



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA DO JATO DE TETO EM
UM INCENDIO NO CENTRO DE GERENCIAMENTO DE REJEITOS (CGR)
DA ELETRONUCLEAR

Ana Carolina de Oliveira Coppe

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Nuclear da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores: Antônio Carlos Marques Alvim
Antônio Sérgio De Martin Alves

Rio de Janeiro
Junho de 2018

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA DO JATO DE TETO EM
UM INCENDIO NO CENTRO DE GERENCIAMENTO DE REJEITOS (CGR)
DA ELETRONUCLEAR

Ana Carolina de Oliveira Coppe

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO
CURSO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA ESCOLA POLITÉCNICA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
ENGENHEIRO NUCLEAR.

Examinado por:

Prof. Antônio Carlos Marques Alvim (UFRJ), Ph.D

Dr. Antônio Sérgio De Martin Alves (ETN), D. Sc.

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo (UFRJ), D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

JUNHO DE 2018

Coppe, Ana Carolina de Oliveira

Determinação da Temperatura Máxima do Jato de teto em um Incêndio no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da Eletronuclear / Ana Carolina de Oliveira Coppe - Rio de Janeiro: UFRJ/ ESCOLA POLITÉCNICA, 2018.

X, 39 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Antônio Carlos Marques Alvim

Antônio Sérgio De Martin Alves

Projeto de Graduação – UFRJ/ POLI/ Engenharia Nuclear, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 37-39.

1. Centro de Gerenciamento de Rejeitos. 2. Temperatura Jato de Teto. 3. Modelagem Incêndio. I. Alvim, Antônio Carlos Marques e Alves, Antônio Sérgio De Martin. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Nuclear. III. Determinação da Temperatura Máxima do Jato de teto em um Incêndio no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da Eletronuclear.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Nuclear.

DETERMINAÇÃO DA TEMPERATURA MÁXIMA DO JATO DE TETO EM
UM INCENDIO NO CENTRO DE GERENCIAMENTO DE REJEITOS (CGR)
DA ELETRONUCLEAR

Ana Carolina de Oliveira Coppe

Junho/2018

Orientadores: Antônio Carlos Marques Alvim
Antônio Sérgio De Martin Alves

Curso: Engenharia Nuclear

O objetivo deste trabalho é determinar a temperatura dos gases quentes provenientes de um incêndio causado por uma falha na empilhadeira elétrica na área de descarregamento de embalados do depósito 3 do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da Eletronuclear, localizado no sítio da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), em Angra dos Reis. Estimar essa temperatura, denominada temperatura do jato de teto, é de extrema importância na análise de ocorrência de focos secundários de incêndio, na área de armazenamento do depósito 3, devido ao contato dos tambores contendo rejeito radioativo imobilizado em betume com esses gases. Para análise do incêndio postulado foram utilizados três modelos algébricos, ou seja, os Modelo de Alpert, Heskestad & Delichatsios e L. Y. Cooper. Os valores de temperatura encontrados, correspondentes a cada método utilizado, foram respectivamente iguais a 102°C, 110°C e 121°C, todos abaixo do ponto de fulgor do betume que é 301°C. Foi calculada a probabilidade da temperatura dos gases quentes do incêndio atingir o ponto de fulgor do betume (301°C) e o valor encontrado é igual a 2.10^{-37} . Assim, fica evidente que a probabilidade de ocorrer alvos secundários de incêndio, na área de armazenamento do depósito 3 do CGR, é insignificante.

Palavras-chave: Modelagem Incêndio, Temperatura Jato de Teto, Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR)

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Nuclear Engineer.

Ana Carolina de Oliveira Coppe

DETERMINATION OF THE MAXIMUM CEILING JET TEMPERATURE IN
A FIRE AT ELETRONUCLEAR WASTE MANAGEMENT CENTER

June/2018

Advisors: Antônio Carlos Marques Alvim

Antônio Sérgio De Martin Alves

Course: Nuclear Engineering

The objective of this work is to determine the temperature of hot gases from a fire caused by a failure of the electric forklift in the package unloading area of Radioactive Storage Facility (RSF) 3 of the Waste Management Center of Eletronuclear, placed at Almirante Alvaro Alberto Nuclear Center, in Angra dos Reis. Estimating this temperature, called the ceiling jet temperature, is of extreme importance for the analysis of occurrence of secondary fire targets in the storage area of RSF-3, due to the contact of the radioactive drums containing waste immobilized in bitumen with these gases. For analysis of the postulated fire, three algebraic models were used, that is, Alpert, Heskestad & Delichatsios and L.Y. Cooper Models. The temperature values calculated with each method were respectively 102°C, 110°C, and 121°C. The probability of the temperature of the hot gases of the fire reaching the flash point of bitumen (301 ° C) was calculated as $2 \cdot 10^{-37}$. Therefore, it is evident that the probability of occurring secondary fire targets, in the RSF-3 of the CGR, is negligible.

Keywords: Fire Modeling, Ceiling Jet Temperature, Waste Management Center

Sumário

Lista de Símbolos	x
1 Introdução	1
2 Descrição do cenário de acidente	5
2.1 Descrição do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR)	5
2.2 Postulação do Acidente	8
3 Fundamentos teóricos	13
3.1 Transferência de calor	13
3.1.1 Condução	13
3.1.2 Convecção	14
3.1.3 Radiação Térmica	15
3.2 Leis da Conservação	15
3.2.1 Conservação de massa	16
3.2.2 Conservação de energia	16
4 Características de um incêndio	18
4.1 Conceitos básicos de um incêndio	18
4.1.1 O incêndio	18
4.1.2 Características do incêndio em compartimentos	19
4.2 Jato de teto	21
4.3 NUREG	23
4.4 Modelos para simulações de incêndio	23
4.5 FIVE-Rev1	26
5 Modelos para o cálculo de temperatura dos gases	27
5.1 Modelo de Alpert	27

5.1.1	Validação do Modelo de Alpert	29
5.2	Modelo de Heskestad & Delichatsios	30
5.3	Modelo de Cooper	31
6	Resultados	32
6.1	Dados	32
6.2	Temperatura	33
6.3	Análise do Modelo de Alpert	34
7	Conclusões	36
	Referências Bibliográficas	37

