatura que podem ser utilizados para definir a tensão de início de corona experimentalmente [1]. Os métodos mais conhecidos são os baseados na observação visual, na medição da tensão de rádio-interferência (RIV), na medição de descargas parciais ou na medição de ruído audível. Deve-se definir o método mais adequado, de acordo com a disponibilidade de equipamentos, espaço físico e objetivo do ensaio em questão.

Como o método utilizado por Peek e por Zaengl em seus experimentos foi baseado em observações visuais, optou-se também por empregar este método durante os ensaios realizados nesta pesquisa. Deste modo, a comparação dos resultados obtidos com os existentes na literatura é facilitada, pois a utilização de métodos diferentes aumentaria a discrepância dos resultados devido à diferença de sensibilidade presente em cada um.

Antes de se definir os procedimentos adotados para os ensaios, deve-se considerar a definição da tensão associada à formação do corona, visto que esta possui interpretações diferentes na literatura. A tensão associada ao corona pode ser definida como a tensão que coincide com a primeira aparição das descargas de corona (surgimento), ou como a tensão em que ocorre o desaparecimento total das descargas de corona (extinção) [18]. As normas geralmente associam a tensão de corona à extinção do fenômeno [19], pois a principal preocupação é a identificação de pontos susceptíveis à formação do corona, ou garantir sua ausência para determinada faixa de tensão acima da tensão de operação. Como a extinção do corona se dá a tensões inferiores ao seu aparecimento, para este trabalho, a tensão associada ao corona foi vinculada ao surgimento do fenômeno.

3.2 Metodologia

A tensão de início de corona, determinada experimentalmente para os diferentes arranjos, servirá como base para as simulações computacionais. Assim, a partir desta tensão e do seu correspondente gradiente (obtido através das simulações) será possível estabelecer comparações dos modelos de predição apresentados.

A montagem utilizada nos experimentos foi efetuada de forma a se evitar o aparecimento do corona em regiões onde este não fosse objeto de estudo, não permitindo interferência nos resultados, assegurando que as primeiras descargas de corona fossem devidas ao arranjo sob ensaio. Para isto, a condução da tensão ao arranjo foi realizada via tubulação de cobre, sem presença de quinas ou pontas. Uma visão geral da montagem experimental é apresentada na Figura 3.1.



Figura 3.1: Montagem Experimental - Visão geral

Os experimentos consistiram na energização dos arranjos, em ambientes totalmente escuros, com aplicação de uma tensão alternada senoidal de 60 Hz, cuja amplitude pode ser variada na faixa de 1kV a 50kV. A partir de uma tensão inicial, onde ainda não se havia detectado a presença do corona, foi-se elevando a tensão em passos pré-definidos e o registro fotográfico do arranjo, a cada tensão aplicada, foi realizado. Após o término de cada experimento, as fotografias foram analisadas, e a tensão de início de corona foi identificada para cada configuração testada.

A fim de se manter o mesmo padrão de identificação, uma câmera digital foi utilizada para o registro das fotos, com mesmo tempo de exposição e mesma sensibilidade em todas as situações. Deste modo, a câmera foi ajustada para ISO 400, tempo de exposição de 30 segundos e abertura $f/5.2$. A câmera foi mantida a uma distância fixa de 1 metro do arranjo.

Os arranjos testados possuíam topologias diferentes, variando o tipo e a configuração.

3.3 Arranjos

Os experimentos iniciais foram realizados em arranjos simples, do tipo ponta-plano. Posteriormente energizou-se um isolador polimérico, portanto uma estrutura de geometria mais complexa. Os arranjos utilizados são descritos a seguir.

3.3.1 Arranjo Ponta-plano

O arranjo ponta-plano consistiu de um eletrodo ativo, um bastão de cobre com terminação pontiaguda, separado por uma distância de uma superfície plana aterrada. Esta distância foi chamada de *gap*. Nos ensaios conduzidos utilizando este tipo de arranjo, três diferentes eletrodos foram utilizados. A diferença entre estes eletrodos reside no raio de curvatura de suas pontas. Os eletrodos foram chamados de r_1 , r_2 e r_3 , de acordo com o raio, sendo, respectivamente: 0.0129cm, 0.0392cm e 0.1879cm. Os valores dos raios dos eletrodos foram obtidos por uma regra de três simples entre a medida do diâmetro do eletrodo e da sua ponta, realizada em *pixels* pela inspeção das fotos, e depois convertida em centímetros. Os eletrodos são vistos na Figura 3.2.



Figura 3.2: Eletrodos de raios r_1 , r_2 e r_3 , utilizados nos arranjos ponta-plano

Com o intuito de se investigar a influência do comprimento do *gap* na tensão de início de corona, quatro distâncias foram analisadas: 1.5cm, 3cm, 7cm e 10cm. Os ensaios foram conduzidos conforme metodologia apresentada anteriormente, onde o passo de tensão adotado foi de 0.5kV. Houve ainda a inserção de um multímetro, para possibilitar medições mais precisas na faixa de 1kV a 5kV. As condições ambientais registradas durante o ensaio

foram: temperatura ambiente = 19°C, pressão atmosférica = 698mmHg e umidade relativa do ar = 50%.

As tensões de início de corona levantadas durante estes ensaios são apresentadas na seção de resultados. Deve-se ressaltar que alguns *gaps* foram avaliados em um segundo experimento, onde a consistência dos resultados foi verificada.

3.3.2 Isolador Polimérico

Ensaio foram também realizados em um arranjo consistido de um isolador polimérico de distribuição, de 13,8kV de tensão nominal. A Figura 3.3 apresenta este isolador, destacando seus terminais de acordo com energização de cada um.

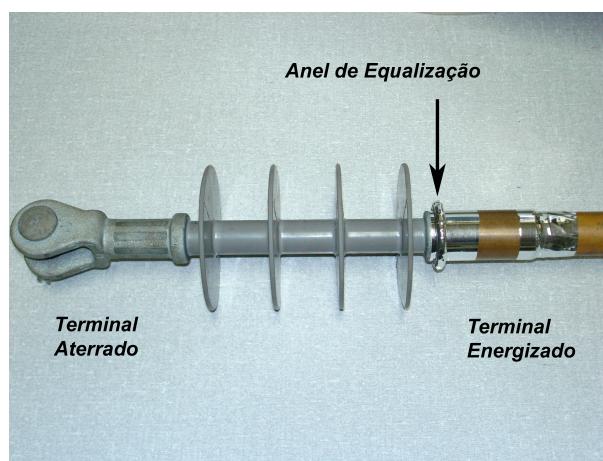


Figura 3.3: Isolador polimérico de 13,8kV utilizado nos experimentos

O objetivo dos ensaios, para este tipo de arranjo, era avaliar a tensão de início de corona devido à presença de defeitos localizados na superfície do isolador. Semiesferas metálicas foram colocadas na saia do isolador, simulando gotas de água, uma situação comum de serviço a que este é submetido [20, 21, 22]. Este isolador foi preparado de forma que um pequeno anel de equalização foi instalado junto ao terminal energizado, evitando assim a formação do corona na ferragem. Deste modo, garantiu-se que o corona primeiro surgisse nos defeitos presentes na superfície do isolador.

Utilizou-se quatro semiesferas de alumínio, duas possuindo diâmetro de 1.06 cm, e as outras duas diâmetro de 0.82 cm. Estas semiesferas foram colocadas na primeira saia do isolador, próximo à terminação energizada, sempre em pares iguais. Avaliou-se a formação do corona para três casos distintos, nos quais variou-se distância do par em relação ao bastão do isolador e a distância entre semiesferas, além do tamanho destas. Estes casos são detalhados no item 3.4.2.

O procedimento para identificação da tensão de início de corona foi o mesmo descrito anteriormente, optando-se por um passo de tensão de 1kV, devido à menor sensibilidade encontrada neste arranjo nos pré-testes. Durante os ensaios, registrou-se temperatura de 28°C, pressão atmosférica de 698mmHg e umidade relativa do ar de 55%.

3.4 Resultados e Discussões

As tensões de início de corona observadas durante os ensaios são apresentadas aqui. As semelhanças e diferenças para cada arranjo e configuração são discutidas.

3.4.1 Arranjo Ponta-plano

A Figura 3.4 ilustra as fotos consideradas como correspondentes à condição de início de corona. Neste caso, o *gap* de 3cm e os eletrodos r1, r2 e r3 foram utilizados. Observa-se diferenças no formato das descargas luminosas para cada ponta. As tensões em que ocorre o fenômeno para cada eletrodo são, respectivamente, 5.5kV, 8kV e 15.5kV (valores r.m.s.). Para tensões aplicadas inferiores a estas, nas respectivas configurações, não observou-se nenhuma atividade luminosa nos arranjos.

As descargas de corona para eletrodos de raios de curvatura menores, r1 e r2, apresentam formato denominado *glow* negativo. A forma do corona para o eletrodo r3 deixa margem a duas interpretações, pois se assemelha tanto ao *glow* negativo quanto aos *streamers* positivos. Como o corona negativo surge primeiro que o positivo, ao considerar-se todas as descargas como *glow* negativo, os resultados estariam dentro do esperado. Também é coerente considerar que o corona em r3 pode ser *streamer* positivo. Isto pode ser explicado pelo fato que tanto o formato do eletrodo quanto o nível de tensão, são responsáveis pelo aparecimento dos diferentes tipos de corona. Um nível mais elevado de tensão, como apresentado em r3, propicia o surgimento de corona positivo. Como o corona positivo abrange maior área, o corona negativo, que ocorre durante o semiciclo negativo, é superposto por este, já que a foto registra a luminosidade observada durante 30 segundos. Devido aos níveis baixos de tensão para surgimento do corona, em r1 e r2 observa-se apenas a presença de corona negativo.

A Tabela 3.1 mostra as tensões de início de corona (valores r.m.s.) observadas para diferentes arranjos. Analisando o raio da ponta dos eletrodos, constata-se que, quanto maior este raio, maior a tensão para início de corona. Resultado semelhante é encontrado quando observado o tamanho do *gap*, quanto maior o *gap* maior a tensão necessária para formação do efeito corona.

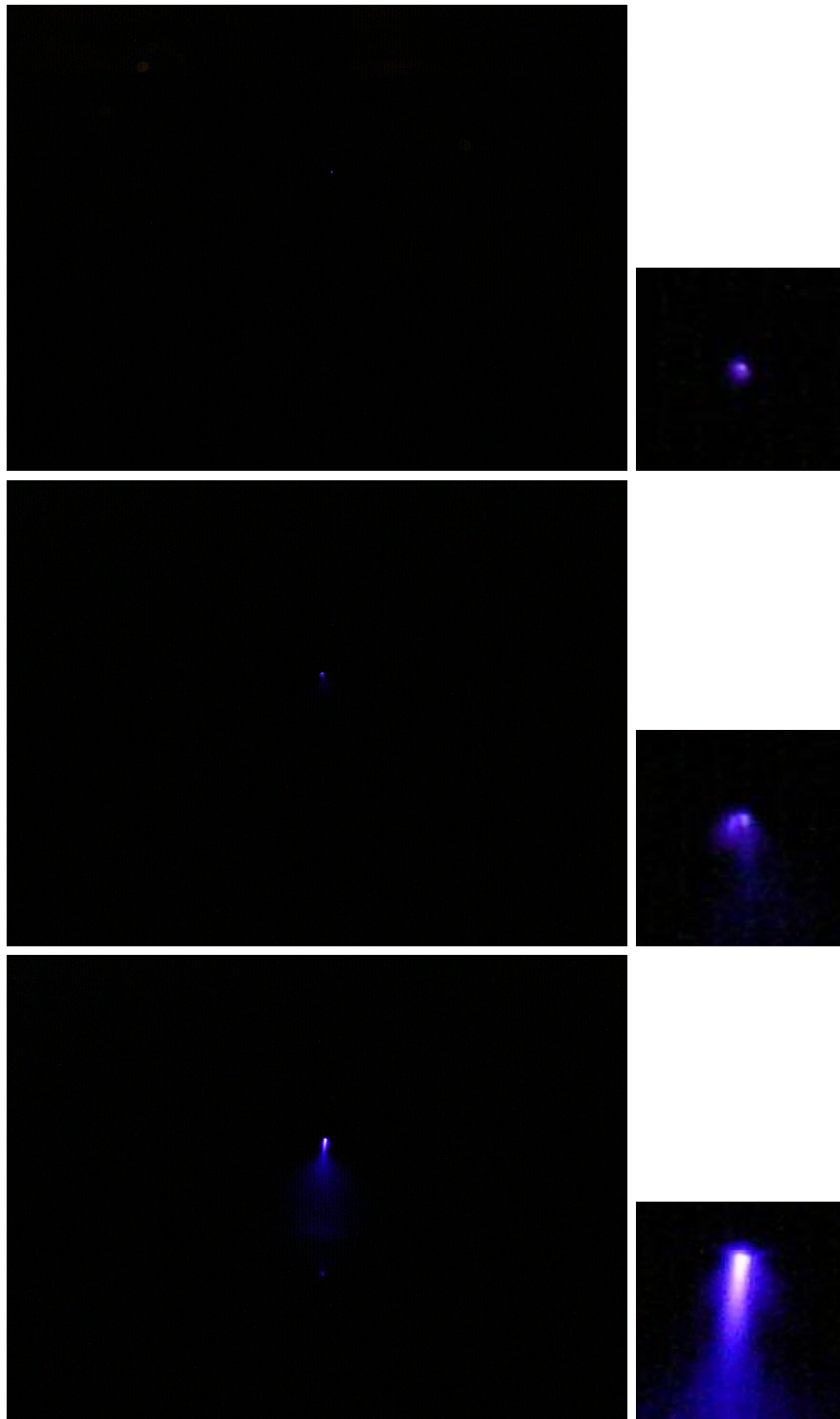


Figura 3.4: Descargas de corona observadas para arranjo ponta-plano, para *gap* de 3cm, eletrodos r1, r2 e r3 e tensões aplicadas de 5.5kV, 8kV e 15.5kV

Raios	Comprimento do Gap			
	1.5cm	3cm	7cm	10cm
r1	4.5kV	5.5kV	6.0kV	6.0kV
r2	7.0kV	8.0kV	9.0kV	9.5kV
r3	12.0kV	15.5kV	18.0kV	19.0kV

Tabela 3.1: Tensão de início de corona para arranjos ponta-plano

A Figura 3.5 mostra as curvas para a tensão de início de corona obtidas pela Tabela 3.1. Conforme observado pelas curvas, há uma tendência de estabilização da tensão de início de corona, à medida em que o comprimento do *gap* aumenta, indicando uma menor dependência desta tensão com o *gap*, para valores elevados deste. Comportamento similar para a tensão de início de corona em função do *gap*, foi encontrado por Goldman *et al.* [9].

