

## DETERMINAÇÃO DA DISTÂNCIA DE SEGURANÇA CONTRA PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIOS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA PELO FLUXO DE CALOR RADIANTE CRÍTICO

Paulo Henrique Pereira (COPEL) pauloh.pereira@copel.com

**Resumo:** Em subestações elétricas, mesmo possuindo um número reduzido de ocorrências, devido ao volume de óleo utilizado para o isolamento elétrico do seu núcleo, os transformadores de potência são os principais elementos de risco de incêndio de grandes proporções. Por isso, em projetos de subestações, os normativos dos Corpos de Bombeiros estabelecem sobre esses equipamentos as maiores exigências de segurança contra o fogo. Dentre as medidas de proteção contra a propagação de incêndios de transformadores para outros elementos, normalmente a mais efetiva e economicamente vantajosa é a adoção do isolamento desses por uma distância segura de edificações e/ou outros equipamentos. Neste estudo, utilizando o modelo semi-empírico de Shokri e Beyler desenvolvido para incêndios em líquidos combustíveis contidos por diques, calcula-se a radiação térmica incidente sobre um elemento próximo a um transformador em chamas. Tendo como condição limite o fluxo de calor crítico para a ignição, são determinadas as distâncias de segurança contra a propagação de incêndios de destes equipamentos para edificações. Com estes resultados, demonstra-se que a distância exigida pelos códigos de segurança contra incêndio e pânico dos Corpos de Bombeiros apresentam requisitos excessivamente conservadores, especialmente quando aplicados à transformadores de menor potência.

**Palavras-chave:** Segurança contra incêndio em subestações, incêndio em transformadores, distância de segurança contra incêndio.

## DETERMINATION OF ACCEPTABLE SEPARATION DISTANCE FOR POWER TRANSFORMERS TO PREVENT THE SPREAD OF FIRE BY CRITICAL RADIANT HEAT FLUX

**Abstract:** In power substations a transformer on fire is a rare event, however, due to the amount of oil used for electric insulation, the power transformers are the main fire hazards in distribution power facilities. Hence, in power substations design, the major fire fighting requirements are established by fire fighting codes for these equipment. Among measures against fire spreading to adjacent buildings or structures, usually the most effective and economically advantageous is the adoption of safe distances between the transformers and other objects. In this paper, by using the Shokri and Beyler semi-empirical model developed to pool fires, radiant heat flux to a target near a transformer on fire is calculated. To determine the acceptable separation distance between transformers and buildings is adopted as a limiting condition the critical radiant heat flux that can cause ignition. With these results, it is demonstrated that the safe distance established by fire fighting departments are excessively conservative, especially if it is applied to small power substations.

**Keywords:** Substations fire protection, power transformers on fire, acceptable separation distance.

### 1. INTRODUÇÃO

Em subestações elétricas, os transformadores de potência oferecem o maior risco de incêndio de grandes proporções. Mesmo com o número de sinistros extremamente baixo, estes equipamentos possuem a maior carga incêndio dessas instalações devido ao volume de óleo mineral necessário para o isolamento elétrico do seu núcleo. Por isso, em geral, as legislações dos corpos de bombeiros, bem como as demais normas de segurança contra incêndios em subestações elétricas estabelecem sobre os transformadores as maiores exigências em relação a prevenção e o combate a incêndios.

Dentre as medidas usualmente requeridas, encontram-se tanto elementos passivos, como bacias de contenção de óleo ou diques, afastamentos mínimos de segurança e paredes corta-fogo, quanto sistemas ativos de combate por água nebulizada ou espuma. No entanto, é importante ressaltar que em caso de incêndio raramente o equipamento sinistrado terá