Lista de Figuras

1.1	Representação esquemática do fluxo de rejeitos radioativos gerados nas usinas nucleares Angra 1 e 2	2
2.1	Localização do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) no sítio da CNAAA	5
2.2	Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) contendo os depósitos 1, 2 e 3	6
2.3	Caminhão Munck	9
2.4	<i>Pallets</i> utilizados no CGR	9
2.5	<i>Frames</i> utilizados no CGR	10
2.6	Rack metálico com 4 tambores radioativos no pátio do CGR	10
2.7	Vista interna de área de descarregamento de embalados do depósito 3 do CGR	11
2.8	Empilhadeira elétrica movimentando um rack metálico no pátio do CGR	11
3.1	Representação do balanço de energia em um incêndio	16
4.1	Triângulo do incêndio	19
4.2	Etapas do incêndio	20
4.3	Jato de teto	21
4.4	Esquema simplificado do incêndio no depósito	22
4.5	Comparação dos métodos	25
5.1	Distribuição Normal do valor "verdadeiro" de um determinado parâmetro em um incêndio hipotético	30
6.1	Temperatura máxima do Jato de Teto em função da taxa de liberação de calor	33

6.2	Valores máximos de temperatura do Jato de Teto obtidos com os métodos de Alpert, Heskstad & Delichatsios e L.Y. Cooper	34
6.3	Distribuição Normal da temperatura	35

Lista de Símbolos

H	Altura do Teto
H_c	Potencial Calorífico do Material Combustível
h_c	Coefficiente de Transferência de Calor
K	Condutividade Térmica
M_c	Massa do Material Combustível que Pode Queimar no Incêndio
m_{VC}	Massa do Volume de Controle
\dot{m}_e	Vazão Mássica de Entrada
\dot{m}_s	Vazão Mássica de Saída
\dot{q}_c	Taxa de Liberação de Calor no Compartimento pela Combustão do Combustível
\dot{q}_l	Taxa de Perda de Calor Devido ao Fluxo de Gases Quentes para Fora das Aberturas do Compartimento
\dot{q}_r	Taxa de Calor Irradiado Através das Aberturas
\dot{q}_w	Taxa de Perda de Calor para os Limites do Compartimento
q''_{con}	Fluxo de Calor por Convecção
q''_{rad}	Fluxo de Calor por Radiação
q''_x	Fluxo de Calor por Condução
r	Raio Entre o Centro da Chama e o Ponto para Determinação da Temperatura
T	Temperatura Máxima dos Gases Quentes
T_r	Temperatura do Corpo
T_s	Temperatura da Superfície
T_∞	Temperatura Ambiente
t	Tempo
ϵ	Emissividade Térmica
σ	Constante de Stefan-Boltzmann

Capítulo 1

Introdução

O conceito do átomo existe há muitos séculos. Mas só recentemente começou-se a entender o enorme poder contido nesta minúscula partícula. Nos anos imediatamente anteriores e durante a Segunda Guerra Mundial, a pesquisa nuclear concentrou-se principalmente no desenvolvimento de armas de defesa [1]. Mais tarde, os cientistas se dedicaram a aplicações pacíficas da tecnologia nuclear e aplicaram-na com sucesso a muitos outros fins.

Alguns exemplos da aplicação da energia nuclear são os tratamentos de radioterapia no combate aos diversos tipos de câncer, a irradiação de alimentos, a utilização de radiofármacos na medicina diagnóstica, o uso de traçadores radioativos na agricultura, o emprego da gamagrafia na indústria e no controle de fadiga de aeronaves, o uso de reatores de potência nuclear na propulsão naval, a geração de eletricidade nas centrais nucleares, etc [2].

Na geração de eletricidade, estão atualmente em operação no Brasil, as usinas nucleares Angra 1 e 2 , compondo a Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAEA) que é operada pela Eletronuclear S/A.

A operação dessas usinas está associada à produção de rejeitos radioativos nas formas sólida, líquida e gasosa, que podem ser descartados diretamente na biosfera, ou que precisam ser gerenciados de forma segura, por décadas e até mesmo dezenas de milhares de anos.

O descarte se aplica aos rejeitos com nível de atividade inferior aos limites autorizados pelo órgão licenciador brasileiro que é a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Estes limites são expressos em termos de atividade total ou concentração em atividade e são distintos para cada tipo de radionuclídeo e estado

físico dos rejeitos. Eles são estabelecidos com base em estudos prévios que levam em consideração a solubilidade e a diluição dos rejeitos no meio ambiente, as rotas que percorrem até chegar ao homem, e as doses de radiação resultantes na população circunvizinha [3].

Uma representação esquemática do fluxo de rejeitos radioativos gerados nas usinas nucleares Angra 1 e 2 é mostrada na Figura 1.1.

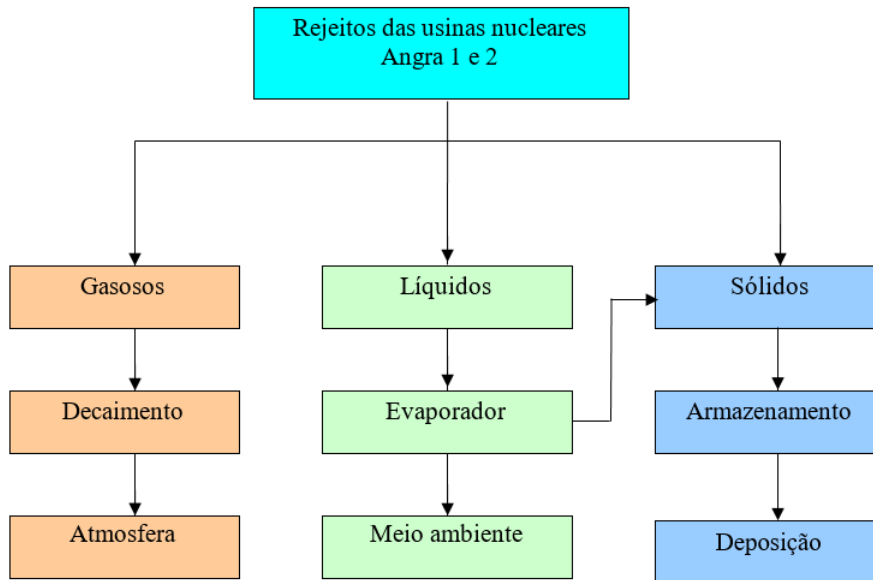


Figura 1.1: Representação esquemática do fluxo de rejeitos radioativos gerados nas usinas nucleares Angra 1 e 2 [2]

Os rejeitos líquidos, que são armazenados inicialmente em tanques de estocagem, são posteriormente processados em evaporadores, dando origem a um condensado de baixo nível de radiação, que, após monitoração, é lançado ao mar como efluente líquido. O outro produto resultante do processo de evaporação é o concentrado do evaporador, rejeito sólido que é armazenado em tanques de concentrado, localizados no interior da usina, para o posterior encapsulamento em tambores de aço de 200 litros, com matrizes de cimento (Angra 1) ou betume (Angra 2).

