

Contribuição ao Desenvolvimento de um Laboratório de Arco Elétrico Controlado para Medição da Energia Incidente

Pedro O. Bacin*. Ana Paula G. Marchesan **. Rafael C. Beltrame **.
Tiago B. Marchesan **. Daniel P. Bernardon *. Vitor C. Bender **.
Leonardo H. Medeiros **. Fernando S. Borges **. Lucas M. Chiara **.
Fernando C. Pepe ****.

*Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência, UFSM, Santa Maria, Brasil.

E-mail: pedro.bacin@acad.ufsm.br e dpbernardon@ufsm.br

** Instituto de Redes Inteligentes, UFSM, Santa Maria, Brasil.

E-mail: anapaulagm@mail.ufsm.br, beltrame@ufsm.br, tiago@ufsm.br,
vitor.bender@ufsm.br e leohm.29@gmail.com

*** LIZBOR Manutenção e Consultoria LTDA, Gravataí, Brasil

**** CPFL Energia, Campinas, Brasil

E-mail: lucaschiara@cpfl.com.br e fernandopepe@cpfl.com.br

Abstract: Arc flashes are events of great electrical hazards and with a destructive power that can lead workers to disability and death, and cause serious damage to equipment. In the last 20 years, there have been significant advances in laboratory tests of arc flash to measure incident energy. For instance, the IEEE Standard 1584 - 2018 shows laboratory setups for tests and provides mathematical models to determine the incident energy. However, the literature is scarce regarding tests under several weather conditions, like moisture and different temperatures. These issues are especially important when it comes to the Brazilian context, since Brazil is a large country with several singularities, and understanding the effects of these conditions on arc flash can be of vast scientific importance. Therefore, this paper demonstrates the constructive aspects of a high-current laboratory for measuring incident energy in different conditions of moisture and temperature. Thus, the paper discusses about the limitations of the laboratory's voltage, current and arcing time, as well as its main equipment, methods to arc ignition and a methodology to measure the resulting incident energy through calorimeters and a thermographic camera. With the laboratory's conclusion, it is intended to contribute with the existing methodologies for testing arc flash in laboratory and the respective measurement of incident energy, as well as to provide results that can collaborate with more accurate sizing of personal protective equipment in several weather conditions.

Resumo: Os arcos elétricos são eventos de grande risco elétrico, com um potencial destrutivo que pode levar trabalhadores à invalidez e à óbito, além de causar graves danos em materiais e em equipamentos. Nos últimos 20 anos, ocorreram avanços significativos em ensaios laboratoriais de arcos elétricos para a medição de energia incidente. Por exemplo, o guia IEEE Std 1584 - 2018 mostra *setups* laboratoriais para ensaios e obtenção de modelos matemáticos para a energia incidente. Entretanto, a literatura é escassa no que se refere a ensaios em condições ambientais diversas, como umidade e temperatura. Essa questão é especialmente importante quando se trata do contexto brasileiro, já que o Brasil é um país extenso e com diversas singularidades e os efeitos dessas condições no arco elétrico representam grande importância científica. Desse modo, esse trabalho apresenta os aspectos construtivos de um laboratório de altas correntes elétricas que está em desenvolvimento para a medição da energia incidente em diferentes condições de umidade e temperatura. São definidas as limitações de tensão, corrente e tempo de arco do laboratório bem como seus principais equipamentos, métodos para a ignição do arco elétrico e metodologia de medição da energia incidente resultante através de calorímetros e de uma câmera termográfica. Com a conclusão do laboratório, pretende-se contribuir com as metodologias existentes de ensaios de arcos elétricos e a respectiva medição da energia incidente, bem como prover resultados que colaborem com dimensionamentos mais precisos de equipamentos de proteção individual (EPIs).

Keywords: Arc Flash; Electrical Hazards; Incident Energy; Weather Conditions; IEEE Std 1584 - 2018; High-Current Laboratory.

Palavras-chaves: Arco Elétrico; Riscos Elétricos; Energia Incidente; Condições Ambientais; IEEE Std 1584 - 2018; Laboratório de Alta Corrente.

1. INTRODUÇÃO

Os riscos associados aos arcos elétricos são elevados por que podem culminar em fatalidades e lesões em trabalhadores, onde em alguns casos estas lesões podem ser irreversíveis, além da possibilidade de causar graves danos em equipamentos devido à elevada quantidade de energia liberada em um curto espaço de tempo (Queiroz, 2011). Conforme constatado por Lee (1982), em sua origem, os arcos podem alcançar temperaturas análogas a três ou quatro vezes à da superfície solar, o que exemplifica a magnitude desses eventos. Alguns dos riscos associados são destacados pela Fig. 1.

Dos riscos observados na Fig. 1, destacam-se as queimaduras, que podem ser de primeiro, segundo ou terceiro grau. As elevadas temperaturas produzidas pela expansão de ar quente, plasma e vapor podem causar queimaduras graves, bem como o contato com fragmentos sólidos derretidos e ejetados pelos eletrodos, com chances de danificar os equipamentos de proteção individual (EPIs). Embora os demais riscos também sejam motivos de preocupação, os térmicos são especialmente perigosos e preocupantes, pois levam a maioria dos casos de invalidez e óbitos nesse tipo de acidente (Zhang, 2015).

Tratando-se especificadamente de acidentes causados por arcos elétricos, os dados estatísticos destas ocorrências são de difícil acesso no Brasil. Contudo, até 2013, a Fundação Comitê Gestão Empresarial (COGE) divulgava gratuitamente estes dados e, posteriormente, os restringiu apenas para assinantes. A Fig. 2 lista as ocorrências entre 2000 e 2013.

