



Emanuel Ferreira

Serviço Regional de Protecção Civil da Madeira  
[emanuel.ferreira@procivmadeira.pt](mailto:emanuel.ferreira@procivmadeira.pt)

João Paulo C. Rodrigues

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra  
[jpaulocr@dec.uc.pt](mailto:jpaulocr@dec.uc.pt)

Leça Coelho

Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
[alcoelho@lnec.pt](mailto:alcoelho@lnec.pt)

#### RESUMO

Neste artigo apresentam-se os resultados da avaliação quantitativa probabilística do risco de incêndio do núcleo da sala de comando numa estação de tratamento de resíduos sólidos urbanos. Para a quantificação do risco de incêndio utilizou-se o Building Fire Safety Evaluation Method (BFSEM). A aplicação do BFSEM ao referido compartimento permitiu a determinação das probabilidades de ocorrência das diferentes formas de extinção do incêndio e do *flashover*.

**Palavras-chave:** Risco, incêndio, BFSEM, cenário, probabilidade.

#### RESUMEN

*Riesgo de incendio en una sala de control de una planta de tratamiento de residuos sólidos* - Este artículo presenta los resultados de la evaluación cuantitativa probabilística del riesgo de incendio del núcleo de la sala de control de una planta de tratamiento de residuos sólidos urbanos. Para cuantificar el riesgo de incendio se ha utilizado el Building Fire Safety Evaluation Method (BFSEM). La aplicación del BFSEM a el compartimento permitió la determinación de las probabilidades de ocurrencia de las distintas formas de extinción el incendio y del *flashover*.

**Palabras clave:** Riesgo, incendio, BFSEM, escenario, probabilidad.

#### RÉSUMÉ

*Risque d'incendie dans une salle de contrôle d'une station d'épuration des déchets solides* - Cet article présente les résultats de l'évaluation probabiliste quantitative de risque d'incendie de la salle de contrôle d'une station d'épuration des déchets solides urbains. Pour quantifier le risque d'incendie a été utilisée le Building Fire Safety Evaluation Method (BFSEM). L'application du BFSEM a la salle a permis la détermination des probabilités d'occurrence des différentes formes d'éteindre le feu et de *flashover*.

**Mots clés:** Risque, incendie, scénario, probabilité.

#### ABSTRACT

*Fire risk in a control room of a municipal solid waste plant* - This paper presents the results of the quantitative probabilistic assessment of the fire risk of the control room core of a treatment plant of urban solid residues. To quantify the fire risk it is used the Building Fire Safety Evaluation Method (BFSEM). The application of BFSEM to the compartment allowed the determination of the probabilities of occurrence of the different ways of fire extinction and the probability of flashover.

**Key words:** Risk, fire, BFSEM, scenario, probability.

\* O texto deste artigo corresponde à comunicação apresentada ao II Congresso Internacional de Riscos e VI Encontro Nacional, tendo sido submetido para revisão em 11-06-2010, tendo sido aceite para publicação em 23-09-2010. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 19, 2012, © Riscos, ISBN: 0872- 8941.

## Introdução

Com a difusão dos conceitos de perigo, risco e fiabilidade, as metodologias e técnicas aplicadas na segurança de sistemas, inicialmente utilizadas apenas em áreas restritas como as áreas militar e espacial, tiveram a partir da década de 70 uma aplicação quase que universal na solução de problemas de engenharia em geral e na engenharia de segurança de incêndio em edifícios em particular. A análise do risco de incêndio é basicamente uma abordagem estruturada para a tomada de decisão sob a incerteza. O conceito generalizado da análise do risco de incêndio contempla os seguintes passos:

- a) Identificação dos perigos de incêndio;
- b) Quantificação das consequências e probabilidade dos perigos de incêndio;
- c) Identificação das opções de controlo dos perigos;
- d) Quantificação do impacto das opções no risco dos perigos;
- e) Seleccionar a protecção adequada.

A avaliação do risco de incêndio evoluiu com a indústria seguradora no século XIX. Os métodos de análise do risco de incêndio podem ser classificados em quatro categorias: checklists, narrativos, indexação e métodos probabilísticos. As checklists e os narrativos são abordagens não quantitativas que podem abordar os passos 1, 3 e 5 indicados anteriormente e ultrapassam os passos 2 e 4. A indexação é um método de quantificação completo que é mais heurístico do que baseado na fundamentação. Os métodos probabilísticos têm vindo a crescer o seu uso nos últimos 30 anos. No entanto a avaliação quantitativa probabilística do risco de incêndio em Portugal ainda é de difícil aplicação visto que Portugal não estatísticas dos incêndios ocorridos bem como sobre a fiabilidade dos sistemas de segurança contra incêndio, que permitam obter probabilidades de ocorrência dos eventos que transmitam a realidade do País e cultura de segurança. Para a criação de uma base de dados é necessário que as autoridades competentes desenvolvam esforços no sentido de criar um sistema de recolha de dados logo durante a ocorrência dos incêndios e que por exemplo “formatem” o livro de registos constante das medidas de autoprotecção preconizadas na Portaria n.º 1532/2008 de 29 de Dezembro de modo a se aferir a fiabilidade dos equipamentos de segurança, visto que os registos têm também por objectivo descrever o desempenho destes equipamentos.

