



GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

PROPOSTA PARA CARACTERIZAÇÃO E DETERMINAÇÃO DE FATORES DE EQUALIZAÇÃO DE DIFERENTES CÂMERAS DE DETECÇÃO DE EFEITO CORONA.

YURI DOS REIS OLIVEIRA (1); EDUARDO COSTA DA SILVA (2); JOSÉ ANTONIO DAFFONSECA SANTIAGO CARDOSO (1); CRISTIANO SOBREIRA XAVIER (1); CARLOS ROBERTO HALL BARBOSA CEPEL (1); PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO (2)

RESUMO

As descargas coronas são avaliadas com o auxílio da câmera de detecção ultravioleta (UV). Entretanto, os *frames*, imagens captadas pela câmera, em sua grande maioria são abstratos, tornando sua avaliação suscetível exclusivamente a interpretação humana. Assim, o resultado obtido é uma avaliação altamente subjetiva e pouco quantitativa. Outro fator observado entre os usuários de câmeras UV é a dificuldade em comparar resultados obtidos em diferentes de câmera UV. Tendo em vista tal problema, este trabalho visa propor uma metodologia de processamento dos *frames*, uma metodologia para caracterizar a câmera e assim determinar os fatores de comparação e equalização de resultados.

PALAVRAS-CHAVE

Efeito Corona, Corona UV, Processamento Digital de Imagem, Caracterização, Inteligência Artificial.

1.0 - INTRODUÇÃO

O corona é um fenômeno muito recorrente em equipamentos de alta tensão e também em linhas de transmissão. Este fenômeno é caracterizado por produzir pequenas descargas elétricas não disruptivas, causando perdas e degradação dos equipamentos submetidos a elas. Devido a estes fatores, são frequentemente realizadas inspeções em linhas de transmissão e, também, realizados ensaios de efeito corona em novos projetos de equipamentos de alta tensão para avaliar as possíveis degradações e a conformidade das especificações dos equipamentos respectivamente.

Atualmente, esses procedimentos são realizados utilizando-se câmeras de detecção ultravioleta UV em faixas de comprimento de onda (240 a 280 nm). Porém, a avaliação das descargas corona por meio destas imagens UV são em sua grande maioria realizados subjetivamente, estando a cargo da experiência do comitê técnico que realiza o ensaio, ou do técnico que realiza a inspeção [1].

Deste modo, este trabalho propõe uma nova maneira de quantificar a descarga corona a partir do processamento da imagem UV e a caracterização da câmera utilizada. O processamento é encarregado de retirar os ruídos da imagem e em seguida extrair informações quantitativas. A partir desta metodologia de processamento digital das imagens, os vídeos obtidos durante os ensaios com uma fonte padrão de UV, foram tratados e, assim, geraram dados quantitativos.

Nesses ensaios utilizou-se a abordagem de alterar a distância entre uma fonte UV caracterizada e a câmera UV, como também o ganho da câmera. Desta forma, foram obtidas imagens UV, em diferentes distâncias, correspondentes a uma radiação UV de uma fonte conhecida através da realização de uma varredura em níveis de ganho em cada distância.

Ao obter dados quantitativos de uma mesma fonte UV em diferentes condições de ganho/distância, possibilitou-se caracterizar, ou seja, determinar o comportamento da câmera ao alterar tais condições e também estabelecer fatores de equalização de resultados que podem ser extrapolados para diferentes câmeras.

2.0 - EFEITO CORONA E CÂMERA UV

O efeito corona é proveniente do elevado gradiente de campo elétrico em uma região, o que acarreta a ionização do ar e resulta em uma avalanche de elétrons e, assim, de descargas não disruptivas, o que é chamado de descarga corona.

A descarga corona emite uma radiação com comprimento de onda na faixa de 230 a 405 nm. Radiações dessa magnitude situam-se no espectro UV, entretanto, dentro faixa de comprimento de onda também é encontrado as radiações emitidas pelo sol. Assim, a câmera UV utilizada para a detecção de corona capta as radiações emitidas entre os valores de 240 a 280 nm propositalmente, já que a radiação UV proveniente do sol nessa faixa de comprimento de onda é filtrada pela camada de ozônio. Possibilitando a detecção da descarga corona em ambiente diurnos e, também, em laboratórios iluminados [3].

A câmera UV é composta internamente por um canal UV com um detector UV e um canal óptico que contém uma câmera comum, que conforme visualizado na Figura 1, através de um arranjo de espelhos a imagem registrada gera dois sinais de vídeo, correspondentes à imagem propriamente dita e à irradiação de UV. Estes sinais podem ser sobrepostos de modo que possa identificar a localização das descargas corona através do *software* interno da câmera UV [4], sendo possível visualizar apenas as imagens geradas pelo detector UV.