Destaca-se que é grande a probabilidade dos dados apresentados na Fig. 2 representar apenas uma parcela dos acidentes, uma vez que a COGE contabiliza apenas acidentes registrados pelas empresas, de modo que os acidentes informais não são contabilizados (Resende, 2016). A partir de uma avaliação dos dados da Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade (ABRACOPEL) para o ano de 2020, observa-se que o número total de acidentes de origem elétrica registrados na categoria de choque elétrico foram de 765, sendo 592 fatais e 173 não fatais. Salienta-se que os arcos elétricos estão inclusos nesta categoria de acidentes, uma vez que as outras categorias de acidentes de origem elétrica são incêndios por sobrecarga e descargas atmosféricas (ABRACOPEL, 2021).

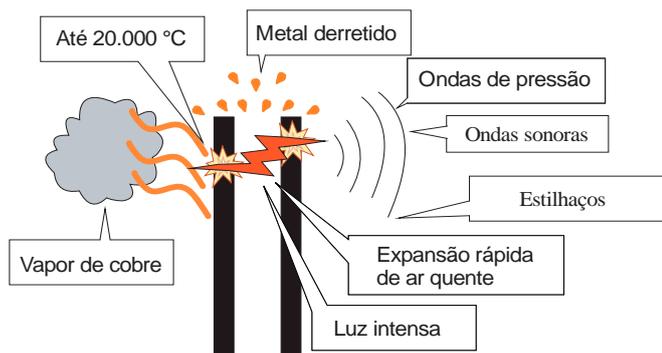


Fig. 1 Principais riscos associados aos arcos elétricos.
Fonte: Cooper Bussmann, 2005.

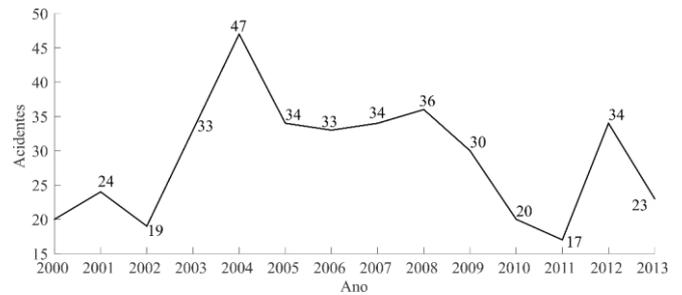


Fig. 2: Estatística de acidentes com arco elétrico no setor elétrico brasileiro. Fonte: COGE, 2014; Resende, 2016.

Para representar a magnitude da energia térmica liberada por um arco elétrico, utiliza-se o termo energia incidente (EI), que expressa a quantidade de energia térmica que incide em uma dada área (cal/cm^2) (ASTM, 2014). É definido $1,2 \text{ cal}/\text{cm}^2$ como o valor de energia térmica capaz de causar queimaduras de segundo grau na pele humana (limiar curável), sendo que a partir desse valor há a necessidade da utilização de EPIs em ambientes onde existe o risco do arco elétrico produzir valores de EI superiores. Os EPIs para proteção térmica utilizam o ATPV (*Arc Thermal Performance Value*) para diferenciar seus níveis de proteção, sendo este o valor em cal/cm^2 que o tecido do EPI suporta e protege contra o efeito térmico proveniente do arco elétrico (NFPA, 2021). É importante que seja feita a diferenciação entre a EI, que é a unidade de medida da energia térmica, e o ATPV, que é um limiar de proteção para EPIs.

A medição da EI dos arcos elétricos em laboratórios normalmente emprega um sistema de calorímetros em conjunto com sensores de monitoramento para verificar a energia transmitida para os calorímetros, e a ignição do arco elétrico depende de toda uma infraestrutura que permita alcançar altos valores de corrente elétrica entre eletrodos (Bottaro e Eichinger, 2018).

Em termos normativos, há quatro principais documentos que norteiam os estudos relacionados à EI. O guia IEEE Std 1584-2018 (*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*) apresenta modelos matemáticos para o cálculo da EI em sistemas de até 15 kV e *setups* que podem ser utilizados em laboratórios. Já a norma NFPA 70E (*Standard for Electrical Safety in the Workplace*) é um guia de procedimentos de segurança e dimensionamentos de EPIs contra arcos elétricos e os seus efeitos. Finalmente, as normas ISO 9151 (*Determination of Heat Transmission on Exposure to Flame*) e ASTM F9159/F1959M (*Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing*) que são referências para os procedimentos de ensaio em laboratórios afim de definir o desempenho de materiais em relação aos arcos elétricos.

A publicação científica precursora de estudos relacionados à EI foi elaborado por Lee (1982), e propôs um equacionamento para o cálculo da EI resultante do arco elétrico acima de 600 V. Já o trabalho de Hughes et al. (2011) apresentou o desenvolvimento de laboratório de altas correntes elétricas para um sistema de detecção de arcos elétricos, servindo como um importante alicerce para dimensionamentos de laboratórios para este fim. Os autores Lasica et al. (2017) apresentam um detalhamento da medição da

EI por calorímetros localizados em equipamentos de proteção facial em um laboratório com capacidade de correntes elétricas de até 12 kA, também servindo como uma referência importante para o tema. Outros trabalhos de bastante relevância são de Zhang (2015) e Zhang et al. (2020), que expressam em detalhes diversas questões relacionadas ao tema: desde os perigos envolvidos nos ensaios, configurações de eletrodos, detalhamento das medições, referências normativas, entre outros.