As probabilidades atribuídas aos eventos neste tipo de análise podem ser subjectivas, baseadas na experiência e julgamento técnico, ou em dados estatísticos quando disponíveis. Devido à falta de dados estatísticos aplicar-

se-á neste artigo a sensibilidade possível no que se refere à segurança contra incêndio em edifícios e algum bom senso para estimar a probabilidade de ocorrência de alguns eventos que se apresentam durante um incêndio. As probabilidades atribuídas neste trabalho são portanto pessoais e subjectivas e resultam da sensibilidade dos autores.

## Building Fire Safety Evaluation Method (BFSEM)

O BFSEM foi desenvolvido no campo da Pesquisa Operacional e Avaliação de Risco pelo Dr. Robert Fitzgerald do Worcester Polytechnic Institute - EUA. O método consiste numa rede estruturada para a avaliação do desempenho da segurança contra incêndio em que o utilizador pode avaliar a frequência de ignição, crescimento e propagação do incêndio num edifício, concentrando-se em factores como a carga de incêndio, características da ocupação, nas medidas de protecção activas e nas características estruturais (M. J. MADDEN *et al.*, 2005). Numa primeira análise do estudo são examinados os componentes isoladamente e depois são combinadas as partes relacionadas para fornecer uma visão interactiva do desempenho. Isto envolve uma estrutura analítica que guia o processo de pensamento e codifica a informação relevante para estimar o comportamento através de diagramas lógicos chamados de Continuous Value Network (CVN), que descrevem o comportamento do incêndio através de uma sequência de eventos interligados pela sua ordem de acontecimento e Single Value Network (SVN) que permitem “parar” um determinado evento e analisar o seu comportamento para uma determinada potência calorífica do incêndio. Para cada um dos eventos que compõe o diagrama é estabelecido um valor probabilístico que representará a percepção do utilizador do que irá acontecer, ou seja o grau de crença de como o incêndio se comportará (PIRES, T. T. e DUARTE, D., 2000).

### Compartimento de origem

A aplicação do BFSEM começa na selecção do compartimento de origem. Esse compartimento poderá ser o local onde o incêndio possa provocar maiores danos, tenha maior probabilidade de ocorrer, ou apresente maior vulnerabilidade do ponto de vista da continuidade operacional. Posteriormente é realizada a análise do potencial de alastramento da chama nesse compartimento e propagação a outros compartimentos através da análise dos modos de falha das barreiras.

Na sala de comando da Estação de Tratamento de Resíduos Sólidos (ETRS) da Meia Serra, na Ilha da Madeira, é onde se encontram localizados os sistemas de controlo e monitorização da Estação, pelo que se mostra indicado para a análise pretendida. Este é constituído

por três compartimentos: sala de engenharia (C1), sala de comando (C2) e sala do chefe de turno (C3), esquematizados na figura 1, formando o seu conjunto um compartimento isolado com cerca de 160 m<sup>2</sup>. As paredes são em alvenaria de tijolo de 20 cm rebocadas em ambas as faces, o pavimento em placas de PVC rígido é falso para passagem de cablagens e o tecto é revestido com placas metálicas. O compartimento C1 comunica com o C2 através de uma porta e entre os compartimentos C2 e o C3 existe um vão envidraçado com vidro normal.

A sala de comando encontra-se permanentemente ocupada com pelo menos dois operadores. A sala de engenharia e sala de comando possuem sistema de detecção, sistema de extinção automática por inergen e desenfumagem. O compartimento de origem para este estudo é a sala de engenharia, por neste estar instalado o servidor com todo o software de gestão da Estação. Esta sala possui ainda quadros eléctricos, três computadores, três mesas metálicas com tampo de madeira revestido a vinílico e uma estante metálica. Possui 97,6 m<sup>3</sup> de volume e 3,2 m de pé direito. Como critério de aceitação do risco, vamos admitir a probabilidade de 2%, do núcleo ser tomado por um incêndio de potência calorífica de 800 kW.

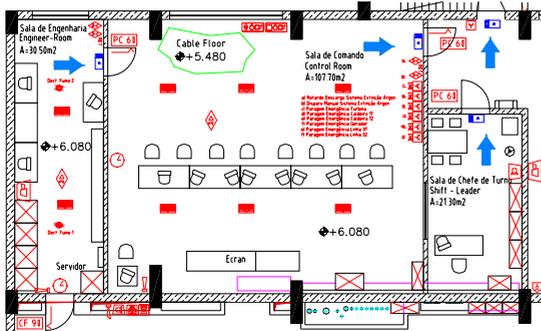


Fig. 1 - Planta do núcleo da sala de comando (ACE ETRS Meia Serra, 2004).