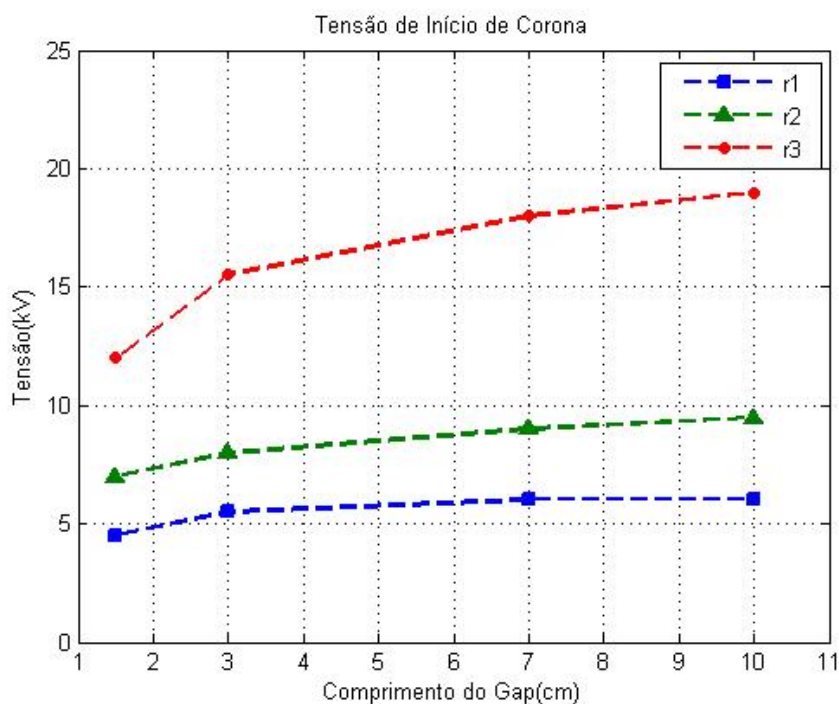


Figura 3.5: Tendência para as tensões de início de corona observadas para arranjos ponta-plano

Os resultados evidenciam a influência tanto do comprimento do *gap* quanto dos raios dos eletrodos na formação do corona.

3.4.2 Isolador Polimérico

Três configurações para o isolador foram testadas, onde variou-se a distância entre as semiesferas (D_{ee}), a distância entre as semiesferas e o bastão do isolador (D_{be}), e o tamanho das semiesferas (raio R_e). Um esquemático destas distâncias é visto na Figura 3.6.

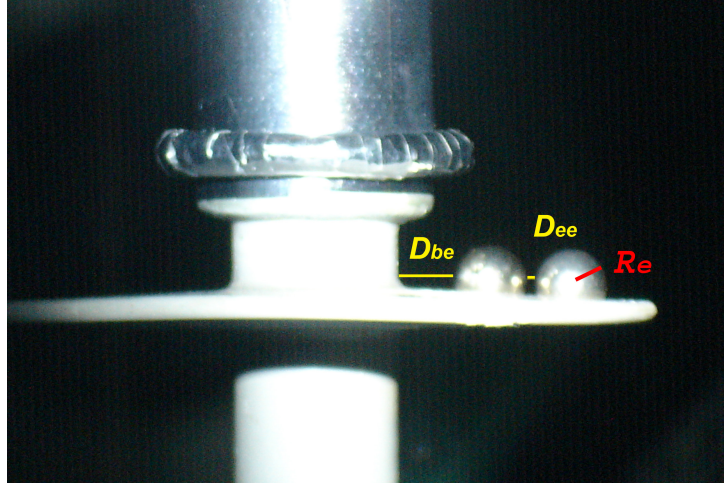


Figura 3.6: Distâncias esquemáticas - isolador

A Figura 3.7 apresenta o isolador polimérico, submetido a uma tensão suficientemente alta para produzir corona nos quatro *gaps* considerados. O isolador se encontra sob tensão de 45kV. Para facilitar visualização, foi realizada a superposição de duas fotos, a do isolador e a foto do corona.

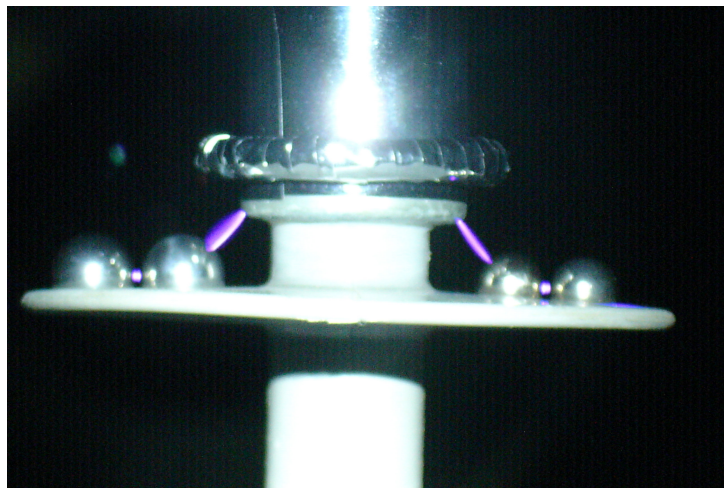


Figura 3.7: Corona no Isolador

Deve-se ressaltar que as tensões nas quais o corona foi observado estão acima da tensão de operação do isolador, porém a análise dos resultados podem ser estendidas qualitati-

vamente à isoladores de tensão nominal superior. Isto é possível devido a análise ter sido realizada observando-se a primeira saia e o terminal energizado do isolador, estrutura que não apresenta diferenças significativas, para este tipo de estudo, à medida que se aumenta a tensão nominal do isolador.

A Tabela 3.2 apresenta os casos avaliados, de acordo com as distâncias utilizadas para cada *gap* em cada um destes casos.

Casos	Comprimento do Gap		
	D_{ee}	D_{be}	R_e
C1	0.075cm	0.8cm	0.53cm
C2	0.06cm	0.8cm	0.53cm
C3	0.06cm	0.95cm	0.41cm

Tabela 3.2: Distâncias utilizadas para experimentos com isolador polimérico

As tensões de início de corona obtidas para os casos observados são apresentadas na Tabela 3.3. Verifica-se que a tensão para a formação do corona entre semiesferas (V_{ee}) é maior quanto mais afastadas estas estiverem do eletrodo energizado, como visto ao se comparar os casos C2 e C3.

Casos	Tensões (r.m.s.)	
	V_{ee}	V_{fe}
C1	45.0kV	-
C2	40.0kV	42.0kV
C3	42.0kV	45.0kV

Tabela 3.3: Tensões de início de corona para diferentes distâncias dos defeitos

Observando os casos C1 e C2, constata-se que uma maior separação entre as semiesferas necessita de maior tensão aplicada para surgir corona. Isto se explica no fato que, um aumento no potencial aplicado implica em um aumento no potencial flutuante, no qual as semiesferas estão submetidas.

Analisando o *gap* entre o terminal energizado e a primeira semiesfera, chamado ferragem-esfera, observa-se que a tensão necessária para descarga de corona (V_{fe}) é proporcional ao tamanho deste *gap*. Os resultados observados apresentam coerência com as situações semelhantes descritas na literatura [7].

Para este tipo de configuração, as expressões apresentadas para os modelos de predição não são aplicáveis, visto que estes arranjos apresentam geometrias mais complexas, não dependentes somente do raio de curvatura e do espaçamento entre eletrodos.

Embora as tensões de início de corona observadas sejam superiores à tensão de operação do isolador, é preciso salientar que efeito semelhante ocorreria para isoladores de

tensão nominal mais elevada, onde certamente a presença de gotas de água nas saias destes ocasionaria a formação de corona [22].

As situações observadas nos experimentos reportados neste capítulo foram reproduzidas computacionalmente e seus resultados são apresentados e analisados no capítulo seguinte.

Simulações Computacionais

4.1 Introdução

Atualmente, existe grande variedade de programas para o cálculo de campo elétrico e magnético, disponíveis no mercado. Estes programas baseiam-se em métodos numéricos para resolução de equações diferenciais parciais, como as de Laplace e Poisson.

Problemas complexos, envolvendo campos em duas ou três dimensões, geometrias complexas e/ou com diferentes características de materiais, podem ser solucionados mais facilmente pela aplicação destes métodos. O Método das Diferenças Finitas, o Método de Elementos Finitos, o Método de Simulação de Carga e o Método de Elementos de Fronteira são exemplos de métodos numéricos utilizados [5].

Há vantagens e desvantagens em cada método, ficando a cargo do usuário identificar a ferramenta de cálculo que melhor lhe atende. Neste trabalho, foi utilizado o programa FEMM [23], baseado no Método de Elementos Finitos. Como vantagens deste método, têm-se:

- facilidade de aplicação em sistemas não homogêneos;
- aumento da precisão com aumento do número de elementos;
- refino da solução para regiões de interesse.

4.2 Método de Elementos Finitos

No método de Elementos Finitos, o problema é dividido em regiões, de acordo com suas propriedades elétricas (permissividade, potencial, etc), as quais são definidas pelo

usuário. Cada região é então subdividida em elementos, compondo o que se chama de malha. Um exemplo de malha pode ser visto na Figura 4.1. Uma formulação conveniente é então aplicada a cada um dos elementos desta malha, e o conjunto de soluções relativo a estas regiões nos fornece a solução global do problema. É evidente que quanto menores forem estes elementos, mais a solução discretizada se aproxima da solução contínua, o que representaria o caso ideal.

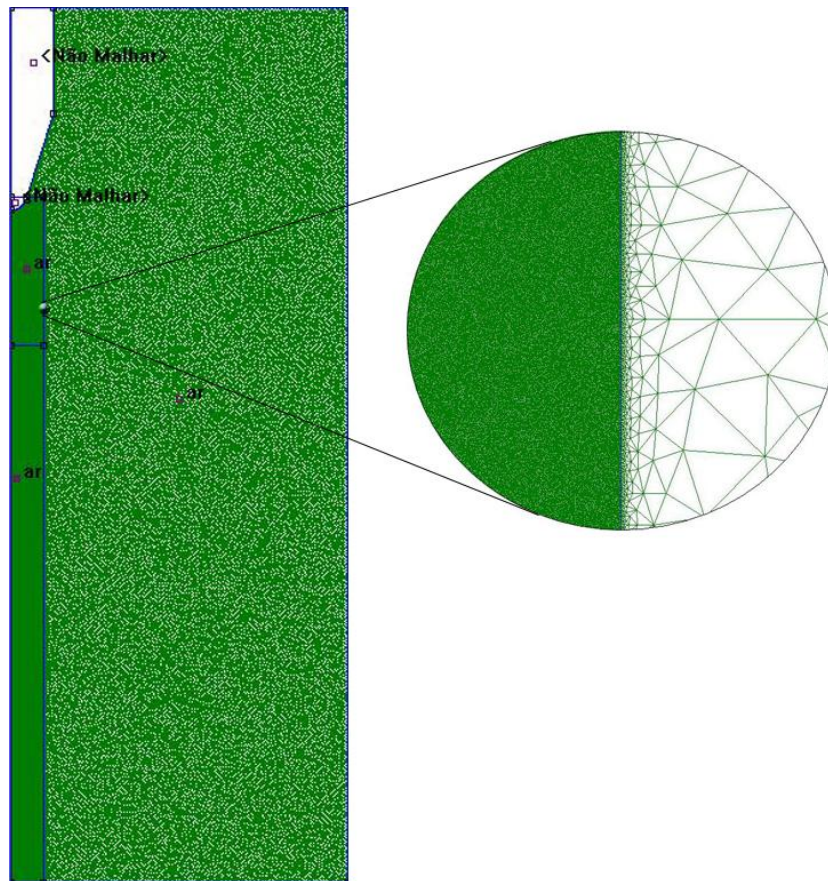


Figura 4.1: Exemplo de malha - detalhe à direita

Para problemas bidimensionais, usualmente utiliza-se elementos triangulares, devido a estes modelarem mais facilmente formatos irregulares, como é o caso do FEMM [23]. Estes elementos devem possuir suas fronteiras coincidentes, sendo o ponto comum entre vários elementos denominado nó. Além disto, o elemento não pode conter dois meios diferentes. Para melhor aproximação da resposta, o triângulo a ser utilizado como elemento deve ser equilátero, ou se aproximar o mais possível deste. Isto é devido à aproximação da variação do potencial no interior do elemento ser admitida linear. Em um triângulo que apresenta um de seus ângulos muito agudo isto não é verdade, pois há uma distorção do campo nesta região. O elemento de malha é detalhado na Figura 4.2.

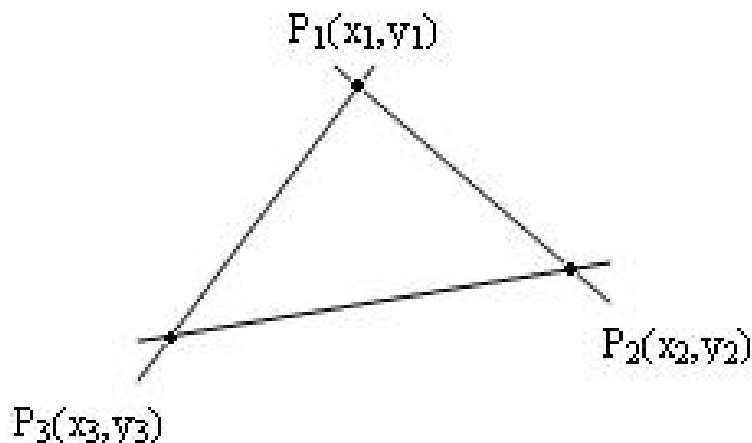


Figura 4.2: Elemento de malha

Um programa de cálculo de campo pode ser dividido em três etapas básicas:

- *Pré-processamento*: nesta etapa o usuário deve fornecer a estrutura a ser analisada (formas geométricas, condições de contorno, fontes). Ainda nesta etapa, a geração da malha deve ser efetuada de forma automática ou semi-automática pelo programa malhador.
- *Processamento*: uma vez que a discretização é efetuada, o cálculo utilizando o método de elementos finitos é aplicado; como principal resultado obtém-se o potencial incógnito nos nós.
- *Pós-processamento*: nesta etapa é efetuada a análise de resultados, tanto sob forma visual (traçado de equipotenciais, densidade de cores) como sob forma numérica, ou seja, obtém-se valores de campos, fluxos, etc.

Após a definição da malha, elementos finitos de primeira ordem são utilizados, onde o potencial varia linearmente segundo a Equação 4.1.

$$V(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y \quad (4.1)$$

Observando os três nós P_1 , P_2 e P_3 , tem-se as equações em 4.2.

$$\begin{aligned} V_1 &= a_1 + a_2x_1 + a_3y_1 \\ V_2 &= a_1 + a_2x_2 + a_3y_2 \\ V_3 &= a_1 + a_2x_3 + a_3y_3 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Resolvendo o sistema de equação, obtém-se os valores para as constantes a_1 , a_2 e a_3 ,

de acordo com a Equação 4.3.

$$\begin{aligned}
 a_3 &= \frac{V_1(x_3 - x_2) + V_2(x_1 - x_3) + V_3(x_2 - x_1)}{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)} \\
 a_2 &= \frac{V_1(y_2 - y_3) + V_2(y_3 - y_1) + V_3(y_1 - y_2)}{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)} \\
 a_1 &= \frac{V_1(x_2y_3 - x_3y_2) + V_2(x_3y_1 - x_1y_3) + V_3(x_1y_2 - x_2y_1)}{x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2)}
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Substituindo a Equação 4.3, na Equação 4.1, obtém-se o potencial em qualquer ponto no interior do elemento, dado pela Equação 4.4.

$$V(x, y) = \frac{1}{2\Delta} \sum_3 (p_i + q_i x + r_i y) V_i \tag{4.4}$$

Onde p, q, r são dados pela Equação 4.5.

$$\begin{aligned}
 p_1 &= x_2y_3 + x_3y_2 & q_1 &= y_2 - y_3 & r_1 &= x_3 - x_2 \\
 p_2 &= x_3y_1 + x_1y_3 & q_2 &= y_3 - y_1 & r_2 &= x_1 - x_3 \\
 p_3 &= x_1y_2 + x_2y_1 & q_3 &= y_1 - y_2 & r_3 &= x_2 - x_1
 \end{aligned} \tag{4.5}$$

Verifica-se que Δ corresponde à área do triângulo do elemento em questão. A relação entre Δ e as coordenadas dos vértices do elemento é dada por 4.6.

$$2\Delta = x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \tag{4.6}$$

Re-escrevendo o potencial, em função das tensões dos vértices do elemento, tem-se a Equação 4.7:

$$V(x, y) = \phi_1(x, y)V_1 + \phi_2(x, y)V_2 + \phi_3(x, y)V_3, \tag{4.7}$$

onde ϕ é chamada de função de forma, por definir a forma como o potencial varia no elemento.