Nesse contexto, algumas lacunas identificadas na literatura dizem respeito à medição da EI e às especificidades do arco elétrico no contexto elétrico brasileiro (por exemplo, considerando-se diferentes cenários de condições ambientais). Especificamente, um padrão de medição que é recomendado pelas normas é o emprego de sensores do tipo termopar que são inseridos no centro da face traseira do *slug* (disco de cobre) no calorímetro. Entretanto, há bastante discussão acerca da eficácia desse método devido à baixa imunidade ao ruído eletromagnético em ensaios que envolvem altas correntes, o que pode ocasionar distorções nos valores lidos de EI medidos pelos calorímetros em relação aos valores reais (Soares et al., 2019). Já com relação ao cenário nacional, faltam estudos que incluam a análise de fatores climáticos em relação ao arco elétrico, como umidade e temperatura, que são condições que divergem bastante no Brasil devido à sua extensão continental.

Desse modo, o presente trabalho busca contribuir com o desenvolvimento de um laboratório para o ensaio de arcos elétricos para a medição de EI sob condições ambientais controladas em diferentes níveis de corrente elétrica. O laboratório está em fase de construção junto ao Instituto de Redes Inteligentes (INRI) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), viabilizado com recursos do Grupo CPFL Energia, através do programa de P&D ANEEL. Além disso, espera-se contribuir com os métodos existentes de medição de temperatura através de calorímetros, reduzindo o efeito da interferência eletromagnética e seu respectivo ruído na leitura, através do emprego de uma câmera termográfica ao invés de sensores do tipo termopar.

2. ANÁLISE DA NORMA IEEE 1584-2018

O guia IEEE Std 1584 é de grande relevância nos estudos de arcos elétricos, uma vez que é a maior referência normativa que provê uma modelagem matemática empiricamente comprovada para estimação da EI existente, de acordo com determinados níveis de tensão de circuito aberto (V_{oc}). A norma apresenta análises estatísticas de ensaios e ajustes de curvas de EI contemplando variáveis como tensão, corrente, tempo de arco, entre outras. Pode-se observar na Fig. 3 as configurações entre eletrodos analisadas na norma, que são as seguintes: Vertical em Ambiente Fechado (VCB); Vertical em Ambiente Fechado com Barreira (VCBB); Vertical em Ambiente Aberto (VOA); Horizontal em Ambiente Fechado (HCB); e Horizontal em Ambiente Aberto (HOA). A abrangência de aplicação da norma em sistemas de energia correspondem às seguintes (IEEE 1584, 2018):

- V_{oc} trifásica entre 208 V e 15 kV;
- Frequências de 50 Hz e 60 Hz;

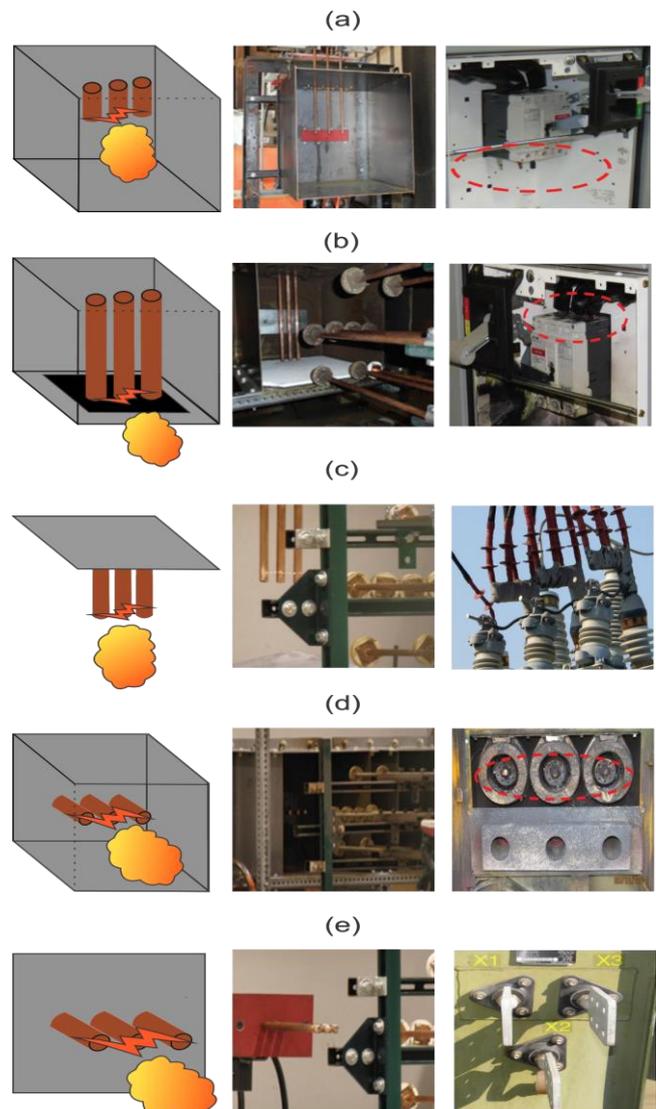


Fig. 3 Configurações de eletrodo utilizadas pela IEEE 1584 e seu correspondente real: (a) VCB, (b) VCBB, (c) VOA, (d) HCB, (e) HOA.

Fonte: IEEE 1584, 2018 e Zhang et al., 2020.

