

Comparative Study of Incident Energy Calculation Methodologies using IEEE-1584 2018, IEEE-1584 2002 and ARCPRO: Real Case Study

Henrique Fantoni Primo*. João Inácio Coelho**
Rafael Tenágua Mariani***

*Electrical Studies Department Manager – SM&A, Master in Electrical Engineering - UFMG
Brasil (Tel: 055 31 99791-1821; e-mail: henrique.fantoni@sma-eng.com.br).

** Electrical Studies Department Engineer – SM&A (e-mail:
joao.coelho@sma-eng.com.br)

*** Electrical Studies Department Engineer – SM&A, (e-mail: rafael.mariani@sma-eng.com.br)

Abstract: This paper aims to analyze and calculate incident energy levels by presenting the various calculation methodologies of a 4.16 kV switchgear. Following the update of the IEEE-1584 standard in 2018, there were significant changes in the information required to calculate incident energy. Thus, the intention is to present the changes caused by this new methodology compared to the values previously presented in IEEE 1584-2002 and the ARCPRO software, commonly used for voltage levels above 15 kV.

Resumo: Este artigo pretende comparar os valores de energia incidente calculados através da nova norma IEEE-1584 (2018) com a metodologia de cálculo anterior IEEE-1584 (2002) e o software ARCPRO, uma vez que a mesma apresenta mudanças significativas nas análises necessárias para os cálculos de energia incidente. Este estudo de caso utilizou o compartimento de entrada de um painel de 4,16 kV, e foi avaliado o valor da energia incidente para uma variação de curto-circuito de 5 kA a 50 kA. Observou-se que é extremamente importante a avaliação adequada da posição dos eletrodos uma vez que os valores de energia incidente variaram muito dentro de um mesmo compartimento.

Keywords: arc flash; arc-flash calculation, IEEE-1584 (2018); IEEE-1584 (2002); Arcpro.

Palavras-chaves: Energia Incidente; IEEE-1584 (2018); IEEE-1584 (2002); Arcpro.

1. INTRODUÇÃO

O Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil (MTE) normalizou, com a portaria 598 de 7 de dezembro de 2004 que oficializa a NR-10, práticas que visam garantir a segurança das pessoas que trabalham em ambiente com presença de eletricidade.

Um dos tópicos desta NR trata do uso obrigatório de vestimentas anti-chamas para trabalhos próximos a painéis elétricos uma vez que acidentes com arcos elétricos são uma das principais causas de acidentes com eletricidade. Dessa forma, a correta especificação de uma vestimenta é essencial para a segurança dos operadores e para isso, um estudo de energia incidente deve ser elaborado, definindo então o nível das vestimentas de proteção para cada caso.

A metodologia de cálculo de energia incidente mais utilizada na indústria atualmente é a da norma IEEE1584. A mesma passou por uma atualização em 2018 em que novas equações foram elaboradas. Este artigo pretende desenvolver um comparativo entre as duas versões da norma, apresentando a principal alteração da mesma que é inclusão da análise da orientação dos eletrodos. Além disso, estes valores são comparados aos resultados utilizando a metodologia do

ArcPro, software desenvolvido pela Kinectrics, que realiza o cálculo de energia incidente a partir de equações de transferência de calor. Este software também é muito utilizado na indústria, principalmente em altas tensões.

A partir de uma análise gráfica, é possível perceber que os resultados de energia incidente considerando a metodologia da norma em sua versão de 2002 são muito próximos aos da nova versão da norma considerando a orientação dos eletrodos como VCB e VCBB. Para a configuração HCB, a energia incidente é mais elevada.

2. METODOLOGIAS DE CÁLCULO DE ENERGIA INCIDENTE

2.1 IEEE-1584 2002

A metodologia do IEEE 1584-2002 foi desenvolvida empiricamente através dos resultados obtidos em testes laboratoriais. As equações são utilizadas para estimar a potencial energia incidente despreendida durante a ocorrência de um arco elétrico bem como a distância de segurança.