#### Análise do potencial de crescimento da chama no compartimento de origem

Durante o desenvolvimento de um incêndio, a chama não se desenvolve através de um único processo, apresentando estágios de crescimento, cada um com as suas características particulares. Quando os parâmetros que afectam o seu comportamento estão presentes, o incêndio poderá desenvolver-se até atingir o estágio seguinte. Os estágios de desenvolvimento de um incêndio são os seguintes (R. T. VILELA e D. DUARTE, 2000):

- Ponto de aquecimento - é o instante em que o aumento de temperatura é verificado nalgum objecto combustível presente;
- Ponto de ignição - é o instante em que ocorre uma pequena chama auto sustentável;
- Ponto de radiação - é o ponto em que a chama

atinge o tamanho seleccionado para o início da análise do incêndio. Para espaços compartimentados, como é o caso, uma chama de potência calorífica de 20 kW com cerca de 25 cm de altura parece ser apropriada para o desenvolvimento do incêndio, EB (Established Burning), (R. W. FITZGERALD, 2004);

- Ponto limite - é o ponto a partir do qual o tamanho começa a ser influente e aumenta a taxa de crescimento. Neste ponto a altura da chama poderá atingir 150 cm e uma potência calorífica entre os 300 e 400 kW;
- Ponto de tecto - é o tamanho da chama quando esta alcança o tecto. A potência calorífica do incêndio neste ponto para uma altura de 2,45 m pode estar compreendida entre 800 e 1000 kW;
- Ponto de envolvimento - é o momento em que as chamas envolvem todo o combustível do espaço que está a ser analisado ou seja o flashover, FRI (Full Room Involvement).

A propagação do incêndio para a sala de comando e desta para a sala do chefe de turno está dependente do insucesso ou sucesso da barreira existente entre os compartimentos. As barreiras têm uma influência significativa no desempenho do incêndio dos espaços para além do compartimento de origem, principalmente quando não existe um sistema de extinção automático.

O limite (L) do movimento da chama no compartimento define-se como a extensão com que o incêndio se propaga até terminar, sendo que a extinção pode ocorrer de vários modos:

- O incêndio auto extingue-se (I);
- Extinção automática do incêndio (A);
- Extinção pelos bombeiros da localidade (M).

As medidas preventivas e de 1ª intervenção não são contabilizadas nesta análise.

#### Curva de auto extinção (I)

A curva de auto extinção descreve a relação entre a potência calorífica do incêndio para um determinado cenário e a crença de que este se auto extinguirá, para compartimentos em que o flashover é o mecanismo de alcance do FRI. Considerando o EB até ao FRI, podemos considerar os seguintes eventos críticos:

- Ponto limite - 300 kW;
- Ponto de tecto - 800 kW;
- Ponto de envolvimento do ambiente - 1000 kW

Para determinarmos as probabilidades condicionais destes pontos devem ser respondidas as seguintes questões:

- a) Dado o EB, qual a probabilidade do incêndio alcançar o ponto definido como ponto limite ( $I_{300\text{ kW}}$ )?
- b) Dado que o incêndio para este cenário alcança o ponto limite, qual a probabilidade de este alcançar o ponto de tecto ( $I_{800\text{ kW}}$ )?
- c) Dado que o incêndio para este cenário alcança o ponto de tecto, qual a probabilidade de este alcançar o ponto de envolvimento do ambiente ( $I_{1000\text{ kW}}$ )?

Os valores numéricos das probabilidades apresentados nesta análise representam o julgamento pessoal e subjectivo de como o incêndio se vai comportar no núcleo da sala de comando.

Vamos admitir que devido a uma falha de corrente ou sobrecarga se inicia um pequeno incêndio nos componentes electrónicos e placas de circuito impresso do servidor. Este foco de incêndio por sua vez inflama outros materiais combustíveis como fios, cabos e invólucros plásticos de equipamentos electrónicos. Dado que ocorre o EB no servidor da sala de engenharia, a probabilidade de que a chama atinja 300 kW é relativamente alta visto que o equipamento se encontra sob tensão e predominam materiais facilmente inflamáveis como o PVC, poliestireno, etc. A probabilidade de que a chama não se auto extinga até atingir 1,5 m de altura é de 85%, ou seja a  $P(\bar{T}_{300\text{ kW}})=0,85$  e a probabilidade de que a chama se auto-extinga é o seu complemento, ou seja,  $P(I_{300\text{ kW}})=0,15$ . Dado que o incêndio atinge o ponto limite (300 kW), a probabilidade de que este cresça mais, atingindo 800 kW ainda é maior porque o servidor ficará completamente tomado pelo fogo. A probabilidade de que a chama não se auto extinga até atingir o tecto é de 90%,  $P(\bar{T}_{800\text{ kW}})=0,90$  e  $P(I_{800\text{ kW}})=0,10$ . A partir desta energia, a probabilidade de que o incêndio atinja a condição de envolvimento completo (FRI) é quase uma certeza dada a existência de materiais/equipamentos combustíveis na sala como quadros eléctricos, cablagens no pavimento falso, etc. sendo  $P(\bar{T}_{1000\text{ kW}})=0,95$  e  $P(I_{1000\text{ kW}})=0,05$ . Estas probabilidades podem então ser aplicadas a uma rede CVN como indica a figura 2, permitindo assim a descrição do desenvolvimento do incêndio para o cenário idealizado para a sala de engenharia bem como o cálculo das probabilidades acumuladas ao longo da rede.

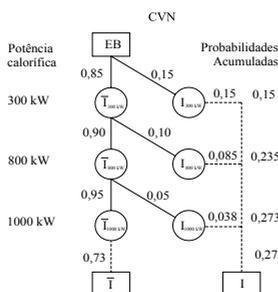


Fig. 2 - Rede CVN para o crescimento potencial do incêndio no compartimento C1

As operações para o cálculo da rede são as

seguintes: multiplicam-se as probabilidades ao longo de um caminho (ou caminho parcial) e somam-se os resultados idênticos. A probabilidade de que a chama não se auto extinga antes do FRI é de 73%,  $P(\bar{T})=0,85 \times 0,90 \times 0,95=0,73$ . A probabilidade da auto extinção do incêndio com potência de 800 kW dado que não se auto extinguiu para uma potência de 300 kW é de 8,50%,  $P(I_{800\text{ kW}} | \bar{T}_{300\text{ kW}})=0,85 \times 0,10=0,085$ .

