

Análise de Risco-Custo-Benefício para Galpão de Expedições

Gianluca De Sanctis¹, Vinicius Sanches Ambrogi², Peter Christen¹

¹ EBP Schweiz AG, Zollikerstrasse, 65 – Zollikon – ZH – Suíça

(gialuca.desanctis@ebp.ch) e (peter.christen@ebp.ch)

² Geoklock Consultoria e Engenharia Ambiental Ltda, Avenida Nações Unidas, 13.797, bloco II, 14º andar – São Paulo/SP - Brasil (vinicius.ambrogi@geoklock.com.br)

OBJETIVOS DO TRABALHO

O presente trabalho teve como objetivo realizar uma análise de risco-custo-benefício para galpão de expedições de cargas em atividade, localizado na Suíça de modo a identificar as potenciais medidas para a redução de riscos e permitir que o galpão seja utilizado para o armazenamento temporário de combustíveis líquidos priorizando os investimentos de melhores custos-benefícios.

O projeto do galpão considerou como premissa o armazenamento e transporte de produtos secos ou líquidos não inflamáveis. No entanto, atualmente, o galpão incluiu em suas atividades o transporte de líquidos inflamáveis, o que exige a reavaliação para verificar a necessidade das instalações e medidas de proteção.

DESCRIÇÃO DO TRABALHO REALIZADO

O galpão possui cinco inquilinos com áreas de diferentes tamanhos e manuseio de mercadorias, em paletes ou embalagens, todos para armazenamento temporário. A seguradora do edifício exigiu uma divisão do galpão, uma vez que o galpão não conta atualmente com nenhuma divisão física.

A modelagem para análise de risco-custo-benefício prevê a definição e cálculos das seguintes probabilidades:

- Ocorrência de incêndio
- Propagação do fogo e extinção de fogo por brigadistas
- Sistema de combate a incêndio
- Expansão do fogo para estocagem adjacente
- Propagação das chamas na área do incêndio
- Plausibilidade
- Cálculo dos danos
- Substâncias inflamáveis no incêndio
- Distribuição das massas de líquidos inflamáveis (classe 3)
- Cálculo do risco por redes bayesianas

RESULTADOS

Modelagem de Riscos

Ocorrência de Incêndio

A ocorrência de incêndios é modelada com base em método estatístico, criado por meio de eventos reais de incêndios em edifícios industriais e comerciais, incluindo galpões. É um modelo empírico que se relaciona diretamente ao volume do edifício.

A taxa de ocorrência de incêndios anual para o galpão estudado foi calculada em 2,1%. Esta probabilidade é distribuída a todos os inquilinos proporcionalmente ao espaço alugado. Neste contexto, o incêndio deve ser visto como evento que pode gerar desde uma pequena perda até a perda total.

Inquilino	Área [m ²]	(%)	Ocorrência anual de Incêndio
Empresa 1	1040	12	0,25%
Empresa 2	480	5	0,11%
Empresa 3	3440	39	0,83%
Empresa 4	1000	12	0,24%
Empresa 5	2790	32	0,67%
Total	8750	100	2,10%

Tabela 1: Probabilidade da ocorrência de incêndio para cada área do galpão

O modelo adotado é considerado conservador, pois não distingue entre galpões produtivos ou de armazenamento, já que produção tende a ter maiores riscos de incêndio quando comparado ao armazenamento. Comparado a modelos estatísticos de outros países como Suécia e Finlândia, a taxa de incêndios situa-se entre ambos e na mesma ordem de grandeza.

Propagação do Fogo e Extinção de Fogo por Brigadistas

Na ocorrência de um incêndio, em sua fase inicial, ele pode ser controlado pelos brigadistas do edifício, sendo por este motivo disponibilizados os itens suficientes para extinção das chamas. Para os bombeiros o sucesso da operação depende da velocidade de desenvolvimento das chamas, quanto mais rápido o fogo se propagar, mais difícil se torna o combate ao incêndio.

A probabilidade de sucesso no combate a incêndios em fase precoce pode ser estimada por dados estatísticos [1] e situa-se entre 39% e 58%. Devido a grande faixa, a probabilidade de sucesso é definida dependendo da velocidade de propagação do fogo. Os valores estão listados na Tabela 2.

Velocidade de propagação do fogo	muito lenta	lenta	média	rápida	ultra rápida
Com sucesso	0,80	0,60	0,50	0,20	0,05
Sem sucesso	0,20	0,40	0,50	0,80	0,95

Tabela 2: Probabilidade de sucesso na extinção do incêndio

Foi realizado um levantamento na literatura [2] sobre as causas, frequências e intensidades de incêndio em galpões diversos. Neste trabalho, apenas os principais incidentes foram estudados, o que leva a presumir que os valores de probabilidade de propagação levantados são superiores à velocidade real, devido, às causas especiais de fogo que são improváveis para este galpão com a utilização prevista. Portanto, a probabilidade de fogo "ultra-rápido" foi ajustada para 5%, sendo as demais corrigidas em função da alteração, listadas na Tabela 3.