A implementação do método de elementos finitos é feita, no caso do FEMM, aplicando-se o método dos resíduos, onde uma função resíduo é definida conforme Equação 4.8.

$$R = \nabla(\epsilon grad(V)) + \rho \tag{4.8}$$

Quanto mais a função resíduo se aproxima de zero, mais a solução obtida se aproxima da analítica. Esta função é então forçada a zero pela aplicação de uma função peso (W) em cada elemento. Aplicando apropriadamente as propriedades do divergente, chega-se à Equação 4.9.

$$\int_{\Omega} WRd\Omega = \oint_S W\epsilon grad(V)dS - \int_{\Omega} (\epsilon grad(V)grad(\phi))d\Omega + \int_{\Omega} \rho\phi d\Omega = 0 \tag{4.9}$$

A escolha da função peso particulariza o método. O programa FEMM opta pela variação linear da função peso; de maneira semelhante às funções de forma. O termo relativo à integral de superfície fechada na Equação 4.9 está relacionado às condições de fronteira, as quais devem ser estabelecidas pelo usuário do programa. Os outros dois termos referem-se ao campo elétrico, onde o primeiro termo está relacionado ao campo gerado pelos potenciais e o segundo ao gerado pelas cargas. Os termos relativos ao campo podem ser avaliados separadamente do termo relacionado às condições de fronteira.

Como este é um método discreto, deve-se a solução global é fornecida pela soma referente à cada nó do elemento considerado. Avaliando os termos referentes às fontes de campo:

$$\sum \int_{\Omega} (\epsilon \text{grad}(V) \text{grad}(\phi) - \rho \phi) d\Omega = 0 \quad (4.10)$$

$$\text{grad}V = \frac{1}{2\Delta} \sum_3 (q_i \vec{i} + r_i \vec{j}) V_i \quad (4.11)$$

$$\text{grad}\phi = \frac{1}{2\Delta} (q_i \vec{i} + r_i \vec{j}) \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} d\Omega &= \Delta \\ \int_{\Omega} \rho \phi d\Omega &= \rho \frac{\Delta}{3} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Na forma matricial, tem-se a Equação 4.14.

$$\frac{\epsilon}{4\Delta} \begin{bmatrix} q_1 q_1 + r_1 r_1 & q_1 q_2 + r_1 r_2 & q_1 q_3 + r_1 r_3 \\ q_2 q_1 + r_2 r_1 & q_2 q_2 + r_2 r_2 & q_2 q_3 + r_2 r_3 \\ q_3 q_1 + r_3 r_1 & q_3 q_2 + r_3 r_2 & q_3 q_3 + r_3 r_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} - \rho \frac{\Delta}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (4.14)$$

Para aplicação destas equações, é necessária a definição de um modelo adequado, feito pelo usuário, a partir do problema real.

4.3 Modelo Computacional

Uma das formas de se avaliar os modelos de predição, discutidos no Capítulo 2, é pela comparação do campo elétrico crítico, estimado por cada um dos modelos, com aqueles presentes no ensaio. Como a medição de campo elétrico próximo aos eletrodos sofre alteração pela presença do próprio medidor, optou-se pela simulação computacional.

Um modelo eletrostático bidimensional com simetria aximétrica foi utilizado para reproduzir a situação imediatamente anterior ao corona, antes da formação de carga espacial,

em cada configuração do arranjo. Para se garantir boa precisão dos resultados, modelou-se a região onde o campo foi tomado com maior número de elementos. A discretização do modelo gerou malhas com um total de aproximadamente dois milhões de elementos.

Para se avaliar a distribuição do campo elétrico, deve-se estabelecer o caminho no qual será observada esta distribuição. Este caminho foi chamado de “sensor” de campo.

4.3.1 Arranjo Ponta-plano

O modelo utilizado para simulação do arranjo ponta-plano foi reproduzido a partir do arranjo experimental, como apresentado na Figura 4.3. Nesta figura destaque-se os parâmetros físicos alterados a cada simulação (d e r).

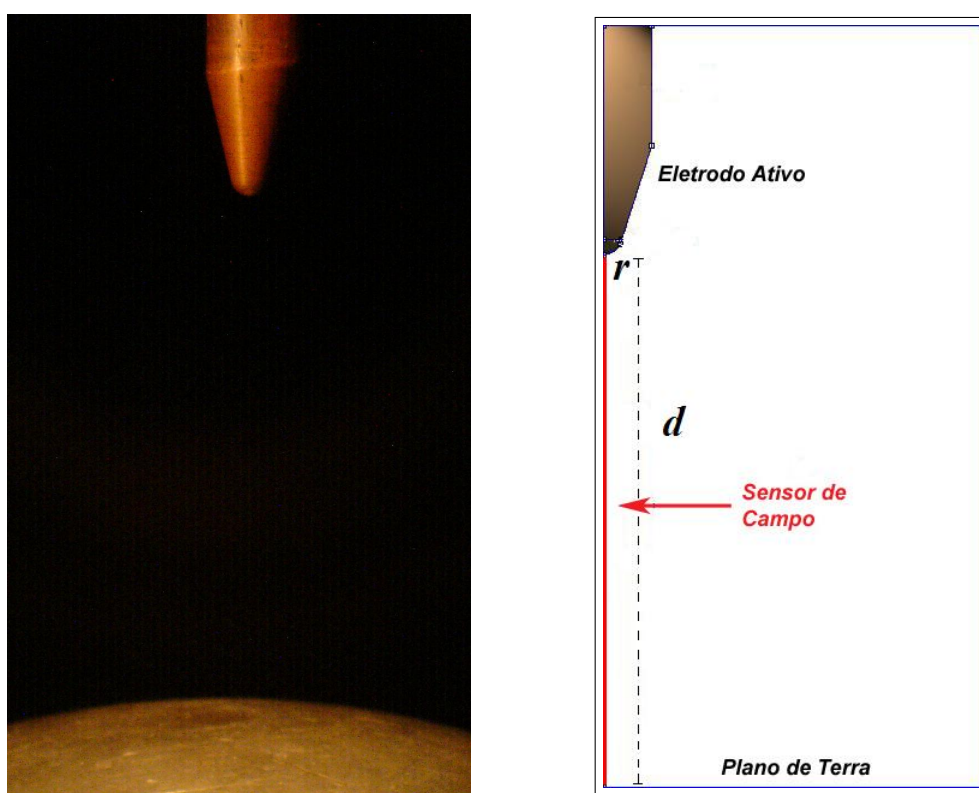


Figura 4.3: Modelo Computacional Para Arranjo Ponta-planos Utilizado na Simulação

O campo elétrico foi avaliado ao longo da linha central, a partir do eletrodo até o plano de terra. Cada topologia foi simulada à tensão de início de corona registrada em ensaio, conforme abordado anteriormente no Capítulo 3. O campo elétrico crítico é obtido através da simulação, sendo, para o caso ponta-plano, o campo máximo na superfície do eletrodo à tensão de início de corona.

4.3.2 Isolador polimérico

O modelo para o isolador pode ser observado na Figura 4.4, onde as variáveis utilizadas a cada configuração e os sensores de campo elétrico são observados. O campo elétrico foi avaliado em dois pontos distintos. Ao longo do *sensor 1*, partindo do ponto *A* até *B* e ao longo do *sensor 2*, de *C* a *D*. O primeiro sensor objetiva analisar a formação do corona entre a ferragem e a primeira semiesfera. O *sensor 2* procura avaliar a distribuição de campo elétrico ao longo da primeira saia, passando pelo centro das semiesferas (altura de 0.13cm para esferas maiores e 0.12cm para menores). O objetivo é a verificação do campo elétrico para a formação do corona entre semiesferas.

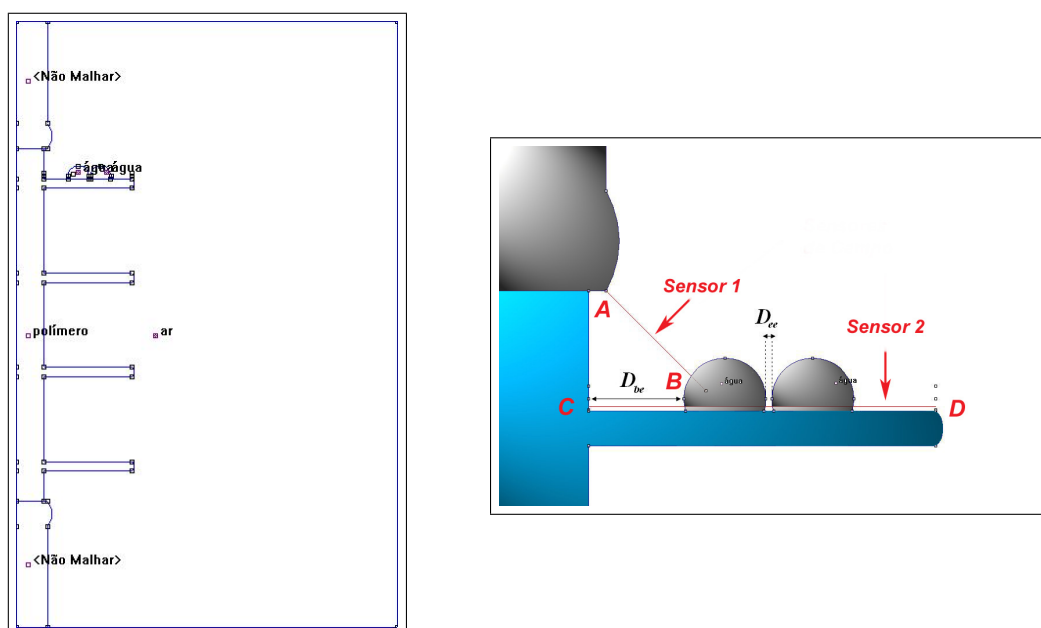


Figura 4.4: Modelo Computacional Para Isolador Polimérico Utilizado na Simulação

Deve-se observar que o modelo aximétrico representa bem o isolador, porém as semiesferas presentes nas saias serão interpretadas como semi-toróides. Mesmo assim é uma representação qualitativamente válida, considerando as limitações de um modelo bidimensional.

4.4 Resultados e Discussões

As simulações fornecem saídas gráficas, onde se pode analisar os valores de potencial e campo elétrico pontualmente, ou ao longo das linhas definidas como sensores, ou ainda pela visualização gráfica (linhas equidistantes ou por cores). As tonalidades associadas às cores mais quentes (vermelho, amarelo) representam maior intensidade do parâmetro avaliado, enquanto cores mais frias (lilás, azul) identificam menor intensidade deste. A Figura 4.5 exemplifica uma saída gráfica típica.

4.4.1 Arranjo Ponta-plano

Todas as configurações dos arranjos ponta-plano foram simuladas às tensões de início de corona registradas nos experimentos. A Figura 4.5 apresenta a distribuição do potencial e da intensidade de campo elétrico para o eletrodo $r3$ e distância de 7cm. Nota-se que a distribuição de potencial se dá de maneira não uniforme devido à geometria do eletrodo, se concentrando nas regiões próximas à ponta do eletrodo. Este fato é confirmado pelo gradiente do potencial, onde se observa um campo elétrico mais intenso nas proximidades do eletrodo energizado. Esta não uniformidade foi observada em todas as simulações, sendo mais acentuada para a ponta $r1$, como era esperado.

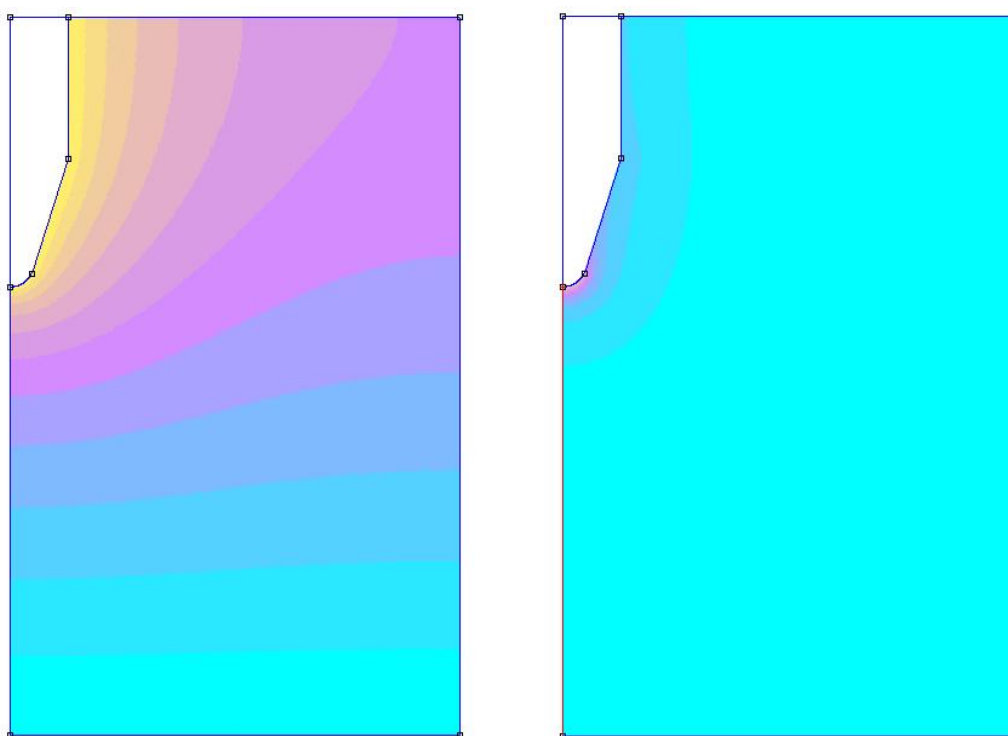


Figura 4.5: Potencial e Campo Elétrico obtidos para Ponta $r3$ e gap de 7cm.

A intensidade do campo elétrico ao longo do sensor é mostrada nas Figuras 4.6 e 4.7. A distância do gap é dada em porcentagem para efeito de comparação, para o caso de $gaps$ diferentes. Esta distância tem início no eletrodo ativo, e término no plano de terra, atribuído o valor de 100%.