Curva de extinção automática (A)

A curva de extinção automática descreve o desempenho funcional do sistema de extinção por inergen para uma determinada potência calorífica. A análise centra-se em dois factores: a aplicação do agente (AA), que tenta expressar a fiabilidade do sistema e a eficácia operacional (AC).

A aplicação do agente expressa a probabilidade de que o gás vai fluir a partir dos bocais quando o sistema solicitar e a sua avaliação considera dois componentes:

- Todas as válvulas estão abertas (vaa);
- O gás chega aos bocais (gaa).

Os factores que influenciam o desempenho de cada componente são os indicados no QUADRO I.

QUADRO I - Factores que influenciam a aplicação do agente do sistema de extinção automático.

Componente	Factores que influenciam o desempenho do componente
vaa	- supervisão das válvulas; - a atitude do pessoal da ETRS da Meia Serra; - as políticas de manutenção.
gaa	- dimensão da rede; - regularidade de limpeza da tubagem; - manutenção e inspecção

Na avaliação da aplicação do agente (AA) verifica-se que a atitude da empresa mostra uma preocupação genuína no que concerne à segurança contra incêndio em geral e para a manutenção de todos os sistemas de protecção em particular. Olhando para o registos de manutenção verifica-se atenção e regularidade na documentação. As válvulas são supervisionadas e um exame das práticas da empresa sugere que após uma avaria, as válvulas têm uma probabilidade alta de serem reabertas rapidamente. A probabilidade de que todas as válvulas estejam abertas quando necessárias durante um incêndio, foi avaliada em 85% (vaa=0,85). O sistema tem manutenção regular e não mostra sinais de restrições na passagem do gás nas tubagens. Dado que existe um incêndio e o incêndio é confirmado pelo menos por dois detectores ou é accionada a botoneira de descarga na sala de engenharia, estima-se que quase de certeza o gás vai fluir nas tubagens, sendo atribuída a probabilidade de 95% (gaa=0,95). Vamos

admitir que a activação do segundo detector decorre quando o incêndio tem uma potência calorífica de 300 kW. Estas probabilidades podem então ser aplicadas a uma rede SVN permitindo assim a descrição do desempenho da aplicação do agente extintor, como se indica na figura 3.

Durante o processo de avaliação, a probabilidade da aplicação do agente, ou seja a fiabilidade, é normalmente determinada de uma só vez para o mesmo edifício ou zona com o mesmo sistema de extinção automático, independentemente do número de espaços do edifício (R. W. FITZGERALD, 2004).

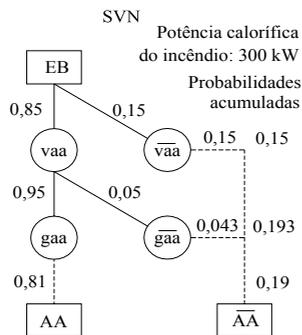


Fig. 3 - Rede SVN para aplicação do agente extintor no compartimento C1 para um incêndio de potência calorífica de 300 kW.

Dado que o gás chega aos bocais (AA), a avaliação do desempenho da curva A examina a eficácia operacional do sistema (AC). A análise da SVN examina o sucesso de extinção do sistema de extinção por gás para um incêndio de potência calorífica específica. A análise centra-se em dois componentes:

- Todos os bocais que protegem a sala de engenharia vão libertar o gás (fac) antes que o incêndio cresça para uma área maior;
- O gás que flui dos bocais é em quantidade suficiente, pressão e duração, para extinguir o incêndio (cac).

Os factores que influenciam o desempenho de cada componente são os indicados no QUADRO II.

Na avaliação da eficácia operacional (AC) verifica-se que o sistema é de confiança dada a sua concepção. As características do incêndio no servidor levam à produção rápida de fumos e estima-se como uma certeza a probabilidade de actuação dos detectores de fumo da sala de engenharia para um incêndio de potência calorífica de 300 kW. Desde que não seja pressionada a botoneira de retardo do sistema, é escolhido o valor de  $P(\text{fac})=0,80$ . Dado que o sistema de libertação do gás actua, é relativamente elevada a probabilidade de que o volume de gás controle o incêndio para uma potência calorífica de 300 kW,  $P(\text{cac})=0,85$ . Aplicando estas probabilidades a uma rede SVN como indicado

QUADRO II - Factores que influenciam a aplicação do agente do sistema de extinção automático.

Componente	Factores que influenciam o desempenho do componente
fac	- incêndio (tipo e taxa de crescimento) na medida em que influencia a detecção automática e consequente o despoletar do mecanismo de lançamento do gás; - corrosão ou pintura dos difusores; - volume da sala.
cac	- solicitação do compartimento (n.º de difusores) - adequação do sistema de gás (volume de armazenamento, pressão, extensão da rede); - alterações à instalação inicial; - influência da corrosão da tubagem; - interrupção do sistema de distribuição devido a factores externos (sismos, explosões, vandalismo, etc)

na figura 4 obtemos a descrição do desempenho da eficácia operacional do sistema.