Para o cálculo da energia incidente, é necessário a coleta das seguintes informações:

- Tensão nominal dos painéis;
- Corrente de curto-circuito trifásica em cada um dos painéis;
- Tipo de instalação: barramento exposto ou painel;
- Tipo de equipamento: conjunto de manobra, CCM, cabos;
- Gap (distância entre os condutores no local do arco elétrico);
- Tipo de aterramento do neutro dos transformadores;
- Tempos de duração do arco;
- Tempos de abertura dos disjuntores.

Para o cálculo da energia incidente deve-se utilizar a Equação 1:

$$E = 4.184 * C_f * E_n * \left(\frac{t}{0.2}\right) * \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \quad (1)$$

Sendo:

- E = energia incidente (J/cm²) para distância de trabalho e tempo de atuação da proteção especificados;
- C_f = fator de cálculo igual a 1 para tensões acima de 1,0 kV, ou 1,5 para tensões abaixo de 1 kV;
- E_n = energia incidente normalizada (J/cm²) calculada anteriormente;
- D = distância (mm) do ponto de arco elétrico até o operador, conforme Tabela 3 da IEEE 1584 (2002);
- x = expoente de distância da Tabela 4 da IEEE 1584 (2002);
- t = duração do arco, ou seja, soma dos tempos de atuação da proteção e de abertura do disjuntor.

Para o cálculo da distância de segurança deve-se utilizar a Equação 2:

$$D_B = [4.184 * C_f * E_n * \left(\frac{t}{0.2}\right) * \left(\frac{610^x}{E_B}\right)]^{\frac{1}{x}} \quad (2)$$

- D_B = distância segura de aproximação sem o uso de EPI, na qual E_B = 5,0 J/cm² (mm);
- C_f = fator de cálculo;
- E_n = energia incidente normalizada (J/cm²);
- E_B = energia incidente (J/cm²) na distância limite, definida como 5,0 J/cm² para a pele desprotegida;
- t = duração total do arco (s);
- x = expoente de distância da Tabela 4 da IEEE 1584 (2002).

2.2 IEEE-1584 2018

O método de cálculo de energia incidente da norma IEEE 1584-2018 também é empírico e foi criado a partir dos resultados obtidos em testes realizados em painéis elétricos. No entanto, os testes que levaram o desenvolvimento das equações apresentadas na IEEE 1584-2002 não levaram em consideração a orientação dos eletrodos nem a forma de propagação do plasma do arco elétrico, visto que anteriormente todos os experimentos foram realizados apenas com os eletrodos na vertical.

Testes mais recentes mostram que quando os eletrodos possuem orientações diferentes, a energia incidente tende a se propagar de forma diferente, o que afeta diretamente os valores finais.

a) Eletrodos na vertical

De acordo com Wilkins, Allison e Lang (2005), quando os eletrodos são orientados na vertical, o arco elétrico ao se formar, tende a ir na direção contrária dos eletrodos devido a forças eletromagnéticas. Uma vez que os eletrodos estão na vertical, a tendência é que o arco se “choque” contra o fundo do painel, fazendo com que a dispersão de calor ocorra primeiramente dentro do cubículo e que só após alguns milissegundos, o calor seja sentido do lado de fora. Também por conta do sentido de movimentação do arco elétrico, o calor é mais intenso na parte inferior do painel.

b) Eletrodos na horizontal

De acordo com Jim Phillips (2019), assim como no teste com eletrodos na vertical, o arco elétrico, ao se formar, tende a ir na direção contrária dos eletrodos devido a forças eletromagnéticas. No entanto, nesse caso, a direção contrária é a parte de fora do painel.

Dessa forma, o calor é sentido mais fortemente levando a energia incidente em painéis com esse tipo de orientação a ser cerca de 3.5 vezes maior do que com os eletrodos na vertical.