A dose radiológica em indivíduos do público, devido ao efeito conjunto da liberação de efluentes gasosos e líquidos provenientes de Angra 1 e 2 é da ordem de 10^{-8} Sv [4], sendo 10^4 vezes inferior ao limite da CNEN [5].

Os demais rejeitos sólidos produzidos nas usinas Angra 1 e 2 são os elemen-

tos combustíveis irradiados que ficam armazenados em piscinas com água, as resinas exauridas e filtros utilizados na purificação da água do sistema primário, as ferramentas, peças e vestuário contaminados, etc. Assim, observa-se que os rejeitos que não podem ser descartados na biosfera devem ser encaminhados inicialmente para armazenamento e posteriormente para deposição.

É importante ressaltar que o rejeito radioativo, pronto para armazenamento e posterior deposição, está sempre na forma sólida (vide Figura 1.1). Entretanto, o rejeito sólido pode conter pequenas quantidades de gases ou líquidos, de acordo com os critérios de aceitação definidas pelo órgão licenciador [6].

O armazenamento compreende a estocagem provisória do rejeito radioativo em depósitos iniciais projetados e licenciados para esta finalidade [7]. As atividades operacionais típicas para o armazenamento de rejeito são as rotinas operacionais de recebimento, processamento, enchimento, armazenamento, recuperação e preparação dos embalados de rejeito para a deposição. As atividades de suporte compreendem: proteção radiológica, monitoração e vigilância, teste e exame dos embalados, inspeção de componentes da instalação de armazenagem, manutenção e reparo, colocação de rótulos e manutenção do registro dos embalados [8].

Os rejeitos de baixo e médio níveis de radiação, gerados pelas usinas Angra 1 e 2, são armazenados pela Eletronuclear (ETN) no Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR), localizado no próprio sítio da Central Nuclear Almirante Alvaro Alberto (CNAAA), em Angra dos Reis. O CGR é composto por 3 depósitos iniciais denominados Depósitos 1, 2 e 3. Esses depósitos são projetados pela ETN e licenciados junto à CNEN, antes de sua construção. Para o licenciamento nuclear, é requerida pelo órgão regulador a elaboração dos Relatórios Preliminar e Final de Análise de Segurança, RPAS e RFAS, respectivamente.

Nesses documentos, devem ser incluídos e analisados todos os cenários de acidentes aplicáveis à instalação, dentre os quais se destaca, por sua relevância, o incêndio no veículo de transferência de embalados das usinas Angra 1 e 2 para o CGR, tanto nas rotas de transferência como no interior do Depósito 3 do CGR, sendo este último de interesse para o presente estudo.

Postula-se neste trabalho que, quando uma empilhadeira elétrica estiver na área de descarregamento do Depósito 3, uma falha mecânica/elétrica na mesma

poderá provocar um incêndio na empilhadeira e no embalado que está sendo transferido, evidenciando a possibilidade de que o fogo possa atingir outras áreas do depósito com base no aparecimento de focos secundários de incêndios.

O objetivo deste trabalho é determinar a temperatura dos gases quentes no incêndio para que se possa analisar a ocorrência de focos secundários de incêndio, na área de armazenamento do depósito, devido ao contato dos tambores radioativos contendo rejeito imobilizado em betume com esses gases. Assim, busca-se apurar se os referidos gases quentes podem provocar um aumento de temperatura do betume, até que este atinja o seu ponto de fulgor, ou seja, 301 °C [9].

Para atingir este objetivo, no Capítulo 2 é feita uma descrição do cenário de acidente.

No Capítulo 3 são apresentados os fundamentos teóricos necessários para compreender a modelagem do acidente.

No Capítulo 4 são expostas as características de um incêndio em um compartimento fechado, que é o caso do acidente analisado.

O Capítulo 5 apresenta a metodologia para a determinação da temperatura dos gases quentes no referido incêndio.

O resultado e a sua análise se encontram no Capítulo 6.

E finalmente no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões do estudo.

Capítulo 2

Descrição do cenário de acidente

Este capítulo apresenta a descrição do local em que ocorre o incêndio, os tipos de rejeitos encontrados neste ambiente, além de relatar o acidente postulado e as premissas feitas para modelá-lo.

2.1 Descrição do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR)

O prédio destinado a armazenar os rejeitos radioativos de baixo e médio níveis de radiação no sítio da CNAAA é o Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR), conforme mostrado na Figura 2.1.



Figura 2.1: Localização do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) no sítio da CNAAA

Esse Centro de Gerenciamento de Rejeitos é formado pelos depósitos 1, 2 e 3, conforme mostrado na Figura 2.2.