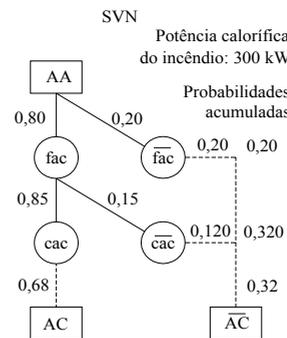


Fig. 4 - Rede SVN para a eficácia operacional do sistema de extinção automático do compartimento C1 para um incêndio de potência calorífica de 300 kW.

A combinação da fiabilidade do sistema (AA) com a eficácia operacional (AC), indicada na rede da figura 5, fornece a probabilidade de sucesso do sistema de extinção automática em extinguir um incêndio no C1 com potência calorífica de 300 kW.

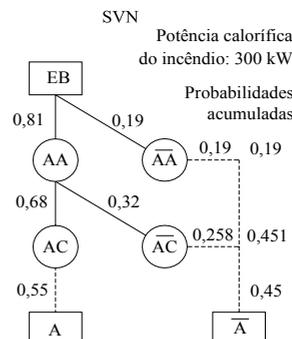
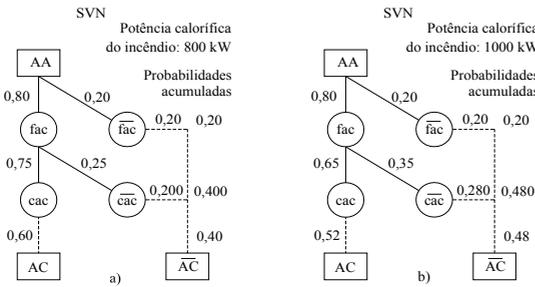


Fig. 5 - Rede SVN para a extinção automática do compartimento C1 para um incêndio de potência calorífica 300 kW.

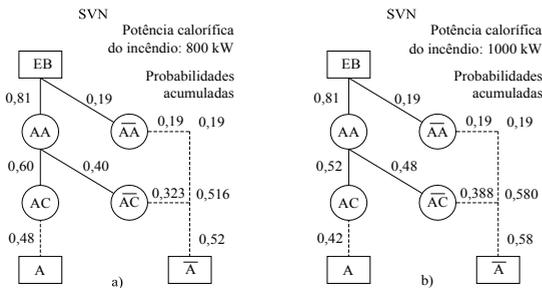
Para as potências caloríficas de 800 kW e 1000 kW vamos adoptar os mesmos valores de AA e fac, admitidos

anteriormente. Para a componente cac para o incêndio de potência 800 kW a  $P(cac_{800kW})=0,75$  e para o incêndio de potência 1000 kW a  $P(cac_{1000kW})=0,65$ , porque à medida que o compartimento vai sendo tomado pelas chamas a descarga do gás não tem o mesmo efeito inibidor do oxigénio do que quando descarregado na fase inicial do incêndio, pelo que obtemos as redes SVN indicadas na figura 6.



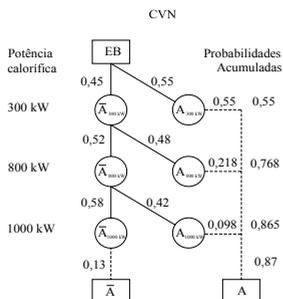
**Fig. 6** - Rede SVN para a eficácia operacional do sistema de extinção automático do compartimento C1 para um incêndio de potência calorífica de 800 kW a) e 1000 kW b).

Com a eficácia operacional do sistema determinada para o incêndio de potência calorífica de 800 kW e 1000 kW, podemos determinar a probabilidade de sucesso do sistema de extinção automático, em extinguir um incêndio no compartimento C1 para estas potências, como indica a figura 7.



**Fig. 7** - Rede SVN para a extinção automática do compartimento C1 para o incêndio de potência calorífica de 800 kW a) e 1000 kW b).

Posto isto, podemos calcular o desempenho do sistema de extinção automático (A) para a sala de engenharia através de uma rede CVN para o cenário de incêndio idealizado, como indica a figura 8.



**Fig. 8** - Rede CVN para a extinção automática do incêndio no compartimento C1.

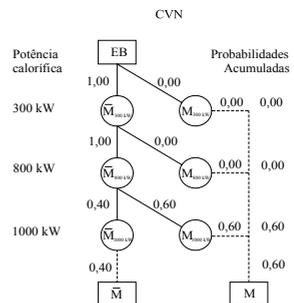
Conclui-se assim que o sistema de extinção automático tem 87% de probabilidade de sucesso em evitar o FRI no compartimento C1.

*Curva de extinção manual pela corporação de bombeiros da localidade onde se situa a estação (M)*

A curva M avalia a probabilidade da corporação de bombeiros da localidade onde se situa a estação de tratamento, extinguir o incêndio no compartimento de origem. Esta análise não contempla apenas o corpo de bombeiros só por si mas também a influência da arquitectura do local e a eficácia dos dispositivos de extinção disponíveis. No entanto podemos resumir simplificadaamente em três passos a construção da curva:

- Avaliar a potência calorífica que o incêndio terá quando ocorrer a aplicação do agente. Como o tempo de chegada do corpo de bombeiros ao local é inferior a 30 min, o que é um tempo longo, vamos considerar 800 kW para a potência calorífica do incêndio neste caso;
- Seleccionar uma potência calorífica do incêndio apropriada para avaliar a probabilidade de sucesso da extinção manual. No nosso caso adoptaremos a potência calorífica do incêndio do FRI, porque a partir daí torna-se insustentável a permanência de pessoas no compartimento, mesmo os bombeiros, ou seja a partir de 1000 kW;
- Até à potência calorífica de 800 kW a probabilidade de extinção manual do incêndio é nula e a partir do FRI a probabilidade de extinção manual antes de se atingirem as condições insustentáveis no compartimento é de 60%.