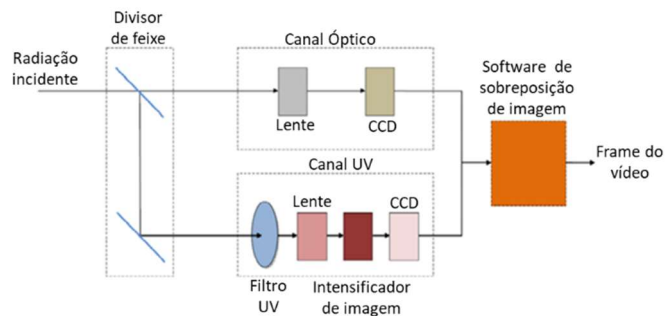


FIGURA 1 – Esquemático interno da câmera UV.

2.1 - Frame da câmera

Os *frames* são imagens que compõem os vídeos captados pelas câmeras UV. Os modelos de câmera UV disponíveis no mercado atualmente geram vídeos com taxas de 24 a 30 frames por segundo. As câmeras disponibilizam três categorias de imagens: a imagem visual (imagem captada pela câmera visual), a imagem UV (imagem captada pelo detector UV) e a imagem combinada (imagem formada pela sobreposição das outras duas). Tais categorias de imagens podem ser visualizadas na Figura 2.

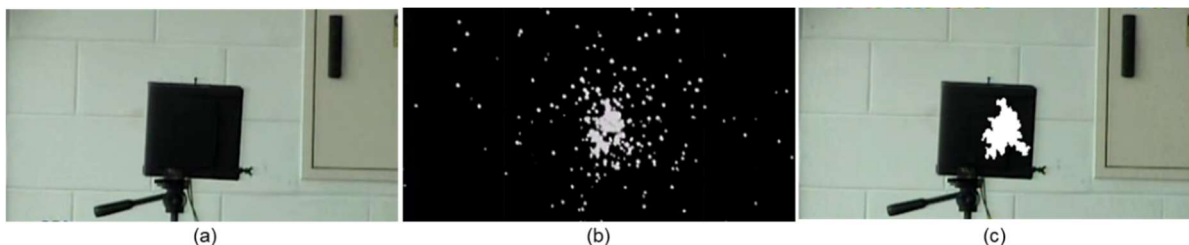


FIGURA 2 — Categorias de imagens geradas pela câmera.

Conforme visualizado nas imagens da Figura 2, a radiação UV detectada pela câmera é representada através de brilhos amorfos. Na academia, tais elementos são nomeados como “fáculas”, tal convenção também será utilizada neste trabalho.

Além das fáculas, os *frames* também fornecem um valor quantitativo, o número de “fótons”, referente a radiação gravada pela câmera em um intervalo de tempo. Este quantitativo é determinado segundo as fáculas que estão dentro de uma região de contagem do *frame*. Estes elementos que estão nos *frames*, podem ser mais bem contemplados, ver Figura 3. Para facilitar o processamento, neste trabalho os vídeos foram gravados utilizando apenas as imagens do detector UV.

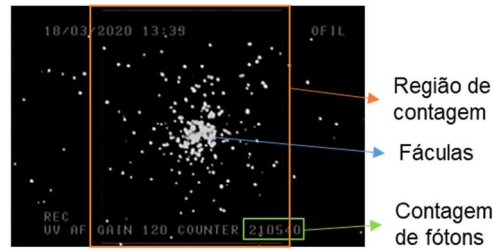


FIGURA 3 — Detalhamentos dos elementos principais dos *frames* da câmera UV.

3.0 - METODOLOGIA DE PROCESSAMENTO DE *FRAMES*

A metodologia de processamento das imagens geradas pelas câmeras UV consiste em usar os *frames* dos vídeos gerados de modo que, após aplicar algumas técnicas computacionais, seja possível extrair dados quantitativos das fácúlas de modo a estabelecer caracterizações, inferências e avaliações da descarga corona. Os passos da metodologia utilizada no processamento podem ser visualizados na Figura 4.



FIGURA 4 – Etapas da metodologia de processamento dos *frames*.

O processamento é realizado a partir de um método iterativo. Em cada iteração os *frames* são pré-processados e então sobrepostos até atingirem um número de amostras preestabelecido. A sobreposição gera uma imagem resultante da qual são extraídos os valores quantitativos que correspondem àquele bloco de frames sobrepostos durante a iteração, ou seja, a metodologia utilizada neste trabalho propõe analisar a descarga corona em intervalos de tempo.

