

Avaliação de energia incidente

Por Luiz Carlos Catelani Junior*

Capítulo VIII

Modelos para corrente contínua

Ao contrário do que muitos pensam, os arcos elétricos em corrente contínua ocorrem e têm seus valores bem expressivos. Não podemos confundir quando é feita a análise para choque elétrico onde a corrente contínua tem valores de tensão contato limite bem superior ao da corrente alternada.

TABELA 1 – TENSÕES CONTATOS LIMITES DE ACORDO COM A NBR 5410

Natureza da corrente	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Alternada, 15 Hz – 1 000 Hz	50	25	12
Contínua sem ondulação ¹⁾	120	60	30

Para o corpo na situação 1, corpo seco, o limite da tensão de contato para corrente alternada é de 50 V contra 120 V da corrente contínua.

É notável que o limiar de suportabilidade do corpo humano é maior para corrente contínua do que para corrente alternada. Sendo assim, a avaliação para choque elétrico se mostra mais favorável para corrente contínua.

Isso se propaga não só para condição 1, corpo seco, como nas condições 2 e 3, corpo molhado e submerso respectivamente.

Sendo assim a avaliação para arco elétrico deve ser feita mesmo nos casos em que a tensão contato limite não é atingida.

Um dos primeiros anos em que foi abordado o cálculo de energia incidente para corrente contínua foi na revisão de 2012. Toda a formulação para o cálculo do arco elétrico em corrente contínua estava nos trabalhos de:

- Arc Flash Calculations for Exposures to DC Systems,” Doan, D.R., IEEE IAS Electrical Safety Workshop, 2007, Record of Conference Papers, March 2007.

A formulação para este tipo de arco elétrico remete a

ponderações similares ao da teoria de Ralph Lee para corrente alternada. As condições serão as mesmas, visando o cálculo da máxima energia incidente.

O circuito equivalente em corrente contínua pode ser representado conforme o esquema da Figura 1.

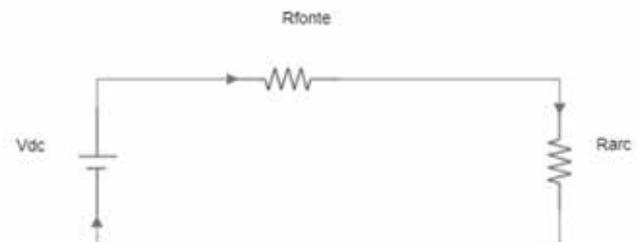


Figura 1 – Representação do esquema de arco elétrico em corrente contínua.

A transferência de potência será máxima quando o valor da resistência da fonte for igual a resistência do arco elétrico.

Com isso, para o caso de um curto-circuito franco ($R_{arc} = 0$):

$$I_{CURTO} = \frac{V_{DC}}{R_{fonte}}$$

Já para um arco elétrico:

$$I_{ARC} = \frac{V_{DC}}{R_{fonte} + R_{ARC}}$$

Assumindo que a resistência do arco elétrico é igual a resistência da fonte:

$$I_{ARC} = \frac{V_{DC}}{2 \times R_{fonte}}$$

$$I_{ARC} = \frac{I_{CURTO}}{2}$$

Com as condições impostas acima o valor da energia incidente:

$$E_i = 0,01 \times V_{DC} \times I_{ARC} \times \frac{t_{ARC}}{D^2}$$

Onde:

I_{CURTO} → Corrente de curto-circuito [A]

I_{ARC} → Corrente de arco elétrico [A]

V_{DC} → Tensão do circuito [V]

t_{ARC} → tempo de duração do arco elétrico [s]

D → distância do operador ao arco elétrico [cm]

E_i → Energia incidente [cal/cm²]

As condições de contorno para a formulação de “Doan” para arcos elétricos em corrente contínua são:

- Tensão máxima do circuito até 1000 V
- Arcos na condição do tipo aberto ou “open”

Para caso de arcos elétricos em painéis ou em equipamento esse valor deve ser multiplicado por 3.