Aplicando estes valores a uma rede CVN obtemos o cenário de supressão manual indicado na figura 9.



**Fig. 9** - Rede CVN para a extinção manual pelos bombeiros do incêndio no compartimento C1.

*Limite do movimento da chama na sala de origem (L)*

Os procedimentos para o cálculo e construção da curva L não são mais do que a soma das probabilidades

acumuladas das curvas I, A e M para as potências caloríficas de incêndio seleccionadas, como indica a figura 10.

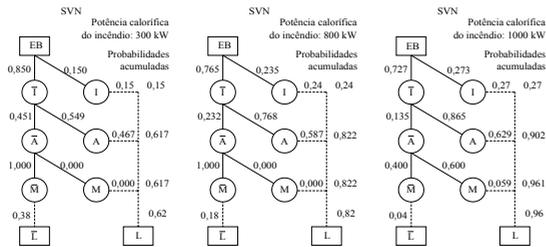


Fig. 10 - Rede SVN para a propagação do incêndio no compartimento C1 para as potências caloríficas de incêndio de 300, 800 e 1000 kW.

Na figura 11 é indicada a representação gráfica das curvas I, A, M e L para o compartimento de origem C1. Da análise da figura pode concluir-se que dado o EB no compartimento C1 haverá 96% de probabilidade de sucesso em evitar o FRI.

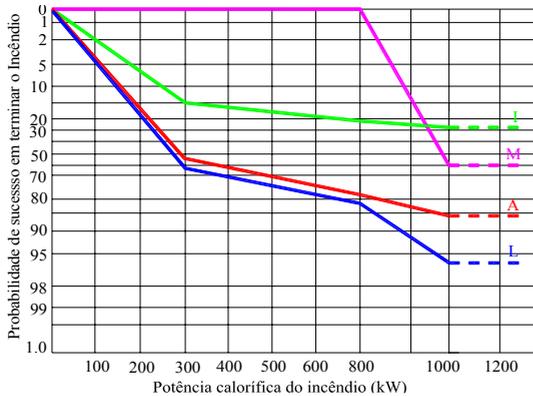


Fig. 11 - Rede SVN para a propagação do incêndio no compartimento C1 para as potências caloríficas de incêndio de 300, 800 e 1000 kW.

*Limite do movimento da chama para além da sala de origem*

A principal questão que se coloca na avaliação das curvas I, A e M para os espaços além do compartimento de origem são os modos de falha das barreiras. Uma barreira é qualquer superfície que possa retardar ou prevenir o desenvolvimento das chamas ou fumo de um espaço para o espaço adjacente. Em qualquer instante do tempo, a barreira só pode encontrar-se num de três estados. Considerando o potencial de ignição do lado não exposto, os três estados são os seguintes:

- A barreira apresenta sucesso (B). A ignição não ocorre no espaço adjacente;
- A barreira experimenta uma grande falha (falha  $\bar{D}$ ) que pode causar um fluxo massivo de gases para o espaço adjacente. Aqui uma abertura grande (como uma porta aberta, ou colapso parcial) permitirá um afluxo substancial de energia calorífica para o compartimento adjacente.

Este afluxo massivo de energia térmica da falha pode resultar no desenvolvimento pleno do incêndio num curto período de tempo;

- A barreira experimenta uma falha pequena e localizada (falha  $\bar{T}$ ) que pode causar a ignição no espaço adjacente. Como exemplos de falhas  $\bar{T}$  podemos ter uma ou mais fendas que podem abrir, um orifício pequeno que pode se desenvolver, um orifício que possa existir antes do incêndio, ou pode ser transmitido calor suficiente através da barreira para que uma ignição possa ocorrer no lado não exposto. Se a falha  $\bar{T}$  ocorrer, o ponto quente da ignição pode resultar num desenvolvimento normal do incêndio no espaço adjacente.

Vamos avaliar o desempenho da barreira parede que separa o compartimento C1 do C2 para o evento crítico ponto de tecto (potência calorífica do incêndio de 800 kW). Vamos considerar o que se passa quando ocorre uma falha  $\bar{D}$  na barreira. Um fluxo massivo de gases entra rapidamente para o compartimento C2 permitindo que rapidamente se atinja o FRI, pelo que a  $P(I \bar{D}_{800kW})_2=0,0$  ou seja, a probabilidade de auto-extinção é nula. O mesmo se passa com a probabilidade do sistema automático de extinção por gás porque se este não extinguiu o incêndio no compartimento C1 também não o fará no C2 porque alguma coisa correu mal (válvulas fechadas, encravamento do sistema de despoletagem, etc.),  $P(A \bar{D}_{800kW})_2=0,0$ . Quando o incêndio tem a potência calorífica de 800 kW no compartimento C2, a probabilidade de extinção pelos bombeiros não será nula, visto que estes chegam ao local quando no compartimento C1 o incêndio tem uma potência calorífica de 800 kW. No entanto a probabilidade de extinção no compartimento C2 antes que atinja o FRI será baixa para a falha do tipo  $\bar{D}$ ,  $P(M \bar{D}_{800kW})_2=0,20$ .