O *frame*, que é uma imagem multibanda (RGB), é convertido para imagens em tons de cinza, ou seja, em apenas uma banda, ver Figura 5 (a), e posteriormente segmentado através do algoritmo de determinação de contorno ao especificar apenas a sua fácúla principal, resultando em uma imagem, ver Figura 5 (b), em preto (intensidade do *pixel* igual a 0) e branco (intensidade do *pixel* igual a 255), do qual apresenta apenas a fácúla principal.

Os *frames* segmentados são sobrepostos em blocos de n *frames*, ver Figura 5 (c), de modo que se possa avaliar na imagem resultante de todas as imagens que foram sobrepostas num período definido *a priori*, a descarga corona produzida durante este intervalo de tempo, conforme sugerido por [3].

A imagem resultante dessa incrementação é normalizada, dividindo cada *pixel* pelo número n de *frames* utilizados no processo de sobreposição. Com a normalização obtém-se uma imagem em tons de cinza, com valores entre 0 e 255, ver Figura 5 (d) e Figura 5 (e). Assim, a intensidade dos *pixels* indicaria a periodicidade da fácúla na região determinada.

Após a normalização da imagem incrementada são retirados os ruídos. Na metodologia deste trabalho, são entendidos como ruídos os *pixels* da imagem normalizada com intensidade menor que 5. Tal metodologia pode ser analisada ao comparar a Figura 5

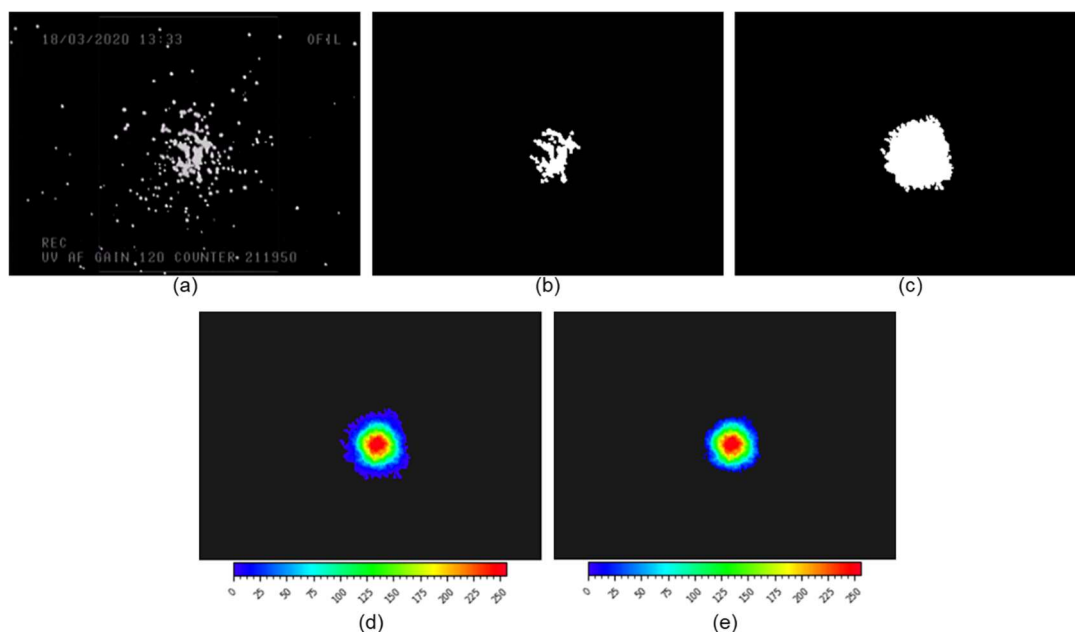


FIGURA 5 – Detalhamento da metodologia de processamento dos *frames* (a) *Frame* em tons de cinza (b) Segmentação da fácula principal (c) Sobreposição dos *frames* segmentados (d) Normalização com ruídos (e) Normalização sem ruídos.

Após a aplicação da metodologia de processamento dos *frames* é extraído da imagem resultante algumas características como: área, diâmetro e contagem de “fótons”. Segue abaixo a definição das respectivas características:

- Área, corresponde ao número de píxeis da imagem com intensidade diferente de zero.
- Diâmetro, corresponde a largura da fácula, ou seja, seu comprimento horizontal.
- Contagem de “fótons”, corresponde a um parâmetro quantitativo fornecido pela câmera.

Para se obter a contagem de fótons foi aplicada uma rede neural convolucional, baseada no modelo MNIST de [4], para classificar os dígitos da contagem de “fótons” mostrados no *frame*, conforme indicado na Figura 3. Para treinamento e teste foram utilizadas imagens dos dígitos retirados dos *frames* das câmeras usadas. O *dataset* utilizado contabilizou cerca de 20 000 imagens sendo 80 % para treinamento e 20 % para teste. O *dataset*, também foi dividido em 10 classes correspondentes aos dígitos de 0 a 9. A rede neural obteve uma precisão de 98 % em seus dados de teste.