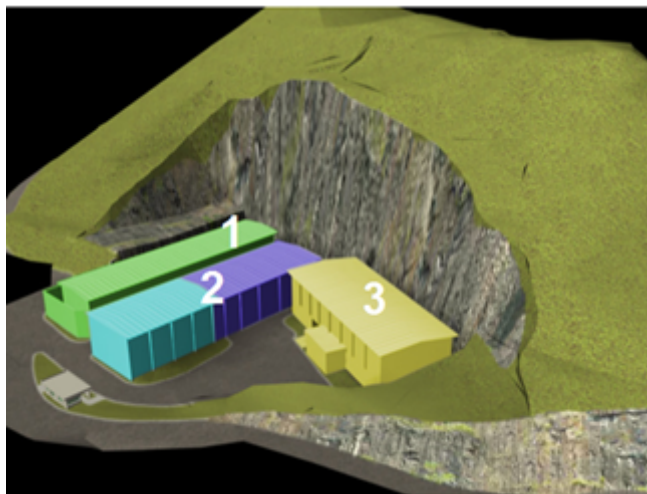


Figura 2.2: Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) contendo os depósitos 1, 2 e 3

Basicamente os rejeitos armazenados no CGR são classificados como [10] :

- **Concentrado do Evaporador (CE)** - Oriundo dos sistemas de tratamento de efluentes líquidos radioativos das usinas. Este rejeito é solidificado em matriz de cimento (Angra 1) e betume (Angra 2);
- **Resinas do Circuito Primário (RP)** - Utilizadas na purificação do sistema de refrigeração do reator. Este tipo de rejeito é incorporado em cimento (Angra 1) e em betume (Angra 2 e 3) para solidificação do conteúdo;
- **Resinas do Circuito Secundário (RS)** - Utilizadas na purificação da purga do gerador de vapor. Este tipo de rejeito em Angra 1 é acondicionado diretamente em tambores. Em Angra 2 e 3, não é prevista a geração deste rejeito, pois as resinas são regeneradas para serem reutilizadas;
- **Filtros (F)** - Tais equipamentos são usados nos sistemas de purificação e tratamento do refrigerante do reator. São acondicionados em tambores de 200 litros e imobilizados em cimento (Angra 1) e betume (Angra 2 e 3);
- **Rejeitos compactados (RC)** - São materiais compressíveis, trituráveis e compactados por prensa hidráulica no interior de tambores de 200 litros, para

redução do volume. Os rejeitos compactáveis são constituídos por materiais plásticos, papéis, luvas, sapatilhas, roupas, etc.;

- **Rejeitos não Compactáveis (RNC)**- São peças, tubos, materiais metálicos, que, além do processo de segregação normal, sofrem processo de corte e res-segregação para a otimização do volume de armazenamento. Para garantir a estabilidade do conteúdo, estes materiais são imobilizados em cimento no interior de caixas metálicas (Angra 1) e em betume no interior de tambores de 200 litros (Angra 2 e 3).

Para o caso de Angra 1 as seguintes embalagens são as principais utilizadas para o encapsulamento dos rejeitos [10]:

- **Tambor de 200 litros** - Embalagens cilíndricas confeccionadas em aço, com capacidade volumétrica nominal de 200 litros, revestimento interno e externo com pintura à base de epóxi, acabamento externo na cor verde noturno. Estas embalagens apresentam as seguintes dimensões: altura total de 875 mm, diâmetro interno de 570 mm e diâmetro externo do anel de expansão de 604 mm. São utilizadas para rejeitos compactáveis e rejeitos imobilizados em matriz sólida de cimento;
- **Caixas de 1 m³** - Embalagens confeccionadas em chapa de aço carbono nas dimensões de 800 mm de largura, 1.300 mm de comprimento e 1.200 mm de altura. A caixa metálica é revestida interna e externamente com pintura à base de epóxi e tem o acabamento externo na cor amarelo ouro;
- **Liners** - Embalagens cilíndricas confeccionadas em aço carbono, com pintura e acabamento à base de epóxi. São equipadas individualmente com um conjunto misturador interno de palhetas e defletores. Apresentam uma altura total de 1301,75 mm e diâmetro externo do corpo de 1206.50 mm, sendo providas de blindagens internas de concreto, variáveis em espessura, acarretando três tipos de embalagens com volumes internos diferentes, dependendo do rejeito a ser solidificado. São equipadas também com tubulação interna para borbulhamento de ar e coletor para remoção de água, sendo este último apenas para a solidificação de resinas.

- **Caixa B-25** - Embalagem metálica (aço carbono ASTM A 1011) de dimensões 1083 mm de largura, 1170 mm de comprimento e 1190 mm de altura, com tampa de fechamento fixada através de cliques ou parafusos, com capacidade volumétrica de $1,50 m^3$ e contendo três dispositivos de levantamento em sua base.

Para o caso de Angra 2, são utilizados apenas tambores de 200 litros, com altura total de 928 mm, diâmetro interno de 560 mm e diâmetro externo do anel de reforço de 621 mm e revestimento interno e externo com pintura à base de epóxi, acabamento externo na cor amarela. São utilizadas para rejeitos compactáveis e rejeitos imobilizados em matriz sólida de betume.

Cada depósito do CGR é responsável por receber determinados tipos de rejeitos. No depósito 1, contendo os módulos A e B, é previsto o armazenamento dos embalados com os menores valores de taxa de dose na superfície, incluindo-se caixas metálicas e tambores de 200 litros. Já o depósito 2, também composto pelos módulos A e B, é projetado para armazenar os *liners* contendo as resinas exauridas do primário de Angra 1.

O depósito 3 é projetado para o armazenamento dos tambores de 200 litros. Da mesma maneira que os depósitos anteriores, ele é também dividido nos módulos A e B. O módulo A, neste caso, é destinado a receber rejeitos compactados de Angra 2 e qualquer embalado de rejeito de Angra 1, como tambores, caixas metálicas ou *liners*. O módulo B, por sua vez, é destinado ao armazenamento dos rejeitos de Angra 2 tratados com betume [11].

2.2 Postulação do Acidente

Conforme pode ser visto, com o auxílio da Figura 2.1, os rejeitos sólidos de baixo e médio nível de radiação, gerados nas usinas Angra 1 e 2, podem ser transferidos para o CGR, utilizando-se uma via de acesso construída para essa finalidade. Utiliza-se, para essa tarefa, um caminhão Munck preparado para o manuseio de embalados com rejeito radioativo (vide Figura 2.3).



Figura 2.3: Caminhão Munck [12]

Ao chegar ao CGR os tambores radioativos são retirados do caminhão e colocados nas superfícies de *pallets* de aço (vide Figura 2.4), utilizando o macaco hidráulico do caminhão Munck.



Figura 2.4: *Pallets* utilizados no CGR [13]

Na sequência, esses *pallets* com 4 tambores são inseridos, com a utilização de

empilhadeira elétrica, no interior de *frames* apresentados na Figura 2.5.



Figura 2.5: *Frames* utilizados no CGR [13]

O conjunto formado por um *pallet* e um *frame* é denominado *rack* metálico, que é mostrado na Figura 2.6.