Quanto à falha  $\bar{T}$ , vamos assumir a existência de uma caixa de derivação de electricidade 10 x 10 cm encastrada na barreira (parede). A ignição através de um ponto quente irá causar quase sempre o desenvolvimento normal de um incêndio no compartimento adjacente, ficando o ambiente enfumado e quente, pelo que o incêndio cresce mais facilmente comparativamente com o compartimento de origem,  $P(\bar{T}_{800kW})_2=0,95$ . Quanto ao sistema automático de extinção o raciocínio é idêntico ao da falha  $\bar{D}$  pelo que  $P(A \bar{T}_{800kW})_2=0,0$ . Quanto à extinção manual pelos bombeiros, como a barreira retarda a propagação do incêndio, esta permite que os bombeiros tenham mais tempo para o controlo efectivo do incêndio no compartimento C2. Vamos adoptar  $P(M \bar{T}_{800kW})_2=0,70$ .

Vamos assumir que para o FRI, devido às suas características construtivas a barreira apresenta

sucesso de  $P(B_{1,2})=0,70$ , para uma falha  $\bar{D}$ ,  $P(\bar{D}_{1,2})=0,10$  visto que a porta existente normalmente se encontra fechada e para uma falha  $\bar{T}$ ,  $P(\bar{T}_{1,2})=0,20$ .

Na análise do desempenho da barreira parede que separa o compartimento C2 do C3 verifica-se que esta possui um vão envidraçado com vidro normal simples com área de 2 m<sup>2</sup>. Admitindo que para este tipo de vidro a diferença de temperatura entre as faces exposta e não exposta, mantendo a sua integridade, é no máximo 40 °C (J. ALMA`S, 2002), rapidamente esta situação configura numa falha do tipo  $\bar{D}$ , pelo que a probabilidade de sucesso B desta barreira é nula. A probabilidade de ocorrer a falha do tipo  $\bar{D}$  é portanto quase uma certeza,  $P(\bar{D}_{2,3})=0,95$ , obtendo a probabilidade de falha do tipo  $\bar{T}$  um valor residual,  $P(\bar{T}_{2,3})=0,05$ .

Para a falha do tipo  $\bar{D}$  no compartimento C3 a probabilidade de auto-extinção é nula pela mesma razão do compartimento C2,  $P(I\bar{D}_{800kW})_3=0,0$  e a probabilidade de extinção pelo sistema automático também é nula,  $P(A\bar{D}_{800kW})_3=0,0$  porque neste compartimento este sistema não existe. A probabilidade de extinção pelos bombeiros é idêntica à do compartimento C2 para a falha  $\bar{T}$ ,  $P(M\bar{D}_{800kW})_3=0,70$  porque a partir do momento em que os bombeiros se encontram instalados no local com os seus próprios meios a probabilidade de sucesso na extinção do incêndio mantém-se. Para a falha do tipo  $\bar{T}$ ,  $P(\bar{T}_{800kW})_3=0,95$ ,  $P(A\bar{T}_{800kW})_3=0$  e  $P(M\bar{T}_{800kW})_3=0,70$ .

Posto isto estamos em condições de construir a rede que descreve o desenvolvimento do incêndio através do espaço/barreira pelo caminho C1→C2→C3, com as probabilidades descritas anteriormente, como indica a fig. 12.

Na figura 12a encontram-se indicadas as probabilidades adoptadas e na figura 12b os cálculos efectuados.

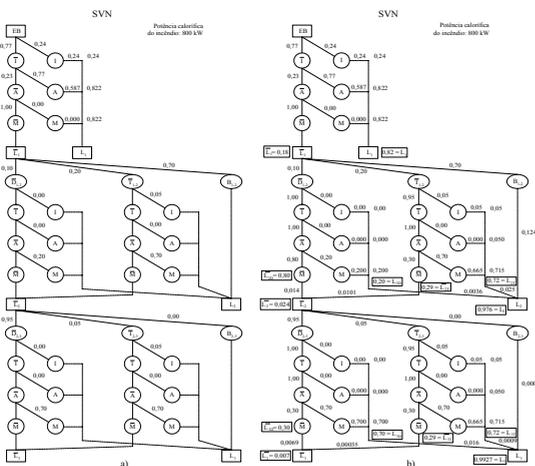


Fig. 12 - Rede SVN para o desenvolvimento do incêndio através dos compartimentos C1, C2 e C3.

O limite da propagação da chama no compartimento C3 será:

$$P(L_3)=P(L_1)+P(B_{1,2} | \bar{L}_1)+P(\bar{L}_1) \times P(\bar{T}_{1,2}) \times P(L_{2T})+P(\bar{L}_1) \times P(\bar{D}_{1,2}) \times P(L_{2D})+P(B_{2,3} | \bar{L}_2)+P(\bar{L}_2) \times P(\bar{T}_{2,3}) \times P(L_{3T})+P(\bar{L}_2) \times P(\bar{D}_{2,3}) \times P(L_{3D})=$$

$$=0,82 + 0,18 \times 0,70 + 0,18 \times 0,20 \times 0,72 + 0,18 \times 0,10 \times 0,20 + 0,024 \times 0,00 + 0,024 \times 0,05 \times 0,72 + 0,024 \times 0,95 \times 0,70 = 0,9927.$$

A rede indicada na figura 12b pode ainda ser resumida na rede que se indica na figura 13a e no gráfico da figura 13b.