Velocidade de propagação do fogo	Valor [kW/s ²]	Probabilidade	Frequência
Muito lenta	0,001334	16%	17%
lenta	0,002778	24%	26%
média	0,011111	28%	30%
rápida	0,044444	21%	22%
ultra rápida	0,177778	12%	5%

Tabela 3: Probabilidade da velocidade de propagação do fogo

Sistema de Combate a Incêndio

Os sistemas de extinção de incêndio são considerados medidas de proteção contra incêndios, tecnicamente viáveis e eficazes, que podem reduzir significativamente a extensão de um incêndio. Isto torna possível, como no presente caso sem a presença de materiais perigosos, dispensar medidas estruturais como

o confinamento de áreas. Dados internacionais sobre a confiabilidade da operabilidade de aspersores mostram valores entre 86% e 99,5% [3]. Para esta análise de risco, foi utilizado o fator 98%. O uso aspersor é utilizado para a análise de sensibilidade.

Sua funcionalidade não é suficiente por si mesma, já que sua ativação depende de uma condição de temperatura. Desta forma, a probabilidade de liberação do aspersor é, se for operacional, ajustado em resposta à velocidade de desenvolvimento do incêndio, em função da altitude dos sprinklers instalados. Os valores estão listados na Tabela 4.

Funcionalidade do sprinkler	Não	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Velocidade de propagação do fogo	Independente	muito lenta	lenta	média	rápida	ultra rápida
Extinção	0%	10%	20%	70%	100%	100%
Sem extinção	100%	90%	80%	30%	0%	0%

Tabela 4: Probabilidade de acionamento dos sprinklers

Expansão do Fogo para Estocagem Adjacente

O histograma apresenta a curva de liberação de calor do material baseada na abordagem estatística t^2 que é limitada pela taxa máxima de libertação de calor (média de $250 \pm 50 \text{ kW/m}^2$; Gráfico 1 - esquerda). Assumiu-se o armazenamento com carga média de $500 \pm 250 \text{ MJ/m}^2$ (Gráfico 1 - direita), isto é suficiente para que o fogo de uma pilha de estocagem atinja uma pilha adjacente (suposição conservadora).

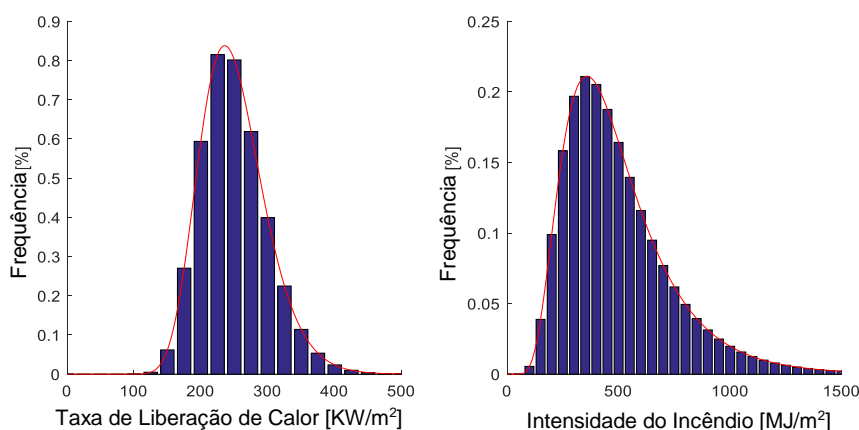


Gráfico 1: Distribuição da frequência de liberação de calor e carga (direita)

O empilhamento no galpão é montado separadamente a uma certa distância. O calor radiante a partir do fogo para um objeto adjacente pode ser calculado com o modelo de ponto de origem (Figura 2 - esquerda). A base para o cálculo é a curva de liberação de calor definida anteriormente. Aqui é assumido conservadoramente que 100% da energia do fogo é transmitida para o objeto através de radiação térmica.

A radiação de calor para o objeto (Figura 1 - direita) é calculada pela transferência de calor por radiação, sendo a ignição dada quando a temperatura da superfície atinge 218°C . Assim, o tempo de expansão do fogo pode ser determinado.

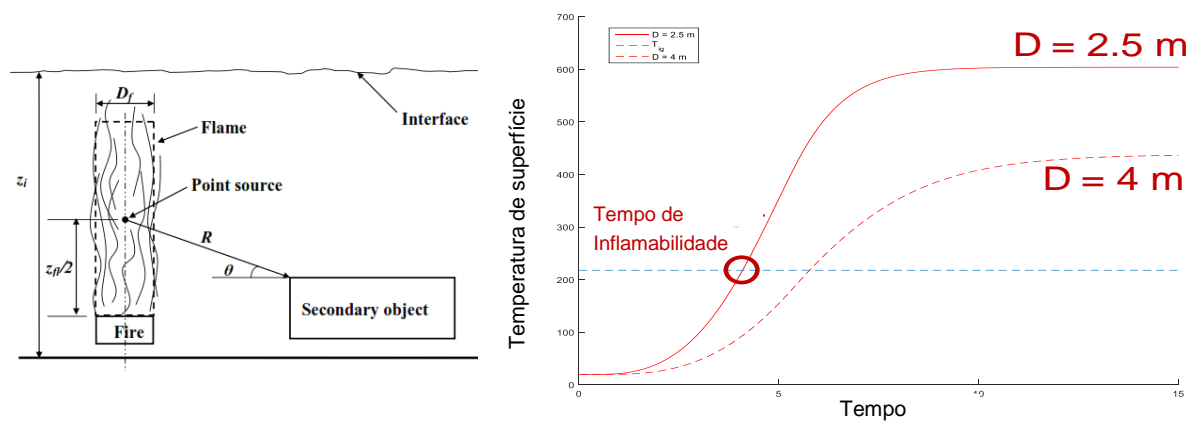


Figura 1: Point-Source-Model e curva de temperatura em função do tempo e distância (direita)

Propagação das Chamas na Área do Incêndio

A velocidade de propagação depende da localização do incêndio. Há três cenários diferentes: a propagação do fogo no canto, na borda e no meio (Figura 2 - esquerda). Com base nesses cenários de propagação em função do tempo, a área de incêndio pode ser determinada (Figura 2 - direita).

O curso da área de incêndio depende dos seguintes fatores:

- propagação do cenário de incêndio (centro, borda, canto)
- taxa de alastramento ("muito lento" até "ultra-rápida")
- distância entre as pilhas
- taxa de liberação de calor do fogo

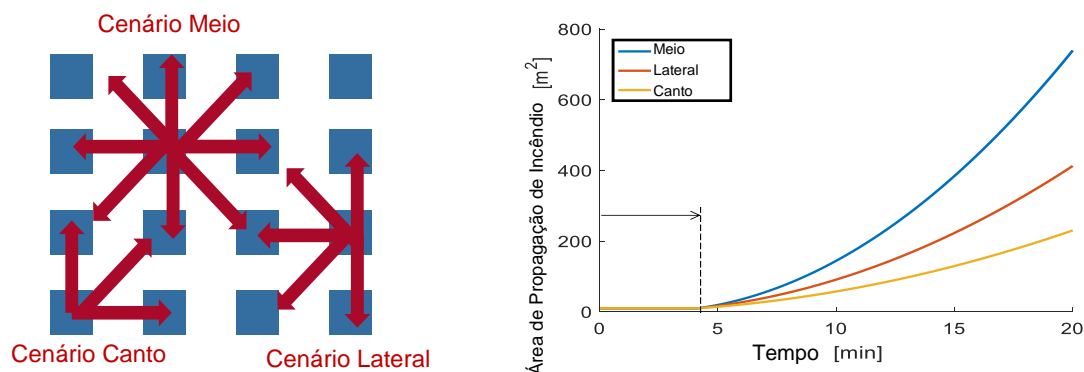


Figura 2: Cenário de propagação do fogo e associação temporal à área (direita)

O aumento temporal na área de incêndio, depende do cenário utilizado para determinar a probabilidade de extinção do incêndio pelos bombeiros. Para determinar uma extensão de danos é assumido que o incêndio não possa ser controlado pelos bombeiros, podendo espalhar por todo o galpão. Se os brigadistas da empresa, como uma possível medida, forem capazes, a propagação é limitado à área do incêndio. A Tabela 5 apresenta a lista de cenários.

Extinção do fogo - bombeiros	Sim	Sim	Não	Não
Contenção do fogo - brigadistas	Sim	Não	Sim	Não
Sem grandes danos	100%	100%	0%	0%
Danos a parte do galpão	0%	0%	100%	0%
Galpão todo	0%	0%	0%	100%

Tabela 5: Probabilidades de propagação do fogo

O sucesso na extinção ou contenção do incêndio pelos bombeiros depende principalmente dos fatores:

- tempo de intervenção (o início do combate ao incêndio)
- tamanho do fogo a ser combatido
- acessibilidade ao fogo
- equipamentos dos bombeiros

A acessibilidade pode ser tomada como garantida devido às exigências regulamentares do galpão. O tamanho do fogo a ser combatido dependente do tempo de intervenção e pode ser determinado pelas curvas de propagação de fogo (Gráfico 2 - direita). O tempo de intervenção depende do tempo de detecção de incêndio e prazos legais [4]: detecção por sensor/alarme de 1 minuto; tempo contingente de 1 minuto, e chegada ao local (80% factível) em 10 minutos.

A Figura 4 ilustra a distribuição de frequência de sucesso na extinção do incêndio associada ao momento da intervenção. Estes eventos são levados em consideração com base na curva de frequência exibida no modelo de risco.

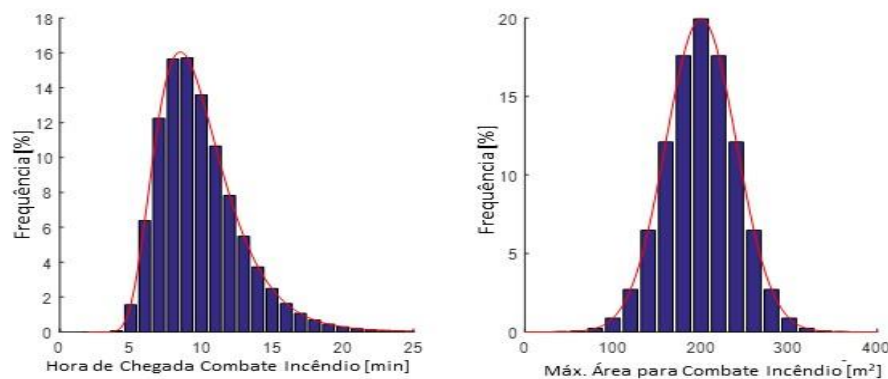


Gráfico 2: Frequência da hora de chegada dos bombeiros para combate ao fogo e frequência da área máxima de combate a incêndio (à direita)

Hosser et al. [5] examinou a área máxima de fogo, o qual pode ainda ser controlado pelos bombeiros. Presume-se como padrão os bombeiros equipados com 1 ABTR, 1 CT, que podem conseguir combater um incêndio com área média de 200 m². Por conseguinte, Hosser et al. traz um grande desvio padrão ao valor médio de (200 ± 40 m²). Isso também se reflete no modelo de risco.

O corpo de bombeiros pode extinguir o incêndio, se a difusão da área de fogo (A_F) no momento do tempo de intervenção (T_{Interv}) é menor do que a superfície máxima de combate a incêndio (A_{max}). A probabilidade de uma ação bem sucedida ocorrer pode ser calculada usando $P(A_F(T_{Interv}) \leq A(A_{max}))$. Esta probabilidade é calculada usando uma análise FORM (*First Order Reliability Method*). Em contraste com os métodos baseados em simulação de Monte Carlo, este método de aproximação tem a vantagem de incluir incertezas estatísticas no cálculo. As seguintes incertezas são consideradas no cálculo:

- carga de incêndio (500 ± 250 MJ / m²)
- pico de libertação de calor de acordo com [1] (250 ± 50 kW / m²)
- tempo de intervenção (Gráfico 2 - esquerda)
- área máxima de combate ao fogo (Gráfico 2 - direita)

Plausibilidade

A probabilidade de sucesso da extinção do incêndio pelos brigadistas é de 91% para o caso sem substâncias perigosas. Para uma rápida velocidade de propagação do fogo é de 75%. Para o inquilino esta probabilidade de sucesso se reduz a 83% se as substâncias perigosas estão presentes e se não forem implementadas medidas de redução de riscos, e para uma rápida velocidade de propagação do fogo de 68%. Se bacias de retenção forem utilizados para substâncias perigosas de Classe 3 a probabilidade do combate ser bem sucedido sobe para 89%.

Cálculo dos Danos

A perda financeira é calculada em função da área de propagação do fogo e é baseado no valor do seguro em torno de 50 milhões de reais.

	total
Pequeno foco de incêndio	17.500
Pequenos danos com extinção do fogo pelos bombeiros	35.000
Perda de parte do galpão	Aprox. 12 milhões
Perda total do galpão	Aprox. 50 milhões

Tabela 6: Danos financeiros dependendo das consequências

Substâncias Inflamáveis no Incêndio

Devido a baixa quantidade de material inflamável estocado no galpão em relação a quantidade total (cerca de 1,6% do total), a probabilidade da ocorrência de fogo no local onde o material perigoso é armazenado é muito baixa. Mesmo assim, para reduzir ainda mais esta probabilidade é recomendada a eliminação das fontes de ignição (instalações e tomadas elétricas, etc.) das proximidades dos materiais perigosos. Sendo isto assegurado, pode-se assumir que não há ignição direta na área de instrumentação da superfície de apoio ao manuseio dos materiais perigosos.

Sendo assim, mesmo que as substâncias perigosas estiverem presentes, elas podem não ser diretamente envolvidas em um incêndio. Para calcular esta probabilidade é assumido que o fogo se inicie numa sala por acidente. Uma substância perigosa será envolvida no incêndio, se ela estiver a menos que 5 m de área de incêndio (Figura 3). A área de incêndio de referência é assumida no meio de 200 m^2 com um desvio padrão de 40 m^2 . Isto corresponde à máxima área possível de combate pelo corpo de bombeiros. Se a área de fogo é maior, o corpo de bombeiros não pode apagar e assume-se perda total.

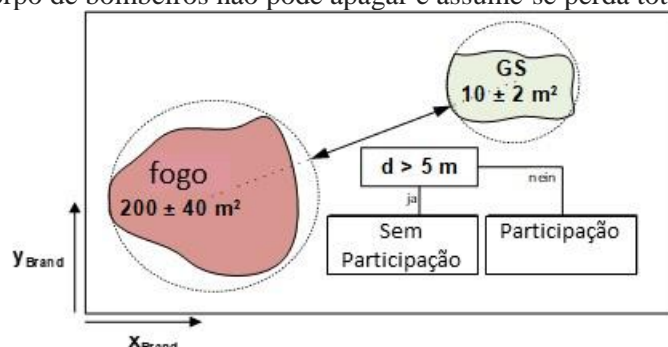


Figura 3: Frequência da hora de chegada dos bombeiros para combate ao fogo e frequência da área máxima de combate a incêndio (à direita)

Um inquilino com uma pequena área tem maior probabilidade de ser atingido por um incêndio originado em materiais perigosos, presentes em áreas subjacentes a dele, porque a área de incêndio é proporcionalmente maior em relação ao espaço alugado.

Inquilino	Área	Participação em Área	Participação de materiais perigosos
Empresa 1	1040	12%	42%
Empresa 2	480	5%	57%
Empresa 3	3440	39%	15%
Empresa 4	1000	12%	43%
Empresa 5	2790	32%	19%

Tabela 7: Probabilidade de participação de materiais perigosos num incêndio

Distribuição das Massas de Líquidos Inflamáveis (Classe 3)

A distribuição estatística representa o número de vezes que uma certa quantidade de líquidos inflamáveis, em caso de incêndio é manuseada e foi determinado a partir de observação do armazenamento. As distribuições são úteis para modelar casos extremos que não ocorreram no período de observação.

Produto Perigoso Classe 3	Distribuição	Massa média [kg]	90%-fração [kg]	Inquilinos
Sem	-	0	0	todos
Pequeno	Lognormal	217	326	2 e 5
Médio	Lognormal	266	604	1 e 4
Grande	Exponencial	934	2.150	3

Tabela 8: Distribuição estatística tendo em conta a quantidade de líquidos inflamáveis

Se líquidos inflamáveis estiverem envolvidos num incêndio, o principal risco é dos recipientes serem danificados pelo efeito de calor e, assim, vazarem. Adotando-se uma premissa conservadora, de que todos os vazamentos de fluído imediatamente começam a queimar e também contribuam para a área de incêndio de materiais não perigosos. Para o cálculo, uma espessura de poça de 5 mm foi definida. Assim, 100 l de líquidos inflamáveis geram uma poça de incêndio de 20 m². Os líquidos inflamáveis, assim como os sólidos inflamáveis, têm uma liberação de calor mais elevada, também a probabilidade de combate pelos bombeiros diminuiu. Neste caso é modelado pela redução da superfície máxima de combate a incêndios de 150 ± 30 m².

Cálculo do Risco por Redes Bayesianas

Redes Bayesianas representam as dependências entre as variáveis de risco que influenciam cadeias de eventos e, em extensão gráfica, consideram também a posição cujas frequências e probabilidades se interceptam e comunicam. Então, as redes representam bem as relações complexas entre as variáveis interdependentes de forma clara e promove uma abordagem sistemática para a avaliação de risco. A base de cálculo de redes Bayesianas é a mesma usada nos métodos convencionais, tais como árvores de evento e falhas, mas oferece as seguintes vantagens:

- Abordagem sistemática à atribuição de probabilidades;
- Fácil introdução de cenários adicionais;
- Aliviar análises de sensibilidade e controles de plausibilidade, variando as probabilidades dos estados individuais; e
- considerando vários efeitos interdependentes.

Os eventos individuais e variáveis do sistema são chamados de caixas (Figura 4) e têm diferentes estados. As barras nos nódulos denotam a frequência de uma condição. Setas entre as caixas denotam sua dependência, ou seja, o estado de um nó depende do estado do outro. O cálculo das frequências condicionais da condição é "sim" para todos os nós e pode ser calculada da seguinte forma:

$$p(ja) = p(ja|ultra\ slow) \cdot p(ultra\ slow) + \\ \dots \\ p(ja|ultra\ fast) \cdot p(ultra\ fast)$$

A rede Bayesianas, que é utilizada para o cálculo do risco é apresentada na Figura 6. As caixas em vermelho descrevem a cadeia de eventos. As caixas em amarelo indicam a extensão do fogo (extensão do dano), bem como os danos e são baseados na Tabela 5 e 6. A perda esperada na caixa "dano" é consistente com o risco. As caixas verdes referem-se às várias medidas. Dependendo da abordagem que eles tenham, é definido como "não" (não disponível) e "sim" (disponível). Para o estado inicial está tudo pronto para "não".

Os parâmetros azuis definem o estado ou o cenário considerado. Por exemplo, o risco de um inquilino específico pode ser encontrado, ou o caso de vistas sem substâncias perigosas.

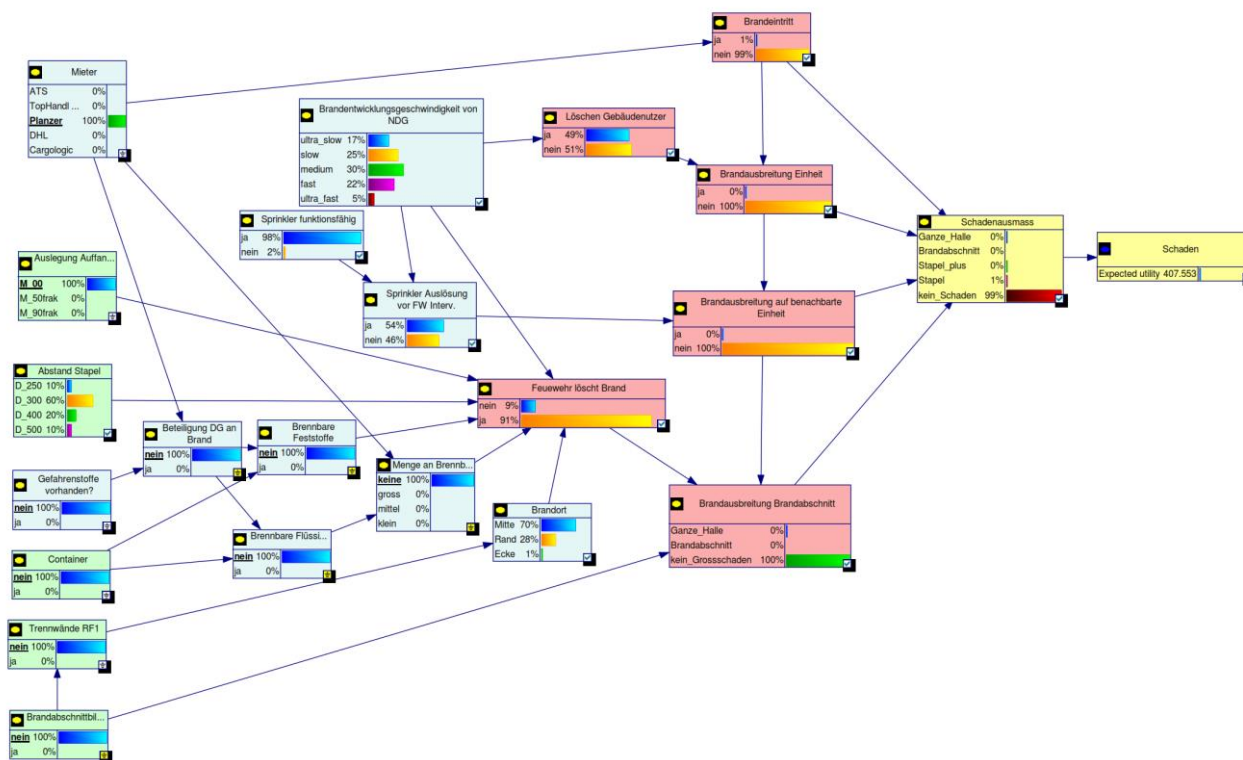


Figura 4: Rede Bayesiana

RESULTADOS OBTIDOS

Análise de Custo-Efetividade

O objetivo da análise custo-efetividade no projeto é de recomendar medidas de prevenção de incêndios que minimizem o custo total, ilustrado no Gráfico 3. Arbitrar um alto nível de redução de risco não é viável, já que os custos das medidas superam os custos das perdas. Uma solução ótima pode ser encontrada através da minimização do custo total e representa um equilíbrio entre os custos de medidas e danos esperados. Esta abordagem também tem sido aplicada em conexão com a revisão dos regulamentos de incêndio em 2015 na Suíça ("Otimização econômica na proteção preventiva contra incêndio" [6]) e corresponde à prática habitual em outras áreas relacionadas à segurança, por exemplo, na segurança no tráfego de veículos terrestres.

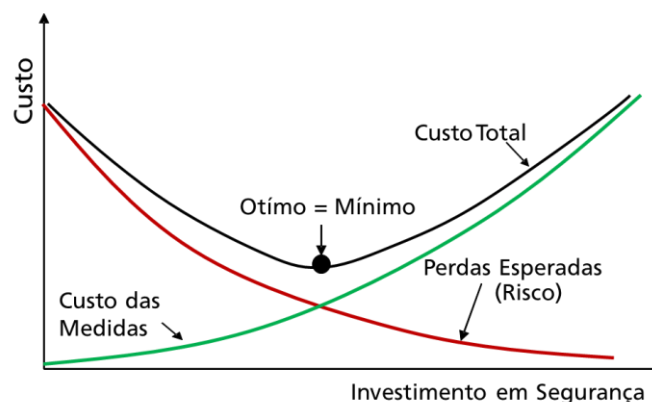


Gráfico 3: Análise custo-efetividade para a avaliação das medidas ótimas

Para a análise de custo-benefício, é necessário quantificar os riscos plausíveis. A análise julga o risco a ser considerado como danos à propriedade e é expressa por dano causado pelo fogo em Reais por ano. Só danos ao edifício são considerados, os demais danos materiais não estão considerados, mas pode-se supor que as recomendações de medidas efetivamente reduzam o risco da mesma forma.