4.0 - ENSAIOS

Os ensaios foram realizados com o intuito de obter dados (vídeos) para testar as metodologias propostas pelo trabalho. Entretanto, para viabilizar a análise do comportamento da câmera UV frente a diversas condições de distância e ganho. Foi necessário atenuar a aleatoriedade da fonte emissora de UV. Utilizou-se uma lâmpada germicida de 3 W, ver Figura 6 (a).

A lâmpada utilizada foi testada *a priori*, e verificou-se que a radiação UV emitida está na faixa do espectro eletromagnético detectável pela câmera, ver Figura 6 (b), e que o módulo desta radiação possui uma estabilidade aceitável, de modo a desprezar a hipótese que alguma variação nos resultados poderia advir da radiação emitida pela lâmpada.

Devido à sensibilidade das câmeras foi necessário inserir a lâmpada em uma caixa limitadora, do qual a radiação UV somente sairia por um furo de aproximadamente 0,5 mm, o conjunto lâmpada e caixa limitadora pode ser visualizado na Figura 6 (c).

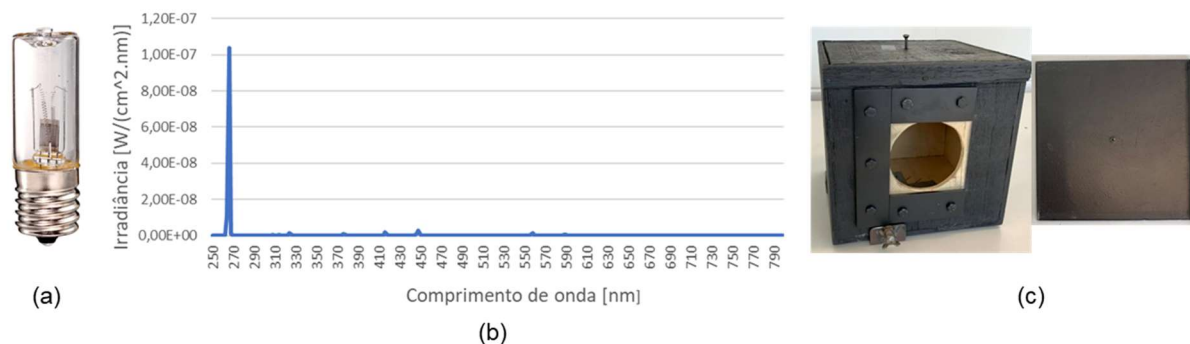


FIGURA 6 – (a) Lâmpada germicida. (b) Distribuição espectral. (c) Detalhe da caixa limitadora.

O arranjo de ensaio, consiste em alinhar a câmera UV e a fonte paralelamente, mantendo uma distância entre elas. Os ensaios foram realizados com dois modelos distintos de câmera UV, modelo A e modelo B de um mesmo fabricante.

Os ensaios foram realizados com distâncias na faixa entre 2 e 12 metros, em intervalos de 2 e 2 metros. Os limites de varredura do ganho da câmera em cada nível de distância foram definidos considerando os limites do detector UV das câmeras. Desta forma, o primeiro valor de ganho foi definido como o ajuste de ganho mais baixo necessário para que a câmera detectasse uma radiação UV, e o último valor do ganho, foi definido como o ajuste de ganho em que a fâcula atingisse os limites da região de contagem, ver Figura 7. A Figura 8 mostra as condições em que foram executados os ensaios.

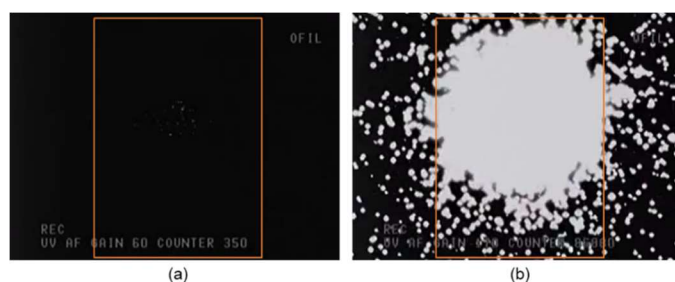


FIGURA 7 – (a) Limite inferior de detecção de UV. (b) Limite de saturação de detecção de UV.