A Figura 4.6 apresenta uma comparação do gradiente para os três diferentes eletrodos, em um mesmo gap , de 7cm à tensão de início de corona. Observa-se que, após cerca de 5% da distância total, o campo elétrico é menor que 10% do seu valor máximo para os três eletrodos. Para distâncias menores que 5% do gap , cada eletrodo apresenta diferentes valores de intensidade máxima de campo, além de diferentes variações deste campo. Quanto menor o raio de curvatura, maior a variação e intensidade do campo elétrico, ou

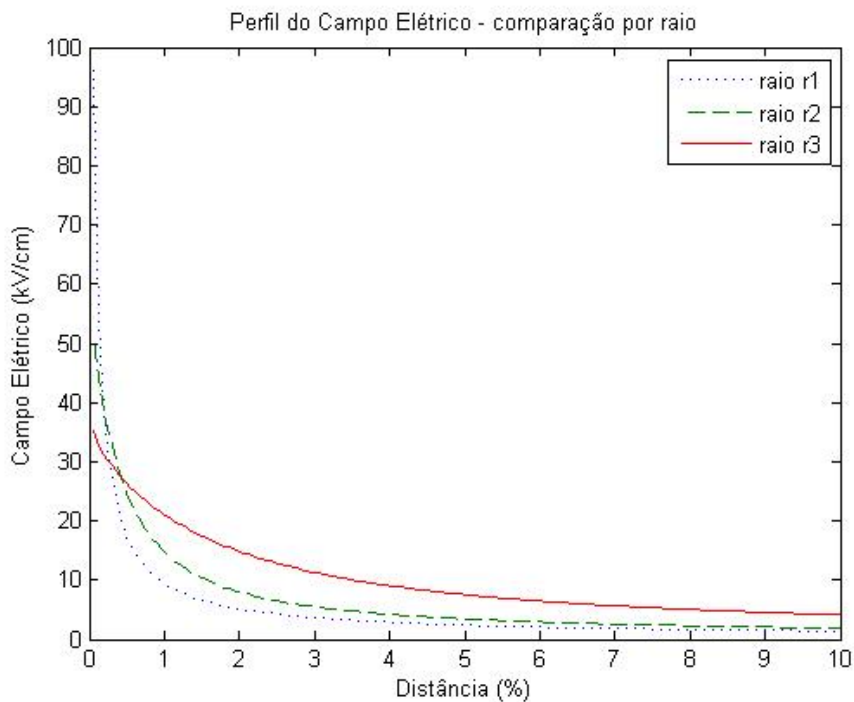


Figura 4.6: Intensidade de Campo Elétrico - variação com o raio de curvatura do eletrodo

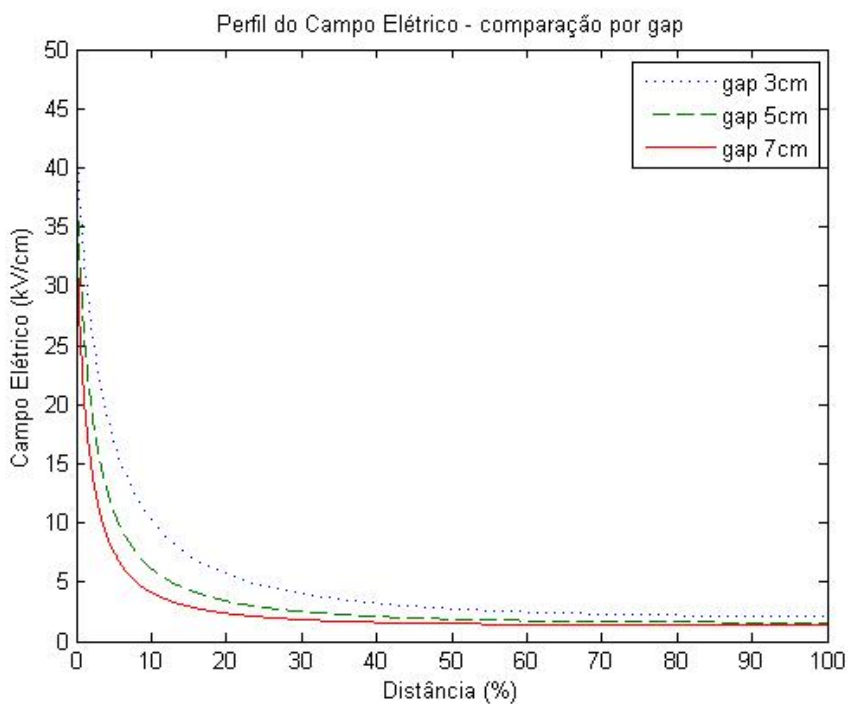


Figura 4.7: Intensidade de Campo Elétrico - variação com o tamanho do *gap*

seja, maior o grau de não uniformidade deste campo.

A Figura 4.7 exibe a intensidade do campo elétrico, simulado para o eletrodo r_3 , em diferentes tamanhos de gap à tensão de início de corona. A magnitude do campo é maior quanto menor o gap , mantendo-se perfil semelhante independente do tamanho do gap .

O campo elétrico máximo (valor r.m.s.), obtido na superfície do eletrodo para cada arranjo simulado à tensão de início de corona, é encontrado na Tabela 4.1. Observa-se que, quanto menor o comprimento do gap , maior o campo elétrico próximo à superfície do eletrodo energizado. Dependendo da relação entre o comprimento do gap e o raio do eletrodo (d/r), o campo elétrico para início de corona apresenta grandes variações, não sendo este somente dependente do raio. O grau de não uniformidade apresentado pelo campo elétrico também depende da relação d/r , e quanto menor esta relação mais suave o perfil de campo.

Raios	Comprimento do gap			
	1.5cm	3cm	7cm	10cm
r1	151.6kV/cm	127.7kV/cm	72.1kV/cm	49.0kV/cm
r2	61.4kV/cm	58.5kV/cm	45.7kV/cm	38.3kV/cm
r3	44.5kV/cm	43.9kV/cm	35.2kV/cm	29.6kV/cm

Tabela 4.1: Campo elétrico máximo simulado

4.4.2 Isolador Polimérico

A Figura 4.8 exibe a distribuição do campo elétrico, considerando a presença das semiesferas na primeira saia do isolador. Analisando esta figura, observa-se uma intensifi-

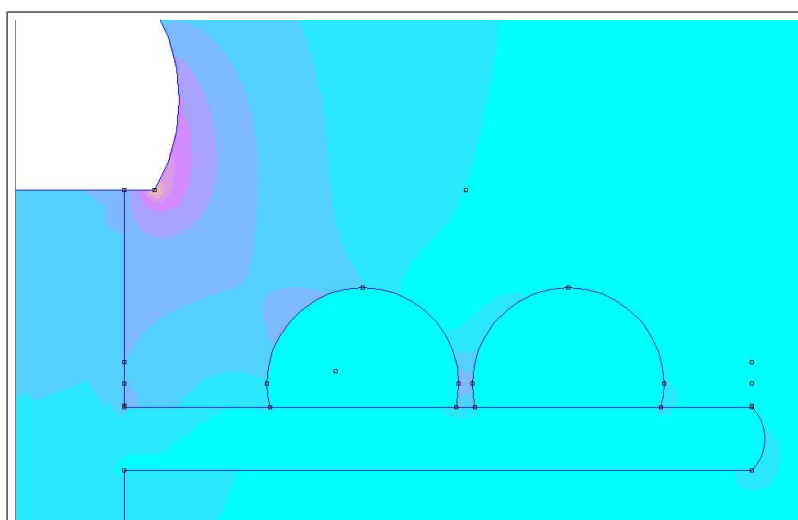


Figura 4.8: Campo Elétrico para Início de Corona

cação do campo elétrico nos *gaps* onde ocorrem as descargas de corona, *gap* esfera-esfera e ferragem-esfera.

A distribuição de campo elétrico para a situação de início de corona, e respectivo potencial ao longo do sensor 2, são vistos nas Figuras 4.9 e 4.10. O caso em questão

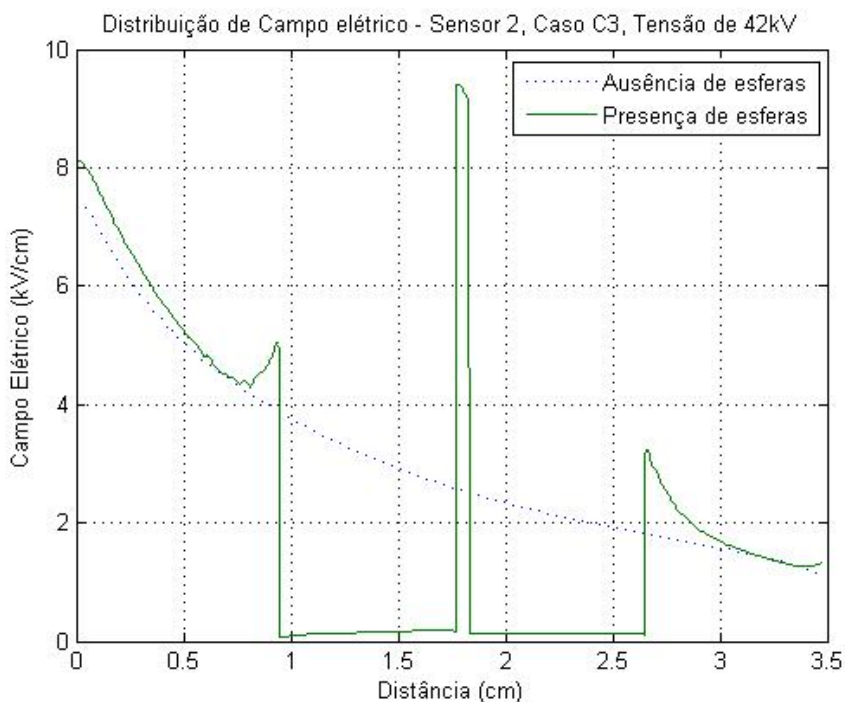


Figura 4.9: Distribuição de Campo Elétrico - Efeito das semiesferas

é o *C3*, onde a tensão aplicada é de 42kV, conforme Tabelas 3.2 e 3.3. A presença das semiesferas faz com que o campo elétrico máximo seja elevado em uma região pequena, causando o aparecimento do corona nesta região.

A Tabela 4.2 apresenta os resultados para campo elétrico máximo simulado para os *gaps* analisados, às tensões de início de corona registradas. Observa-se que estes valores são próximos para o mesmo tipo de *gap*.

Casos	Campo Elétrico (r.m.s.)	
	E_{ee}	E_{fe}
C1	9.9kV/cm	-
C2	10.3kV/cm	32.0kV/cm
C3	9.4kV/cm	32.0kV/cm

Tabela 4.2: Campo Elétrico Máximo

Tanto o perfil do campo, quanto o campo elétrico máximo são aproximadamente os mesmos quando comparam-se os três casos estudados, como é mostrado na Figura 4.11.

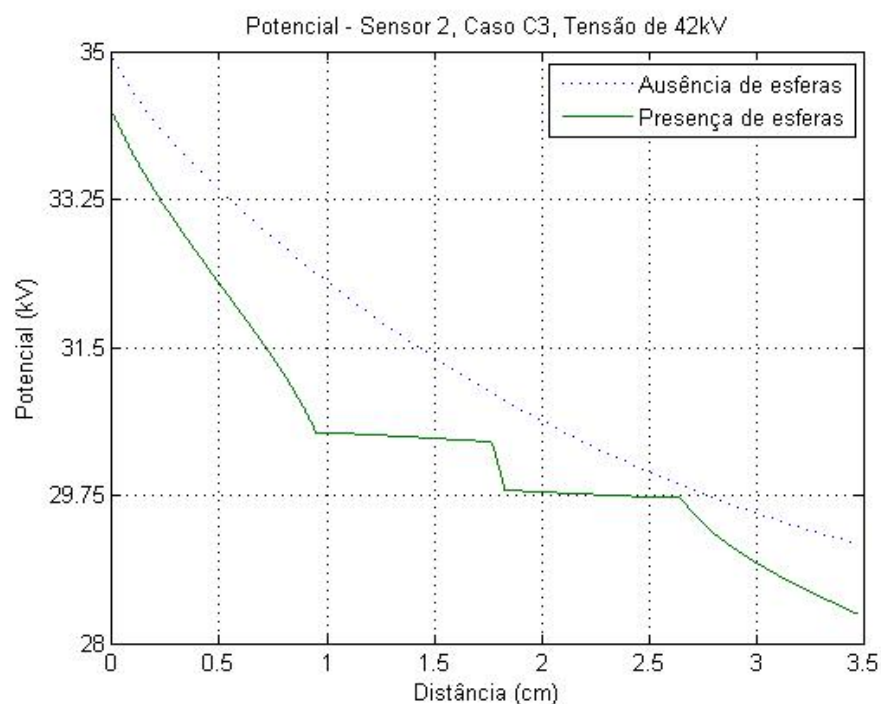


Figura 4.10: Potencial - Efeito das semiesferas

Nota-se que o campo elétrico é praticamente constante entre semiesferas, devido à pequena distância existente entre estas. Verifica-se também que, ao alcançar um valor em torno de 10kV/cm as descargas de corona ocorrem, diferentemente do arranjo ponta-plano, em que estas dependem da intensidade e grau de uniformidade do campo, não possuindo um valor fixo.

Analisando o potencial (Figura 4.12), verifica-se que, este muda de acordo com a tensão aplicada, porém, o potencial flutuante entre semiesferas é praticamente o mesmo para os três casos, em torno de 1kV .

Analisando o *gap* entre ferragem-esfera, ao longo do sensor 1, observa-se que a presença das semiesferas faz com que o campo elétrico, nas proximidades destas, seja elevado conforme Figura 4.13. Este fato provoca uma mudança na distribuição do campo e consequente aumento do campo médio neste *gap*, o que leva à formação do corona. Isto ocorre mesmo para diminuição do potencial ao longo do *gap* devido à presença das semiesferas, como mostrado na Figura 4.14. O campo elétrico máximo neste *gap* não variou, se mantendo em torno de 30kV/cm . Estas constatações são evidenciadas na Figura 4.13 e Tabela 4.2.

A partir dos resultados obtidos nos ensaios e através das simulações, pode-se avaliar, tomando estes parâmetros como critério, cada modelo de predição apresentado no Capítulo 2. Esta análise é realizada no capítulo que segue.