Corrente de falta franca trifásica (I_{bf}) de 500 A a 106 kA ($208 \text{ V} < V_{oc} < 600 \text{ V}$) e 200 a 65 kA ($601 \text{ V} < V_{oc} < 15 \text{ kV}$);

- Espaçamento entre eletrodos de 6,35 mm a 76,2 mm ($208 \text{ V} < V_{oc} < 600 \text{ V}$) e 19,05 mm a 254 mm ($601 \text{ V} < V_{oc} < 15 \text{ kV}$);
- Distâncias de trabalho entre 301 mm e 914 mm ($208 \text{ V} < V_{oc} < 600 \text{ V}$) e 57 mm e 1193 mm ($601 \text{ V} < V_{oc} < 15 \text{ kV}$);
- Sem limite de tempo para extinção do curto-circuito;
- Padronização de configurações de eletrodos: VCB, VCBB, HCB, VOA e HOA.

No que diz respeito à IEEE 1584, é importante que se definam os principais parâmetros de entrada e de saída para ensaios de arcos elétricos por ela definidos, que são os seguintes:

- V_{oc} : tensão nominal de ensaio (ou tensão de circuito aberto), que delimita o espaçamento entre eletrodos, onde estes sempre são adotados para evitar a ocorrência de um arco elétrico. Assim, os ensaios são baseadas em configurações reais de eletrodos e é necessário um condutor de sacrifício de pequena bitola para fechar o caminho de curto-circuito;
- I_{bf} : corresponde a uma condição de curto-circuito com impedância nula no ponto de falta, ou no qual a impedância nula é assumida, sendo esta a corrente observada na ignição do arco elétrico;
- *Tempo de duração do arco*: período de tempo entre o início do curto-circuito e a sua interrupção total. Uma vez que a EI é diretamente proporcional ao tempo de duração do arco, este é um parâmetro fundamental para o modelo matemático da norma IEEE 1584;
- *Gap*: espaçamento utilizado para evitar arcos elétricos em situações reais para determinada V_{oc} ;
- *Configuração dos eletrodos*: diversas configurações entre eletrodos são utilizadas pela norma IEEE 1584 para ensaios de arcos elétricos. Existem as configurações horizontais, verticais e suas respectivas variações, conforme a Fig. 3;
- *Distância de trabalho ou dos calorímetros*: distância entre o ponto de ocorrência do arco elétrico e a posição da face ou do torso do trabalhador;
- *Enclausuramento*: a presença deste e suas respectivas dimensões influenciam na metodologia de cálculo da IEEE 1584. Em ambiente aberto a EI é mais dispersa, e com gabinete mais concentrada.

O método convencional de medição da EI ocorre a partir do emprego de calorímetros, sendo que o fluxo de calor causado pelo arco elétrico é entregue principalmente por radiação (Schau e Novitskiy, 2009). A norma IEEE 1584 utilizou em seus testes 7 calorímetros, sendo 3 perpendiculares à ponta dos eletrodos e igualmente espaçados, 3 abaixo da ponta dos eletrodos e igualmente espaçados e um calorímetro acima da ponta dos eletrodos. Essa distribuição representa o tórax e a face de uma pessoa (Zhang, 2015). Na análise dos resultados, considerou-se apenas a maior medição da EI entre todos os calorímetros, e que a energia absorvida pelos calorímetros é igual ou superior a 90% da EI para sondas de cobre (IEEE 1584, 2018).

A Fig. 4 ilustra a posição dos calorímetros e algumas variáveis de entrada na representação de um *setup* para reprodução de um arco elétrico. Pode-se observar algumas das variáveis definidas até o momento, como a V_{oc} entre os eletrodos, a I_{bf} em direção arco elétrico, o gabinete no entorno dos eletrodos (quando aplicável), o espaçamento entre eletrodos e a distância dos calorímetros.

O fluxograma da Fig. 5 representa as variáveis de entrada e de saída para o cálculo da EI através norma IEEE 1584. A norma IEEE 1584 realiza a estimativa da distância segura de aproximação (AFB) e da EI de modo empírico, através de métodos de interpolação. Não é intuito deste trabalho aprofundar-

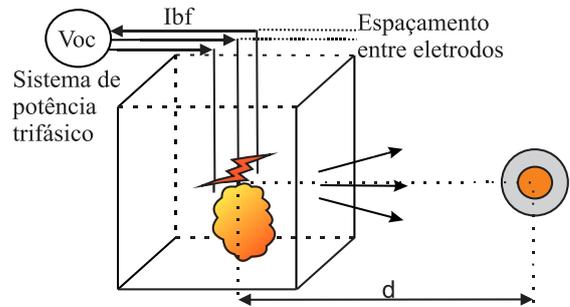


Fig. 4 Esquema e elementos básicos em ensaios de EI.
Fonte: Wilkins et al., 2004.

se na determinação da AFB, entretanto é importante que se ressalte que este é um importante parâmetro de saída.

A norma IEEE 1584 não fornece informações específicas sobre o cálculo da potência do arco e do fator de potência (FP), pois esses parâmetros não são utilizados nos modelos matemáticos da estimativa da EI e da AFB. Todavia, quando se trata de ensaios laboratoriais, é importante que sejam conhecidos esses valores para que se respeitem os limites técnicos dos equipamentos do laboratório e para que não ocorra a extinção do arco antes dos tempos estipulados na proteção devido a um FP elevado, por exemplo. Assim, pelas propriedades do arco em corrente alternada, o FP deve se manter entre 0,1 e 0,8, pois um FP próximo ao unitário significa que as ondas de tensão e corrente estão quase ou em fase (Das, 2021).

Fatores como temperatura ambiente, umidade, pressão atmosférica, nevoa salina, entre outros, possivelmente podem afetar as características do arco elétrico. Salienta-se que a norma IEEE 1584 não considera tais fatores. Além disso, aproximações e suposições no processo de coleta de dados também podem resultar na variação das características reais do arco em relação ao esperado (Davis et al., 2003). Um dos

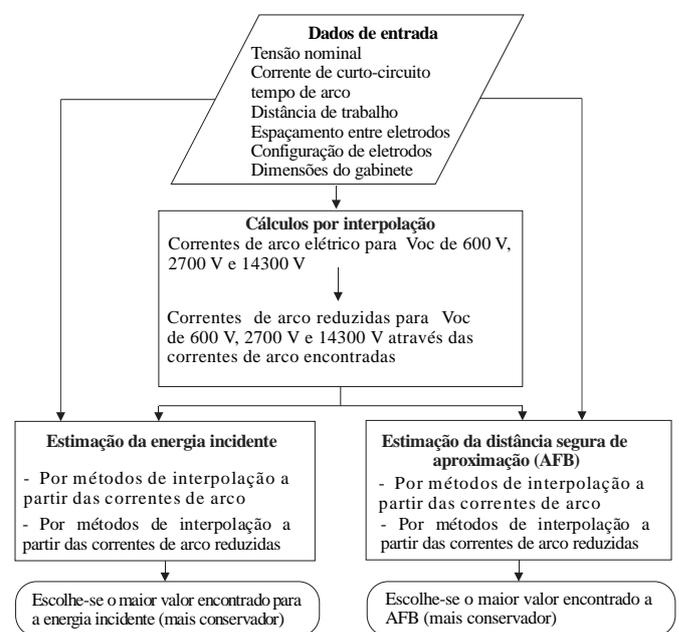


Fig. 5 Fluxograma da metodologia de cálculo da IEEE 1584.

parâmetros que sofrem alterações com a correlação entre umidade relativa e temperatura é o tempo de duração do arco, e nesse aspecto, há carência de informações experimentais na literatura (Gauce, 2020). Outro ponto de interesse, não abordado pela IEEE 1584, diz respeito aos níveis de V_{oc} para o cálculo de EI, que variam de 208 V até 15 kV. Acima de 15 kV, o método existente mais aceito para o cálculo da EI é o de Lee (1982), que é bastante conservador. O laboratório proposto não possuirá capacidade de realizar ensaios acima desse nível de tensão, porém é interessante que se destaque a existência dessa lacuna teórica e prática.

3. LABORATÓRIO PROPOSTO

3.1 Esquemático do Laboratório

O laboratório a ser implementado possui a estrutura representada pela Fig. 6. Ela é composta pela câmara de ensaios, sala de equipamentos e áreas de circulação. A câmara de ensaios é delimitada por uma parede de vidro e possui em seu interior os calorímetros de medição e os eletrodos, onde é feita a ignição do arco. A câmara termográfica é instalada atrás da parede de vidro para garantir segurança ao equipamento (de alto valor agregado). Para tanto, a porta de vidro deve ficar entreaberta para que câmara capte diretamente a oscilação de temperatura dos *slugs* de cobre dos calorímetros. Consta-se, também, a presença de umidificadores (na câmara de ensaios) e de condicionadores de ar ao longo da estrutura, que visam fornecer as condições ambientais requeridas. Na Fig. 6 também é apresentada a sala de máquinas do laboratório.

A função dos principais equipamentos na sala de máquinas contida na Fig. 6 são descritas a seguir:

Transformador de Potencial (TP) (Classe 15 kV): Empregado na medição da tensão de entrada;

Transformadores de Corrente (TCs): Empregados na medição das correntes de entrada de energia;

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

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

Reatores: Alteram a impedância da rede para controle da corrente de curto-circuito. Possuem 12 *taps* distintos;

Transformador de Potência: Equipamento responsável por rebaixar o nível de tensão da rede elétrica e proporcionar, desse modo, os elevados níveis de corrente requeridos nos ensaios. As principais especificações desse equipamento são apresentadas na Tabela 1;

TCs de Janela: Responsáveis pela medição das correntes de arco;

Disjuntor de BT: Controlado pelo Relé da BT, é responsável por interromper o arco elétrico no tempo programado em conjunto ao relé associado.

A sala de controle, responsável pelo monitoramento e controle do ensaio, fica localizada em estrutura externa ao laboratório da Fig. 6.

Inicialmente, o disparo é realizado diretamente pelo painel de comando, com o fechamento do disjuntor. Como implementação futura, será elaborado um circuito de disparo do arco, composto por três subcircuitos, a saber: (i) de medição das tensões dos eletrodos e detecção de cruzamento por zero; (ii) de sincronismo; e (iii) de módulo de disparo.