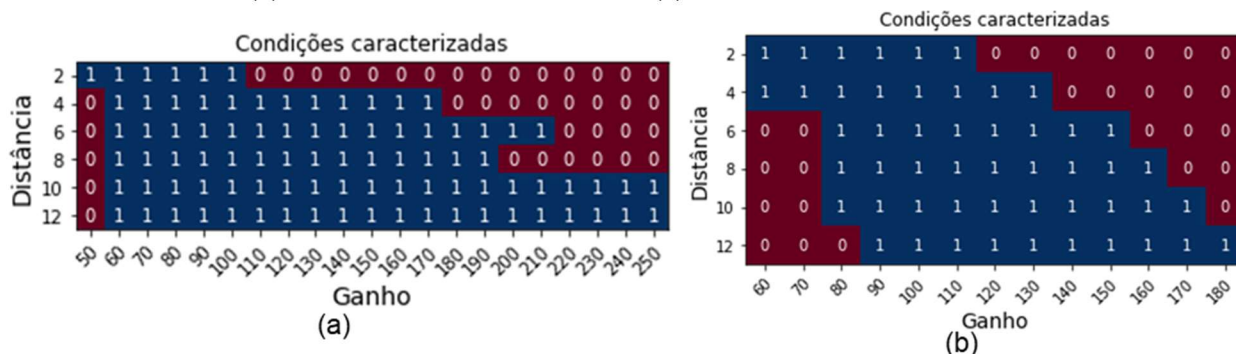


FIGURA 8 - (a) Condições de ensaio com a câmera de modelo A. (b) Condições de ensaio com a câmera de modelo B. Em "1" a condição ensaiada e "0" a condição não ensaiada.

Em cada condição ensaiada, ver Figura 8, foram gravados vídeos de cerca de 2 minutos, contabilizando em cada vídeo valores de 2400 até de 3600 *frames*, conforme a taxa de *frames* por segundo do modelo da câmera utilizada. Dentre esses *frames* foram realizadas 6 iterações (6 amostras em cada vídeo), e em cada iteração a imagem resultante foi gerada a partir da sobreposição de 200 *frames*.

5.0 - METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DE CÂMERAS UV

Utilizando os dados quantitativos obtidos a partir do processamento dos vídeos nos ensaios, pode-se caracterizar as câmeras UV, ou seja, verificar qual a influência do ganho e da distância nelas.

5.1 - Influência do ganho

Ao analisar o efeito dos ganhos nas câmeras nos gráficos da Figura 9, observa-se que os dados seguem uma tendência, independente da distância em que são observados. Entretanto, ao analisar o comportamento da contagem de “fótons”, verificam-se variações bruscas, tal efeito tem relação com a saturação das fâculas na região de contagem e com possíveis erros da rede neural utilizada para classificar os dígitos referentes à contagem de “fótons”.

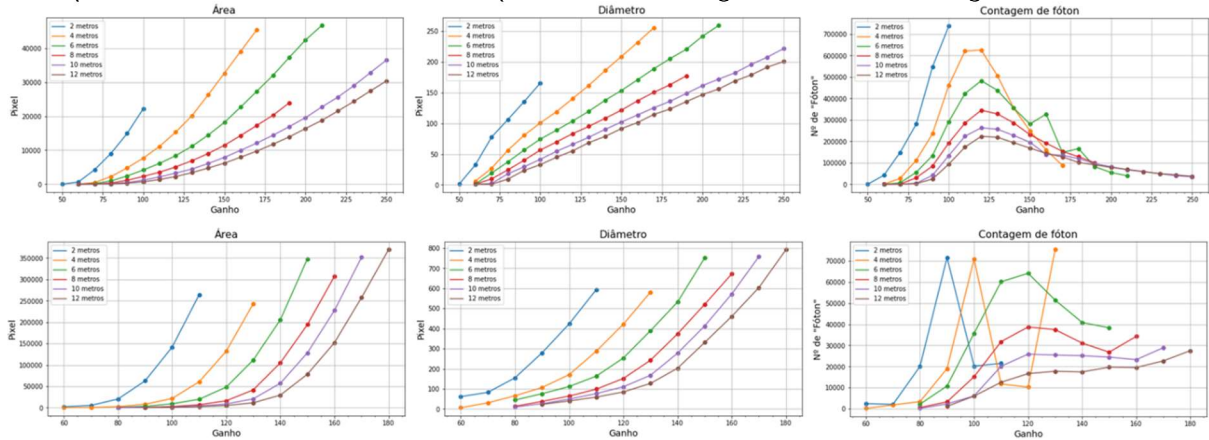


FIGURA 9 – Curvas de tendência no comportamento da câmera frente aos ganhos, curvas superiores, referente a câmera de modelo A e as inferiores ao modelo B.

Ao observar a tendência dos gráficos relacionados à Área e ao Diâmetro percebe-se que tais dados, podem ser ajustados para a equação (1) conforme observado por [5].

$$Y(\text{ganho}) = a_1 \times e^{b_1 \times \text{ganho}} \quad (1)$$

5.2 - Influência da distância

A Figura 10 mostra a influência da distância nos parâmetros extraídos da fâcula. Demonstrando que os dados também seguem uma tendência.