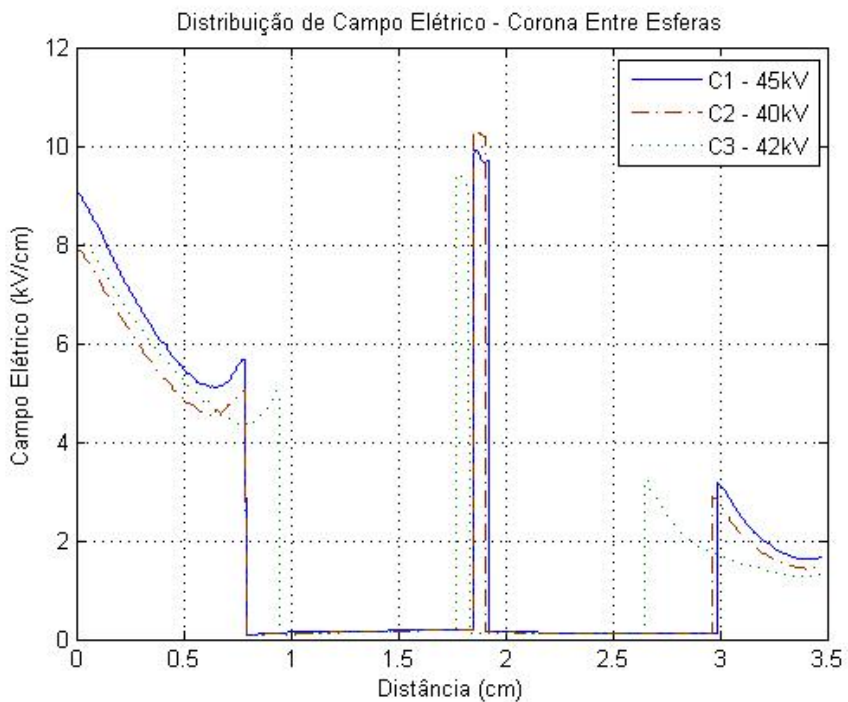


Figura 4.11: Distribuição de Campo Elétrico - Corona entre semiesferas

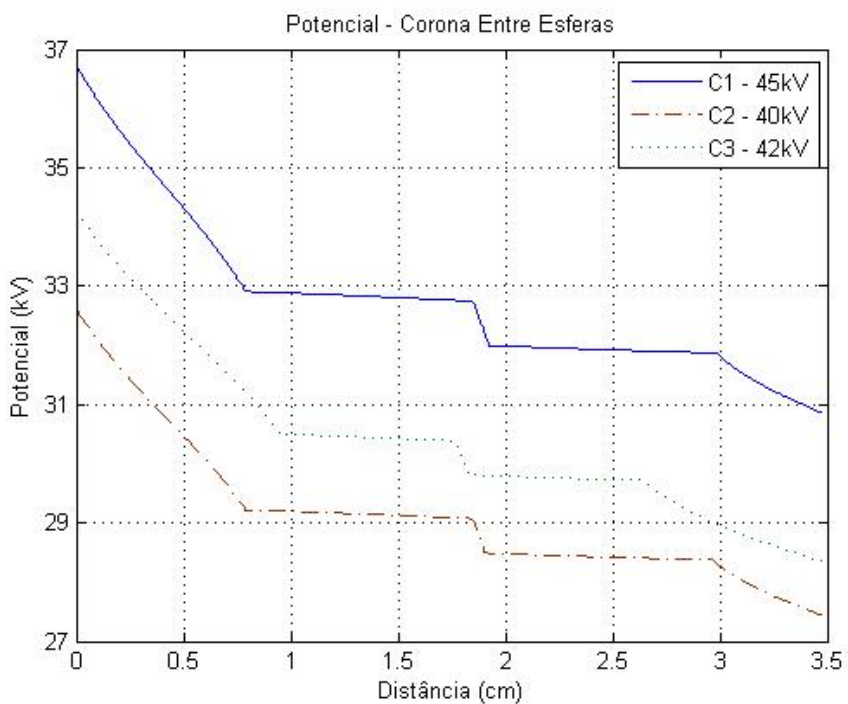


Figura 4.12: Potencial - Corona entre semiesferas

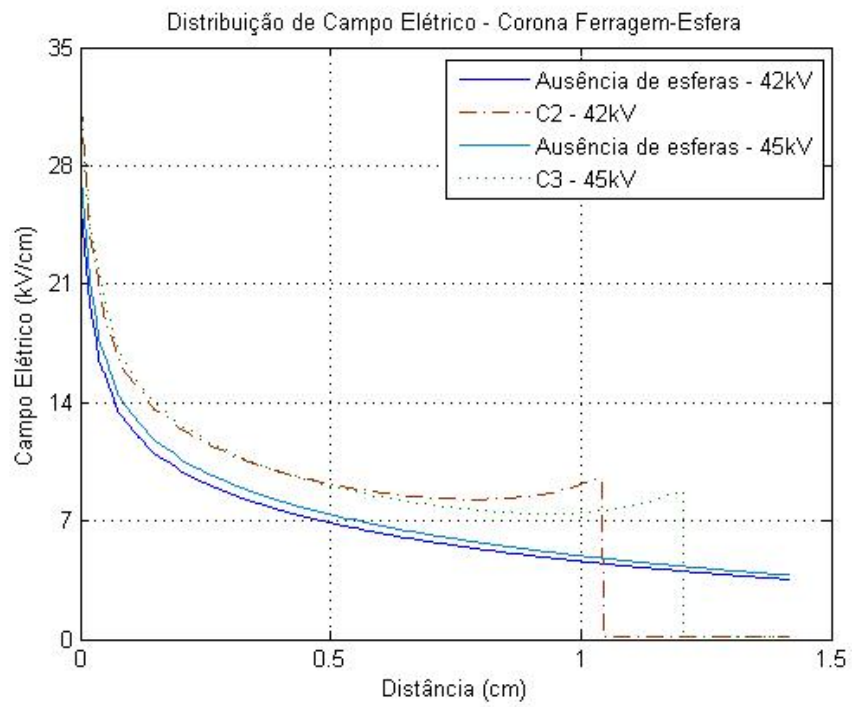


Figura 4.13: Distribuição de Campo Elétrico - Corona *gap* ferragem-esfera

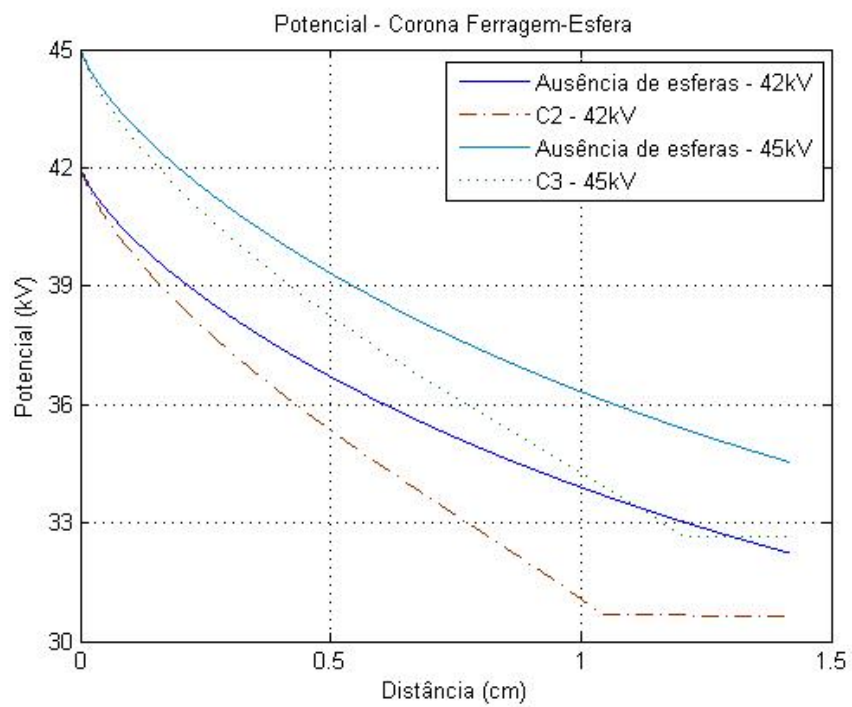


Figura 4.14: Potencial - Corona *gap* ferragem-esfera

Análise dos Modelos de Predição

5.1 Introdução

As formulações referentes aos modelos de predição apresentados no Capítulo 2 foram aplicadas aos arranjos ponta-plano avaliados experimentalmente. A análise dos resultados é realizada aqui de duas formas: através das tensões de início de corona e pela análise do campo crítico correspondente. O foco principal é a análise das tensões de início de corona calculadas por cada modelo. A observação do campo elétrico crítico também se faz necessária, visto que, dependendo do modelo, as tensões são calculadas utilizando este campo.

5.2 Tensão de Início de Corona

A Tabela 5.1 exibe as tensões de início de corona obtidas utilizando cada modelo, para cada configuração do arranjo ponta-plano. Estas tensões foram calculadas a partir das correspondentes expressões para tensão de início de corona e das informações de campo elétrico crítico, este último obtido pelas formulações empíricas apresentadas ou pelas simulações (no caso do Fator de Eficiência de Campo). Para o cálculo destas tensões o fator de irregularidade da superfície m foi considerado igual a 1 (superfície polida) e a densidade relativa do ar δ foi considerada 0.91 (média obtida dos ensaios realizados).

As tensões de início de corona previstas pelas expressões de Peek (Equação 2.7) e de Zaengl (Equação 2.20), chamadas respectivamente de V_{peek} e V_{zaengl} , são muito semelhantes. Este fato era esperado, visto que a expressão de Zaengl apresenta uma correção na formulação de Peek, para raios maiores. Os valores apresentados por estes dois modelos fornecem menor discrepância para *gaps* maiores, ou seja, quando a dependência da tensão

Gap	Raios	V_{medido}	V_{peek}	V_{zaengl}	V_{fator}
1.5cm	r1	6.36kV	6.7kV	6.3kV	4.52kV
	r2	9.90kV	10.8kV	10.6kV	5.09kV
	r3	16.97kV	20.5kV	20.8kV	14.14kV
3cm	r1	7.78kV	7.7kV	7.2kV	3.96kV
	r2	11.31kV	12.8kV	12.5kV	5.09kV
	r3	21.92kV	26.4kV	26.8kV	16.26kV
7cm	r1	8.48kV	8.9kV	8.3kV	2.26kV
	r2	12.73kV	15.2kV	15.0kV	4.24kV
	r3	25.46kV	34.0kV	34.5kV	13.86kV
10cm	r1	8.48kV	9.4kV	8.8kV	1.56kV
	r2	13.43kV	16.3kV	16.0kV	3.54kV
	r3	26.87kV	37.3kV	37.8kV	12.02kV

Tabela 5.1: Tensões de início de corona - calculadas e medidas (kV pico)

de início de corona com o tamanho do *gap* é diminuída. Contudo, a tendência observada para as tensões calculadas por estes modelos é a mesma pelas tensões registradas no ensaio, ou seja, um aumento das tensões de início de corona tanto com o raio do eletrodo, quanto com o tamanho do *gap*. Deve-se observar que as tensões diferem das encontradas nos ensaios devido à aplicação da Equação 2.7, num arranjo ponta-plano, sendo esta adequada para condutores cilíndricos concêntricos.

O modelo baseado na expressão do Fator de Eficiência de Campo, apresentou valores estimados para tensão de início de corona (V_{fator}), abaixo dos valores observados nos experimentos. Atribui-se estas diferenças principalmente à sensibilidade na identificação da tensão de início de corona. Nos experimentos realizados por Qiu [16] a identificação foi baseada em observações à olho nu, diferentemente dos experimentos conduzidos nesta pesquisa, onde se utilizou uma câmera fotográfica.

Buscando-se uma melhora nos resultados apresentados é realizada uma modificação na expressão de η , de forma que esta melhor se adeque aos valores encontrados experimentalmente, conforme Figura 5.1 e Equação 5.1.

$$\eta_{modificado} = [0.22 \cdot (d/r) \cdot \ln(6 \cdot (d/r)) / \ln(d/r)]^{-1} \quad (5.1)$$

A modificação de um coeficiente no Fator de Eficiência de Campo permitiu que as tensões calculadas por este modelo ($V_{modificado}$) apresentassem valores mais coerentes com os medidos, como é demonstrado pela Tabela 5.2. Esta tabela apresenta o comparativo para as tensões de início de corona calculadas utilizando o Fator modificado. Observa-se melhora significativa dos resultados, principalmente para os eletrodos de raios maiores, $r2$ e $r3$, obtendo erro médio de 23%. Embora os resultados para o eletrodo $r1$ tenham apresentado melhoras, os erros se mostraram ainda elevados, chegando a 55%.

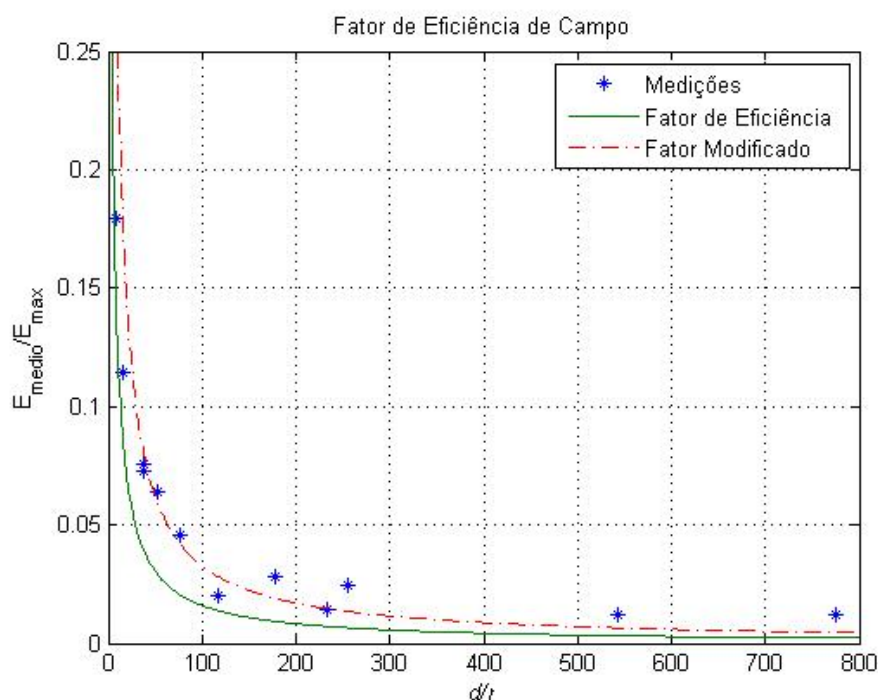


Figura 5.1: Fator de Eficiência de Campo

Gap	Raios	V_{medido}	$V_{modificado}$	Diferença Perc.
1.5cm	r1	6.36kV	9.47kV	48,9%
	r2	9.90kV	9.05kV	9,4%
	r3	16.97kV	18.10kV	6,7%
3cm	r1	7.78kV	11.74kV	50,9%
	r2	11.31kV	9.19kV	23,1%
	r3	21.92kV	20.93kV	4,7%
7cm	r1	8.48kV	6.79kV	25%
	r2	12.73kV	12.59kV	1,1%
	r3	25.46kV	25.03kV	1,6%
10cm	r1	8.48kV	4.67kV	55%
	r2	13.43kV	10.75kV	25%
	r3	26.87kV	21.64kV	24,2%

Tabela 5.2: Tensões de início de corona - Fator modificado (kV pico)

5.3 Campo Elétrico Crítico

Os resultados para o campo crítico são apresentados na Tabela 5.3, onde se pode comparar os valores de campo elétrico encontrados pela simulação com aqueles obtidos pelas expressões de cada modelo. Vale ressaltar que o cálculo do campo crítico efetuado a partir do Fator de Eficiência de Campo se utiliza da tensão de início de corona obtida do ensaio, devido a este campo ser função desta tensão, conforme mostra a Equação 2.15.

Gap	Raios	$E_{simulado}$	E_{peek}	E_{zaengl}	E_{fator}
1.5cm	r1	214.39	109.27	102.36	149.41
	r2	86.83	74.86	73.56	82.86
	r3	62.93	49.71	50.39	37.0
3cm	r1	180.60	109.27	102.36	176.27
	r2	82.73	74.86	73.56	89.71
	r3	64.06	49.71	50.39	42.26
7cm	r1	101.96	109.27	102.36	183.68
	r2	64.63	74.86	73.56	96.11
	r3	49.78	49.71	50.39	44.56
10cm	r1	69.30	109.27	102.36	185.88
	r2	54.16	74.86	73.56	99.77
	r3	41.86	49.71	50.39	45.64

Tabela 5.3: Campo elétrico crítico - simulado e calculado (kV/cm pico)

Observa-se que os campos elétricos críticos calculados pelas expressões de Peek (Equação 2.5) e Zaengl (Equação 2.20), chamados respectivamente de E_{peek} e E_{zaengl} , são independentes do tamanho do *gap*. O tamanho do *gap* é considerado apenas no cálculo da tensão de início de corona, realizado a partir deste campo crítico. Na formulação empírica de Peek, o campo elétrico crítico é função somente de um único parâmetro geométrico, o raio do eletrodo ativo. Ao aplicar esta expressão a arranjos ponta-plano, verifica-se que o campo elétrico estimado se aproxima do valor obtido nas simulações para configuração composta do *gap* intermediário, 7 cm, para os três raios dos eletrodos.

Para os campos calculados utilizando o Fator de Eficiência de Campo (E_{fator}), nota-se que estes se aproximam do valor encontrado nas simulações em duas situações: para raio do eletrodo e *gaps* pequenos (como se verifica para $r1$ e $r2$ com *gaps* de 1.5 e 3cm); e para raio do eletrodo e *gaps* grandes (como se observa para $r3$ com *gaps* de 7 e 10cm). Isto indica que existem faixas da curva do Fator de Eficiência de Campo que estão adequadas, conduzindo a valores de campo coerentes com a simulação. Esta faixa se estende para d/r assumindo valores entre 35 e 200. Portanto, um ajuste em η , como feito anteriormente para a tensão, é necessário para corrigir as demais situações.

5.4 Modelo de Predição Proposto

Os modelos discutidos neste trabalho são capazes de estimar a tensão de início de corona, cada um com suas próprias limitações e com suas próprias qualidades. Deste modo, procurou-se identificar aquele que pudesse, de maneira simples, ser utilizado coerentemente para estimar esta tensão nos arranjos ponta-plano. A solução adotada foi a utilização do campo elétrico crítico dado por Peek na formulação do Fator de Eficiência

de Campo, com posterior ajuste deste fator.