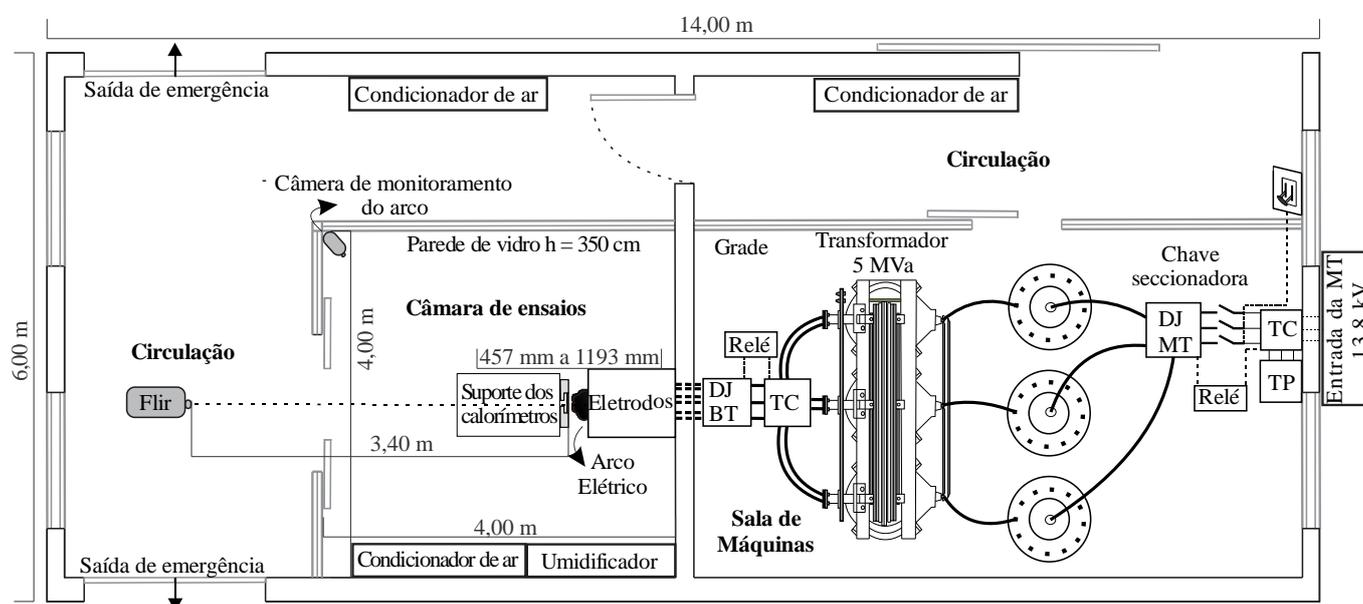


Fig. 6 Planta baixa do laboratório contendo os principais dispositivos elétricos e de medição.

Tabela 1. Principais especificações técnicas do transformador de potência.

Parâmetro	Especificação	
Potência Nominal	5.000 kVA	
Tensão Nominal Primária	13.800 V em 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

O emprego do transformador no laboratório deve respeitar as seguintes condições (consideradas em seu projeto):

- O equipamento é desenergizado e reenergizado a cada ensaio, respeitando-se o limite máximo de 10 ensaios ao dia;
- A corrente de curto-circuito no secundário ficará restrita entre 1 e 28,3 kA, sendo controlada através dos reatores instalados no primário do transformador;
- O curto-circuito deverá ser interrompido pelo disjuntor do secundário do transformador e não deve exceder 2 segundos.

3.2. Procedimentos de Ensaio

A norma IEEE 1584 abrange ensaios com tensões entre 208 V e 15 kV. No caso particular do laboratório proposto, as tensões ficarão restritas a 635 V e 1,1 kV, apesar de existir a previsão de *by-pass* do transformador de potência para ensaios em 13,8 kV. Os níveis reduzidos de tensão, comparativamente à norma, não inviabilizam, porém, que os espaçamentos entre eletrodos correspondam à V_{oc} de até 15 kV, uma vez que o laboratório contará com um circuito de disparo para ignição do arco.

Conforme comentado, o controle dos níveis de corrente de curto-circuito é realizado através de reatores conectados ao primário do transformador de potência. A Tabela 2 traz alguns níveis de correntes calculados a partir da impedância dos reatores e do transformador, desconsiderando a impedância de arco elétrico.

Percebe-se, consultando-se a Tabela 2, que a I_{bf} sem a ligação dos reatores, na configuração estrela, é exatamente a capacidade projetada para operação segura do laboratório: 28,3 kA. Não há restrições de corrente para a ligação estrela, apenas para a ligação delta. Destaca-se que para correntes acima de 10 kA (*tap* 5 do reator), é provável que os ensaios sejam realizados em horários alternativos, para diminuir os impactos na rede elétrica.

Tabela 2. Correntes de curto-circuito trifásicas francas disponíveis nos eletrodos.

Tap	Indutância (mH)	I_{bf} (kA)	
		$V_{oc} = 635$ V	$V_{oc} = 1,1$ kV
0	0,00	47,80*	28,30
1	2,85	36,92*	21,82
2	5,65	30,09*	17,78
3	8,56	25,22	14,90
4	12,08	21,08	12,46
5	16,69	17,34	10,25
6	21,78	14,50	8,57
7	27,34	12,29	7,27
8	40,13	9,11	5,38
9	56,57	6,83	4,04
10	97,96	4,19	2,48
11	145,36	2,90	1,72
12	254,97	1,70	1,00

* Não são ensaiadas, pois o regime de aplicação do transformador na BT é entre 1 kA e 28,3 kA.

Após definir a configuração dos reatores e ajustar os níveis de corrente de ensaio, deve ser determinado o *setup* de ensaio (VCB, VCBB, VOA, HCB ou HOA). Ressalta-se que, nas configurações enclausuradas, os resultados medidos para a EI são mais precisos. Todavia, os ensaios em ambiente aberto são mais relevantes ao laboratório, uma vez que pretende-se emular condições climáticas diversas em redes de MT no contexto brasileiro. O espaçamento entre os eletrodos é definido através da norma IEEE 1584 e das normas brasileiras vigentes, como a ABNT NBR 15688 (ABNT, 2012) para o espaçamento entre condutores em linhas aéreas (em maior parte na configuração horizontal para redes de MT), como os seguintes:

- IEEE 1584, de 601 V a 15 kV: de 19,05 mm a 254 mm;
- ABNT NBR 15688 até 15 kV: entre 140 a 170 mm, com condutor no topo do isolador e cobertos;
- ABNT NBR 15688 menores que 1 kV: 200 mm entre condutores nus do mesmo circuito;
- ABNT NBR 15688 de 1 kV até 15 kV: 500 mm para condutores nus do mesmo circuito.