Segundo a IEEE 1584 (2018), existem 5 diferentes tipos de configuração dos eletrodos, sendo eles:

- VCB (Vertical electrodes in a cubic box): Condutores posicionados verticalmente em um painel fechado
- VCBB (Vertical electrodes in a cubic box terminated in a barrier): Condutores posicionados verticalmente em um painel fechado com terminação em barreira de material isolante.
- HCB (Horizontal electrodes in a cubic box): Condutores posicionados horizontalmente em um painel fechado
- VOA (Vertical electrodes in open air): Condutores posicionados verticalmente ao ar livre
- HOA (Horizontal electrodes in open air): Condutores posicionados horizontalmente ao ar livre

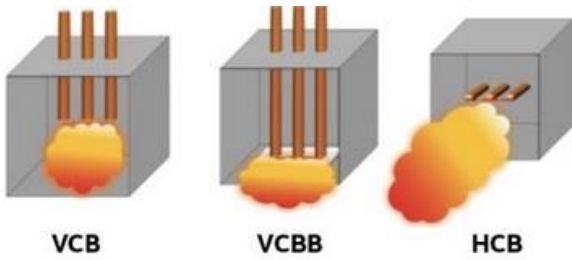


Fig. 1 Configuração dos Eletrodos (IEEE-1584 2018)

Para o cálculo da energia incidente, calcula-se E_1 , E_2 e E_3 referente a energia incidente interpolada, conforme as Equações 3, 4 e 5:

$$E_1 = \frac{E_{2700} - E_{600}}{2.1} * (V_{oc} - 2.7) + E_{2700} \quad (3)$$

$$E_2 = \frac{E_{14300} - E_{2700}}{11.6} * (V_{oc} - 14.3) + E_{14300} \quad (4)$$

$$E_3 = \frac{E_1 * (2.7 - V_{oc})}{2.1} + \frac{E_2 * (V_{oc} - 0.6)}{2.1} \quad (5)$$

Sendo:

- E_1 = Primeiro termo da interpolação entre 600 V e 2700 V (J/cm²)
- E_2 = Segundo termo da interpolação V_{oc} é maior que 2700 V (J/cm²)
- E_3 = Terceiro termo da interpolação V_{oc} é menor que 2700 V (J/cm²)

Uma vez definidas E_1 , E_2 e E_3 , a energia incidente total “E” será definida conforme a tensão do painel analisado.

Para tensões entre 600 V e 2700 V, utiliza-se Equação 6:

$$E = E_3 \quad (6)$$

Para tensões maiores que 2700 V, utiliza-se Equação 7:

$$E = E_2 \quad (7)$$

Para tensões menores que 600 V, utiliza-se Equação 8:

$$E = E_{\leq 600} \quad (8)$$

Para o cálculo da distância de segurança (Arc Flash Boundary ou AFB) deve-se utilizar as Equações 9, 10 e 11:

$$AFB_1 = \frac{AFB_{2700} - AFB_{600}}{2.1} * (V_{oc} - 2.7) + AFB_{2700} \quad (9)$$

$$AFB_2 = \frac{AFB_{14300} - AFB_{2700}}{11.6} * (V_{oc} - 14.3) + AFB_{14300} \quad (10)$$

$$AFB_3 = \frac{AFB_1 * (2.7 - V_{oc})}{2.1} + \frac{AFB_2 * (V_{oc} - 0.6)}{2.1} \quad (11)$$

- AFB_1 = primeira interpolação para equipamentos entre 600 V e 2700 V (mm);
- AFB_2 = segunda interpolação para equipamentos maiores que 2700 V (mm);
- AFB_3 = terceira interpolação para equipamentos menores que 2700 V (mm);
- $AFB_{V_{oc}}$ = distância segura de aproximação, na qual a energia incidente é de 5,0 J/cm² ou 1,2 cal/cm²;
- V_{oc} = tensão nominal do equipamento (kV);

Para equipamentos com tensões entre 600 V e 2700 V, utiliza-se a Equação 11. Para tensões superiores a 2700 V, utiliza-se a Equação 10.

2.3 Kinectrics' ARCPRO:

O programa ARCPRO foi projetado para calcular os parâmetros térmicos associados com um arco de energia elétrica alinhado verticalmente no ar. O modelo foi feito de forma a ajudar na seleção de roupas de proteção para trabalhadores expostos a arcos elétricos.

O software modela o arco de alta potência levando em consideração variáveis complexas como propriedades de gás, materiais de eletrodos de arco, radiação térmica e dissipação de energia convectiva.

Apesar de não declarar todas as equações utilizadas para os cálculos de energia incidente, o ARCPRO informa as seguintes equações para os cálculos:

- a) Corrente de curto-circuito limitada por arco:

$$I(t) = E(t) * \int_0^{\infty} \sigma * 2 * \pi * r * dr \quad (12)$$

- $I(t)$ = corrente limitada por arco (A);
- E = Campo elétrico gerado pela coluna de arco (V/m);
- σ = Condutividade elétrica do gás (mho/m);
- r = distância radial do arco elétrico (m).

- b) Tensão do arco elétrico

$$V_{arc}(t) = E(t) * L * V_a + V_c \quad (13)$$

- V_{arc} = Tensão de arco elétrico em relação ao tempo;
- E = Campo elétrico gerado pela coluna de arco (V/m);
- L = Comprimento do arco (m);
- V_a = Tensão residual no anodo do eletrodo (V);
- V_c = Tensão residual no catodo do eletrodo (V).

- c) Potência total do arco elétrico

$$P_T(t) = V_{arc} * I(t) \quad (14)$$

- $P_T(t)$ = Potência do arco elétrico;
 - V_{arc} = Tensão de arco elétrico em relação ao tempo;
 - $I(t)$ = corrente limitada por arco (A).
- d) Calor convectivo total

$$H_C = H_T - H_R \quad (15)$$

- H_C = Calor convectivo total;
- H_T = Calor total;
- H_R = Calor irradiado.

3. ESTUDO DE CASO

De forma a comparar os valores de energia incidente calculados conforme equações da IEEE-1584-2002, ARCPRO e as diversas configurações apresentadas na nova norma IEEE 1584-2018, analisou-se o compartimento de entrada de um painel de 4,16 kV apresentado na Figura 2.



Fig. 2 Painel de 4,16 kV utilizado

Levantou-se as seguintes informações a respeito do compartimento de entrada deste painel:

- Tensão: 4,16 kV
- Gap (mm): 102
- Altura (mm): 750
- Largura (mm): 1000
- Profundidade (mm): 679
- Distância de Trabalho (mm): 914.4
- Tempo da proteção (s): 0.28
- Aterramento: Solidamente aterrado
- Material do barramento: Cobre

Conforme a norma IEEE 1584 (2018), a definição da configuração dos eletrodos é extremamente importante para os cálculos de energia incidente. Analisaram-se três possibilidades de arco elétrico no compartimento escolhido, apresentado na Figura 3:

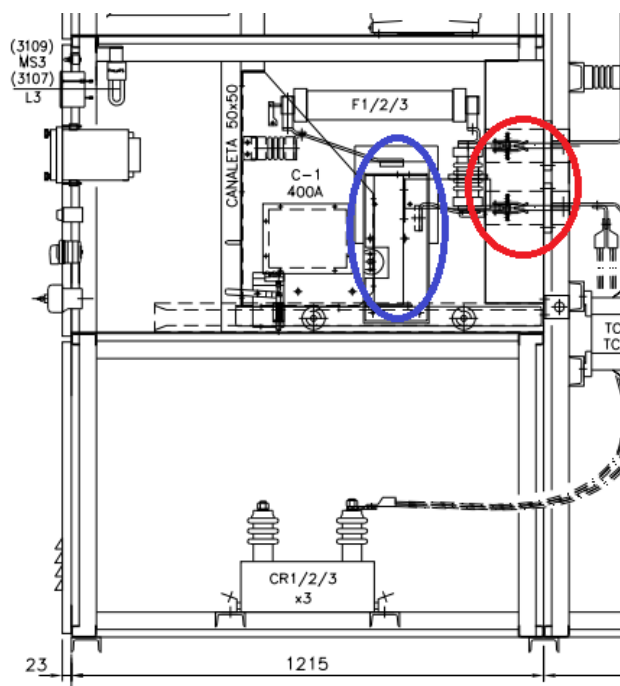


Fig. 3 Desenho eletromecânico do painel

- Disjuntor mal inserido ou com problemas durante a inserção, arco elétrico no ponto de conexão entre disjuntor e barramento (círculo vermelho);
- Compartimento de entrada sem a presença do disjuntor (círculo vermelho);
- Falha interna do disjuntor devido falha mecânica e/ou elétrica, arco elétrico dentro do disjuntor (círculo azul).

Para um arco elétrico na condição “a”, apesar da configuração HCB (plasma do arco elétrico no sentido horizontal) parecer mais adequada para a modelagem de uma situação real, o disjuntor em questão irá funcionar como uma barreira isolante entre o arco e o operador. Neste caso, a configuração VCBB é a mais adequada para o cálculo.

Para um arco elétrico na condição “b”, a configuração HCB é a mais adequada para o modelo matemático, uma vez que o ponto de ocorrência do arco elétrico está direcionado horizontalmente, projetando o plasma do arco para fora do painel, em cima do operador.

Para um arco elétrico interno ao disjuntor, ou seja, na câmara de extinção de arco, quando os contatos não conseguem interromper a falta, o plasma do arco elétrico tenderá a ir para cima. Desta forma, a configuração VCB melhor representa este fenômeno.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos dados de entrada levantados, calculou-se a energia incidente e a distância de segurança do painel estudado para as condições a, b e c, variando-se os valores de curto-circuito entre 5 e 50kA.

Os resultados desta simulação são apresentados na Tabela 1.

Ibf (kA)	VCB		VCBB		HCB	
	Energia Incidente (cal/cm ²)	AFB (mm)	Energia Incidente (cal/cm ²)	AFB (mm)	Energia Incidente (cal/cm ²)	AFB (mm)
5	1.53	1069.3	1.92	1199.4	2.86	1518.0
10	2.99	1635.1	4.03	1840.1	6.04	2348.2
15	4.4	2093.6	6.22	2362.3	9.33	3027.3
20	5.8	2494.8	8.45	2820.9	12.68	3621.1
25	7.18	2859.2	10.73	3237.3	16.05	4155.7
30	8.55	3196.8	13.03	3622.1	19.41	4644.0
35	9.92	3513.0	15.35	3981.0	22.74	5093.4
40	11.26	3810.5	17.66	4317.5	26	5508.1
45	12.59	4090.7	19.96	4634.0	29.17	5890.9
50	13.89	4354.4	22.24	4932.6	32.22	6243.3

Tabela 1. Configuração VCB, VCBB e HCB – IEEE-1584 (2018)

De forma a se obter informações para uma comparação com outros métodos, calculou-se também a energia incidente para este painel utilizando as metodologias da IEEE-1584 (2002) e do software ARCPRO, conforme apresentado na Tabela 2.