5.4.1 Descrição

Observando a expressão empírica apresentada por Peek, nota-se que o campo elétrico crítico independe do comprimento do *gap*, sendo somente função do raio e de fatores ambientais. A presença de constantes como o fator de rugosidade, para correção da expressão, insere ainda um grau de incerteza a esta expressão, já que este fator é definido conforme a superfície do condutor (valores típicos são encontrados para cabos na literatura) [8]. Além disto, esta expressão é baseada em arranjos do tipo cilindros concêntricos. Mesmo assim, esta formulação é utilizada amplamente, para outros arranjos. Embora o campo elétrico crítico fornecido por Peek informe uma estimativa deste, os valores de tensões de início de corona calculados a partir deste campo, se tornam equivocados ao aplicá-lo a arranjos diferentes daqueles utilizados para elaboração da expressão.

Para o cálculo do campo crítico utilizando a formulação baseada no Fator de Eficiência de Campo, é necessário o conhecimento prévio da tensão de início de corona. Da mesma forma, para se calcular a tensão de início de corona, a partir desta expressão, deve-se ter o campo elétrico crítico. O que o Fator de Eficiência de Campo indica, portanto, é a relação entre o campo elétrico e a tensão no momento do surgimento do corona. Esta relação, em uma simulação eletrostática é mantida; ou seja, para uma mesma configuração de um arranjo à qualquer tensão aplicada, o campo correspondente apresentará uma relação com a tensão dada pelo Fator de Eficiência de Campo. Este fator pode ser aplicado a um conjunto maior de situações, visto que inclui a dependência da tensão de início de corona com o comprimento do *gap* e com o raio. Mesmo assim, este fator, por si só, não pode ser utilizado para constatar a presença do corona ou estimar a tensão em que ele ocorre.

O modelo proposto busca relacionar o campo crítico de Peek e o Fator de Eficiência de Campo. Deste modo, redefiniu-se o Fator de Eficiência de Campo como a relação entre o campo médio para a tensão de início de corona e o campo elétrico crítico dado por Peek. Este novo fator foi chamado de Fator de Eficiência de Campo Ajustado (η'), e expressa o quanto o campo crítico de Peek se aproxima do campo uniforme, em função da geometria do arranjo (d/r). Desta forma, a partir somente da tensão aplicada e dos parâmetros geométricos, pode-se estimar a tensão de início de corona. A Equação 5.2 expressa a relação atribuída a este fator.

$$\begin{aligned} V_c &= \eta' \cdot E_c \cdot d \\ \eta' &= \frac{E_{medio}}{E_c}, \end{aligned} \tag{5.2}$$

onde E_c é o campo crítico de Peek, d é o comprimento do *gap* e η' é o Fator de Eficiência de Campo Ajustado.

O ajuste no Fator de Eficiência de Campo é necessário devido ao campo elétrico crítico, utilizado como base para os cálculos deste fator, ser dado, agora, pela expressão de Peek. Este ajuste é realizado com base nas amostras medidas, sendo um total de 15 amostras, obtidas nos experimentos realizados com arranjos ponta-plano, em diferentes condições ambientais. O ajuste chamado de global (η'_{global}) é dado pela Equação 5.3.

$$\eta'_{global} = [0.198 \cdot (d/r) \cdot \ln(6 \cdot (d/r)) / \ln(d/r)]^{-1} \quad (5.3)$$

Com estas formulações, pode-se estimar a tensão de início de corona a partir do campo elétrico crítico de Peek e da geometria do arranjo. O fator ajustado elimina a dependência das simulações e, ao mesmo tempo, confere a influência do tamanho do *gap* ao modelo de predição. As tensões estimadas para as amostras utilizadas para ajuste do modelo são vistas na Figura 5.2, juntamente com os erros em relação aos experimentos. As amostras são ordenadas de maneira crescente, em função de d/r . Verifica-se boa concordância dos resultados, porém as diferenças percentuais ainda são elevadas, com média em torno de 21,8% alcançando valor máximo de 49,2%.

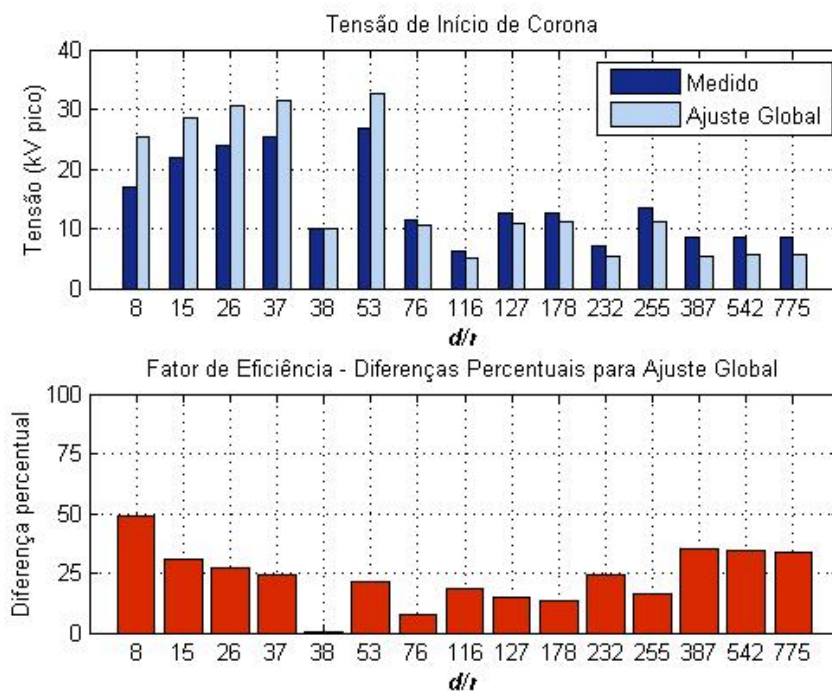


Figura 5.2: Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Ajuste Global

Com base nas diferenças percentuais apresentadas, é sugerido um outro ajuste, delimitando regiões de acordo com a relação d/r , de forma a melhorar a aproximação da tensão de início de corona. Este ajuste foi denominado de ajuste local. Observa-se uma divisão

entre duas regiões, de acordo com o valor das diferenças percentuais, uma região onde d/r vai de 10 a 60, onde estas diferenças decaem, e uma segunda faixa que se estende de 60 a 600, onde as diferenças percentuais aumentam. Cada uma destas regiões teve seu próprio ajuste, conforme Equação 5.4.

$$\begin{aligned} \eta'_{local1} &= [0.2475 \cdot (d/r) \cdot \ln(6 \cdot (d/r)) / \ln(d/r)]^{-1} \\ \eta'_{local2} &= [0.1556 \cdot (d/r) \cdot \ln(6 \cdot (d/r)) / \ln(d/r)]^{-1} \end{aligned} \tag{5.4}$$

A estimação das tensões de início de corona com o ajuste local resultou em diferenças percentuais abaixo dos 20% (Figura 5.3). A média apresentada por estas diferenças foi de 9,9%, o que o torna um modelo satisfatório, para fins práticos, para a predição das tensões de início de corona.

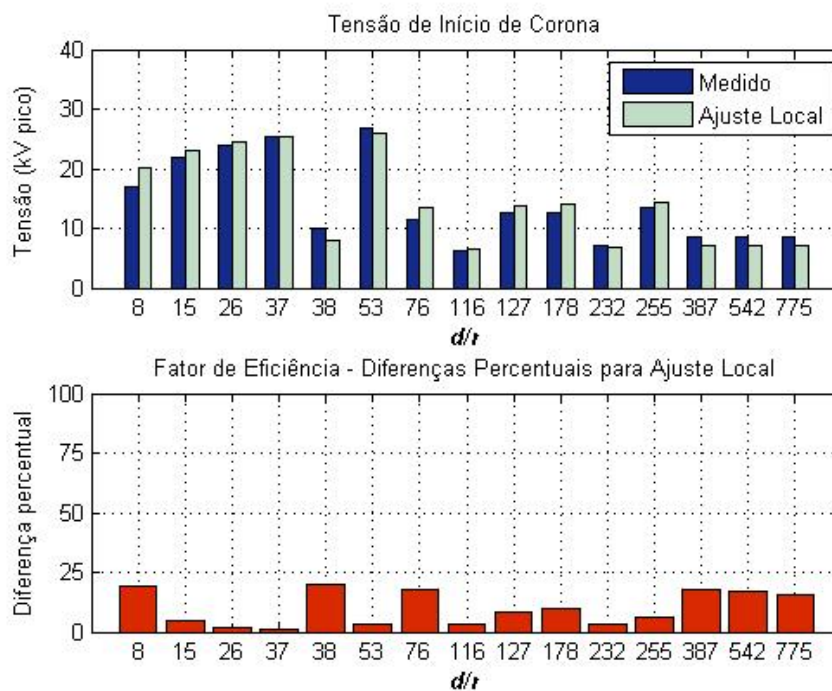


Figura 5.3: Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Ajuste Local

A comparação entre os dois ajustes é apresentada na Figura 5.4. Para ambos, o modelo proposto apresentou boa concordância com valores obtidos nos ensaios. No entanto, o ajuste local, se mostrou mais aceitável, apresentando menor discrepância em relação aos valores medidos.

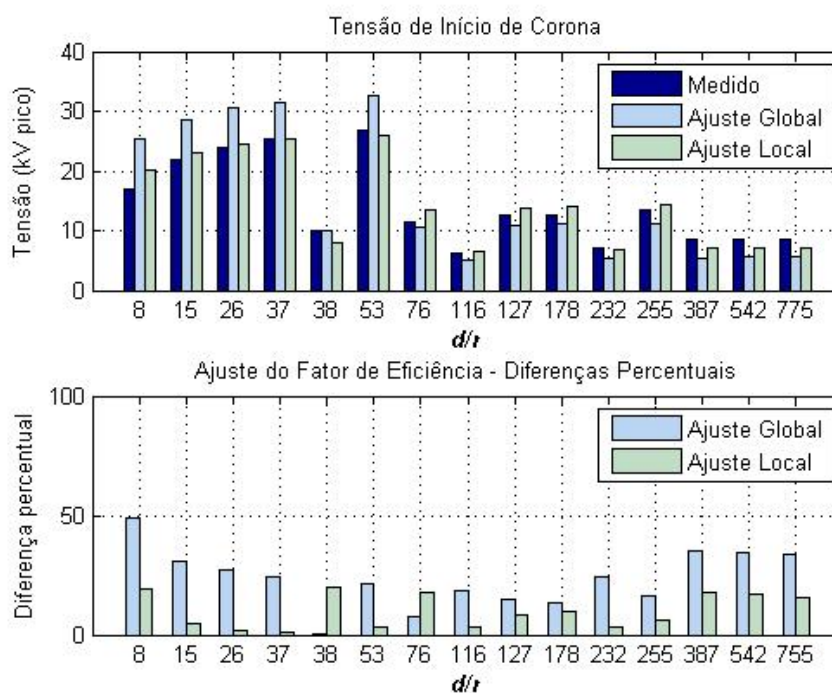


Figura 5.4: Estimação Para Tensões de Início de Corona dos Experimentos - Comparação entre Ajustes Global e Local

5.5 Considerações de Projeto

Deve-se observar que a tensão na qual se inicia o corona apresenta variações para um mesmo arranjo sob teste, como constatado pelos experimentos realizados. Estas variações se devem tanto às diferentes condições ambientais de cada experimento, como à natureza probabilística do efeito corona. A fim de contornar este problema, para propósitos de projeto, sugere-se dois procedimentos: aplicação de uma margem de segurança, ou a consideração de uma tensão de início de corona estatística.

5.5.1 Margem de Segurança

Como a tensão de início de corona não apresenta um valor fixo para uma mesma configuração de arranjo, pode-se prever a presença do corona, adotando-se uma margem de segurança. Deste modo, aplica-se um fator à tensão estimada pelo modelo proposto, diminuindo o valor da tensão associada ao início do corona. Este novo valor de tensão pode ser admitido como seguro, do ponto de vista de projeto, sendo a tensão acima deste valor considerada suficiente para formar o corona e abaixo deste valor é considerado que não há corona no arranjo em questão. Este procedimento é melhor ilustrado através da Figura 5.5.

Para estabelecer a margem de segurança, pode-se considerar os valores das diferenças

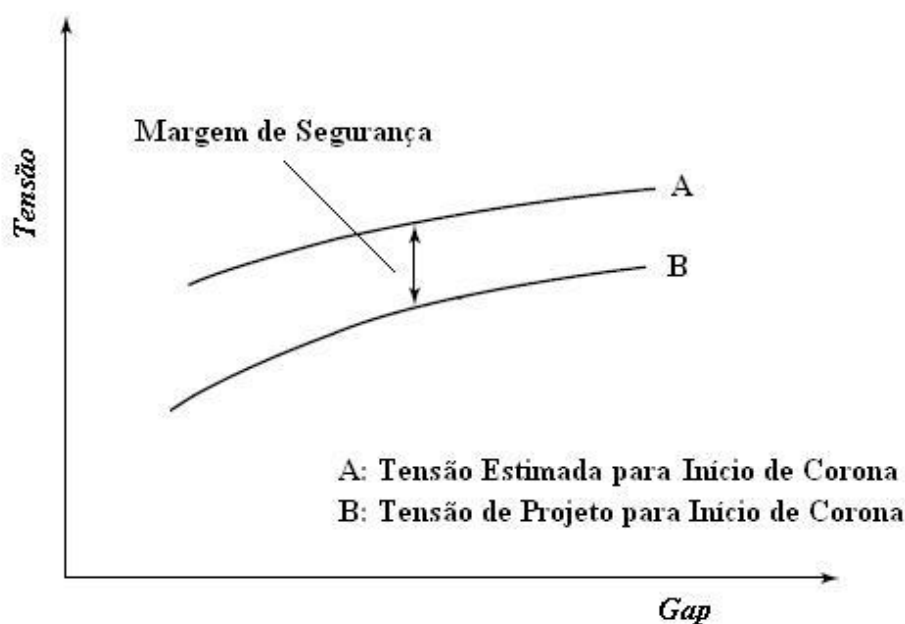


Figura 5.5: Margem de Segurança Estabelecida Para Fins de Projeto

percentuais encontradas nos experimentos. Definida a margem de segurança, pode-se atrelá-la ao Fator de Eficiência de Campo η'_{global} . Deste modo, para se estabelecer uma margem de segurança, por exemplo de 20%, no cálculo das tensões de início de corona, é necessário deslocar a curva η'_{global} para 80% do seu valor.

A Tabela 5.4 apresenta os valores de tensão (kV pico) estimados para fins de projeto ($V_{projeto}$), para as amostras utilizadas para ajuste do modelo. Acima destes valores estimados o corona é considerado presente no arranjo. Foi considerada uma margem de segurança de 20% para estas estimações. Para fins de comparação, os valores encontrados nos experimentos também são exibidos na tabela. A presença do corona é indicada pelo símbolo “O” e sua ausência por “X”, baseado na predição realizada através do modelo proposto.

Para que o modelo apresente resultados coerentes, é necessário que este indique a presença de corona para tensões não superiores àquelas observadas nos ensaios. Observa-se que, não há indicação de corona para três situações, onde este foi constatado nos ensaios. Isto se deve à tensão estimada para início de corona pelo modelo, ter ficado acima da tensão registrada nos experimentos, mesmo adotando-se o fator de segurança.

Além dos erros verificados, alguns valores de tensão de início de corona ficaram muito abaixo do valor real, se mostrando conservador nestes casos. Para os casos analisados, a adoção de uma margem de 20% se mostra insuficiente para que o modelo apresente resultados satisfatórios em todas as amostras.