condições de ser recuperado, assim, as medidas de segurança devem ter como objetivo principal o confinamento do incêndio a fim de mitigar os danos a elementos próximos. Para isto, de acordo com o Cigre [1], o isolamento por uma distância adequada é normalmente a solução mais efetiva e econômica em subestações convencionais que possuam área de terreno suficiente. Atualmente a ABNT [2] estabelece o afastamento entre transformadores e edificações em função do tipo e volume de óleo isolante contido no equipamento. No entanto, no Brasil é de competência dos Corpos de Bombeiros Militares estaduais estabelecer e fiscalizar a aplicação de medidas de proteção contra incêndios. Para esses, conforme determinado nos códigos de segurança contra incêndio e pânico (CSCIP) de São Paulo [3], Minas Gerais [4] e Paraná [5] entre outros, a distância mínima de segurança contra propagação de incêndio de transformadores de potência para outros elementos é fixa independente de suas características. Assim, apesar de haver na referida norma brasileira critérios de isolamento em função do porte do equipamento, para a aprovação de projetos de combate à incêndios permanece soberana a legislação estabelecida pelos Corpos de Bombeiros. Com isso, em alguns casos estes normativos se tornam excessivamente conservadores, especialmente para instalações de pequeno porte. Neste contexto, podem ser citadas as subestações elétricas da COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Em seu parque instalado, a referida empresa possui desde subestações elétricas com um transformador trifásicos 34,5/13,8 kV - 7,0 MVA com 3.300 litros de óleo mineral até outras possuindo 7 transformadores monofásicos 500/230 kV - 200 MVA com 90.000 litros do mesmo isolante. É nítido que essas instalações possuem potencial de incêndio completamente diferentes. Entretanto, atualmente os CSCIPs tratam todas as subestações elétricas de modo indistinto.

Segundo Carlsson [6], a propagação do incêndio para uma edificação próxima ao fogo pode ocorrer de várias maneiras, entre elas, através do contato com as chamas, de fagulhas lançadas pelo vento, por convecção de gases aquecidos ou por radiação térmica. No entanto, Cheng [7] relata que apesar dos vários modos de propagação, a radiação térmica é a forma que possui a capacidade de propagar o fogo à maior distância em relação ao foco do incêndio. Por isso, normas como a NFPA [8] utilizam o fluxo de calor crítico para ignição como parâmetros para estabelecer as distâncias de segurança contra propagação de incêndio entre edificações próximas.

Neste estudo são determinadas, utilizando como critério limite o fluxo de calor crítico para a ignição, as distâncias de segurança contra a propagação incêndios entre transformadores de potência e edificações. Para tanto, os parâmetros de combustão do óleo mineral isolante existentes na literatura são aplicados ao modelo semi-empírico de Shokri e Beyler [9] para líquidos combustíveis contidos em diques. Com base nesta formulação, propõe-se que a distância de segurança contra incêndio seja determinada pela área da bacia de contenção de óleo ou dique, ou seja, pela superfície de combustível disponível para a queima. Os valores encontrados nesta metodologia são ainda comparados com as distâncias de segurança estabelecidas na ABNT [2] e nas legislações dos Corpo de Bombeiros [3, 4 e 5]. Por fim, recomenda-se algumas linhas de pesquisa complementares a serem desenvolvidas a fim de subsidiar revisões dos normativos vigentes no Brasil.

## 2. REFERÊNCIAL TEÓRICO

Conforme apresentado na seção anterior, a propagação do fogo para elementos próximos ao foco de incêndio pode ocorrer por contato com as chamas, por fagulhas lançadas pelo vento, por convecção de gases aquecidos ou pela radiação térmica. No entanto, esta última pode ocorrer em distâncias muito superiores as demais formas de propagação. Por isso, neste estudo, assim como em diversas pesquisas relacionadas, o fluxo de calor crítico para ignição (FCCI) é utilizado para estabelecer a distância de segurança contra a propagação do fogo. Assim, apresentam-se nesta seção os conceitos do FCCI aplicado para edificações próximas à

incêndios bem como o modelo desenvolvido por Shokri e Beyler [9] para análise de incêndio em líquidos combustíveis confinados por diques.

## 2.1 Fluxo de calor crítico para ignição

O FCCI é a menor carga térmica por unidade de área capaz de iniciar uma reação de combustão em um dado material. Entretanto, ao considerarmos as edificações como um todo, por serem compostas dos mais variados materiais, não é possível estabelecer um valor crítico único para que o incêndio inicie. No Brasil, a maioria das edificações são construídas utilizando grande parte dos materiais classificados como não combustíveis, tais como alvenarias, estruturas de concreto, pisos cerâmicos, etc. Porém, mesmo nestas edificações, sempre haverá pontos suscetíveis a ação do fogo.