A contagem de “fótons”, também apresentou algumas variações, entretanto, as variações referentes à câmera de modelo A foram bem menores que em relação à câmera de modelo B. Tal fator pode estar relacionado a um possível desbalanceamento no *dataset* utilizado na rede neural de classificação dos dígitos.

Ao observar a tendência dos gráficos relacionados à Área e ao Diâmetro percebe-se que tais dados, podem ser ajustados para a equação (2) conforme observado por [5].

$$Y(\text{dist}) = a_1 \times \text{dist}^{-b_1} \quad (2)$$

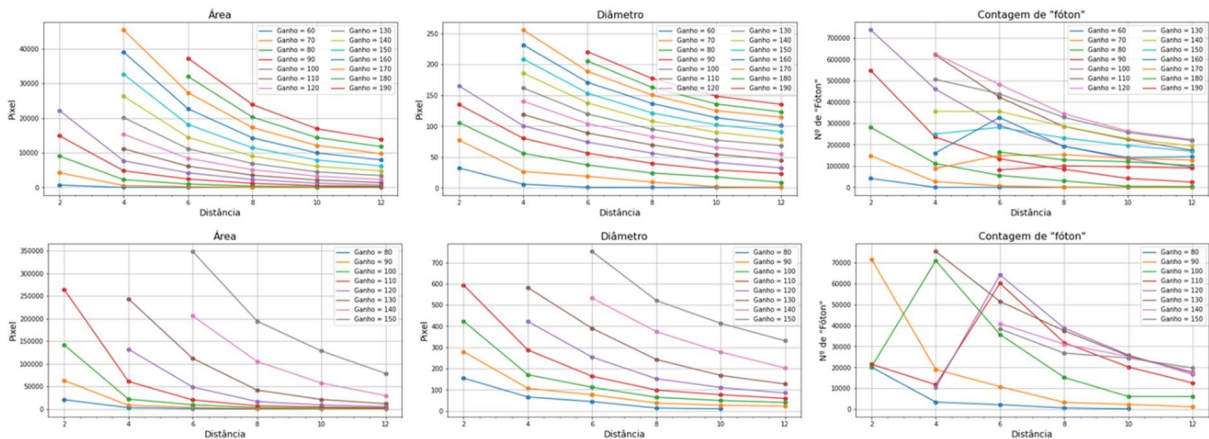


FIGURA 10 - Curvas de tendência no comportamento da câmera frente a várias distâncias, curvas superiores, referente à câmera de modelo A e inferiores ao modelo B.

6.0 - DETERMINAÇÃO DOS FATORES DE EQUALIZAÇÃO

O fator de equalização (f) é um fator multiplicador que busca deduzir qual o valor de parâmetro extraído da fâcula — $Y(g_atual, d_atual)$ — caso seja obtido em outra condição desejada de ganho/distância ou por outra câmera, ou seja, o $Y(g_desejado, d_desejado)$. Essa dedução é melhor exemplificada na equação (3):

$$Y_{desejado} = Y_{atual} \times f \quad (3)$$

Com base nos dados de caracterização das câmeras, este trabalho propõe que o fator de equalização seja obtido a partir da comparação destes dados, conforme demonstrado na equação (4).

$$f = \frac{Y_{carac}(g_{desejado}, d_{desejado})}{Y_{carac}(g_{atual}, d_{atual})} \quad (4)$$

Entretanto, para extrapolar o fator de correção para condições em que a câmera não foi caracterizada, foi utilizado os dados para ajustar uma equação que tivesse como variáveis, o ganho e a distância. Baseado nas equações (2) e (3), foi definido equação (5).

$$Y(g, d) = a_3 \times e^{(b_3 \times g \times d^{c_3})} \quad (5)$$

Contudo, a equação (5), conforme mostra a Figura 11, não se ajusta aos dados da contagem de “fótons”. A Tabela 1 mostra os coeficientes e o valor de R-quadrado referente a cada parâmetro em seu respectivo modelo de câmera.