Gap	Raios	V_{medido}	$V_{projeto}$	Corona
1.5cm	r1	6.36kV	4.10kV	O
	r2	9.90kV	7.92kV	O
	r3	16.97kV	20.22kV	X
3cm	r1	7.78kV	4.24kV	O
	r2	11.31kV	8.34kV	O
	r3	21.92kV	22.91kV	X
5cm	r1	8.48kV	4.38kV	O
	r2	12.73kV	8.63kV	O
	r3	24.04kV	24.47kV	X
7cm	r1	8.48kV	4.38kV	O
	r2	12.73kV	8.77kV	O
	r3	25.46kV	25.17kV	O
10cm	r1	8.48kV	4.52kV	O
	r2	13.43kV	8.91kV	O
	r3	26.87kV	26.02kV	O

Tabela 5.4: Predição de corona adotando-se margem de segurança de 20%

5.5.2 Tensão de Início de Corona Estatística

Assim como na disrupção, o processo de ionização possui um comportamento estatístico. Pode-se dizer então, que existe uma tensão provável de se haver corona e não um valor fixo. Pensando desta forma, de modo similar a estudos de coordenação de isolamento, onde se estabelece uma tensão disruptiva estatística, procura-se estabelecer um valor de tensão cuja probabilidade de corona ocorrer seja muito baixa ou muito elevada, de acordo com a necessidade. Estes valores podem, posteriormente, ser utilizados como um critério de projeto.

Como a disrupção tem mesma origem do efeito corona, assume-se que a distribuição da probabilidade para tensão de início de corona é a mesma para a tensão de disrupção, ou seja, uma distribuição gaussiana, dada pela Equação 5.5 [5, 24, 25].

$$P(V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{V - V_{50\%}}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

Onde $V_{50\%}$ é a tensão cuja probabilidade de ocorrência de corona é de 50% e σ é o desvio padrão.

A Figura 5.6 apresenta a densidade de probabilidade para a tensão de início de corona, correspondente à Equação 5.5.

Admite-se que, a partir da curva do Fator de Eficiência de Campo, obtém-se a tensão de 50% para ocorrência do corona. Assim, através da curva η'_{global} tem-se $V_{50\%}$, em função de d/r . Como, para estabelecimento da curva do Fator de Eficiência de Campo, utilizou-se valores correspondentes dos experimentos realizados, em diferentes condições,

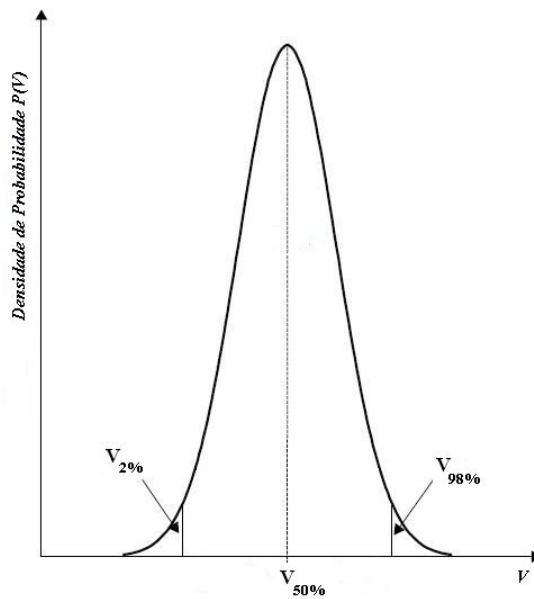


Figura 5.6: Distribuição Gaussiana Assumida para Tensão de Início de Corona

esta proposição é aceitável. Quanto maior a quantidade de ensaios realizados em cada *gap*, melhor a aproximação da curva η'_{global} , e mais próximo do $V_{50\%}$ serão as tensões calculadas a partir desta curva. Sugere-se que, um processo semelhante ao método “up and down” (realizado para se obter a tensão disruptiva de 50%) seja aplicado aos ensaios de corona para levantamento da curva do Fator de Eficiência de Campo.

Na determinação de um parâmetro, dois tipos de erros estão presentes: um erro associado à natureza estatística do fenômeno e ao número de testes realizados; e outro associado às medições. Se a curva do Fator de Eficiência de Campo representar bem a relação entre campos, para a tensão de início de corona de 50%, os erros associados à curva podem ser considerados somente de natureza estatística. Deste modo, o erro das amostras sob ensaio em relação à curva, passa a fornecer o desvio padrão para a tensão. A Equação 5.6 fornece o desvio padrão.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum \epsilon_i^2, \quad (5.6)$$

onde n é o número de amostras, e ϵ o erro em cada amostra.

Para o cálculo do desvio padrão, foi utilizado o erro percentual, já que os valores absolutos são diferentes em cada configuração testada. Portanto o desvio padrão obtido é o erro percentual em relação à curva do Fator de Eficiência de Campo. O desvio padrão encontrado para o ajuste global foi de 27.2%, e para ajuste local de 12.5%.

A partir da tensão cuja a probabilidade de ocorrência do corona é de 50% ($V_{50\%}$), e do seu desvio padrão, pode se estimar a tensão de corona de 2% ($V_{2\%}$) e a de 98%

($V_{98\%}$), subtraindo-se e somando-se ao $V_{50\%} 2.05\sigma$, conforme Equação 5.7. Estas tensões correspondem às tensões onde a probabilidade de ocorrência do corona são de 2% e 98%, respectivamente. Para $V_{2\%}$ é assumida a ausência do corona e para $V_{98\%}$ é garantida a presença deste no arranjo. Aos valores intermediários de tensão aplicada são atribuídos probabilidades da presença do corona.

$$\begin{aligned} V_{2\%} &= V_{50\%}(1 - 2.05\sigma) \\ V_{98\%} &= V_{50\%}(1 + 2.05\sigma) \end{aligned} \tag{5.7}$$

No entanto, pode-se aplicar à curva de η'_{global} (utilizada para o cálculo do $V_{50\%}$), o fator $(1 \pm 2.05\sigma)$, e a partir destas novas curvas obter o $V_{2\%}$ e o $V_{98\%}$. A Figura 5.7 mostra estes limites aplicados à curva η'_{global} .

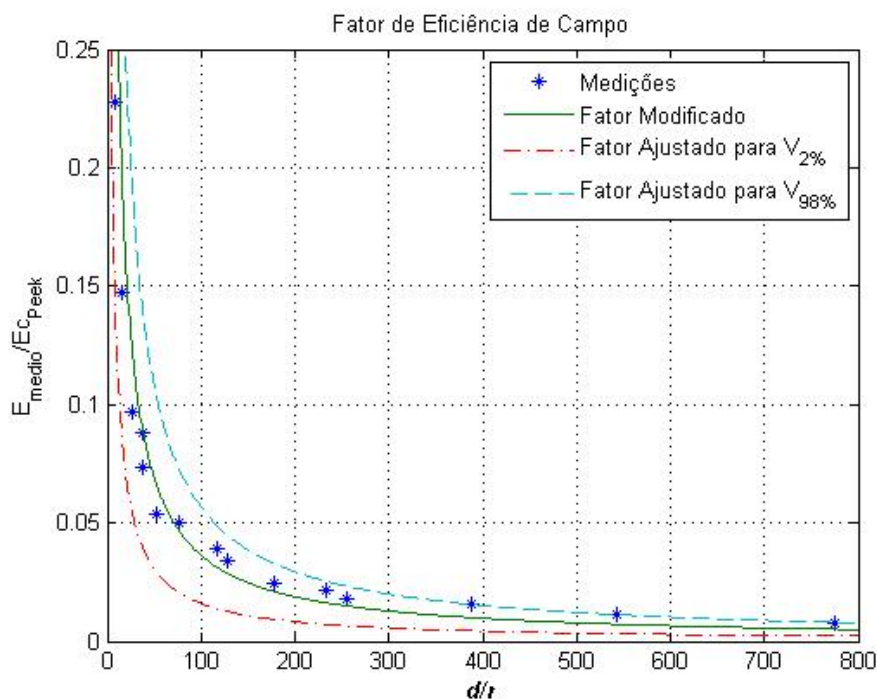


Figura 5.7: Fator de Eficiência de Campo - Modelo proposto

A Tabela 5.5 mostra as tensões limiaries para o corona (kV pico), para o conjunto de configurações testadas. Observa-se uma redução da margem para a tensão sem presença de corona, ou seja, o corona é identificado para valores de tensões mais próximas dos medidos. Este fato foi responsável pela redução do conservadorismo na detecção do corona.

Pela análise da Tabela 5.5, verifica-se que os valores estimados para ausência de corona ($V_{2\%}$) pelo modelo estatístico, sempre se apresentam abaixo do valores registrados nos experimentos. Este fato denota que o modelo estatístico proposto é mais eficaz, neste caso, quando comparado ao modelo que utiliza uma margem de segurança de 20%. Além

Gap	Raios	V_{medido}	$V_{50\%}$	$V_{2\%}$	$V_{98\%}$
1.5cm	r1	6.36kV	5.2kV	4.88kV	8.28kV
	r2	9.9kV	9.9kV	5.90kV	10.0kV
	r3	16.97kV	25.3kV	15.04kV	25.49kV
3cm	r1	7.78kV	5.4kV	5.06kV	8.57kV
	r2	11.31kV	10.5kV	9.91kV	16.79kV
	r3	21.92kV	28.6kV	17.0kV	28.83kV
5cm	r1	8.48kV	5.47kV	5.17kV	8.76kV
	r2	12.73kV	10.8kV	10.22kV	17.32kV
	r3	24.04kV	30.5kV	18.12kV	30.7kV
7cm	r1	8.48kV	5.54kV	5.23kV	8.87kV
	r2	12.73kV	11.0kV	10.4kV	17.63kV
	r3	25.46kV	31.5kV	18.74kV	31.75kV
10cm	r1	8.48kV	5.6kV	5.3kV	8.98kV
	r2	13.43kV	11.2kV	10.58kV	17.92kV
	r3	26.87kV	32.5kV	19.31kV	32.72kV

Tabela 5.5: Predição de Corona - modelo estatístico proposto

disto, também se verifica resultados coerentes para a tensão estimada para presença do corona ($V_{98\%}$).

5.6 Testes do Modelo de Predição Proposto

O modelo de predição proposto foi testado em um arranjo ponta-plano diferente daqueles utilizados para ajuste do Fator de Eficiência de Campo. Para isto, um quarto eletrodo foi utilizado, de raio $r_4 = 0.0950\text{cm}$, conforme Figura 5.8. Este eletrodo possui raio de

Figura 5.8: Eletrodo $r_4 = 0.0950\text{cm}$

curvatura intermediário àqueles utilizados para elaboração do modelo. As condições registradas no teste foram de temperatura ambiente = 25°C , umidade relativa do ar = 58%

e pressão atmosférica = 698mmHg.

As tensões de início de corona, para o ensaio com a ponta r4 são observadas na Tabela 5.6. A previsão pelo modelo proposto, e respectivas diferenças em relação às tensões de ensaio, também estão presentes nesta tabela.

	Comprimento do Gap				
	1.5cm	3cm	5cm	7cm	10cm
Medições	13.4kV	15.6kV	18.4kV	19.1kV	19.8kV
Previsão	16.71kV	18.1kV	19.98kV	19.45kV	19.9kV
Diferenças Perc.	24.7%	16.0%	3.1%	1.8%	0.5%

Tabela 5.6: Tensão de Início de Corona Ponta 4 (kV pico)

Os resultados apresentados pela da Tabela 5.6 e pela Figura 5.9 indicam boa concordância entre o modelo proposto e os valores medidos. O modelo se apresenta satisfatório, para fins práticos, para utilização em arranjos ponta-plano, com erro médio de 10% nas previsões para a tensão de início de corona. Para os *gaps* a partir de 5cm as diferenças percentuais se mostraram em torno de 3%, indicando que, para *gaps* acima deste comprimento o modelo proposto se aplica apropriadamente. As diferenças obser-

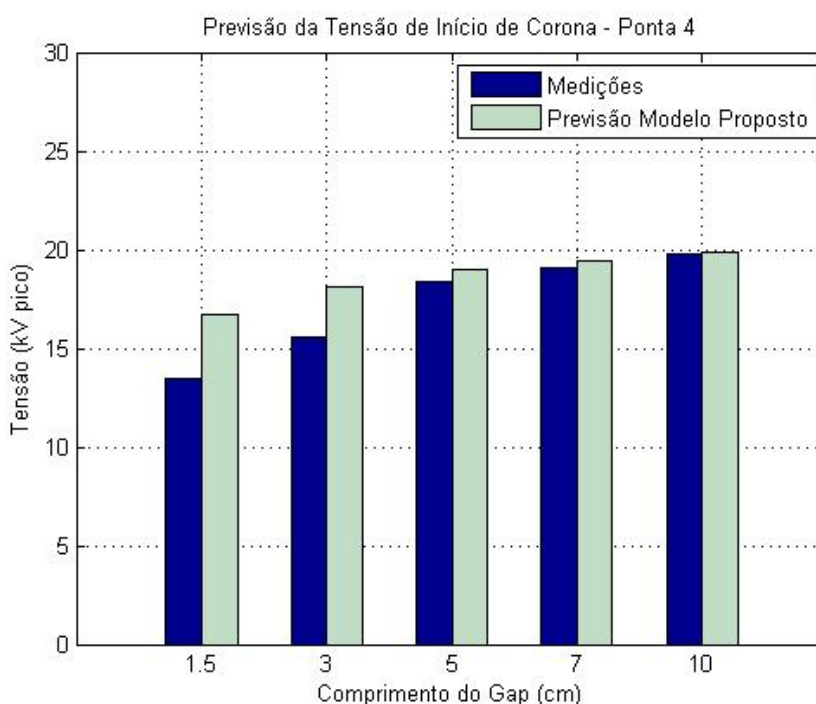


Figura 5.9: Tensões de início de corona - Previsão Ponta 4

vadas nos resultados para os *gaps* menores, 1.5 e 3cm, foram de 24% no máximo, o que sugere ressalva para estes comprimentos de *gap*.

A Tabela 5.7 apresenta as tensões de início de corona calculadas pelo modelo proposto, aplicando uma margem de segurança de 20%, que resulta no $V_{projeto}$.

	Comprimento do Gap				
	1.5cm	3cm	5cm	7cm	10cm
Medições	13.4kV	15.6kV	18.4kV	19.1kV	19.8kV
$V_{projeto}$	13.37kV	14.51kV	15.18kV	15.56kV	15.92kV

Tabela 5.7: Previsão para Tensão de Início de Corona na Ponta 4 Utilizando Margem de segurança de 20% - (kV pico)

A utilização da margem de segurança de 20%, sugerida como alternativa ao método estatístico, apresenta bons resultados, estabelecendo margens coerentes para a tensão de início de corona. Porém, à medida que se aumenta o tamanho do *gap*, estas margens também aumentam, o que torna esta opção conservadora nestes casos.

Empregando-se o método estatístico, onde os valores estimados pelo modelo correspondem ao $V_{50\%}$, e o desvio padrão calculado para as amostras medidas foi de 2.6%, pode-se calcular as tensões estatísticas, para ausência de corona ($V_{2\%}$) e para a presença deste ($V_{98\%}$). Estes valores são apresentadas na Tabela 5.8.