Segundo Heron et. al., [10] apesar das edificações possuírem revestimentos não combustíveis, existem varias outras maneiras do incêndio se propagar para edificações próximas a um incêndio. Dentre estes, o modo mais frequente de transmissão do incêndio ocorre através das esquadrias. Isto acontece porque mesmo sendo um material não combustível, as áreas envidraçadas representam um ponto frágil da edificação e em caso de rompimento, possibilitam o acesso do calor de um incêndio externo à materiais combustíveis existentes no interior das edificações. De acordo Burrell e Hare [11], vidros comumente utilizados nas construções iniciam sua fissuração com fluxo de calor menor que  $5 \text{ kW/m}^2$ , porém, para que os mesmos se quebrem por completo deixando expostos os matérias combustíveis internos a edificação é necessário que o calor radiante seja superior a  $35 \text{ kW/m}^2$ . Coberturas também podem ser um ponto de propagação de incêndio para edificações próximas, quando compostas por materiais asfálticos podem entrar em ignição com um fluxo de calor acima de  $20 \text{ kW/m}^2$ . Assim como esses, existem diversos outros materiais por onde um incêndio pode se propagar. Por isso, devido a essa variedade de elementos construtivos, geralmente os pesquisadores e normativos utilizam como FCCI para edificações o fluxo de calor necessário para a ignição da madeira. Ainda assim, os limites estabelecidos pelos pesquisadores apresentam variações relativas ao tipo e ao teor de umidade presente na madeira durante o ensaio.

Para Law [12], apud Clarke [13], a ignição da madeira seca em estufa só ocorre com radiações acima de  $12,6 \text{ kW/m}^2$  e com exposição mínima de 10 minutos. No entanto, a autora afirma que em aplicações reais sempre haverá umidade o que aumentará o fluxo de calor necessário para a ignição desse mesmo tipo de madeira. Desta forma, admitindo a presença de umidade, Clarke [13] afirma baseado na análise dos resultados de diversos pesquisadores, que a adoção de  $12,6 \text{ kW/m}^2$  como fluxo de calor crítico para a propagação do incêndio para edificações próximas é conservadora e poderia ser elevada para  $16 \text{ kW/m}^2$ . Entre as normas também são encontradas grandes variações. De acordo a NFPA [8], a radiação máxima que pode ser recebida por edificações próximas a um incêndio é de  $12,5 \text{ kW/m}^2$ . No entanto, o WBDG [14] determina que em regiões urbanizadas onde o tempo para chegada da equipe de combate a incêndio é inferior a 15 minutos, pode-se admitir como radiação crítica o valor de  $31,5 \text{ kW/m}^2$  para a determinação da distância de segurança contra a propagação de incêndios. Contudo, no Brasil estes valores não estão bem definidos. Assim, nesta pesquisa, devido ao grau de incerteza existente, prefere-se adotar como radiação de calor admissível para edificações o valor de  $12,5 \text{ kW/m}^2$  definido pela NFPA [8].

## 2.2 Incêndio em líquidos combustíveis

O controle de incêndios em grandes quantidades de líquidos combustíveis é um desafio para o projeto de sistemas prevenção e combate a incêndios. Por isso, nestes casos, usualmente são utilizados métodos de simulação de incêndios para identificar as possíveis consequências de um sinistro nessas instalações. Entre os modos de análise mais frequente utilizados,

encontram-se as formulações semi-empíricas denominadas modelos de incêndio de poça. Estes métodos de aproximação tem como vantagem a simplicidade e a capacidade de fornecerem resultados satisfatórios, tanto para a análise do tamanho e forma das chamas quanto para a determinação da radiação de calor recebida por objetos próximos ao fogo [15]. Em geral, as simulações de incêndio em líquidos combustíveis baseadas em formulações semi-empíricas selecionam geometrias simples para representar a chama, tais como cilindros ou cones. Assim, o fogo pode ser estabelecido em função de sua altura e do diâmetro da base do incêndio. No entanto, o risco de propagação de incêndio para objetos próximos por radiação térmica depende ainda de outros parâmetros, tais como do tipo de combustível, das dimensões do dique, da duração do incêndio assim como da proximidade e características térmicas dos objetos expostos ao incêndio [16].