Existe também duas formas de calcular a corrente de curto circuito em corrente contínua:

- Usando a resistência equivalente do circuito

$$I_{CC} = \frac{V_{DC}}{R_{interna} + R_{circuito}}$$

I_{CC} → Corrente de curto-circuito [A]

V_{DC} → Tensão do circuito [V]

$R_{interna}$ → Resistência interna da fonte de corrente contínua ou bateria [Ω]

$R_{circuito}$ → Resistência da fiação do circuito em corrente contínua [Ω]

- Método aproximado em função da capacidade de carga

Uma alternativa é estimar a corrente de curto – circuito da bateria como 10 vezes a capacidade de carga da bateria em 1 minuto. Vamos trabalhar um exemplo para entender essa aproximação.

Circuito em corrente contínua com:

$V_{DC} = 120 \text{ Vcc}$

$I_n = 60 \text{ A}$

$t = 2 \text{ s}$

$D = 45 \text{ cm}$

Formado por 10 bancos de bateria em série com as seguintes características:

Tensão nominal: 12 V

Capacidade da bateria: 60 Ah @10 horas

Resistência interna: 6 m Ω

Corrente máxima de descarga: 600 A @5segundos

Cálculo da corrente de curto-circuito desprezando a resistência de cabos:

$$I_{CC} = \frac{V_{DC}}{R_{interna} + R_{circuito}}$$

$$I_{CC} = \frac{120}{10 \times 6 \cdot 10^{-3}}$$

Como os bancos estão em série, a resistência equivalente é 10 vezes o valor da resistência de um banco.

$I_{CC} = 2 \text{ kA}$

Estimativa através de 10 vezes a capacidade da bateria em 1 minuto.

Com a curva de descarga da bateria obtida do catálogo do equipamento:

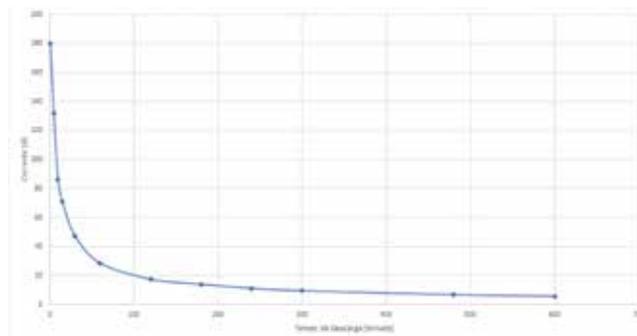


Figura 2 – Curva de descarga da bateria 12v – 60a.H.

Para 1 minuto valor aproxima de 180 A

Corrente de curto-circuito aproximada de 1800 A (10 vezes a capacidade de corrente a 1 minuto).

Neste caso, temos os dados da bateria, mas caso não haja a aproximação sugerida na norma NFPA 70E é uma boa aproximação para bancos pequenos de até 60 Ah.

Para bancos de bateria com capacidade muito superior, o valor da resistência interna não acompanha na mesma escala a capacidade de corrente.

Cálculo da energia incidente em ambiente aberto:

$$E_i = 0,01 \times V_{op} \times I_{arc} \times \frac{t_{ARC}}{D^2}$$

$$E_i = 0,01 \times 120 \times 1000 \times \frac{2,0}{(45)^2}$$

$$E_i = 1,19 \text{ cal/cm}^2$$

Ambiente fechado

$$E_i = 3,56 \text{ cal/cm}^2$$

Com o aumento do número de geração distribuída e de painéis solares, começou a aparecer uma demanda para cálculo com tensão superior a 1000 Vdc. Assim, diversos estudo remetem a teoria do modelo matemático de “Stokes e Oppenlander” e outras metodologias como:

- DC Arc Flash on Photovoltaic Equipment. EPRI, Palo Alto, CA:2018. 3002014124

No modelo de Stokes e Oppenlander a resistência de arco elétrico não é fixa e depende:

- Distância dos eletrodos (gap)
- Corrente de arco



Figura 3 – Circuito elétrico equivalente resistência de arco variável.