	Comprimento do Gap				
	1.5cm	3cm	5cm	7cm	10cm
Medições	13.4kV	15.6kV	18.4kV	19.1kV	19.8kV
$V_{2\%}$	15.81kV	17.16kV	17.96kV	18.4kV	18.83kV
$V_{98\%}$	17.6kV	19.11kV	20.0kV	20.5kV	20.97kV

Tabela 5.8: Tensão de Início de Corona Estatística para Ponta 4 - (kV pico)

Os limites apresentados pelo método estatístico ($V_{2\%}$ e $V_{98\%}$) só foram aceitáveis para distâncias maiores. As diferenças percentuais elevadas encontradas fazem com que, a tensão estatística de 2% seja elevada em alguns casos, como para os *gaps* de 1.5 e 3cm. Para estes *gaps*, a tensão na qual se garante a ausência de corona ($V_{2\%}$), não se mostra coerente. Pela Figura 5.10 observa-se este fato. Uma maior quantidade de amostras melhoraria os resultados alcançados para os casos citados.

Em resumo, analisou-se os modelos de predição apresentados através da comparação das tensões de início de corona, estimadas por estes, com as tensões registradas em ensaio, para diferentes configurações de arranjos ponta-plano. O campo elétrico crítico, para as mesmas condições, também foi analisado. Diferenças foram observadas, tanto para as

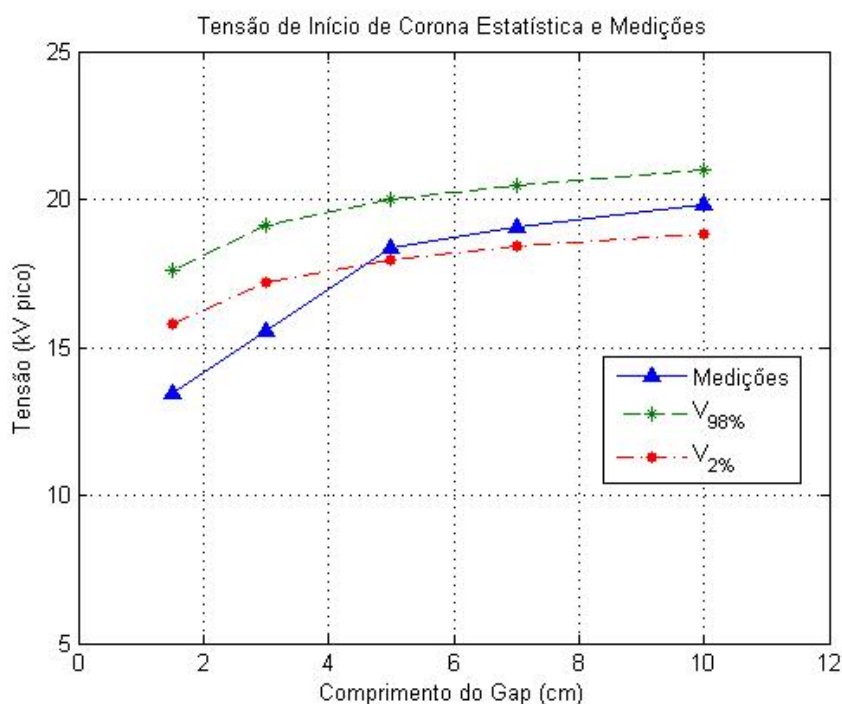


Figura 5.10: Tensão de Início de Corona - Comparação entre Medições e Previsão

tensões quanto para os campos elétricos estimados, para formação do corona, em relação aos resultados de ensaios.

Para aplicação em arranjos ponta-plano, foi proposto um modelo baseado na expressão empírica de Peek e no Fator de Eficiência de Campo, ajustado a partir dos dados obtidos pelas medições realizadas. Adicionalmente, foi sugerido inserção do caráter probabilístico do fenômeno a este modelo, passando a atribuir a cada tensão aplicada uma probabilidade de ocorrência do efeito corona. A expressão para o modelo proposto foi testada para um novo eletrodo. As tensões de início de corona estimadas para este novo arranjo, apresentaram boa concordância com as registradas em ensaio, indicando que o modelo proposto é satisfatório, em termos práticos, para estimação da tensão de início de corona em arranjos ponta-plano.

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

A definição de um critério claro para identificação do corona faz-se necessária para fins de projeto ou manutenção. A formação do corona está associada a níveis de campo elétrico e tensões elevadas, que variam de acordo com a geometria dos arranjos e com as condições a que estes são submetidos. Para estimar tanto o campo elétrico, quanto a tensão necessários para a formação do corona, expressões empíricas foram apresentadas. Estas expressões foram analisadas, na tentativa de se estabelecer um modelo a ser utilizado como base para identificação do efeito corona. Estes modelos foram estudados através de experimentos e simulações.

Experimentos foram realizados em arranjos do tipo ponta-plano e em um isolador polimérico. Para o arranjo ponta-plano três eletrodos, com pontas de diferentes raios, foram testados em diferentes distâncias de *gap*. Os resultados indicam uma tendência para a tensão de início de corona, um aumento no raio de curvatura do eletrodo ou um aumento no tamanho do *gap* implica num aumento desta tensão. No entanto, à medida que se aumenta o *gap*, a taxa deste aumento diminui para um mesmo raio, sugerindo que em *gaps* muito maiores que o raio do condutor esta tensão tende à um valor constante.

Para o isolador polimérico, a influência de defeitos neste foi averiguada, através da presença de semiesferas na superfície do isolador. A presença destas semiesferas representam uma condição típica de serviço, a deposição de gotas de água na saia do isolador, que causam elevação do campo elétrico local. A influência da distância entre semiesferas, da distância das semiesferas ao bastão do isolador e do tamanho destas semiesferas foram analisadas. Observou-se que a tensão de início de corona está diretamente relacionada com a distância, tanto entre semiesferas, quanto com a distância destas ao potencial aplicado.

As formulações dos modelos de predição foram utilizadas para estimar as tensões de início de corona para os experimentos realizados com arranjos ponta-plano. Os modelos de Peek e Zaengl apresentaram resultados semelhantes para as tensões de início de corona estimadas, porém com discrepâncias em relação aos experimentos realizados. Como a formulação de Peek foi originalmente desenvolvida para cilindros concêntricos, com base em condutores de raios pequenos, esses desvios eram esperados. Para estes dois modelos, as tensões estimadas chegaram a cerca de 1.5 vezes mais elevadas que as tensões registradas nos ensaios. Observou-se que, quanto menor o raio do eletrodo energizado, mais próximas as tensões estimadas são daquelas obtidas nos experimentos. As tensões de início de corona estimadas utilizando o Fator de Eficiência de Campo, se mostraram menores que os valores obtidos nos experimentos. Um ajuste foi realizado e os resultados alcançados apresentaram melhora.

Simulações computacionais foram realizadas para os arranjos ponta-plano e isolador polimérico, nas mesmas configurações testadas nos experimentos. Para isto, modelos bidimensionais foram obtidos a partir dos arranjos, e o campo elétrico foi calculado para cada configuração. As simulações mostraram que, em arranjos ponta-plano, o campo elétrico apresenta alto grau de não uniformidade, e este, por sua vez, influencia a tensão inicial de corona. O grau de não uniformidade do campo está diretamente vinculado ao raio do eletrodo e ao comprimento do *gap*. Quanto menor o raio e maior o *gap*, menos uniforme será o campo elétrico neste *gap*. O campo elétrico crítico, valor do campo elétrico necessário para a formação do corona, é maior quanto menor o raio do eletrodo. A mesma relação é observada para o comprimento do *gap*.

Para o isolador polimérico, observa-se intensificação do campo elétrico devido a presença dos defeitos acrescentados, principalmente nas proximidades onde ocorreram as descargas de corona. Os valores de campo elétrico crítico encontrados se mostraram constantes. Para o *gap* entre semiesferas, as descargas de corona ocorrem em torno de 10kV/cm, enquanto que para o *gap* entre a semiesfera e o eletrodo energizado, estas descargas ocorreram para um campo elétrico crítico em torno de 30kV/cm.

Aplicando-se os modelos para estimação do campo elétrico crítico, observa-se que estes não concordam com os valores encontrados nas simulações computacionais. O modelo proposto por Peek apresenta um campo elétrico crítico dependente somente do raio do condutor e de fatores ambientais, portanto constante com o *gap*. Este campo se aproxima da média dos campos elétricos críticos obtidos pelas simulações em cada *gap*. O campo elétrico crítico obtido pela expressão de Zaengl, é semelhante ao obtido pela formulação de Peek, possuindo as mesmas características. Ao se utilizar o Fator de Eficiência de Campo para cálculo do campo crítico, viu-se que, para uma faixa deste fator os valores de campo se aproximam dos valores simulados. Verificou-se que uma modificação na expressão deste

fator melhora os resultados obtidos.

Foi proposto um modelo, baseado no Fator de Eficiência de Campo, vinculado ao campo elétrico crítico fornecido pela expressão empírica de Peek. Deste modo, o cálculo da tensão passa a apresentar dependência de mais um parâmetro geométrico: raio do eletrodo e o comprimento do *gap*. Além disto, a estimativa do campo elétrico seria independente de simulação ou ensaio, o que torna o modelo mais simples. O modelo de predição proposto foi testado em um novo eletrodo e observou-se bons resultados, com erro médio de 10%. Para melhora deste modelo foi sugerida a consideração do caráter estatístico do efeito corona, conferido pelo processo de ionização, o que acarreta em uma probabilidade de ocorrência de corona para uma determinada tensão aplicada.

Em resumo, os modelos apresentados na literatura devem ser empregados em arranjos apropriados, conforme o desenvolvimento de cada um destes modelos. A utilização indiscriminada pode conduzir a erros. O cálculo da tensão de início de corona em arranjos de geometria complexa ainda se mostra complicado, não possuindo modelo de predição apropriado para estes. O modelo proposto pode representar uma iniciativa para se desenvolver um modelo que comporte diferentes estruturas.

6.2 Propostas de Continuidade

A preocupação com o nível de campo elétrico a que materiais isolantes e arranjos são expostos, é crescente nos últimos anos. Contudo, não há ainda uma definição clara dos níveis de campos aceitáveis. Prever os valores de campo elétrico associados ao corona é tarefa complexa, devido aos inúmeros fatores que o influenciam.

A aplicação de modelos simples para predição do corona pode ser utilizada como critério de projeto. A expansão da aplicabilidade do modelo proposto, estendendo a arranjos de geometrias complexas, acarretaria na agilidade na etapa de projetos, e na facilidade de manutenção preventiva. A expansão deste modelo, observando sua aplicabilidade, resultados, e validação, através de experimentos e simulações numéricas, é sugerida como continuidade do trabalho.

Há de se observar que, atualmente, a predição do corona é realizada através de expressões empíricas. Portanto, o desenvolvimento de expressões analíticas, que descrevem o complexo fenômeno da dinâmica de cargas espaciais, faria com que as simulações computacionais pudessem fornecer a magnitude e distribuição de campo elétrico durante processo de formação do efeito corona. Este fato conferiria às simulações, valores precisos dos níveis de campo, os quais poderiam ser utilizados como critério de início de corona. É sugerido estudo da formação de carga espacial e a análise dos modelos matemáticos para ionização, e a partir destes, tentar desenvolver expressões que forneçam o campo elétrico

alterado pelo movimento e distribuição de elétrons durante formação do corona.

A busca pela definição dos níveis de campo elétrico que ocasionam corona vem sendo realizada a tempos, por diversos pesquisadores. A definição de um critério definitivo para predição do efeito corona, aplicável a qualquer estrutura, ainda está distante de ser estabelecida.

Artigos Publicados

- A. Souza, I.J.S. Lopes, *Electric Field Distribution along the Surface of High Voltage Polymer Insulators and its Changes under Service Conditions*. 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation.
- A. Souza, I.J.S. Lopes, *Estudo da Distribuição de Campo Elétrico em Isoladores Poliméricos: uma abordagem computacional e experimental*. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, SBSE 2008.
- A. Souza, I.J.S. Lopes, *Corona Onset Models: A Computational and Experimental Evaluation*. 2008 IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena.

Referências Bibliográficas

- [1] D.B. Phillips, R.G. Olsen, P.D. Pedrow, *Corona Onset as a Design Optimization Criterion for High Voltage Hardware*. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation. Vol. 7, N°6, December 2000.
- [2] V.M. Moreno, R.S. Gorur, *Corona-Induced Degradation of Nonceramic Insulator Housing Materials*. 2001 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- [3] L. Xidong, W. Shaowu, F. Ju, G. Zhicheng, *Development of Composite Insulators in China*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 6, N°5, October 1999.
- [4] R. Hackam, *Outdoor HV Composite Polymeric Insulators*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol. 6, N°5, October 1999.
- [5] E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel. *High Voltage Engineering: Fundamentals*. Second Edition 2000.
- [6] D. Rafiroiu, I. Suarasan, R. Morar, P. Atten, L. Dascalescu. *Corona Inception in Typical Electrode Configurations for Electrostatic Processes Applications* IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 37, N°3, May/June 2001.
- [7] IEEE Taskforce on Electric Fields and Composite Insulators, *Electric Fields On AC Composite Transmission Line Insulator*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 23, N°2, April 2008.
- [8] J. D. Cobine, *Gaseous Conductors - Theory and Engineering Applications*. Dover Publications, 1941.

- [9] M. Goldman, R.S. Sigmond, *Corona and Insulation*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. 17, N°2, April 1982.
- [10] *Transmission Line Reference Book - 345kV and above*. Electric Power Research Institute, Second edition 1982.
- [11] Gorur G. Raju, *Dielectrics in Electric Fields*. University of Windsor, 2003.
- [12] Ravindra Arora, Wolfgang Mosch, *High Voltage Insulation Engineering*. New Age International Publishers, 1995.
- [13] Essam Nasser, *Fundamentals of Gaseous Ionization and Plasma Electronics*. Wiley-Interscience, 1970.
- [14] American Society for Testing and Material, *Engineering Dielectrics - Corona Measurement and Interpretation*, Volume I, ASTM Special Technical Publication 669, 1979.
- [15] Özcan Kalenderli, Emel Önal, Özkan Altay, *Computing the Corona Onset and the Utilization Factor of Rod-Plane Electrode by Using Charge Simulation Method*. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, October 2001.
- [16] Y. Qiu, *Simple Expression of Field Nonuniformity factor for Hemispherically Capped Rod-Plane Gaps*. IEEE Transactions on Electrical Insulation. Vol. EI-21, N°4, August 1986.
- [17] J.P. Holtzhausen, P.J. Pieterse, C. Wahl, H.J. Vermeulen, *A Comparison of the Ac and Dc Corona Inception Levels and Modes for Various Conductors in Air*. XVth International Symposium on High Voltage Engineering. August 2007.
- [18] IEEE Power Engineering Society, *IEEE Standard Definitions of Terms Relating to Corona and Field Effects of Overhead Power Lines*. IEEE Std-539, September 2005.
- [19] American National Standards Institute, *Test Methods for Electrical Power Insulators*. ANSI C29.1 - 1988.
- [20] I. J. S. Lopes, S. H. Jayaram, E. A. Cherney, *A Study of Partial Discharges from Water Droplets on Silicone Rubber Insulating Surface*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. Vol.8, N°2, April 2001.
- [21] A. J. Philips, D. J. Childs and H. M. Schneider, *Aging of Non-Ceramic Insulators due to Corona from Water Drops*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.14, N°3, pp. 1081-1089, 1999.

- [22] A. J. Philips, D. J. Childs and H. M. Schneider, *Water Drop Corona Effects on Full-Scale 500kV Non-Ceramic Insulators*. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.14, N°3, pp. 258-265, 1999.
- [23] D. Meek, *Finite Element Method Magnetics*. Version 4.0. User's manual, 2004.
- [24] H.D. Ramos, *Ensaaios estatísticos em Alta Tensão*. Universidade Nova de Lisboa.
- [25] W. Hauschild, W. Mosch, *Statistical Techniques for High-Voltage Engineering*. English Edition, 1992.