Custo Mínimo

As medidas são úteis apenas com seus custos relativos à redução de riscos. A partir da soma dos custos anuais K e riscos R, o custo total anual $K + R$ pode determinar os conceitos individuais. A abordagem ideal é a que possui o custo total mínimo (abordagem custo marginal). A abordagem usual está no encontro das curvas do custo em Reais versus redução nos danos na base anual.

As despesas anualizadas (rendas) estão apresentadas na Tabela 9. O custo de medidas com conceitos de "dique" e "norma" são o mesmo para todos os inquilinos. Como em cada inquilino um dique é proposto, o custo de compartimentação de fogo foi distribuído a todos os inquilinos igualmente.

Inquilino	Dique [R\$/ano]	Dique+ [R\$/ano]	Container [R\$/ano]	Norma [R\$/ano]
Empresa 1	100%	137%	466%	1807%
Empresa 2	100%	157%	708%	2745%
Empresa 3	100%	111%	135%	523%
Empresa 4	100%	144%	551%	2139%
Empresa 5	100%	212%	1402%	5438%
Total	100%	130%	370%	1437%

Tabela 9: Custos das medidas em cada abordagem

A informação sobre o risco e o custo mede a relação custo-eficácia, e medida proporcionada pode ser determinada (abordagem de custo marginal - Gráfico 4), em um, assim chamada, diagrama de custos de risco por meio do custo marginal.

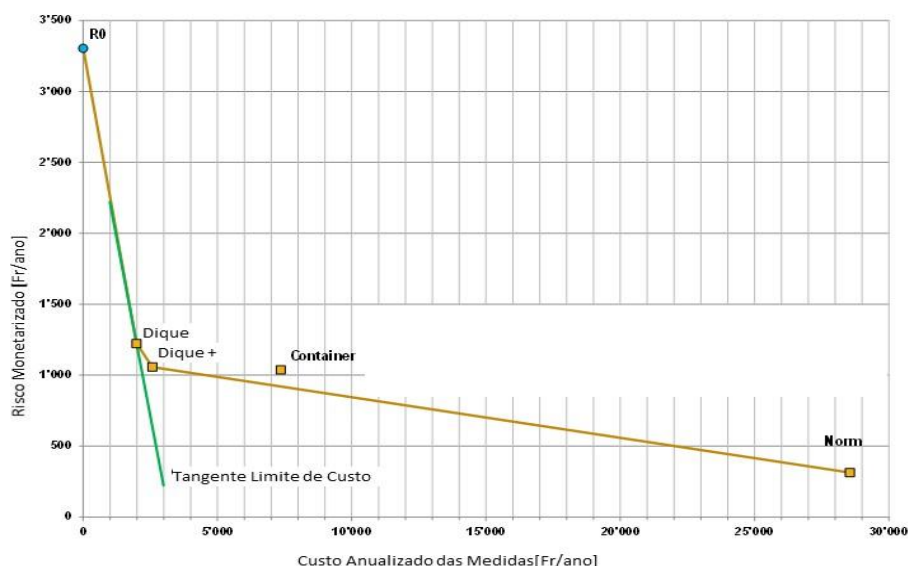


Gráfico 4: Diagrama de risco e custo com conceito de custo-efetividade

No gráfico 4, o dique é a melhor medida custo-efetiva. Os custos marginais sobem massivamente para as medidas Container ou Norma. O Dique + com um custo-benefício: 1:1,2 é comparável ao Dique, o qual traz uma maior aversão ao risco e é uma medida comparativamente plausível.

A Tabela 10 apresenta a rentabilidade para cada medida. O conceito Dique+ é eficaz da mesma forma e tem quase o mesmo custo total do conceito Dique. A abordagem padrão (Norma) tem os maiores custos totais, pois apresenta custos de investimento relativamente elevados pois considera as seções de incêndio. Para galpões de armazenamento temporário não é recomendável a implementação rigorosa das

normas e diretrizes, pois estas referem-se a galpões que contenham as substâncias em tempo permanente e não apresentam danos proporcionais ao tempo de permanência.