Figura 2.6: Rack metálico com 4 tambores radioativos no pátio do CGR [13]

Após a montagem do rack metálico, com 4 tambores, o mesmo é transferido para a área de descarregamento do depósito 3 (vide Figura 2.7) com a utilização de uma empilhadeira elétrica (vide Figura 2.8).



Figura 2.7: Vista interna de área de descarregamento de embalados do depósito 3 do CGR [12]



Figura 2.8: Empilhadeira elétrica movimentando um rack metálico no pátio do CGR [13]

Considera-se que, na área de descarregamento mencionada anteriormente, a empilhadeira elétrica apresenta falhas que ocasionam um incêndio, havendo a possibilidade dos gases quentes provenientes do incêndio atingirem alvos secundários.

No caso estudado, esses alvos secundários são os tambores com matrizes de

betume, armazenados nas células de estocagem contíguas à área de descarregamento do depósito. Assim, deve-se verificar se os referidos gases quentes podem provocar um aumento de temperatura do betume, até que este atinja o seu ponto de fulgor, ou seja, 301 °C [9].

Capítulo 3

Fundamentos teóricos

Uma compreensão de vários ramos da física é necessária para poder interpretar os fenômenos de um incêndio [14]. Estes incluem transferência de calor e conservação de energia e massa. Em vista de sua importância, será apresentado nesse capítulo um breve resumo destes conceitos.

3.1 Transferência de calor

Existem três mecanismos básicos de transferência de calor. A condução, que é a de transferência de calor associados aos sólidos. A convecção, que pode ser definida como a transferência de energia que ocorre entre uma superfície sólida e um fluido adjacente que está em movimento. E por último, a radiação, que é a transferência de energia devido à emissão de ondas eletromagnéticas.

Embora seja provável que todos os três mecanismos contribuam em um incêndio, muitas vezes se percebe que há a predominância de algum deles em um determinado estágio, ou num determinado local.

3.1.1 Condução

A condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de um sólido para as menos energéticas, como resultado da interação entre as partículas. O fluxo de calor para um caso de condução em uma direção pode ser descrito, a partir da equação de Fourier [15]:

$$q''_x = -k \frac{dT}{dx} \quad (3.1)$$

A constante K é denominada condutividade térmica. Ela é função do material e da temperatura.

No contexto de segurança contra incêndio, a condução térmica é importante em problemas relacionados à ignição e propagação de chamas sobre os sólidos combustíveis. Ela é também importante para o estudo da resistência ao fogo, onde é necessário o conhecimento de transferência de calor através dos limites dos compartimentos e das estruturas das edificações.

3.1.2 Convecção

A convecção é a transferência de calor de um fluido para uma superfície de um sólido ou vice-versa, devido à diferença de temperatura entre eles. De acordo com a Lei de resfriamento de Newton, o fluxo de calor por convecção q''_{con} , entre uma superfície aquecida com temperatura T_s e um fluido com temperatura T_∞ (na região externa à camada limite de escoamento), pode ser representado pela seguinte equação [16]:

$$q''_{con} = h_c(T_s - T_\infty) \quad (3.2)$$

onde h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície aquecida e o fluido. Observa-se que, ao contrário da condutividade térmica K , o coeficiente h_c não é função do material da superfície aquecida, embora seja função do fluido e do tipo de escoamento. Especificamente, ele depende das características do sistema, da geometria e orientação do sólido e das propriedades do fluido, incluindo parâmetros de escoamento, além de ser também função da temperatura.

Em um cenário de incêndio, o movimento dos gases associados a essa modalidade de transferência de calor é determinado pela flutuabilidade, que também influencia a forma e o comportamento das chamas de difusão. A convecção ocorre em todos os estágios de um incêndio, mas é particularmente importante no início, quando os níveis de radiação térmica são baixos.

3.1.3 Radiação Térmica

A radiação térmica pode ser definida como a transferência de energia por ondas eletromagnéticas. Por isso, ao contrário da condução e da convecção, não requer nenhum meio intermediário entre a fonte de calor e o receptor para a sua transferência. Essa energia pode ser absorvida, transmitida ou refletida em uma superfície em qualquer faixa do espectro.

De acordo com a equação de Stefan-Boltzmann o calor emitido ou absorvido por um corpo depende apenas da temperatura de sua superfície [16]:

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma T^4 \quad (3.3)$$

onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann e ϵ , a emissividade que depende da temperatura e do comprimento de onda da radiação.

A transferência de calor total por radiação dentro do ambiente fechado pode ser escrita como:

$$q''_{rad} = \epsilon \sigma (T_r^4 - T_s^4) \quad (3.4)$$

sendo T_r a temperatura do corpo e T_s a temperatura da superfície.

A radiação térmica se torna o modo de transferência de calor dominante em incêndios quando o diâmetro do leito do combustível é maior que 0,3m, e assim determina o crescimento e disseminação de incêndios em compartimentos [16].

3.2 Leis da Conservação

As leis da conservação são princípios que estabelecem que uma quantidade ou propriedade permanece constante durante ou após uma interação ou processo. Nesta seção, serão abordadas as leis da conservação de massa e energia aplicadas a um volume de controle.

O volume de controle é um volume no espaço que interessa na análise de um processo. No caso deste trabalho, o volume de controle é o recinto fechado em que ocorre o incêndio.

3.2.1 Conservação de massa

O princípio de conservação de massa estabelece que a taxa de transferência de massa em um volume de controle, durante um intervalo de tempo, é igual à variação líquida da massa total durante este tempo, ou seja [17]:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3.5)$$

onde:

m_{VC} - Massa no volume de controle

t - Tempo

\dot{m}_e - Vazão mássica de entrada

\dot{m}_s - Vazão mássica de saída

Essa equação estabelece que, se a massa no volume de controle muda com o tempo, essa mudança se deve à entrada e/ou à saída de massa no referido volume.

Num incêndio, o ar e os produtos de combustão entram e saem dos compartimentos impulsionados pela flutuação.

3.2.2 Conservação de energia

Na Figura 3.1 é mostrada uma representação esquemática do balanço de energia, para um incêndio, no interior de um espaço confinado (compartimento).