Ibf (kA)	IEEE-1584 (2002)		ARCPRO	
	Energia Incidente (cal/cm ²)	AFB (mm)	Energia Incidente (cal/cm ²)	AFB (mm)
5	1.47	1129	1.49	1018
10	3.08	2406	3.57	1578
15	4.74	3747	6.1	2063
20	6.43	5130	9.05	2513
25	8.15	6545	12.46	2949
30	9.89	7987	16.25	3368
35	11.65	9452	20.54	3787
40	13.43	10936	25.23	4196
45	15.22	12437	30.42	4608
50	17.02	13954	36	5011

Tabela 2. IEEE-1584 (2002) e Arcpro

Observa-se que após a revisão da norma IEEE-1584 (2018), e a introdução das configurações dos eletrodos, tornou-se mais difícil estimar valores de energia incidente para adequação de equipamentos de proteção individual (EPIs), uma vez que, nas simulações realizadas, para um curto-circuito de 25kA, por exemplo, os valores de energia incidente variaram entre 7.18 cal/cm² e 16.05 cal/cm².

A partir dos resultados obtidos nas simulações do estudo de caso considerando as diferentes metodologias de cálculo, foi possível elaborar um gráfico comparativo, de forma a se obter uma melhor visualização do comportamento dos resultados de energia incidente ao se variar a corrente de curto-circuito do sistema. Este gráfico é apresentado na Figura 4. De forma similar, elaborou-se um gráfico da variação da distância de segurança em função da corrente de curto-circuito do sistema, que é apresentado na Figura 5.

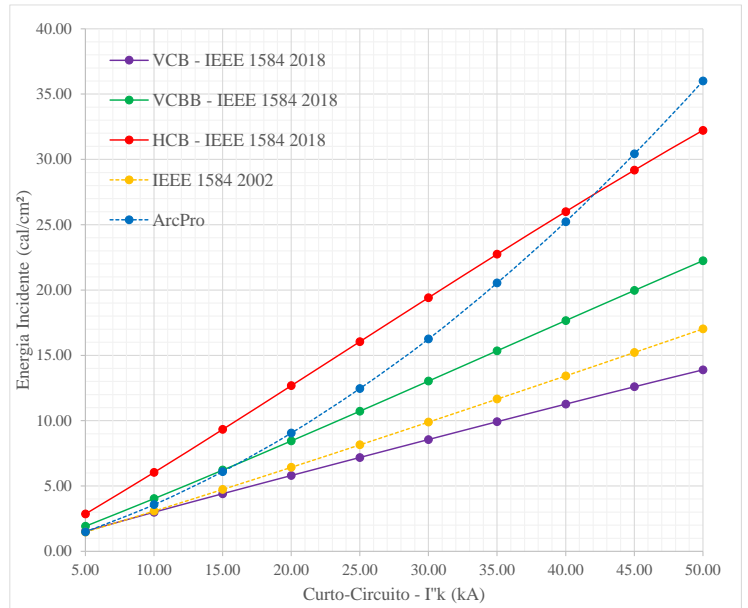


Fig. 4 Gráfico Energia Incidente (cal/cm²) vs Curto-Circuito (kA)

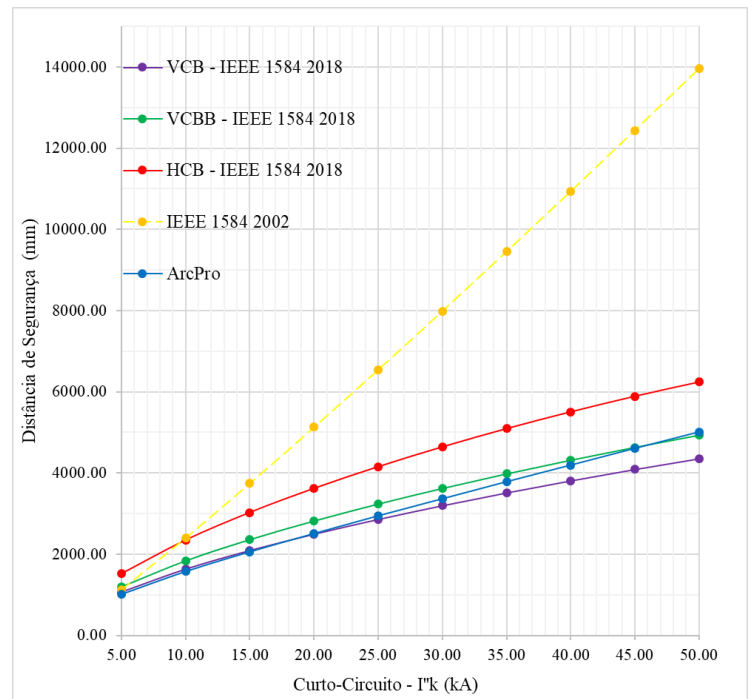


Fig. 5 Gráfico Distância de Segurança (mm) vs Curto-Circuito (kA)

Com base nos gráficos das Figuras 4 e 5, verifica-se que os resultados de energia incidente da norma IEEE 1584 (2018) considerando as orientações VCB e VCBB são muito similares aos da IEEE 1584 (2002). Para a configuração HCB da norma IEEE 1584 (2018), os resultados foram significativamente maiores. Já a energia incidente calculada pelo software ARCPRO apresentou uma grande variação nos resultados em função do nível de curto-circuito. Para correntes de curto-circuito mais baixas, a energia incidente calculada foi semelhante às apresentadas para as configurações VCB e VCBB. No entanto, para correntes de curto-circuito mais elevadas, o método chegou a apresentar

resultados maiores que a configuração HCB da IEEE 1584 (2018).

4. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que a orientação dos eletrodos tem grande relevância nos cálculos de energia incidente. Uma vez que as equações da norma IEEE 1584 na sua versão de 2002 foram elaboradas a partir de testes em laboratório com os eletrodos apenas na vertical, seus resultados são muito próximos aos da versão de 2018 considerando-se as orientações VCB e VCBB. Para a orientação HCB, os valores de energia incidente são mais elevados.

No caso do ARCPRO, seu modelo teórico foi desenvolvido a partir de simulações considerando os eletrodos também na vertical. Dessa forma, os valores de energia incidente calculados por este método são muito similares aos da IEEE 1584 quando se considera as orientações VCB e VCBB, para correntes de curto-circuito de até cerca de 20kA. No entanto, para correntes de curto-circuito mais elevadas, este método tende a apresentar valores muito conservativos, chegando a apresentar valores finais superiores aos da IEEE 1584 considerando a orientação HCB. Por este motivo, esta norma é mais utilizada em altas tensões.

Para a distância de segurança, nota-se que os valores calculados a partir das equações da IEEE 1584 na sua versão de 2002 são extremamente elevados quando comparados com as outras configurações. Uma vez que estes valores eram muito conservativos em comparação com outras metodologias de cálculo como, por exemplo, o ArcPro. A IEEE 1584 trouxe em sua revisão de 2018, novas equações que resultam em valores bem inferiores aos da sua versão anterior.

Ao se considerar as orientações VCB e VCBB, os resultados são muito próximos aos do ArcPro. Considerando-se a orientação HCB, as distâncias são um pouco maiores, como já se era esperado uma vez que a energia incidente nesta configuração tende a ser mais elevada.

As simulações também revelaram que mesmo não sendo utilizados para curto-circuito trifásico abaixo de 15 kV, o software ARCPRO apresentou valores satisfatórios para estimar a suportabilidade de EPIs.

REFERÊNCIAS

- Ammerman, F., Ravel, Gammon, Thammy, Comparative Study of Arc Modeling and Arc Flash Incident Energy Exposures.
- IEEE 1584. Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations. 2002.
- IEEE 1584. Institute of Electrical and Electronic Engineers. IEEE Guide for performing arc-flash hazard calculations. 2018.
- Wilkins, R., Allison, M., Lang M. (2005). Effect Of Electrode Orientation in Arc Flash Testing. 2005