O ajuste seguinte é a configuração de tempo dos disjuntores da MT e da BT, e de seus respectivos relés. O tempo de dissipação do arco elétrico é definido pelos tempos do conjunto relé e disjuntor da BT (entre 0,1 e 2 segundos), de acordo com suas respectivas curvas e demais variáveis mecânicas. Como o curto ocorre à jusante do disjuntor da BT, este atua e, em caso de falha, o relé e o disjuntor da MT atuam para desarmar todo o circuito. Destaca-se que a chave seccionadora está sempre aberta até o momento do ensaio.

Para gerar o arco elétrico, inicialmente, utiliza-se um fio condutor de 0,5 mm² como um “fio de sacrifício” conectado diretamente entre os eletrodos que promove a ignição do arco através do fechamento do disjuntor, como é feito no método tradicional. A longo prazo, pretende-se utilizar o fio condutor nas pontas dos eletrodos sem que este encoste no eletrodo seguinte, apenas para diminuir a rigidez dielétrica do ar entre eles, com cerca de 5 mm de espaçamento entre o final do condutor e a ponta do eletrodo seguinte. Para gerar o arco elétrico, são necessários instrumentos adicionais para causar a faísca de ignição, uma vez que as tensões disponíveis são entre 635 V e 1,1 kV. Então, a partir de um gerador de impulso (GI) dedicado, é aplicado o impulso de tensão necessário para a ignição do arco, e o tempo de arco passa a ser controlado pela abertura do disjuntor da BT (relé mais disjuntor).

3.3 Medição da Energia Incidente

Os *slugs* dos calorímetros para medição da EI possuem propriedades físicas conhecidas, envoltos por um material isolante térmico, e com sensores térmicos que medem a variação de temperatura no *slug* durante um arco elétrico. Assim, através da equação fundamental da calorimetria, determina-se a energia térmica por área, ou seja, a EI a uma determinada distância e sob condições de arco elétrico conhecidas (*I_b* e *V_c*).

A estrutura idealizada para o *setup* de medição de EI é mostrada na Fig. 6, onde observa-se os calorímetros no suporte em frente aos eletrodos sob ensaio e a câmera termográfica filmando o *slug* na parte posterior. Ainda, conforme recomendação do guia IEEE 1584, são utilizados 7 calorímetros conforme mostrado na Fig. 7. Para o valor final de EI do ensaio, utiliza-se o maior valor obtido dentre os 7 calorímetros, considerando assim o pior caso.

Os ajustes dos equipamentos de medição são realizados antes da ignição do arco elétrico. Inicialmente, posicionam-se os

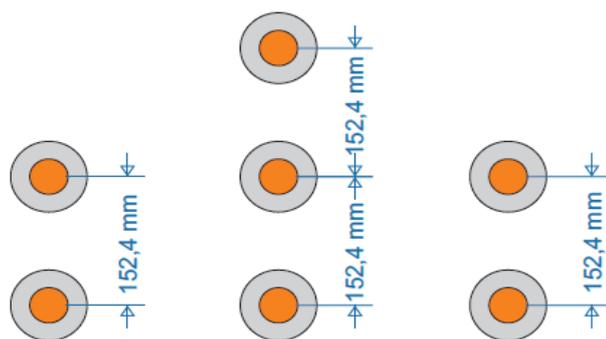


Fig. 7 Disposição espacial e frontal dos calorímetros.
Fonte: IEEE 1584 (2018).

calorímetros a uma distância desejada (distância de trabalho) e ajusta-se a posição da câmera termográfica para que a imagem obtida contemple os 7 sensores. Em seguida, habilita-se a câmera térmica e grava-se a temperatura dos calorímetros antes e durante o ensaio. Esses dados de temperatura obtidos pelo equipamento são salvos e exportados para o MATLAB® de forma que um programa desenvolvido no *software* realize os cálculos de maneira automatizada, a fim de evitar possíveis erros durante o processo e acelerar a obtenção dos resultados.

Os calorímetros projetados para o laboratório são mostrados na Fig. 8 e seguiram, de maneira geral, as recomendações das normas ABNT NBR IEC 61482-1 (2017), ASTM F1959/F1959M (2014) e ISO 9151 (2013), que orientam a sua construção. Para o *slug*, foi dimensionado um disco de cobre eletrolítico com 99,9% de pureza (material encontrado no mercado nacional), com diâmetro de 40 mm, espessura de 1,6 mm e massa estimada de 18g. Esse disco foi pintado com tinta preta fosca para aumentar a emissividade da superfície.

O material empregado como isolante térmico, que envolve o *slug*, é o Marinite A®, conforme recomendação da norma ABNT NBR IEC 61482 (2017). As dimensões utilizadas para o material isolante seguiram as especificações da norma ISO 9151 (2013). A utilização da câmera termográfica para o sensoriamento de temperatura ocasionou ajustes com relação aos padrões construtivos sugeridos pelas normas. Assim, a peça de Marinite possui um furo passante de 10 mm de diâmetro, para que a câmera térmica possa “enxergar” o cobre através do material isolante.