Inquilino	Perdas com produtos perigosos [R\$/ano]	Dique [R\$/ano]	Dique+ [R\$/ano]	Container [R\$/ano]	Norma [R\$/ano]
Empresa 1	100%	183%	222%	635%	2290%
Empresa 2	100%	290%	406%	1627%	6093%
Empresa 3	100%	74%	76%	87%	270%
Empresa 4	100%	117%	143%	439%	1587%
Empresa 5	100%	106%	122%	414%	1336%
Total	100%	97%	110%	254%	874%

Tabela 10: Rentabilidade das Medidas

Como conclusão o Gráfico 5 apresenta a curva de custo efetividade em referência ao Gráfico 3. A linha amarela e as indica o custo total anualizado das medidas e a linha vermelha os custos anualizados dos riscos. O risco residual é normalmente suportado pelos lucros ou custos evitados. Por todo o galpão, nos conceitos Dique e Dique+ o custo total é semelhante levando os riscos tem uma queda significativa. Isso levanta a questão de saber qual critério pode ser usado (proprietário ou seguro): enquanto proprietário, os custos de investimento estão representados na linha amarela, ao passo que a seguradora assume um risco geral linha vermelha.

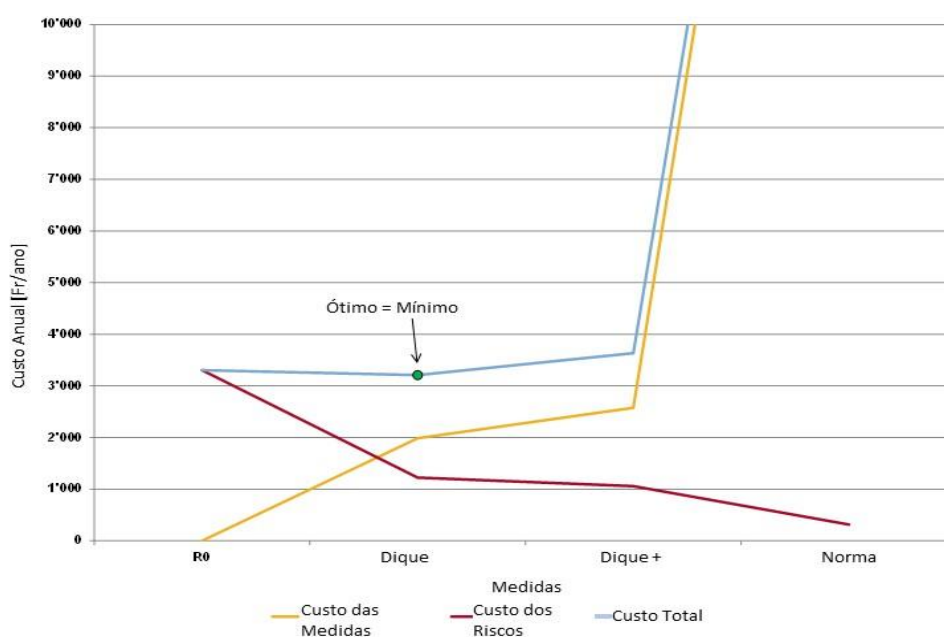


Gráfico 5: Custos totais e escolha do conceito econômico

CONCLUSÕES

O ponto de melhor risco-custo-benefício é indicado pela menor somatória dos custos dos riscos e das medidas, que neste caso aponta para o uso do dique, ou de modo muito similar o dique+. Devido a falta de uma norma que regre as instalações temporárias, normas vigentes regem instalações que possuam substâncias perigosas permanentemente em estoque ou manuseio. Este tipo de estudo permite identificar medidas que possam gerar melhor retorno sobre o investimento, bem como identificar ou elencar a

priorização de medidas frente aos riscos aceitáveis ou mesmo subsidiar decisões quanto a alternativas que requerimentos para medidas de redução de risco que não estejam cobertos por requisitos legais ou normativas vigentes.

Bibliografia:

- [1] G. DE SANCTIS, Generic Risk Assessment for Fire Safety - *Performance Evaluation and Optimisation of Design Provisions*, PhD Thesis, ETH Zurich (2015).
- [2] P.G. HOLBORN, P.F. NOLAN, J. GOLT - *An Analysis of Fire Sizes, Fire Growth Rates and Times between Events Using Data from Fire Investigations*, Fire Saf. J. 39, pag. 481–524 (2004).
- [3] J.-B. SCHLEICH, L.-G. CAJOT, M. PIERRE, D. JOYEUX, G. AURTENETXE, J. UNANUA, S. PUSTORINO, F.J. HEISE, R. SALOMON, L. TWILT, J. VAN OERLE - *Competitive Steel Buildings through Natural Fire Safety Concepts – Final Report*, ECCS (2002).
- [4] FKS, Feuerwehr 2015 - *Konzeption der FKS*, Feuerwehr Koordination Schweiz (2009).
- [5] D. HOSSER, A. WEILERT, C. KLINZMANN, R. SCHNETGÖKE, C. ALBRECHT - *Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung*, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig (2009).
- [6] VKF, Brandschutzerläuterung - *Bewertung von Brandabschnittsgrößen – Sicherheitsnachweis bei industriellen und gewerblichen Nutzungen*, Berechnungsverfahren (2003).