Entre os diversos modelos, destaca-se o método apresentado por Shokri e Beyler [9]. Através da análise de dados experimentais, os autores determinaram o cálculo do fluxo de calor recebido por um objeto externo a chama. Para isso, o modelo assume a chama como um corpo negro, cilíndrico, de radiação homogênea definida pela emissão de energia média do fogo. Assim, para esses pesquisadores o fluxo de radiação  $\dot{q}''$ , em kW/m<sup>2</sup>, incidente sobre um alvo externo a chama é dado por:

$$\dot{q}'' = E \cdot F_{12} \quad (1)$$

Onde  $E$  é a energia emitida pela chama, em kW/m<sup>2</sup>, determinada pela equação (2) em função do diâmetro  $D$  em metros de um incêndio e  $F_{12}$  é chamado de fator visual entre a chama e o alvo.

$$E = 58(10^{-0,00823 \cdot D}) \quad (2)$$

Para os casos de diques não circulares, o método admite ainda obter o diâmetro equivalente a área  $A$  da contenção conforme equação abaixo:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3)$$

O fator visual  $F_{12}$  é calculado conforme a equação (6), para isto, determina-se a altura da chama  $H_f$  em metros, equação (4), onde diâmetro  $D$  é o diâmetro da contenção do líquido combustível e  $\dot{Q}$  é a taxa de calor liberado pelo fogo em kW.

$$H_f = 0,235\dot{Q}^{2/5} - 1,02D \quad (4)$$

Conforme equação (5),  $\dot{Q}$  é diretamente dependente dos parâmetros específicos do líquido combustível presente no incêndio, onde  $\dot{m}$  é a taxa de queima ou massa perdida em kg/s,  $\Delta H_c$  é o calor efetivo liberado pela combustão em kJ/kg e  $K\beta$  é uma constante empírica.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot \Delta H_c \cdot A(1 - e^{-K\beta \cdot D}) \quad (5);$$

Para o caso de alvos verticais acima do solo, conforme Figura 1, Shokri e Beyler [9] dividem a altura da chama em dois cilindros para representar a parcela acima e abaixo do alvo.

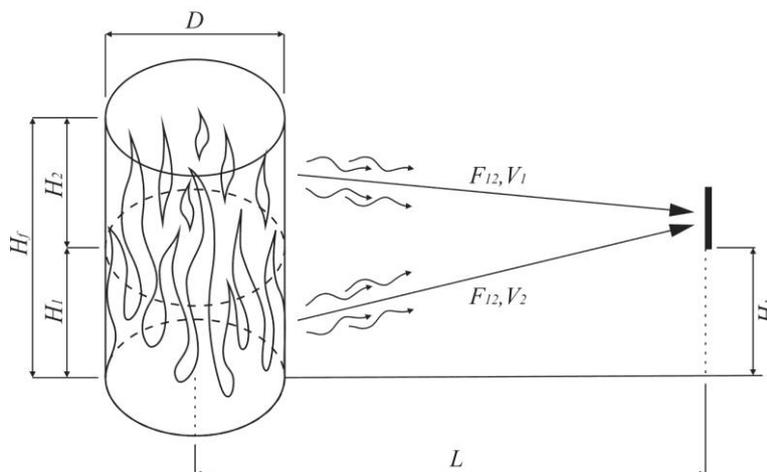


Figura 1 - Representação do incêndio de poça para alvos verticais acima do solo [9].