As equações para tensão de arco e resistência de arco são:

$$V_{ARC} = (20 + 0,534 \cdot gap) \cdot I_{ARC}^{0,12}$$

$$R_{ARC} = \frac{20 + 0,534 \cdot gap}{I_{ARC}^{0,88}}$$

V_{ARC} → Tensão de arco [V]

I_{ARC} → Corrente de arco [A]

R_{ARC} → Resistência de arco [Ω]

gap → distância entre eletrodos [mm]

Pode-se observar que é um sistema que não tem uma solução algébrica direta. A sua solução começa estimando um valor de corrente de arco inicial e calcula -se a tensão de arco. Com esse valor, retorna a calcular a corrente de arco e estima a diferença.

A energia incidente então pode ser calculada como:

$$E_i = \frac{I_{ARC}^2 \times R_{ARC} \times t}{4\pi D^2}$$

I_{ARC} → Corrente de arco [A]

R_{ARC} → Resistência de arco [Ω]

t → Tempo de duração do arco elétrico [s]

D → Distância do operador ao arco elétrico [cm]

E_i → Energia incidente [J/cm^2]

Vamos trabalhar no mesmo exemplo anterior usando as equações de Stokes e Oppenlander.

$$V_{OP} = 120 \text{ Vcc}$$

$$I_n = 60 \text{ A}$$

$$t = 2 \text{ s}$$

$$D = 45 \text{ cm}$$

$$I_{cc} = 2000 \text{ A}$$

$$\text{Gap} = 25,4 \text{ mm}$$

Como primeira aproximação, calcula-se a resistência interna do circuito desconsiderando a resistência de arco:

$$R_{interna} = \frac{V_{oc}}{I_{cc}} = \frac{120}{2000} = 0,06 \Omega$$

Por ser uma solução iterativa, assume que a corrente de arco na primeira instância é igual a corrente de curto - circuito:

$$I_{CC} = I_{ARC} = 2000 \text{ A}$$

Primeira aproximação:

$$R_{ARC} = \frac{20 + 0,534 \cdot gap}{I_{ARC}^{0,88}}$$

$$R_{ARC} = 0,0418$$

$$I_{ARC} = \frac{V_{OP}}{R_{INTERNA} + R_{ARC}} = \frac{120}{0,06 + 0,0418} = 1178 \text{ A}$$

O valor inicial de 2000 A agora com a resistência de arco passou a 1178 A.

Segunda aproximação:

Com a primeira aproximação da corrente de arco, calcula-se a nova resistência de arco:

$$R_{ARC} = \frac{20 + 0,534 \cdot gap}{I_{ARC}^{0,88}}$$

$$R_{arc} = 0,0665 \Omega$$

$$I_{ARC} = \frac{V_{OP}}{R_{INTERNA} + R_{ARC}} = \frac{120}{0,06 + 0,0665} = 948 \text{ A}$$

$$I_{arc} = 948 \text{ A}$$

O erro é estimado como a diferença da corrente de arco anterior - atual.

Cobrecom

Sua marca de **confiança**



Quando falamos de fios e cabos de cobre, trabalhar com uma marca de confiança não pode ser uma opção, e sim regra, já que apenas um erro pode ser fatal.

Escolha uma marca com história sólida, controles de qualidade nos processos de fabricação, garantia de pureza do cobre e muito mais. **Escolha Cobrecom.**



Acesse
www.cobrecom.com
ou escaneie o código
para mais informações.

$$\text{Erro [\%]} = \frac{I_{arc} - I_{arc'}}{I_{arc}} \times 100$$

$$\text{Erro [\%]} = \frac{1178 - 948}{1178} \times 100 = 19,52\%$$

Para apresentar de uma forma mais didática, vamos montar uma tabela repetindo o cálculo passo a passo:

Interação	Rarc	Iarc	Varc	Erro
1	0,0418	1.179,0206	78,4244	41,0%
2	0,0665	948,4925	76,4034	19,6%
3	0,0806	853,7739	75,4449	10,0%
4	0,0884	808,8088	74,9566	5,3%
5	0,0927	785,9816	74,6996	2,8%
6	0,0950	773,9947	74,5619	1,5%
7	0,0963	767,5879	74,4876	0,8%
8	0,0970	764,1311	74,4473	0,5%
9	0,0974	762,2564	74,4253	0,2%
10	0,0976	761,2370	74,4134	0,1%
11	0,0978	760,6818	74,4068	0,1%
12	0,0978	760,3792	74,4033	0,0%

Após 12 interações a corrente de arco converge para 760 A e a resistência de arco para 0,0978Ω.

Cálculo da Energia Incidente:

- Para ambientes aberto:

$$E_i = \frac{I_{ARC}^2 \times R_{ARC} \times t}{4\pi D^2}$$

- Para ambientes fechado:

$$E_i = \frac{3 \times I_{ARC}^2 \times R_{ARC} \times t}{4\pi D^2}$$

Executando o cálculo com a metodologia de “Stokes e Oppenlander”.

$$E_i = \frac{(760)^2 \times 0,0978 \times 2}{4\pi \times 45^2}$$

Ambiente aberto

Ei = 4,44 J/cm² ou 1,06 cal/cm²

Ambiente fechado

Ei = 13,32 J/cm² ou 3,18 cal/cm²

Uma outra aplicação é a avaliação para sistemas de tensão elevada no caso de geração fotovoltaica distribuída. Os valores utilizados estão em um documento produzido pelo EPRI (Electric Power Research Institute) sobre comparação de métodos para

cálculo de energia incidente em grandes sistemas de corrente contínua.

Um sistema de geração solar, por exemplo, de 800 kW com tensão de operação de 1000 Vcc.

Dados para cálculo de energia incidente:

$$U_{op} = 1000 \text{ Vcc}$$

$$I_N = 800 \text{ A}$$

$$I_{CC} = 881 \text{ A}$$

$$t = 2s$$

$$\text{Gap} = 25,4 \text{ mm}$$

$$\text{Distância} = 45 \text{ cm}$$

Condição fechado – “closed”

Vamos avaliar sobre as duas metodologias propostas:

- Conforme abordagem de “Doan”:

$$E_i = 3 \times 0,01 \times V_{op} \times I_{arc} \times \frac{t_{ARC}}{D^2}$$

$$E_i = 3 \times 0,01 \times 1000 \times 440,5 \times \frac{2}{45^2}$$

Ei = 13,05 cal/cm² (ambiente fechado)

Fazendo a mesma avaliação com a metodologia Stokes e Oppenlander:

$$E_i = \frac{3 \times I_{ARC}^2 \times R_{ARC} \times t}{4\pi D^2}$$

$$E_i = \frac{3 \times I_{ARC}^2 \times R_{ARC} \times t}{4\pi D^2}$$

Ei = 3,54 cal/cm² (ambiente fechado)

TABELA 2 – COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS

	NFPA 70E	EPRI
Caso 1 – 60 A – 125 Vcc closed	3,56 cal/cm ²	3,18
Caso 2 – 800 A – 1000 Vcc closed	13,05 cal/cm ²	3,54 cal/cm ²

Para tensões em corrente contínua com valores de até 200 V, as duas metodologias apresentam valores muito próximos. Para grandes sistemas de geração em corrente contínua com tensões acima de 600V, podendo chegar até 1200 V a metodologia de “Doan” é bem conservativa quando comparado com a de “Stokes e Oppenlander”.

**Luiz Carlos Catelani Junior é engenheiro electricista pela Unicamp, com ampla experiência em proteção de sistemas elétricos, subestações AT, linhas de transmissão elétrica e plantas industriais. Ao longo de sua carreira, tem desenvolvido atividades ligadas à geração de fontes renováveis, sendo, atualmente, um dos principais especialistas do país em análise de energia incidente de média e alta tensão – ATPV e Arc Flash.*