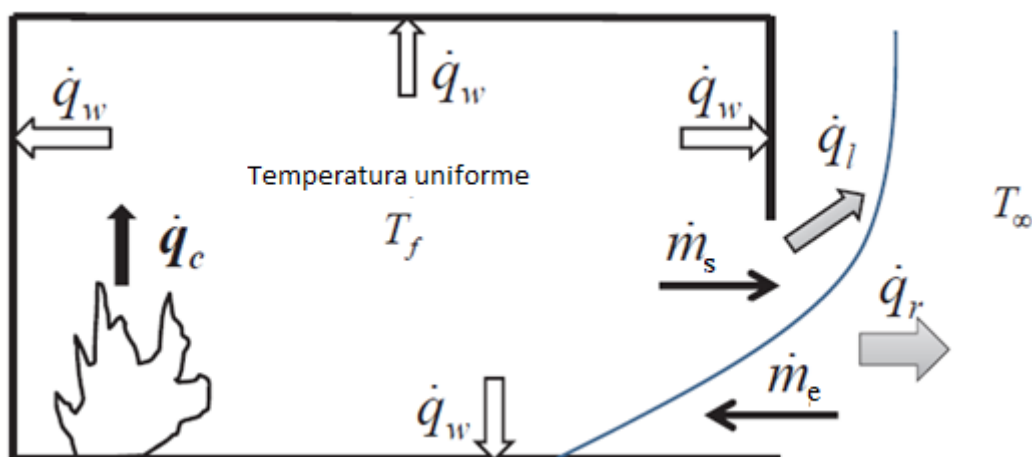


Figura 3.1: Representação do balanço de energia em um incêndio [16]

A primeira lei da termodinâmica estabelece que nenhuma energia pode ser criada ou destruída. Assim, a variação da energia no volume de controle só pode ser provocada pelas taxas de transferência de energia.

O balanço de energia devido a um incêndio no interior de um espaço confinado (vide Figura 3.1) pode ser representado como [16] :

$$\dot{q}_c = \dot{q}_l + \dot{q}_w + \dot{q}_r \quad (3.6)$$

\dot{q}_c - Taxa de liberação de calor no compartimento pela combustão do combustível [kW];

\dot{q}_l - Taxa de perda de calor devido ao fluxo de gases quentes para fora das aberturas do compartimento [kW];

\dot{q}_w - Taxa de perda de calor para os limites do compartimento [kW];

\dot{q}_r - Taxa de calor irradiado através das aberturas [kW].

Capítulo 4

Características de um incêndio

O quarto capítulo deste trabalho trata dos conceitos básicos de um incêndio e dos métodos para modelá-lo segundo o NUREG 1934 [18]. Este documento tem como objetivo descrever modelagens de incêndio aplicáveis, principalmente, a instalações comerciais, tais como as usinas nucleares.

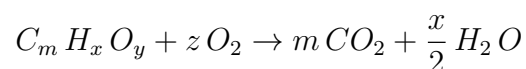
4.1 Conceitos básicos de um incêndio

4.1.1 O incêndio

O incêndio pode ser definido de inúmeras maneiras [19]:

- Queima destrutiva como manifestação de um ou todos os elementos seguintes: luz, chama, calor e fumaça.
- Rápida oxidação de um material no processo químico de combustão, liberando calor, luz e vários produtos de reação.
- Fenômeno de combustão manifestado em luz, chama e calor.
- Reação exotérmica e autossustentável que envolve um combustível sólido, líquido e / ou em fase gasosa.

A reação genérica de combustão para compostos orgânicos, por exemplo, é dada por [20]:



Para que ocorra a combustão é necessário a presença e interação de três elementos, que são o combustível, o oxigênio, que geralmente é fornecido pelo ar e a energia, que é a fonte inicial da ignição e responsável pela manutenção da regeneração térmica. O triângulo do fogo, Figura 4.1, é uma representação gráfica dos elementos básicos da combustão.



Figura 4.1: Triângulo do incêndio

4.1.2 Características do incêndio em compartimentos

O desenvolvimento do fogo em compartimentos é muitas vezes dividido em fases que estão diretamente ligadas aos processos dominantes envolvidos. A ignição é caracterizada em função dos elementos do combustível que está sendo inflamado, entre eles estão a temperatura de ignição, geometria, intensidade da fonte de ignição e propriedades termofísicas que incluem condutividade térmica, calor específico e densidade.

Logo após as chamas serem produzidas e mantidas por um combustível, nota-se a presença de uma pluma de fumaça que transporta massa e calor verticalmente devido à flutuabilidade dos produtos de combustão quente. A pluma arrastará o ar que sobe fazendo com que a fumaça arrefeça e se dilua. Por consequência do aumento da elevação dos produtos de combustão, a quantidade de fumaça transportada aumenta. Depois que uma pluma de fumaça atinge o teto, a fumaça escoar horizontalmente sob o teto em uma camada relativamente fina, referida como jato de teto. Devido ao ar de arrasto e às perdas de calor que ocorrem com a movimentação deste jato, a fumaça esfria de acordo com o crescimento da distância do ponto de im-

pacto da pluma. Desenvolve-se uma camada de ar quente, conhecida também como HGL (*Hot Gas Layer*), no momento em que o jato de teto entra em contato com as paredes ao redor. A pluma fornece calor e massa de fumaça constantemente, o que leva ao aumento da camada de ar quente e, conseqüentemente, da sua temperatura [18]. Um esquema gráfico desses processos pode ser visto na Figura 4.2.