Uma alteração significativa com relação às normas é a utilização de uma câmera termográfica para o sensoriamento de temperatura ao invés de termopares, que sofrem influências de ruídos eletromagnéticos e necessitam de filtragens na captação da elevação da temperatura. Nesse sentido, propõe-se para o laboratório a utilização da câmera termográfica modelo FLIR A6753sc, para realizar o sensoriamento de temperatura. O equipamento possui taxas de amostragem que variam de 125 até 4175 *frames* por segundo, dependendo do tamanho de janela utilizada (*pixels*). Assim, além de uma resposta mais rápida que a do termopar, espera-se uma medição com imunidade ao ruído eletromagnético, já que a câmera termográfica obtém a temperatura através de sensores ópticos.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se detalhar alguns dos principais aspectos relacionados ao projeto de um laboratório para ensaio de arcos elétricos e medição da EI. Quando estiver em operação sob



Fig. 8 Calorímetros finalizados e posicionados.

condições nominais, espera-se que o laboratório alcance correntes de curto-circuito trifásico francas de até 28,3 kA.

Além disso, dois pontos em que se espera contribuir consistem na análise da EI em condições ambientais diversas, através de um ambiente controlado, e na medição de temperatura dos *slugs* de cobre e forma distinta das recomendações normativas. O primeiro ponto pode contribuir significativamente no cálculo da EI no que se refere ao contexto brasileiro, já que o Brasil apresenta uma grande variação climática ao longo do território. Já o segundo ponto pode trazer uma concepção funcional nova para medição da EI, em que se elimina o efeito de ruídos eletromagnéticos na medição de temperatura, ponto de constante preocupação na medição da EI.

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 também 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. Esse trabalho também foi parcialmente financiado pela Fundação de Apoio à Tecnologia e Ciência (FATEC) e pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída de Energia Elétrica (INCT-GD).

REFERÊNCIAS

- ABNT. (2012). *NBR 15688 - Redes de distribuição aérea de energia elétrica com condutores nus*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 158 p. São Paulo, Brasil.
- ABRACOPEL. (2021). *Anuário Estatístico Brasileiro dos Acidentes de Origem Elétrica-2021*. Associação Brasileira de Conscientização para os Perigos da Eletricidade. 88 p. Salto, Brasil.
- ASTM. (2014). Standard Test Method for Determining the Arc Rating of Materials for Clothing. In *American Society for Testing and Materials* v. 1, p. 1-14.
- Bottaro, M., & 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*, v. 123, p. 275–284.
- Cooper Bussmann Inc. (2005). Electrical safety. In *Eaton Corporation*, 11p. Missouri, EUA.
- Das, J. C. (2021). *Arc Flash Hazard Analysis and Mitigation*. In IEEE Press Editorial Board. 625 p. New Jersey, EUA.
- Davis, C., Pierre, C. S., David Castor, Luo, R., and Shrestha, S. (2003). *Practical Solution Guide to Arc Flash Hazards*. In EasyPower, LLC. 150 p. Tualatin, EUA.
- COGE. (2014). *Relatório de Estatísticas de Acidentes no Setor Elétrico Brasileiro*. In Fundação Comitê de Gestão Empresarial. Rio de Janeiro, Brasil.
- Gaunce, A. (2020). *Expanded Predictive Equation for DC arc flash incident energy in 125 V battery systems*. Tese de Doutorado, 80 p., University of Kentucky, EUA.
- Hughes, B., Skendzic, V., Das, D., et al. (2011). High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System High-Current Qualification Testing of an Arc-Flash Detection System. *Annual Western Protective Relay Conference*, v. 38. 10 p.
- IEEE 1584. (2018). *IEEE Guide for Performing Arc Flash Hazard Calculations*. In IEEE Industry Application Society, 141 p.
- Lasica, A., Sul, P., Matusiak, G., & Owsinski, M. (2017). Laboratory tests of face shields protecting against the thermal effects of electric arc. *2017 Progress in Applied Electrical Engineering*, p. 0–4.
- Lee, R. H. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-18(3), 246–251.
- NFPA. (2021). *Standard for Electrical Safety in the Workplace (NFPA 70E)*. In National Fire Protection Association. ed. 2021, 120 p. Quincy, EUA.
- Queiroz, A. R. S. (2011). *Utilização De Relés Digitais Para Mitigação dos Riscos Envolvendo Arco Elétrico*. Dissertação de Mestrado, 130 p., Universidade de São Paulo, Brasil.
- Resende, F. B. (2016). *Proteção Elétrica Em Subestações: Uma Abordagem Sobre Energia Incidente*. Dissertação de Mestrado, 102 p., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.
- Soares, F. C. S., Bottaro, M., & Santos, J. C. (2019). Desenvolvimento de calorímetro baseado em sensor óptico para determinação do ATPV. In *VIII IEEE Electrical Safety Workshop*.
- Schau, H., & Novitskiy, A. (2009). Calorimetric Measurement of Arc Flash Incident Energy. In *International Scientific Colloquium*, v. 54, p. 7.
- Wilkins, R., Allison, M., & Lang, M. (2004). Improved method for arc flash hazard analysis. In *Conference Record of Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, p. 55–62.
- Zhang, Z. (2015). *Arc Flash Hazard Analysis*. Tese de Doutorado, 182p. University of Texas, EUA.
- Zhang, Z., Wang, P., Rau, S. H. and Lee, W. J. (2020). Effect of electrode geometry on arc flash protection boundary. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 56, p. 57–64.