TABELA 1 - Coeficientes e avaliação das curvas

Parâmetro	Câmera	a_3	b_3	c_3	R^2 (%)
Área	Modelo A	732,95	0,05	-0,46	96,65
Diâmetro	Modelo A	18,45	0,03	-0,44	92,55
Cont. Fóton	Modelo A	94408,63	0,04	-1,31	24,40
Área	Modelo B	33,88	0,09	-0,25	98,84
Diâmetro	Modelo B	2,42	0,06	-0,25	98,85
Cont. Fóton	Modelo B	4057,84	0,03	-0,34	28,05

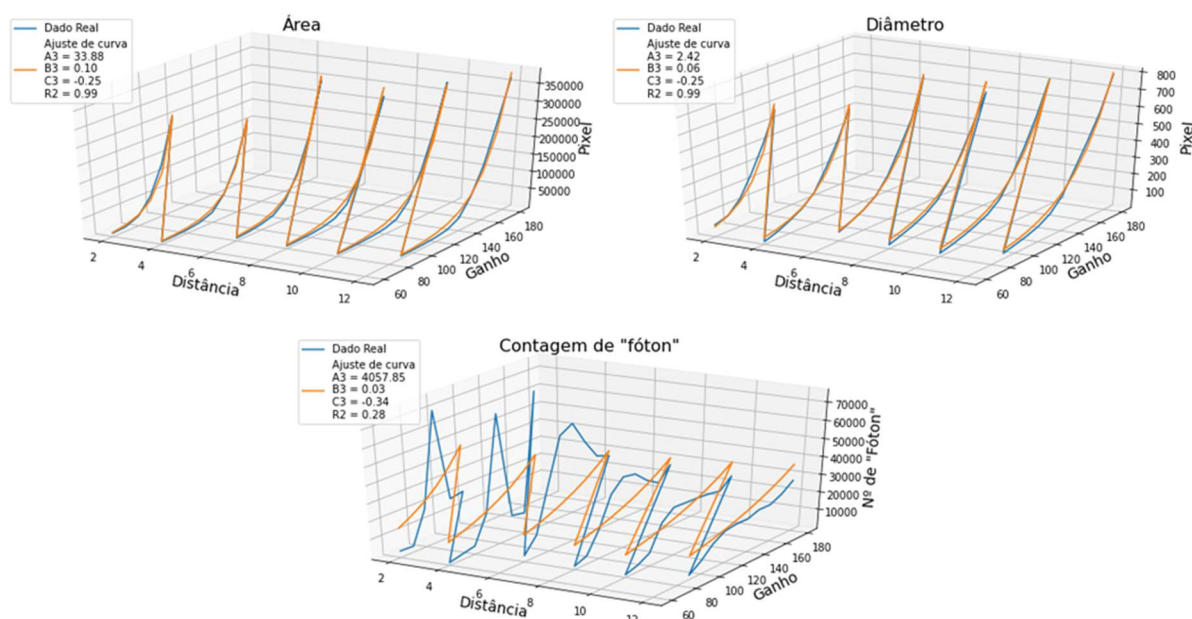


FIGURA 11 – Resultado do ajuste de curva dos parâmetros da câmera de modelo B.

6.1 – Teste prático

Utilizando trechos dos vídeos obtidos nos ensaios de caracterização que não foram processados, foram realizados alguns testes para avaliar os fatores de equalização propostos pelo trabalho, na Tabela 2 podem ser analisados as condições dos dados extraídos e para quais condições foram corrigidos:

Tabela 2 – Resultado de testes práticos

Parâmetro	Condição (atual)				Condição desejada				Fator (f)	Valor corrigido	Erro (%)
	Câmera	Valor real	Distância	Ganho	Câmera	Valor real	Distância	Ganho			
Diâmetro	A	73	6	100	B	111	6	100	1.63	119	7.2
Diâmetro	B	257	6	120	B	760	6	150	3.16	812	6.84
Diâmetro	A	70	8	110	A	55	10	110	0.89	62	12.73
Diâmetro	B	410	10	150	A	84	8	120	0.19	80	4.76
Diâmetro	A	124	12	180	B	798	12	180	7.58	939	17.67
Área	B	47676	6	120	B	351453	6	150	6.38	304246	13.43
Área	A	4773	4	90	A	20078	4	130	2.67	12747	36.51
Área	B	192433	8	150	A	4741	12	140	0.03	6014	26.85
Área	A	1361	12	110	B	3179	6	90	2.34	3196	0.53
Área	B	1710	10	100	B	1169	12	100	0.78	1301	11.29

7.0 - CONCLUSÃO

A metodologia de processamento interpreta a descarga corona em um intervalo de tempo, o que demonstrou trazer estabilidade para os parâmetros, Área e Diâmetro. Já que considera como ruído as regiões com pouca ocorrência de fâculas.

O parâmetro contagem de “fótons”, embora seja um dado quantitativo fornecido pela própria câmera, possui instabilidades e variações, sendo necessário que o usuário seja dotado de relativa experiência para utilizá-lo de maneira correta, pois quando as fâculas atingem os limites da região de contagem há uma redução abrupta na contagem de “fótons” à medida em que a fâcula aumenta, seja pelo aumento do ganho ou pela diminuição da distância.