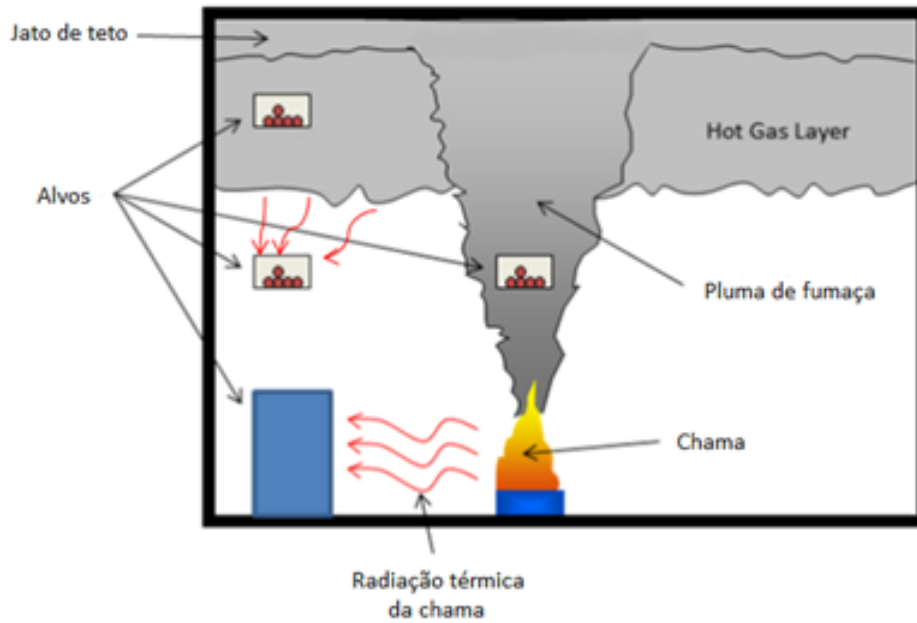


Figura 4.2: Etapas do incêndio

Outros combustíveis não envolvidos no incêndio aumentam suas temperaturas em razão da absorção de calor vindo dos elementos em chamas e do calor radiante do HGL. Ao alcançarem suas respectivas temperaturas de ignição, irão também inflamar.

A circunstância em que a ignição de muitos combustíveis do espaço, causada pelo aquecimento do HGL, ocorre em um curto período de tempo chama-se *flashover* [21].

Vários aspectos do comportamento do incêndio podem ser de interesse na aplicação de modelos de incêndio, dependendo da finalidade da aplicação da modelagem. Determinar os efeitos associados ao aquecimento de um componente submerso na fumaça ou a resposta de detectores instalados no teto são alguns dos assuntos a serem analisados neste contexto. Os aspectos mais comuns do comportamento do incêndio que tipicamente são de interesse em tais análises incluem a taxa de fumaça,

a taxa de preenchimento da fumaça, propriedades da camada de ar quente, propriedades do jato de teto, entre outras. Para a análise que será feita neste trabalho, os aspectos de interesse são as propriedades do jato de teto.

4.2 Jato de teto

Como já mencionado anteriormente, em um cenário onde o incêndio se desenvolve no recinto, uma pluma é formada pela temperatura elevada e pelos produtos de combustão. Os gases quentes da pluma são direcionados para o alto, devido à flutuabilidade, por um movimento verticalmente ascendente que é bloqueado pelo teto que está a uma distância H , acima da base do fogo. Os constituintes da pluma se espalham radialmente para fora formando um fluxo turbulento relativamente fino, que é o jato de teto. Esta dinâmica está representada na Figura 4.3.

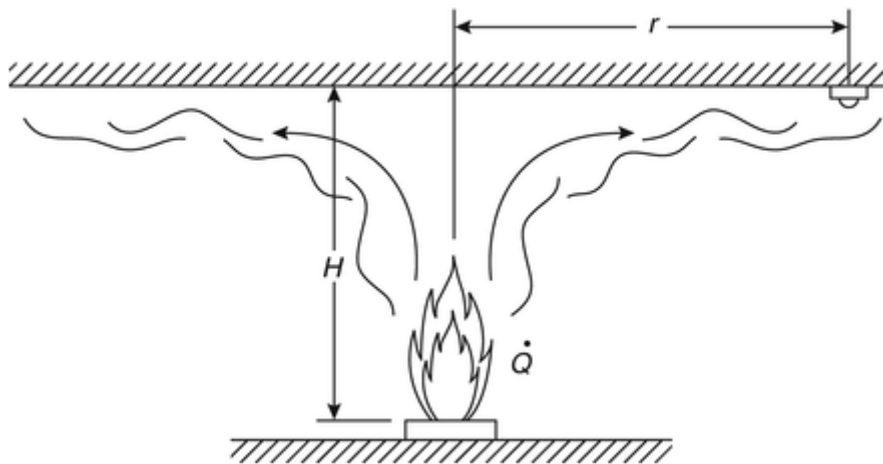


Figura 4.3: Jato de teto [21]

Resumindo, vazão de jato de teto pode ser denominada como a vazão de gás, relativamente rápida, localizada imediatamente abaixo da superfície do teto, que é provocada pela flutuação dos produtos de combustão encontrados na pluma [13].

O estudo das características do jato de teto foi motivado pela necessidade de se prever o comportamento do fogo na região superior do compartimento do incêndio. Grande parte dos equipamentos para a detecção e extinção de incêndios, em instalações industriais [22] e edifícios comerciais, está localizada próxima do teto. Por isso, o conhecimento das características da temperatura e da velocidade

dos gases quentes no jato de teto é fundamental para a proteção contra incêndios em ambientes fechados.

Como neste trabalho é analisado o cenário de um incêndio na área de descarregamento dos embalados do depósito 3 do CGR, observa-se que é muito importante verificar se os referidos gases quentes, provenientes da sala de origem do fogo são capazes de provocar danos ou ignição em materiais localizados em compartimentos vizinhos. Isto se aplica ao módulo B desse depósito, que foi construído para o armazenamento de tambores radioativos com matrizes sólidas de betume. Assim, deve-se verificar se os gases quentes do incêndio podem provocar um aumento de temperatura do betume, até que este atinja o seu ponto de fulgor.