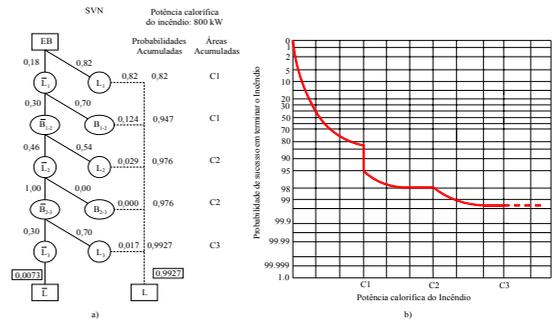


Fig. 13 - Rede SVN resumida para o desenvolvimento do incêndio de potência calorífica 800 kW através dos compartimentos C1, C2 e C3.

Resultados da análise pelo BFSEM

Da análise da figura 13 podemos concluir que para o incêndio de potência calorífica de 800 kW:

- A probabilidade de sucesso em prevenir o incêndio de potência 800 kW no compartimento C1 é de 82%;
- O incêndio que comece no compartimento C1 tem uma probabilidade de sucesso em evitar a ignição no compartimento C2 de 94,70%;
- A expectativa de que a barreira entre os compartimentos C1 e C2 tenha a probabilidade de sucesso de 70% é apenas aplicada aos 18% de probabilidade de que o incêndio não tenha terminado antes do FRI do compartimento C1. Consequentemente  $0,18 \times 0,70=0,124$  é a distância vertical indicada na figura 13b. A probabilidade de que o incêndio possa causar a ignição no compartimento C2 é de  $1,00-0,947=0,053$ , ou seja, um incêndio com origem no compartimento C1 terá a probabilidade de 5,30% de provocar a ignição no compartimento C2;
- No compartimento C2 existe 54% de hipóteses de término do incêndio, aplicado aos 5,30% dos incêndios que passaram a barreira entre os compartimentos C1 e C2. Consequentemente o sucesso de limitar o incêndio a dois compartimentos é de  $0,947+0,029=0,976$ ;
- O ponto final do gráfico indica que dado o EB no compartimento C1, haverá 99,30% de sucesso

em evitar o FRI no C3. O complemento 0,73%, é a probabilidade de que os três compartimentos fiquem perdidos, e é o produto dos valores probabilísticos desde o EB até  $P_3$ , verificando-se assim o critério mínimo de aceitabilidade do risco de incêndio de 2%.

Com este método proporciona-se a informação e o entendimento sobre o comportamento esperado do incêndio para que se possam tomar as melhores decisões. Este conhecimento dá uma visão profunda do planeamento e soluções para gerir ou alterar os riscos de incêndio. O conhecimento claro e o julgamento lógico aumentam a capacidade de comunicar eficazmente com um vasto conjunto de pessoas e profissionais que interagem com o edifício. Compreender - decidir - comunicar é a essência da eficácia da gestão do risco de incêndio (R. W. FITZGERALD, 2004).

### Conclusões

Da aplicação do BFSEM ao núcleo da sala de comando da ETRS da Meia Serra verifica-se que a probabilidade do núcleo ser tomado por um incêndio de potência calorífica 800 kW é inferior a 2%. No entanto, um incêndio na sala de engenharia poderá ser suficiente para comprometer a operacionalidade da Estação. Partindo do princípio que, por um lado, o risco nulo não existe e que por outro, para os cenários descritos e probabilidades admitidas, obtemos para a sala de engenharia (C1) a probabilidade de ocorrência do flashover de 4% ver figura 11, coloca-se a seguinte questão, a probabilidade de ocorrência do flashover no C1 de 4% é aceitável? É uma probabilidade muito baixa, mas a implementação e melhoramento das medidas de segurança contra incêndio como a introdução de uma brigada de incêndio a tempo inteiro na Estação, as acções de formação e sensibilização, manutenções e inspecções, permitem prevenir e controlar os possíveis incêndios que possam ocorrer neste núcleo de extrema importância para a operacionalidade desta Estação.

### Referências bibliográficas:

- ALMA`S, J. (2002) - "*Building Performance Evaluation: an organization for documentation*", Tese de Mestrado, Worcester Polytechnic Institute;
- FITZGERALD, R. W.(2004) - "*Building Fire Performance Analysis*", Wiley;
- MADDEN, M. J. et al., (2005) - "*SFPE Engineering Guide to Application of Risk Assessment in Fire Protection Design*", Society of Fire Protection Engineers, Review Draft;
- PIRES, T. T. e DUARTE, D. (2000) - "*Aplicação do BFEM no gerenciamento dos riscos de incêndio no Núcleo de Processamento de Dados da UFPE*", UFPE ([http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000\\_E0122.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000_E0122.PDF));
- VILELA, R. T. e DUARTE, D. (2000) - "*Análise de risco de incêndio em subestação de energia eléctrica de 230 kV*", UFPE, ([http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000\\_E0018.PDF](http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2000_E0018.PDF)).