Como alternativa a um novo modelo de regressão para a contagem de “fótons” é proposto que, em trabalhos futuros, se faça o uso de redes neurais. Entretanto, seriam necessários extrair mais parâmetros além da Área e do Diâmetro para utilizá-los como dados de entrada. Pelas características observadas neste parâmetro, será necessário adicionar um parâmetro de entrada que represente a taxa de ocupação da fâcula na região de contagem.

Para trabalhos futuros é proposto que as metodologias de processamento e equalização sejam testadas com descarga corona. De modo a avaliar a metodologia em condições reais e fora das condições que a câmera foi caracterizada.

Com intuito de contribuir para os estudos que utilizam câmera de detecção de UV, há necessidade de se caracterizar as câmeras UV, conforme detalhado neste trabalho, que fazem parte do sistema elétrico Brasileiro, com intuito de gerar um banco de informações. Este expediente permitirá que pesquisadores comparem seus resultados uns com os outros.

8.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) CARDOSO, J. A. A. S., BORGES, O. F., MELLO, D. R., “Use of uv cameras for corona tests in high voltage laboratory”, 2008.
- (2) BRITO, K. B., et al., “Attribute extraction and sensitivity analysis for classification of polymeric insulators ultraviolet images”, 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH)., Buenos Aires, Argentina, 2017.
- (3) LINDNER, M., “Daylight corona discharge imager”: High Voltage Engineering Eleventh International Symposium, Vol. 4, pp. 349 – 352, 1999.
- (4) LECUN, Y., CORTES, C., BURGESS, C., “MNIST handwritten digit database”. 2010.
- (5) LI, Z., et al., “Effects of different factors on electrical equipment UV corona discharge detection.”, Energies 9.5 (2016).

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Graduado em engenharia elétrica pela Unifoa em 2014 e pós-graduado em metrologia pela Puc-Rio obtendo grau mestre em 2016. O autor possui experiências em ensaios de alta tensão com tensões impulsivas e em frequência industrial e calibração de sistemas medição aprovados e de referência. Atualmente trabalha com processamento digital de imagens e inteligência artificial especificamente redes neurais, buscando aplicações nas áreas de ensaios e diagnósticos de equipamentos de alta tensão.

(2) EDUARDO COSTA DA SILVA

Graduado em Engenharia Elétrica e em Engenharia de Controle e Automação PUC-RIO em 2008. Possui Mestrado em Metrologia e Doutorado em Engenharia Elétrica, ambos pela PUC-RIO, concluídos em 2010 e 2013. Coordenador do Laboratório de Pesquisa e Desenvolvimento em Eletrônica e da equipe AeroRio da PUC-Rio, que atua no projeto e desenvolvimento de aeronaves não tripuladas e participa de competições nacionais e internacionais. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: projeto e desenvolvimento de circuitos eletrônicos, instrumentação eletrônica, desenvolvimento de transdutores magnéticos, magnetoimpedância gigante (GMI), engenharia biomédica, biomagnetismo e veículos aéreos não-tripulados (VANTS).

(3) CARLOS ROBERTO HALL BARBOSA

Possui graduação em Engenharia Elétrica em Eletrônica/Telecomunicações pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1992), mestrado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1995) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1999). Atualmente é Professor Assistente 1 da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, atuando no Programa de Pós-graduação em Metrologia. Tem experiência multidisciplinar, com ênfase em Metrologia, atuando principalmente nos seguintes temas: sensores e instrumentação, transdutores magnéticos, engenharia biomédica, ensaios não-destrutivos, flutter atrial, corpo estranho magnético e redes neurais.

(4) JOSÉ ANTONIO DAFFONSECA SANTIAGO CARDOSO

José Antonio d'Afonseca Santiago Cardoso - Graduação em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica pela UFRJ (2001) e mestrado em Engenharia Elétrica pela UFRJ (2006). É pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL desde 2002, atuando no laboratório de Ultra Alta Tensão. Trabalhou também na EPE entre 2011 e 2015, na superintendência de Transmissão de Energia. Área de atuação: técnica de ensaios de Alta Tensão (avaliação do desempenho de equipamentos e linhas de transmissão e desenvolvimento de tecnologia da câmera UV) e estudos de transitórios eletromagnéticos de sistemas CA e CC. Membro do CE D1 e A3 Brasil e WG internacionais.

(5) CRISTIANO SOBREIRA XAVIER

Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) (2004) e curso técnico-profissionalizante em Eletrotécnica pelo Centro Federal de Educação Tecnológica, Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ) (1998). Trabalhou como técnico de laboratório em ensaios e pesquisas no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL), trabalhou em projetos de instalações elétricas navais e militares como Engenheiro de Tecnologia Militar no Ministério da Defesa/Marinha do Brasil. Atualmente é Pesquisador - Engenheiro Eletricista, trabalhando em ensaios, projetos e pesquisas no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL).