

Ensaio de Arco Elétrico para Determinação da Energia Incidente Conforme a Norma IEEE *Std* 1584-2018

Pedro O. Bacin* Ana Paula G. Marchesan* Rafael C. Beltrame*
Daniel P. Bernardon** Marina Camponogara** Tiago B. Marchesan*
Vitor C. Bender* Leonardo H. Medeiros* Lucas M. Chiara***
Fernando C. Pepe*** Gilnei José G. Santos***

* *Instituto de Redes Inteligentes, Universidade Federal de Santa Maria, RS (e-mail: pedro.bacin@acad.ufsm.br, anapaulagm@mail.ufsm.br, beltrame@ufsm.br, tiago@ufsm.br, vitor.bender@ufsm.br, leohm.29@gmail.com)*

** *Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, Universidade Federal de Santa Maria, RS, (e-mail: dpbernardon@ufsm.br, marina.camponogara@acad.ufsm.br)*

*** *CPFL Energia, Campinas, SP (e-mail: lucaschiara@cpfl.com.br, fernandopepe@cpfl.com.br, gilnei.santos@cpfl.com.br,)*

Abstract: The arc flash is a dangerous electrical hazard event to workers and equipment, due to the high incident energy associated with it. Yet, there are few laboratories in the world that perform experimental tests related to it, due to the complexities and high costs involved in their composition. Thereby, the Smart Grid Institute (UFSM) together with CPFL Energy developed a high-current laboratory for arc flash tests with the goal to investigate conditions of arc flash related to the national electrical context, that are not approached in the international standards, such as the guide IEEE Std 1584-2018. But, for laboratory's validation, it is necessary that the tests produce analogue results in relation to the mathematical model of the guide IEEE Std 1584-2018, so in the future will be possible to explore situations that are not in standard's scope. Thus, this paper presents the main details related to the construction of the arc flash laboratory, as well as demonstrates the results obtained through an initial test. From the experiment carried out, it is possible to realize that the laboratory has a structure capable of generating a safe and high-current arc flash and measure the respective incident energy, but there are still several matters to explore and improve in the laboratory.

Resumo: O arco elétrico é um evento de elevado risco elétrico para trabalhadores e equipamentos, devido ao alto valor de energia incidente associado. Entretanto, existem poucos laboratórios no mundo que realizam ensaios de arcos elétricos devido aos elevados custos e complexidades relacionados a estes. Desta forma, o Instituto de Redes Inteligentes (UFSM) em conjunto com a CPFL Energia desenvolveu um laboratório de ensaios visando investigar condições de arcos elétricos relacionadas ao contexto elétrico nacional que não são abordadas nas normas internacionais de referência, como o guia IEEE *Std* 1584-2018. Entretanto, para validação do laboratório, os ensaios iniciais devem produzir resultados condizentes com a metodologia de cálculo do guia IEEE *Std* 1584-2018, para que, no futuro seja possível explorar situações que fogem do escopo da norma. Assim, este trabalho apresenta os principais detalhes relacionados à construção do laboratório de arcos elétricos, bem como demonstra os resultados obtidos através de um ensaio inicial. A partir do ensaio realizado, é possível perceber que o laboratório possui uma estrutura capaz de gerar um arco elétrico com altas correntes elétricas de maneira segura e medir sua respectiva energia incidente, mas que ainda há diversas questões a serem exploradas e aprimoradas no laboratório.

Keywords: Arc Flash; Electrical Hazards; Incident Energy; IEEE Std 1584; High-Current Laboratory; Safety in Electrical Systems.

Palavras-chaves: Arco Elétrico; Riscos Elétricos; Energia Incidente; IEEE *Std* 1584; Laboratório de Altas Correntes; Segurança em Sistemas Elétricos.

1. INTRODUÇÃO

O surgimento de arcos elétricos em redes de distribuição é de extremo perigo para operadores e equipamentos no seu entorno. Isso se deve à energia incidente (EI) liberada durante o fenômeno do arco, que possui elevada intensidade e faz com que os arcos elétricos muitas vezes sejam fatais ou deixem grandes sequelas (Queiroz, 2011). Os primeiros estudos relacionados à energia térmica liberada por arcos elétricos foram realizados por Lee (1982), e desde então, diversos trabalhos vêm contribuindo para uma maior compreensão deste fenômeno. A Figura 1 indica alguns dos componentes que se originam a partir do arco elétrico.

Dentre os riscos observados na Figura 1, Zhang (2015) destaca a alta temperatura que o arco elétrico expõe os elementos próximos a ele, que podem acarretar queimaduras de primeiro, segundo e terceiro grau. A EI é expressa pela quantidade de energia térmica liberada em uma determinada área (cal/cm^2) (ASTM, 2014). Segundo a NFPA (2021) os equipamentos de proteção individual (EPI) utilizados por trabalhadores contra os arcos elétricos são dimensionados em relação à EI que potencialmente pode ser liberada, e seu grau de proteção térmico é medido através da *Arc Thermal Performance Value* (ATPV), sendo que uma unidade de ATPV se refere a $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$, que é o limiar curável de energia térmica que causa queimaduras de segundo grau na pele humana. Desta forma, define-se o ATPV como um limiar de proteção de EPI, e a EI como uma unidade de medida térmica.

Com o aprimoramento da segurança em sistemas elétricos e a evolução dos EPIs ao longo dos anos, os acidentes fatais relacionados a este fenômeno vem diminuindo, porém, isso se deve majoritariamente aos avanços relacionados a materiais e procedimentos de segurança do que necessariamente ao domínio técnico do evento, que ainda possui muitas incertezas associadas (Lang et al., 2007).

Algumas das lacunas identificadas na literatura a serem preenchidas dizem a respeito à medição da EI e às especificidades do arco elétrico no contexto elétrico brasileiro. De acordo com Bottaro e Eichinger (2018) e Soares et al. (2019), a forma de medição mais utilizada para o sensoramento do aumento de temperatura nos calorímetros é por termopares, que possuem baixa imunidade a ruídos eletromagnéticos, o que pode ocasionar algumas divergências nas medições da EI, apesar de serem utilizados filtros matemáticos para a obtenção de dados. Já em relação

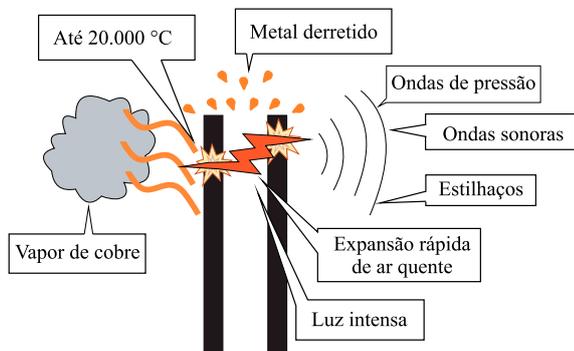


Figura 1. Riscos associados aos arcos elétricos
Fonte: COOPER BUSSMANN (2005).

ao contexto elétrico brasileiro, nas normas existentes não foram encontradas questões envolvendo a influência da umidade, temperatura, chuva, e demais condições climáticas na EI (Bacin et al., 2022).

Entretanto, para uma maior compreensão do arco elétrico, são necessárias pesquisas experimentais relacionadas ao tema, e estas possuem particularidades que dificultam este processo. As principais são a complexidade técnica e o alto valor econômico associados a laboratórios de arcos elétricos, visto que estes operam com altas correntes elétricas e consequentemente com uma potência elétrica que exige bastante da rede de distribuição, além da necessidade de equipamentos de ponta relacionados a geração, controle, medição, ignição e segurança nos ensaios (Bacin et al., 2022). Devido a isso, existem poucos laboratórios para ensaios de arcos elétricos (ou de EPIs) no mundo. Alguns dos que se tem conhecimento são: Aitex (Espanha), CEF/DuPont (França e Suíça), Kinetrics (Canadá e os Estados Unidos) e IEE-USP (Brasil) (Farnezi, 2021). Na literatura, os autores Hughes et al. (2011) apresentam um laboratório de elevadas correntes elétricas para teste de um sistema de proteção para detecção de arcos elétricos.

Deste modo, o presente trabalho apresenta um laboratório dimensionado para ensaios de arcos elétricos e a consequente medição da EI sob condições ambientais controladas e para diferentes níveis de corrente elétrica, detalhando o primeiro ensaio realizado no local. O laboratório se localiza no Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), e sua viabilização foi possível graças a parceria e recursos adquiridos juntos ao Grupo CPFL Energia, em projeto P&D ANEEL.

2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE O GUIA IEEE STD 1584-2018

2.1 Escopo

O guia IEEE STD 1584 (2018) é atualmente a maior referência para a estimativa da EI e da distância segura de aproximação (AFB) em relação aos arcos elétricos. Ele foi desenvolvido empiricamente a partir de 1705 ensaios realizados em quatro laboratórios, um número cerca de seis vezes maior que o de seu predecessor de 2002. O padrão ASTM F1959/F1959M para determinar a capacidade de materiais em fornecer proteção contra arcos elétricos serviu como base durante os ensaios realizados pelo guia.

São diversos os parâmetros que interferem na magnitude do arco elétrico e em sua EI sobre um corpo próximo, a saber: tensão nominal de circuito aberto (V_{oc}); corrente de falta trifásica franca (I_{bf}); tempo de duração do arco elétrico (t); espaçamento entre os eletrodos curto-circuitados (gap); configuração entre os eletrodos; distância de trabalho (d); e se o ensaio é realizado em ambiente aberto ou enclausurado (McConnell, 2019). As configurações entre eletrodos abordadas na norma são as seguintes: verticais em ambiente fechado (VCB), verticais em ambiente fechado com barreira (VCBB), verticais em ambiente aberto (VOA), horizontais em ambiente fechado (HOA) e horizontais em ambiente aberto (HOA) (IEEE STD 1584, 2018).

Considerando os principais parâmetros que afetam o arco elétrico, pode-se definir as principais aplicações da norma.

Existem duas metodologias para a estimação da EI, uma para V_{oc} entre 208 e 600 V e outra para uma V_{oc} entre 601 e 15000 V. Como no laboratório abordado neste trabalho apenas se utilizam V_{oc} acima de 601 V, esta é a metodologia considerada, possuindo as seguintes especificações (IEEE STD 1584, 2018):

- V_{oc} trifásica entre 601 V e 15 kV;
- Frequências de 50 Hz e 60 Hz;
- I_{bf} 0,2 a 65 kA ($601 \text{ V} < V_{oc} < 15 \text{ kV}$);
- Espaçamento entre eletrodos de 19,05 a 254 mm ($601 \text{ V} < V_{oc} < 15 \text{ kV}$);
- Sem limite de tempo definido para extinção o curto-circuito (recomendação de até 2 segundos);
- Distâncias de trabalho entre 457,2 e 1193,8 mm;
- Configurações de eletrodos: VCB, VCBB, HCB, VOA e HOA.

Inicialmente, as configurações de eletrodos da IEEE Std 1584-2018 reproduzidas no laboratório são as configurações em ambiente aberto, ou seja, VOA e HOA. A Figura 2 demonstra essas configurações.

Devido à elaboração empírica da norma, o seu embasamento é em relação às análises estatísticas dos ensaios e ajustes dos resultados obtidos. Isso resultou numa extensa modelagem matemática utilizada para a análise comparativa deste trabalho. O quadro-resumo ilustrado pela Figura 3 esquematiza a modelagem adotada pela norma.

2.2 Arranjos de ensaios

As características dos arranjos dos laboratórios em que os ensaios do guia IEEE Std 1584-2018 foram realizados não são detalhadamente explicitados, entretanto, alguns pontos importantes são disponibilizados, ou então, referenciados a outras normativas existentes. Dentre os principais elementos destacados pela IEEE Std 1584-2018 estão: sistema de medição, dimensões dos eletrodos, condutor de sacrifício, invólucro, distâncias de trabalho padrão e os parâmetros que delimitam o escopo da norma.

Para os eletrodos que estão representados na Figura 2, na norma foram utilizados barras de cobre maciças de 3/4" e 1" em todos os ensaios de arcos elétricos, e o curto-circuito é iniciada por condutores de cobre de sacrifício com seção transversal entre 0,8 e 2,5 mm², dependendo do valor de corrente a ser aplicado. O ponto de ignição do

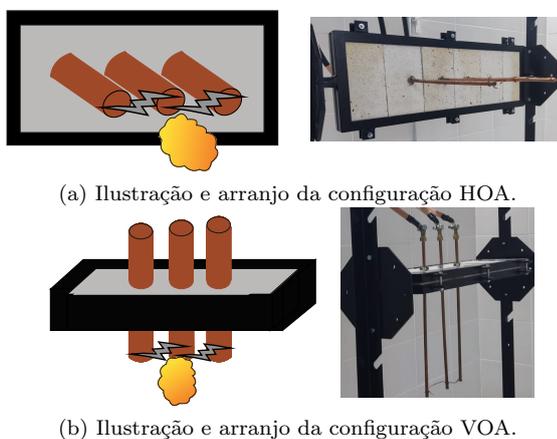


Figura 2. Configurações de ensaio em ambiente aberto.

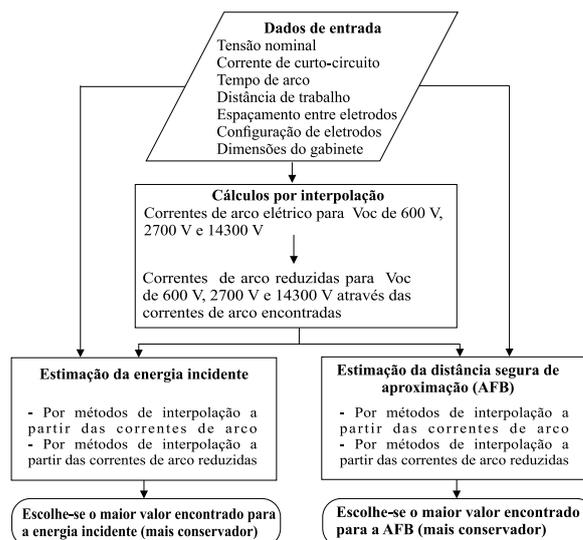


Figura 3. Síntese do modelo matemático do guia IEEE Std 1584-2018.

Fonte: Bacin et al. (2022).

curto-circuito se localiza a 1520 mm do chão. Os materiais que compõem os eletrodos e o condutor de sacrifício devem permitir a ocorrência do curto-circuito, e, em simultâneo, fornecer insumos para que o arco elétrico se propague através da nuvem de gás ionizada (Das, 2021).

Com relação ao sistema de medição da EI, é utilizado um conjunto de sete calorímetros associados a termopares do tipo K ou do tipo J, conforme o que é recomendado pelas normas ASTM (2014) e ISO (2013). O calorímetro é basicamente um dispositivo com um disco de cobre acoplado ao sensor de temperatura com um material isolante térmico e dielétrico em seu entorno, para que o registro do aumento térmico gerado pela EI não tenha interferência do ambiente externo (Schau e Novitskiy, 2009). Em média, a energia absorvida por esses dispositivos são iguais ou superiores a 90% da EI, os tornando bastante confiáveis (Neal et al., 1996). A ISO (2013) determina que o calorímetro deve possuir 40 mm de diâmetro, 18 gramas de massa e uma espessura de 1,6 mm, padrão seguido pela IEEE Std 1584-2018. Os detalhes dimensionais acerca do conjunto que compõe os calorímetros (disco de cobre e material isolante térmico) é representado na Figura 4.

Os sete calorímetros devem ser posicionados para reproduzir o torso humano, com um conjunto de três calorímetros centrais alinhados com a ponta dos eletrodos (ou ponto

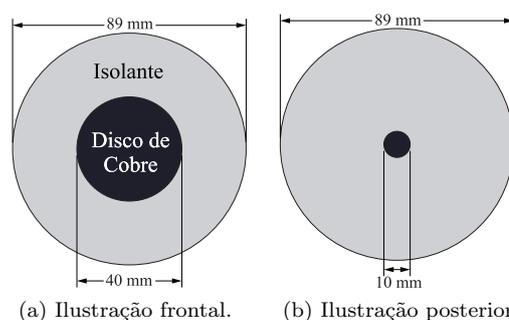


Figura 4. Ilustração dos calorímetros para medição da EI. Fonte: ISO (2013).

de ignição do arco elétrico), outro conjunto idêntico 152,4 mm abaixo do eixo central e um único calorímetro 152,4 mm acima do eixo central (que representa a cabeça do ser humano). O espaçamento horizontal dos calorímetros laterais para os centrais não são normatizados, entretanto, normalmente se utiliza o mesmo espaçamento adotado verticalmente, e a distância dos calorímetros para os eletrodos é definida pela distância de trabalho, entre 457 e 1193 mm. Essas relações podem ser observadas na Figura 5, a partir da configuração HOA.

Quanto a EI resultante dos arcos elétricos, é adotado o valor máximo medido entre todos os calorímetros, conferindo à norma um caráter conservador. Isso se justifica devido à periculosidade que envolve acidentes relacionados a esses eventos, mas também pode causar sobredimensionamentos de EPIs em casos específicos e um conseqüente desconforto ocupacional para os trabalhadores.

Nos ensaios realizados para elaboração da norma, buscou-se utilizar tempos de arcos reduzidos (a maioria em torno de 200 milissegundos), para mitigação de danos aos eletrodos e componentes do laboratório, e as medições de correntes e tensões foram realizadas por osciloscópios (IEEE STD 1584, 2018). Foram realizados repetidos testes para cada configuração, devido o impacto da variação de comportamento que o arco pode apresentar.

3. ESTRUTURA LABORATORIAL

O laboratório de arcos elétricos construído apresenta três principais áreas: sala de controle, sala de máquinas e câmara de ensaios. O controle do laboratório é realizado em uma estrutura externa, através de um painel de comando, que controla outro painel existente na sala de máquinas.

3.1 Sala de Máquinas

A sala de máquinas compreende os equipamentos do laboratório responsáveis por fornecer as condições necessárias para gerar arcos elétricos com elevados valores de corrente elétrica, de forma segura, por um tempo máximo de até dois segundos. Para isso, é empregado um transformador de potência a seco de 5 MVA, especificado na Tabela 1.

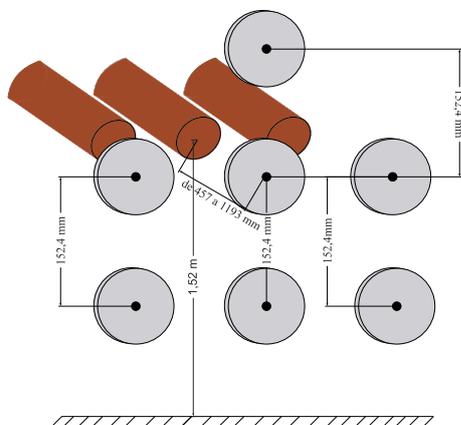


Figura 5. Ilustração dos espaçamentos dos calorímetros em relação aos eletrodos do guia IEEE Std 1584-2018

Tabela 1. Especificações do transformador.

Parâmetro	Especificação	
Potência Nominal	5.000 kVA	
Tensão Nominal Primária	13.800 V	Ligação Delta
Tensão Nominal Secundário 1	1.100 V	Ligação Estrela
Tensão Nominal Secundário 2	635 V	Ligação Delta
Máxima Corrente de Curto-Circuito	AT – 3,6 kA BT – 45,2 kA	Tempo Limite: 2 segundos

A partir das especificações do transformador descrito na Tabela 1, é possível obter as magnitudes das diferentes correntes elétricas possíveis para os valores fixos de tensão na BT do transformador. As correntes são controladas a partir da injeção de reatância no sistema, realizada por três reatores monofásicos (um em cada fase) que possuem classes de isolamento de 15 kV. Os valores de corrente de curto-circuito previstos que podem ser atingidos no laboratório estão apresentados na Tabela 2.

Com os diversos valores possíveis de injeção de reatância no circuito do laboratório, descritos pela Tabela 2, pode-se obter até 42 níveis diferentes de I_{bf} por meio da religação de *taps* dos reatores, apesar da I_{bf} máxima suportada pelo laboratório ser de 25 kA devido à capacidade máxima de interrupção dos disjuntores. Além disso, estes equipamentos possuem a possibilidade de curto-circuitar alguns *taps* entre si, devido as suas características construtivas, assim é possível obter valores intermediários de reatâncias.

Destaca-se, que os valores de I_{bf} demonstrados pela Tabela 2 foram estimados, visto que não se tem certeza das impedâncias da rede a montante do laboratório. Todavia, espera-se que com a realização de alguns ensaios seja possível calcular com maior precisão a I_{bf} esperada.

Além do transformador e dos reatores, diversos outros equipamentos são necessários para gerar e extinguir o arco elétrico com o controle e a segurança necessárias, como pode-se observar no diagrama unifilar da Figura 6.

Tabela 2. Valores de correntes de curto-circuito trifásico possíveis no laboratório.

Conexão entre TAP	Tap em Curto-Circuito	Reatância por reator (Ω)	I_{bf} (kA) em 1,1kV	I_{bf} (kA) em 0,635 kV
H0-H1	-	1,03	22,03	38,16
	H1-H12	0,48	24,99	43,3
H0-H2	-	1,6	19,61	33,96
	H2-H12	0,76	23,39	40,52
H0-H3	-	2,35	17,12	29,66
	H3-H12	1,04	21,98	38,08
H0-H4	-	3,18	15,05	26
	H4-H12	1,32	20,73	35,9
H0-H5	-	4,16	13,09	10,47
	H5-H12	1,67	19,34	33,51
H0-H6	-	5,3	11,4	19,75
	H6-H12	2,02	18,13	31,41
H0-H7	-	6,63	9,91	17,16
	H7-H12	2,45	16,83	29,16
H0-H8	-	9,87	7,5	13
	H8-H12	3,42	14,49	25,1
H0-H9	-	13,3	5,97	10,34
	H9-H12	4,54	12,48	21,63
H0-H10	-	23,1	3,77	6,52
H0-H11	-	31,8	2,84	4,91
H0-H12	-	59,3	1,59	2,76

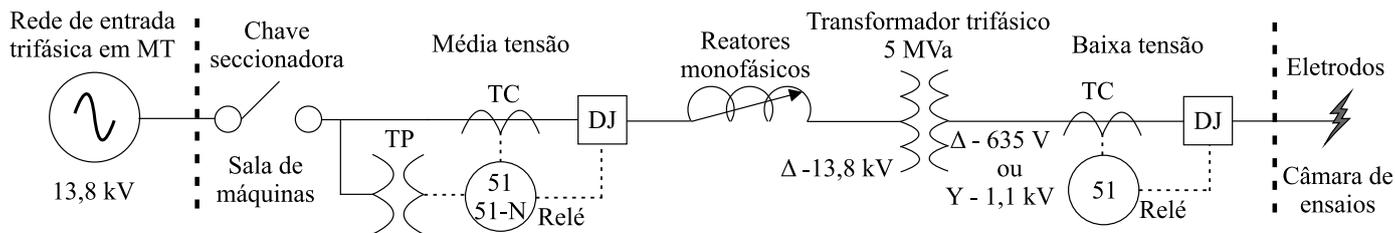


Figura 6. Diagrama unifilar dos principais componentes do laboratório.

Chave Seccionadora Trifásica: Utilizada para seccionar e isolar a entrada do restante do circuito, possibilitando manutenções e a operação segura dos equipamentos;

Transformador de Potencial (TP): Empregado na medição da tensão de entrada;

Transformador de Corrente (TC) de MT: Empregado na medição e envio das correntes de entrada ao relé de MT;

Relé de MT: Responsável por proteger o circuito de MT a partir do acionamento do disjuntor de MT;

Disjuntor de MT: Controlado pelo relé da MT e pelo quadro de comando, é utilizado como proteção secundária para interromper o curto-circuito caso o disjuntor de BT não atue no tempo programado;

TC Janela de BT: Empregado na medição das correntes de arco e responsável por enviá-las ao relé de BT;

Relé de BT: Responsável por controlar o tempo de ensaio comandando a atuação do disjuntor da BT no tempo definido. Também é responsável por amostrar os valores de corrente de ensaio, a partir de sua função de oscilografia.

Disjuntor de BT: Controlado pelo relé da BT e pelo quadro de comando, é responsável pela ignição do arco a partir da sala de controle, e pela sua extinção no tempo definido através do relé da BT.

A operação do laboratório é realizado a partir de dois painéis de comando, um na sala de máquinas e outro na sala de controle. O painel da sala de máquinas possui a função de emergência, energização dos relés e passagem dos cabos lógicos de todo o circuito de comando. Já o painel da sala de controle, possui as botoeiras de emergência e para acionar e abrir os disjuntores. Para funcionarem individualmente, ambos os painéis devem estar ligados e energizados. O disjuntor da MT só pode ser ligado caso o disjuntor da BT esteja desligado, evitando operações indevidas, como realizar a ignição do arco a partir do fechamento do disjuntor da MT. Além disso, na sala de controle é possível observar o arco elétrico, devido a uma câmara de monitoramento localizada na câmara de ensaios que envia o sinal de vídeo em tempo real.

3.2 Câmara de Ensaios

A câmara de ensaios é composta por dois componentes distintos, a estrutura física para a montagem dos arranjos de ensaio para a ignição do arco elétrico e o sistema de medição da EI, que envolve a captação de dados da EI e o envio destes para análise na sala de controle. O arco é gerado em uma câmara de ambiente controlado, sendo totalmente fechada, com exceção de uma pequena abertura para ser possível a utilização da câmara termográfica.

3.2.1 Estrutura física para geração do arco elétrico

A estrutura metálica que serve como suporte dos eletrodos pode ser observada na Figura 2. O espaço para fixação dos eletrodos é preenchido por tijolos refratários, de alta isolamento térmica e elétrica, para evitar danos ao suporte nos ensaios. A estrutura, possui alturas reguláveis entre 145 e 190 cm, compreendendo as alturas recomendadas pelo guia IEEE *Std* 1584-2018. Quanto à configuração, o suporte tem a opção de ajuste em ângulos de 0°, 45° e 90° em relação ao piso, o que possibilita variar entre as configurações horizontais e verticais. O suporte permite ensaios com espaçamentos entre eletrodos de até 200 mm.

Os eletrodos de cobre são fixos em furos de seções idênticas previamente realizados nos tijolos refratários, e os espaçamentos são definidos conforme a necessidade do ensaio. O ajuste dos espaçamentos pode ser realizado a partir do deslocamento horizontal dos tijolos laterais em relação ao tijolo central, que deve ser o de menor largura. Os condutores responsáveis por interligar a sala de máquinas aos eletrodos são conectados diretamente neles, promovendo uma maior sustentação dos eletrodos no suporte.

A ignição do arco elétrico é realizada através do condutor de sacrifício, cujo objetivo é prover um caminho de baixa impedância para o curto-circuito. Normalmente é utilizada uma seção entre 0,25 e 0,5 mm² para este condutor, mas ela pode ser calculada considerando a quantidade de energia esperada para o arco em relação ao calor latente de fusão do cobre, onde se espera que o condutor seja fundido o mais rapidamente possível. Segundo Wilkins et al. (2006), esse tempo deve ser entre 2 a 8 milissegundos (ms). De acordo com Catlett et al. (2016), a razão da importância do tempo de fusão do condutor de sacrifício, é que durante esse período o arco não está em sustentação, pois há um condutor criando o caminho de curto-circuito, significando tempo de ensaio e de arco elétrico perdido. Como as provas realizadas são de no máximo 2 segundos, o período de fusão do condutor de cobre pode consumir uma parcela significativa do tempo de ensaio.

3.2.2 Estrutura de medição

O arranjo de medição é compreendido pelos calorímetros e por uma câmara termográfica de alta velocidade modelo FLIR A6753sc, para o sensoriamento de temperatura, além de um *software* desenvolvido internamente para o tratamento de dados e a estimação da EI. A câmara possui taxas de amostragem que variam de 125 até 4 175 *frames* por segundo, possuindo uma resposta mais rápida que a do termopar. Espera-se uma medição com imunidade ao ruído eletromagnético, já que a câmara estima a temperatura através de sensores ópticos (Bacin et al., 2022).

Os calorímetros foram construídos a partir de um disco de cobre com 99,9% de pureza e da utilização do Marinite A[®] como isolante térmico. A peça dispõe de um furo de 10 mm de diâmetro na parte posterior para eliminar a barreira física entre o disco de cobre e a câmera termográfica, com finalidade de possibilitar a câmera registrar o aumento de temperatura nos discos de cobre.

Os ajustes dos equipamentos de medição são realizados antes da ignição do arco elétrico. Inicialmente, posicionam-se os calorímetros a uma distância desejada (distância de trabalho) e ajusta-se a localização da câmera termográfica para que a imagem obtida contemple os sete calorímetros. Em seguida, habilita-se a câmera térmica e grava-se a temperatura dos calorímetros antes e após o ensaio. A Figura 7 apresenta a estrutura *in loco* do arranjo de medição que envolve os calorímetros e a câmera termográfica.

4. ENSAIO REALIZADO

Os parâmetros de entrada utilizados no ensaio realizado estão descritos na Tabela 3. Dentre os valores observados, destaca-se que foi priorizada a escolha da ligação entre *taps* dos reatores que oferecesse ao circuito a maior reatância e, conseqüentemente, a menor I_{bf} dentre as possíveis no laboratório, priorizando a segurança na realização do ensaio. O tempo de prova considerou o tempo de ajuste no relé (500 ms) mais o tempo máximo para atuação do disjuntor (35 ms). A configuração HOA foi escolhida para observar o arco nitidamente através da câmera de monitoramento e captar uma maior energia incidente nos calorímetros.

O cálculo da seção do condutor de sacrifício considerou diversos, fatores como: I_{bf} , peso específico, resistência e calor latente de fusão do cobre, comprimento e seção do condutor, valor esperado de energia liberada em 2 ms pelo arco elétrico e a energia necessária para fundir o condutor de sacrifício. A partir desses valores foi dimensionado um condutor de sacrifício de 0,3 mm².

Seis períodos de tempos distintos do ensaio descrito pela Tabela 3 são apresentados pela Figura 8. A Figura 8a, demonstra o momento anterior à ignição do arco elétrico, somente com o condutor de sacrifício posicionado. Já a ignição, expansão e extinção do arco são apresentadas nas Figuras 8b, 8c, 8d, 8e e 8f, onde:

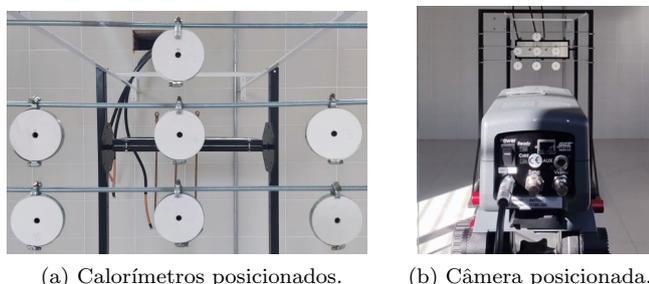


Figura 7. Arranjo de medição da EI em laboratório.

Tabela 3. Parâmetros de entrada do primeiro ensaio do laboratório.

$V_{oc}(kV)$	$I_{bf}(kA)$	$t(ms)$	$Gap(mm)$	$d(mm)$	Configuração	<i>tap</i>
1,1	1,59	535	100	1100	HOA	H0-H12

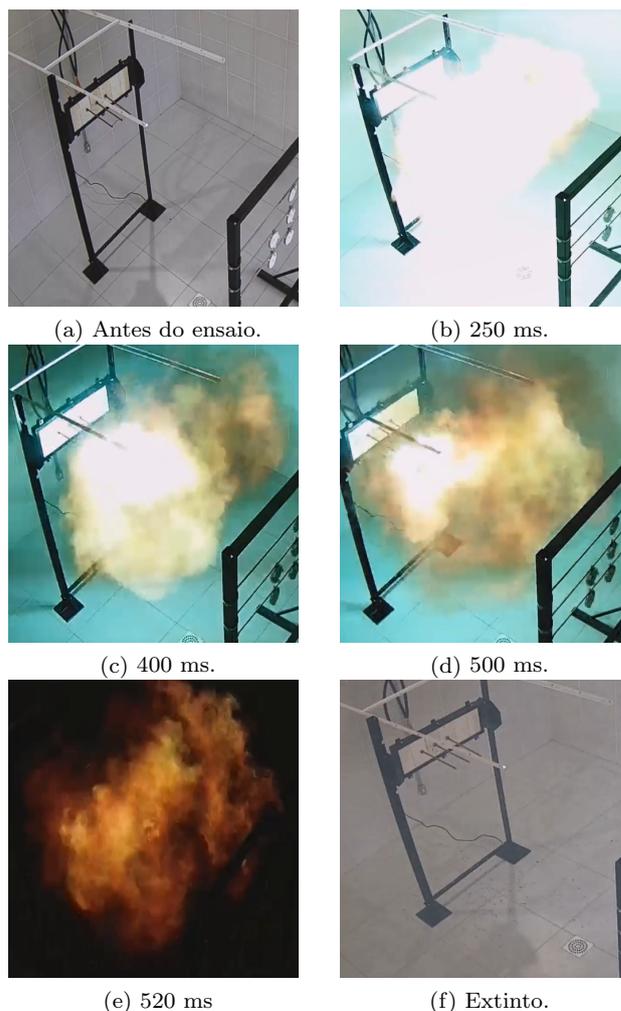


Figura 8. Visualização do ensaio HOA realizado.

Em 250 ms: Está com elevados jatos de plasma e energia concentrada. A sua nuvem de gás retém bastante material ionizado para sustentação;

Em 400 ms: A nuvem de gás já não retém muito material ionizado para sustentação, entretanto o arco se encontra em estado de equilíbrio;

Em 500 ms: A nuvem de gás não tem quase mais nenhum material ionizado para sustentar o arco, que perde força. Pode-se observar que a nuvem está dispersa, e a concentração de energia está retida quase totalmente nos eletrodos. Em 520 ms pode-se observar o arco próximo da extinção.

Quanto aos níveis de corrente reais do ensaio, foi possível extrair os valores de correntes de arco (I_{arc}) das oscilografias dos relés. Para o propósito deste trabalho, são relevantes apenas as correntes de arco obtidas na BT. Desta forma, a Figura 9 ilustra o comportamento instantâneo de I_{arc} para as três fases. A partir da oscilografia, pode-se constatar que o arco elétrico durou 525 milissegundos. Os valores das correntes de arco mostrados pelo gráfico devem ser ajustados por dois principais motivos: o guia IEEE Std 1584-2018 utiliza valores em rms em seu modelo matemático para a estimação da EI, e precisa ser aplicado um filtro cossenoidal para eliminar componentes contínuas (fontes de assimetria), que existem na origem do curto-circuito do arco elétrico (IEEE STD 1584, 2018).

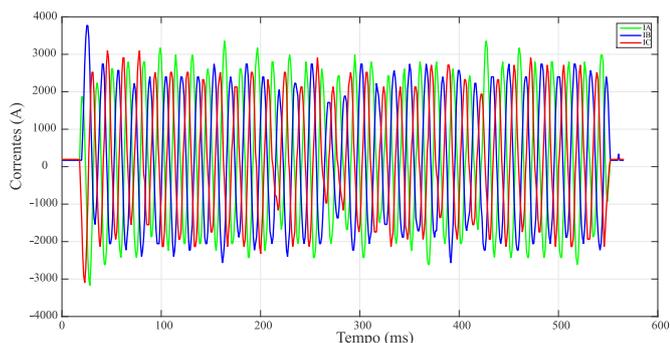
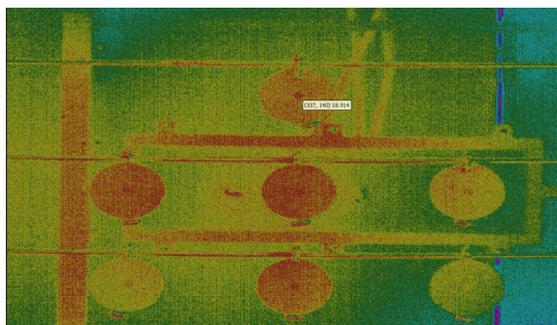


Figura 9. Oscilograma dos valores instantâneos de I_{arc} .

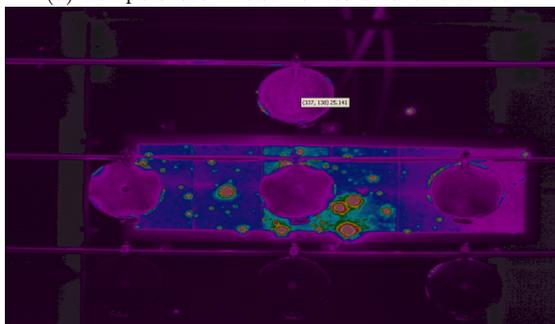
Percebe-se um desequilíbrio significativa na magnitude das correntes entre as fases, que ocorre devido ao instante do ciclo da senoide em que é realizada a ignição do arco elétrico, parâmetro que não é possível controlar no laboratório. Após o tratamento dos dados, foram encontrados os seguintes valores em rms para as correntes de arco: $I_{A_arc} = 1,747$ kA; $I_{B_arc} = 1,665$ kA e $I_{C_arc} = 1,512$ kA. Pressupondo I_{arc} como a média simples dos valores das correntes de fase em rms, seu valor é de 1,641 kA.

Valendo-se do modelo matemático da norma IEEE *Std* 1584-2018 mencionado na Figura 3, e considerando a I_{arc} de 1,641 kA e demais parâmetros do arranjo descrito pela Tabela 3, foi calculada uma EI de 0,94 cal/cm².

Conforme descrito pela ASTM (2014), o equacionamento para o cálculo da EI depende, prioritariamente, da temperatura inicial e final no calorímetro de maior elevação de temperatura, e esse valor pode ser obtido a partir da análise de temperatura nos calorímetros antes e após o ensaio. A Figura 10 exibe as temperaturas inicial e final do calorímetro de maior elevação de temperatura (ΔT).



(a) Temperatura inicial - antes do arco elétrico.



(b) Temperatura final - após o arco elétrico.

Figura 10. Imagens da câmera termográfica demonstrando a elevação de temperatura no calorímetro superior.

Segundo a análise do arquivo de gravação da câmera, a maior elevação de temperatura ocorreu no calorímetro superior, referente a cabeça de um indivíduo. Conforme observado na Figura 10, a temperatura inicial neste calorímetro é de 18,914 °C, e a temperatura final é de 25,141 °C. Desta forma, a EI pode ser estimada através das Equação (1) (ASTM, 2014).

$$EI = \frac{m \times \overline{C_p} \times \Delta T}{A} \quad (1)$$

É importante destacar que o modelo matemático completo para compreender o cálculo da EI nos calorímetros está disponível na ASTM (2014). A partir da Equação (1) e das características físicas do calorímetro de maior ΔT , a EI neste calorímetro pode ser calculada a partir de sua massa (18,858 g), da capacidade térmica média do cobre com relação a ΔT ($\overline{C_p}$), ΔT , além da área de superfície de contato do disco de cobre (12,57 cm²). Desta forma, foi medida uma EI de 0,9 cal/cm².

Em relação à EI calculada através do modelo matemático do guia IEEE *Std* 1584-2018 com a I_{arc} do ensaio, a EI medida no calorímetro de maior ΔT foi 4,26 % menor. A norma ASTM (2014) e os autores Bottaro e Eichinger (2018) consideram uma relação de $\pm 10\%$ entre a energia incidente mensurada e a calculada devido a um arco elétrico uma margem razoável de variação, validando a medição realizada.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os aspectos construtivos e técnicos de um laboratório de arcos elétricos em sua fase final de implementação. Os resultados mostraram que existem muitos desafios no horizonte do laboratório, mas que ele consegue gerar arcos elétricos com elevadas correntes de curto-circuito de maneira segura, e dispõem dos instrumentos necessários para a ignição, interrupção, sensoreamento e medição do arco elétrico.

A partir da medição das correntes de arco elétrico e da elevação de temperatura nos calorímetros, demonstradas nas Figuras 9 e 10, e da realização de um cálculo posterior através do modelo matemático da norma IEEE *Std* 1584-2018 em conjunto com a aplicação do *software* de tratamento dos dados extraídos da gravação da câmera termográfica, chegou-se a conclusão que o laboratório consegue medir com precisão a EI considerando os parâmetros de ensaio da Tabela 3. Entretanto, mais parâmetros devem ser variados entre ensaios, como distância de trabalho, ajuste de *taps* para maiores curto-circuitos, configurações de eletrodos e espaçamentos, para se ter maiores conclusões acerca da eficácia do sistema de medição de EI implementado.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001. Os autores, da mesma forma, agradecem o apoio técnico e financeiro da CPFL Energia no Projeto “DE3069 – Metodologia e Ferramenta Computacional para Avaliação e Modelagem das Condições de Arco Elétrico em Sistemas

Elétricos de Potência no Contexto Brasileiro”, desenvolvido sob o Programa P&D ANEEL PD-00063-3069/2020. O desenvolvimento deste trabalho também teve contribuições técnicas e financeiras da Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC), do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD), do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE-UFSM) e do Instituto de Redes Inteligentes (INRI).

REFERÊNCIAS

- ASTM (2014). *Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*, volume 1. West Conshohocken. doi:10.1520/F1959.
- Bacin, P.O., Marchesan, A.P.G., Beltrame, R.C., Marchesan, T.B., Bernardon, D.P., Bender, V.C., Medeiros, L.H., Borges, F.S., Chiara, L.M., and Pepe, F.C. (2022). Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente. In *IX Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 8. Santa Maria.
- Bottaro, M. and Eichinger, H. (2018). Uncertainties in the Heat Energy calculation process and influences on determination of arc thermal performance value (ATPV) of heat- and flame-resistant materials tests. *Elsevier Measurement*, 123, 275–284.
- Catlett, R., Lang, M., and Scala, S. (2016). Novel Approach to Arc Flash Mitigation for Low-Voltage Equipment. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 52(6), 5262–5270. doi:10.1109/TIA.2016.2591499.
- COOPER BUSSMANN (2005). Electrical safety. Technical report, Cooper Industries, Houston. doi:10.1080/00029238.1980.11079996. URL https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Electrical_Safety_and_Arc_Flash_Protection.pdf.
- Das, J.C. (2021). *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*. IEEE Press, Piscataway, NJ, 2nd edition. doi:10.1002/9781118402498.
- Farnezi, G. (2021). Brasil é único país do Hemisfério Sul que tem um laboratório especializado em estudos de segurança contra efeitos do arco elétrico. URL shorturl.at/achDT.
- Hughes, B., Skendzic, V., Das, D., Carver, J., Hughes, B., Skendzic, V., Das, D., Carver, J., and Laboratories, S.E. (2011). High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System. In *38th Annual Western Protective Relay Conference Spokane*, June, 1–9.
- IEEE STD 1584 (2018). *IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*. IEEE Press, Nova Iorque. URL <https://standards.ieee.org/standard/1584-2018.html>.
- ISO (2013). *ISO 9151:2013 Protective clothing against heat and flame and Determination of heat transmission on exposure to flame*. International Organization for Standardization, Geneva.
- Lang, M., Neal, T., and Wilkins, R. (2007). Introduction to arc flash. *8th International Conference on Electric Fuses and their Applications, ICEFA*, 179–184. doi:10.1109/ICEFA.2007.4419984.
- Lee, R.H. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-18(3), 246–251. doi:10.1109/TIA.1982.4504068.
- McConnell, E. (2019). IEEE 1584 -2018 changes offer a robust upgrade. URL <https://www.plantengineering.com/articles/ieee-1584-2018-changes-offer-a-robust-upgrade/>.
- Neal, T.E., Bingham, A.H., and Doughty, R.L. (1996). Protective clothing guidelines for electric arc exposure. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(4), 1041–1054. doi:10.1109/28.605747.
- NFPA (2021). *Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E)*. National Fire Protection Association, Quincy, 2021 edition.
- Queiroz, A.R.S. (2011). Utilização de Relés Digitais Para Mitigação dos Riscos Envolvendo Arco Elétrico. Mestrado, Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo.
- Schau, H. and Novitskiy, A. (2009). Calorimetric Measurement of Arc Flash Incident Energy. *International Scientific Colloquium*, 54, 7.
- Soares, F.C.S., Bottaro, M., and Santos, J.C. (2019). Desenvolvimento de calorímetro baseado em sensor óptico para determinação do ATPV. In *VIII IEEE ESW*. Salto, São Paulo.
- Wilkins, R., Lang, M., and Allison, M. (2006). Effect of insulating barriers in arc flash testing. *IEEE Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, (October 2005). doi:10.1109/PCICON.2006.359690.
- Zhang, Z. (2015). *Arc Flash Hazard Analysis*. Doutorado, The University of Texas, Texas.