Assim, para obter o fator visual  $F_{12,V}$  total da chama devem ser somadas as parcelas inferiores e superiores ao alvo conforme equação (6).

$$F_{12,V} = F_{12,V1} + F_{12,V2} \tag{6}$$

Onde:

$$F_{12,Vi} = \frac{1}{\pi S} \cdot \tan^{-1} \left( \frac{h_i}{\sqrt{S^2-1}} \right) - \frac{h_i}{\pi S} \cdot \tan^{-1} \frac{\sqrt{S-1}}{\sqrt{S+1}} + \frac{A_i h_i}{\pi S \sqrt{A_i^2-1}} \cdot \tan^{-1} \sqrt{\frac{(A_i+1)(S-1)}{(A_i-1)(S+1)}} \tag{7}$$

$$A_i = \frac{h_i^2 + S^2 + 1}{2S} \tag{8};$$

$$S = \frac{2L}{D} \tag{9};$$

$$h_i = \frac{2H_i}{D} \tag{10};$$

Sendo  $L$  a distância entre o centro do cilindro e o alvo e  $H_i$  a altura do cilindro do cilindro  $i$  acima ou abaixo do alvo em metros.

### 3 METODOLOGIA E RESULTADOS

Este estudo determina, baseado na radiação de calor que atinge um objeto próximo ao fogo, a distância mínima de segurança contra propagação de incêndio de um transformador de potência. Para calcular o fluxo de calor incidente sobre o alvo, utiliza-se o modelo de incêndio de poça de Shokri e Beyler apresentado na seção 2.2. Admite-se que o fluxo de calor crítico para ignição de uma edificação seja  $12,5 \text{ kW/m}^2$  conforme estabelecido pela NFPA [8]. Para a determinação da taxa de calor liberado pelo fogo  $\dot{Q}$ , equação(5), definem-se ainda como parâmetros de queima do óleo mineral isolante os valores descritos por Beyler [16] onde:  $m = 0,039 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $\Delta H_c = 46.400 \text{ kJ/kg}$  e;  $k\beta = 0,7$ . A Figura 2 apresenta a configuração esquemática do problema em que  $X$  é a distância de segurança contra propagação de incêndio entre o dique de contenção de óleo sob o transformador e a edificação mais próxima.

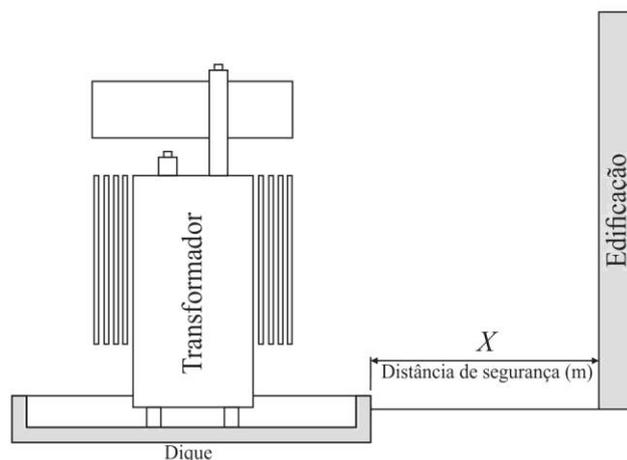


Figura 2 – Representação da distância de segurança entre transformadores de potência e edificações

Aplicando o modelo para incêndio de líquidos combustíveis já descrito, calculam-se as distâncias de segurança  $X$  em função da área da contenção de óleo existente sob o equipamento. Assim, pode-se representar os resultados na forma gráfica conforme Figura 3.

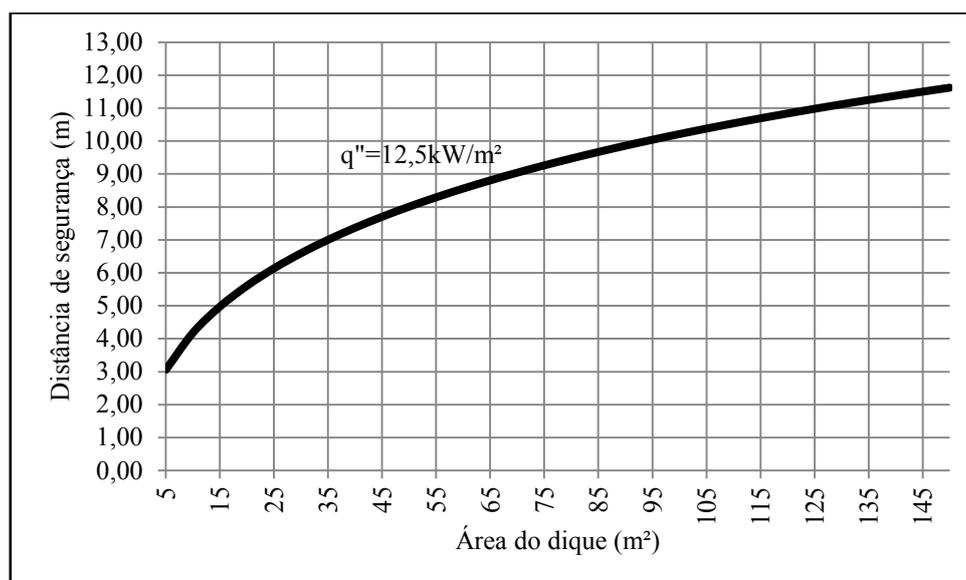


Figura 3 - Distância de segurança contra a propagação de incêndios para  $FCCI = 12,5 \text{ kW/m}^2$

No entanto, segundo os códigos de proteção contra incêndio e pânico [3, 4 e 5] a distância mínima de segurança entre transformadores e edificações deve ser de 15 metros independente das características dos equipamentos. E ainda, onde não for possível atender a esse requisito, exigem a construção de paredes corta-fogo para minimizar o risco de propagação do incêndio para elementos próximos ao fogo. Por outro lado, a ABNT [2] apresenta-se mais flexível. Para esta, a distância de isolamento de transformadores deve ser determinada pelo tipo e volume do óleo isolante contido no equipamento e pelo padrão construtivo da edificação mais próxima.

A Tabela 1 apresenta o comparativo entre o método de Shokri e Beyler [9], a ABNT [2] e as normas dos corpos de bombeiros [3, 4 e 5]. Para tanto, utilizam-se como referência os equipamentos e projetos de contenções de óleo empregados atualmente pela COPEL – Companhia Paranaense de Energia.

Tabela 1 –Tabela comparativa entre os códigos [3, 4 e 5], ABNT [2] e Shokri e Beyler [9]

Transformador Tensão (kV) Potência (MVA)	Volume de óleo (m <sup>3</sup> )	Área da contenção de óleo (m <sup>2</sup> )	Distância de Segurança X (m)		
			Bombeiros [3, 4 e 5]	ABNT [2]	Shokri e Beyler [9]
34,5-13,8 7,0	3,3	14	15	7,6	4,8
138-34,5-13,8 20	12,5	57		7,6	8,4
525-230 200	90,0	105		15,2	10,4

Observa-se que os códigos de prevenção contra incêndio e pânico [3, 4 e 5] são excessivamente conservadores se comparados tanto com a ABNT [2] quanto com o método de Shokri e Beyler [9], especialmente se aplicados à transformadores de pequeno porte. No entanto, é importante ressaltar que apesar da ABNT [2] trazer avanços em relação a exigência de afastamento entre transformadores e edificações, seu critério para estabelecer a distância de segurança está relacionado com o volume de óleo contido no equipamento. Este procedimento difere da maioria dos modelos de incêndio de líquidos combustíveis. Para estes, assim como para Shokri e Beyler [9], o estabelecimento de distâncias de segurança contra propagação de incêndios depende do tipo de combustível e fundamentalmente da superfície livre do líquido, ou seja, da área onde o mesmo poderá entrar em combustão.

#### 4. CONCLUSÕES

A propagação de um foco de incêndio para um elemento próximo pode ocorrer através do contato direto com as chamas, por fagulhas lançadas pelo vento, por convecção de gases aquecidos ou pela radiação térmica. No entanto, devido ao seu maior alcance, a radiação térmica deve ser utilizada para estabelecer a distância de segurança contra propagação do fogo. No caso edificações próximas à incêndios, apesar destas serem constituídas por grande parte de materiais classificados como não combustíveis, sempre existirão pontos susceptíveis à ação do fogo. Entre estes elementos estão as coberturas, esquadrias e elementos de acabamento. Sendo assim, não é possível determinar um fluxo de calor crítico para ignição único para toda a edificação. Por isso, assim como diversos autores e normas, este estudo adota o fluxo de calor crítico para ignição da madeira como limite máximo admitido para edificações.

Para a determinação do radiação de calor incidente sobre um determinado objeto, os métodos semi-empíricos denominados modelos de incêndio de poça apresentam resultados satisfatórios. Através do modelo de Shokri e Beyler [9] foi possível determinar a distância mínima de segurança entre transformadores de potência e edificações. Com base nos resultados desse modelo, observa-se que os códigos de prevenção contra incêndio e pânico dos Corpos de Bombeiros exigem afastamentos de segurança extremamente conservadores, especialmente para transformadores de pequeno porte.

Apesar da ABNT [2] trazer avanços em relação a exigência de separação de segurança entre transformadores e edificações, seu critério para estabelecer tal afastamento está relacionado com o volume de óleo contido no equipamento independente das dimensões do

dique de contenção de óleo. Este procedimento difere da maioria dos modelos de incêndio de líquidos combustíveis. Para diversos autores, assim como para Shokri e Beyler, a intensidade da radiação de um incêndio em combustíveis está relacionada com as propriedades químicas do mesmo e com a superfície livre do líquido, ou seja, com a área onde este poderá entrar em combustão. Com isso, as distâncias estabelecidas pela norma brasileira também apresentam divergências significativas em relação ao modelo semi-empírico.

Por fim, ainda são necessários estudos para avaliar o efeito do vento sobre a chama e seu impacto no fluxo calor radiante para edificações próximas ao foco de incêndio. Devem ainda, ser desenvolvidas pesquisas experimentais que possam validar o modelo de Shokri e Beyler [9] para o caso de incêndio em transformadores.

## REFERÊNCIAS

**CONSEIL INTERNATIONAL DES GRANDS RÉSEaux ÉLECTRIQUES - CIGRE 537: Guide for Transformer Fire Safety Practices. 2013.**

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13231: Proteção contra incêndio em subestações elétricas. Rio de Janeiro-RJ. 2014.**

**POLÍCIA MILITAR DE SÃO PAULO - CORPO DE BOMBEIROS. IT 37: Subestação Elétrica. São Paulo-SP, 2011.**

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DE MINAS GERAIS. IT 32: Subestações Elétricas. Belo Horizonte-MG, 2005.**

**CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO PARANÁ. NPT 37: Subestação Elétrica. Curitiba-PR, 2012.**

**CARLSSON, E. External Fire Spread to Adjoining Buildings. Lund University – Department of Fire Safety Engineering. Sweden, 1999.**

**CHENG, H. Modeling of Fire Spread In Buildins and Modeling of Fire Spread from the Fire Building to Adjacent Buildings. Thesis. Ottawa-Carleton Institute of Civil and Environmental Engineering. Ottawa-CA. 2010.**

**NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. NFPA 80A: Recommended Practice for Protection of Buildings From Exterior Fire Exposures. Quincy-MA. 2012.**

**SHOKRI, M.; BEYLER, C. L. Radiation from Larger Pool Fires. Journal of Fire Protection Engineering. Vol 1. No 4. Pp 141-150. 1989.**

**HERON, D.; COUSINS, J.; LUKOVIC, B.; THOMAS, G.; SCHMID, R. Modelling Fire-Spread in and Around Urban Centers. New Zealand. 2013.**

**BURRELL, G; HARE J. Review of HSE Building Ignition Criteria. Health & Safety Laboratory. Buxton-UK. 2006.**

**LAW 1963 Heat Radiation from Fires and Building Separation. Fire Research Technical Paper No.5, Joint Fire Research Organization**

**CLARKE, J. M. W.** *A Review of the Building Separation Requirements of the New Zealand Building Code Acceptable Solutions. Report of Master Degree, University of Canterbury. Christchurch, NZ. 1999.*

**WBDG.** *Whole Building Design Guide - Code of Federal Regulation CFR: 24 – Part 51 Environmental Criteria and Standards. Washington, DC, 2004.*

**MANSOUR, K. A.** *Fires in Large Atmospheric Storage Tanks and Their Effect on Adjacent Tanks. Doctoral Thesis in Chemical Engineering. Loughborough University, Loughborough – UK. 2012.*

**BEYLER, C. L.** *Fire Hazard Calculations for Large, Open Hydrocarbon Fires. SFPE – Handbook of Fire Protection Engineering. 3 ed. 2002.*