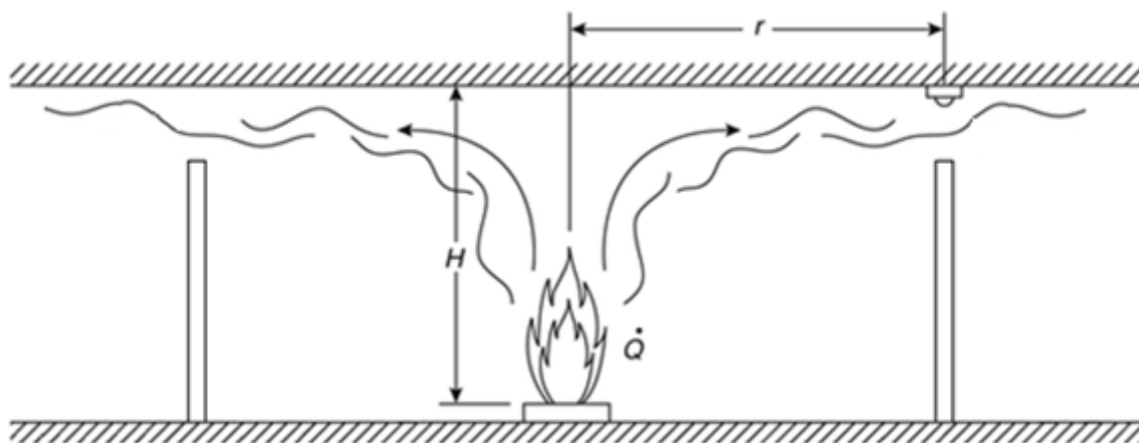


Figura 4.4: Esquema simplificado do incêndio no depósito

Nesta circunstância, quando o jato de gases quentes emerge até o teto do depósito, ele entra em contato com o ar ambiente dos compartimentos adjacentes (locais de armazenamento de embalados), aumentando sua seção transversal de escoamento e incorporando o ar à temperatura ambiente em seu limite inferior. Na Figura 4.4 podemos ver uma ilustração simplificada deste cenário.

Esse ar incorporado resfria os gases da pluma e reduz a velocidade do jato. Com o escoamento dos gases quentes ao longo do teto do recinto, a transferência de calor resfria a porção adjacente à superfície do teto. Estes mecanismos de troca de calor provocam a redução da temperatura média do jato ao longo do seu escoamento.

Existem diversas maneiras para realizar o cálculo da temperatura dos gases quentes. No NUREG-1934 [18] são apresentadas algumas delas.

4.3 NUREG

O NUREG (U.S. Nuclear Regulatory Commission technical report designation) é uma publicação, emitido pela NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission), sobre decisões reguladoras, resultados de pesquisas, investigações de incidentes, etc.

A Comissão Reguladora Nuclear dos EUA foi criada com o objetivo de garantir o uso seguro de materiais radioativos para fins civis benéficos, protegendo as pessoas e o meio ambiente. A NRC regula as usinas comerciais de energia nuclear e outros usos de materiais nucleares, como a medicina nuclear, pelo licenciamento, inspeção e cumprimento de seus requisitos [23].

O NUREG-1934, que tem o título "Diretrizes de Análise de Modelagem de Incêndio de Usinas Nucleares", baseia-se na pesquisa de verificação e validação (V&V) feita pelo escritório de Pesquisa Reguladora Nuclear (Nuclear Regulatory Research-RES) da NRC e pelo Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (Electric Power Research Institute- EPRI). Ele incorpora os resultados de um conjunto de diretrizes e recomendações para a realização de estudos de modelagem contra incêndio em apoio a aplicações da indústria nuclear comercial. Seu foco é descrever o processo de realização de uma análise de modelagem de incêndio, principalmente para aplicações comerciais de uma usina nuclear.

4.4 Modelos para simulações de incêndio

A pesquisa de verificação e validação dos modelos de incêndio tem como objetivo garantir a correção, adequação e qualidade geral do método. A finalidade da verificação é determinar se um modelo representa corretamente a descrição conceitual do autor do projeto, ou seja, se foi construído apropriadamente, enquanto a validação é usada para determinar se um modelo é uma representação adequada do mundo real e é capaz de reproduzir os fenômenos de interesse, ou seja, apura se ele foi criado corretamente.

Vários modelos estão disponíveis para realizar simulações de incêndio. Eles podem ser analíticos ou numéricos. Dada a disponibilidade dos diferentes tipos de modelos, ao se realizar um estudo é preciso compreender as vantagens e limitações de um modelo específico em uma determinada situação para alcançar os objetivos

estabelecidos. Em geral, eles podem ser classificados em três grupos: Algébricos, De zona e CFD.

Os modelos algébricos são geralmente equações autônomas encontradas na literatura e ajudam na compreensão geral de algum dos fenômenos envolvidos na dinâmica do incêndio. São correlações muitas vezes desenvolvidas empiricamente com base nas leis fundamentais de conservação. Esses modelos exigem tempo computacional mínimo e um número limitado de variáveis de entrada. Eles também são muito aceitos na comunidade de engenharia de proteção contra incêndio. Porém, ao aplicar resultados obtidos por esta ferramenta, é preciso estar consciente de que o desenvolvimento da maioria das equações se baseia em modelos simplificados.

Os modelos de zona são algoritmos computacionais que resolvem equações de conservação de energia e massa. Calculam as variáveis do cenário usando volume de controle ou zonas. A ideia fundamental por trás deste modelo é que cada zona está bem misturada e, portanto, todas as variáveis importantes para cada cenário de incêndio tais como, temperatura, concentração de fumaça entre outras, são uniformes em todas as zonas. As variáveis mudam em função do tempo e dependem das condições iniciais previamente definidas. Esta ferramenta é aplicável em situações que envolvem geometria simples ou onde a resolução espacial dentro do compartimento não é importante. O tempo gasto na preparação dos dados de entrada de um modelo de zona, bem como o tempo de computação e a quantidade de dados de saída envolvidos são superiores aos de um modelo algébrico.

Os modelos de dinâmica de fluidos computacional (em inglês: Computational Fluid Dynamics - CFD) são algoritmos sofisticados que resolvem uma versão simplificada das equações de Navier-Stokes [18]. Para executar os códigos de CFD, o recinto a ser analisado deve ser dividido em um grande número de volumes de controle. Esta ferramenta é útil para determinar variáveis do incêndio em um local específico ou quando as características geométricas desempenham um papel significativo para os resultados. Os modelos de CFD vão além do que pode ser calculado pelos outros modelos, pois realizam cálculos detalhados para cada volume de controle. A desvantagem deste método é o tempo computacional e o nível de esforço necessário para configurar um cenário. O tempo necessário para modelar um problema depende da complexidade da geometria.

Dentro destes três grupos de modelos, o NUREG enfoca cinco métodos que são: Ferramentas de Dinâmica de Incêndio (Fire Dynamics Tools- FDTs), Avaliação de Vulnerabilidade Induzida contra incêndio (Fire Induced Vulnerability Evaluation- FIVE-Rev1), Modelo Consolidado de Crescimento de Incêndio e Transporte de Fumaça (Consolidated Fire Growth and Smoke Transport (CFAST) Model), MAGIC e Simulador de dinâmica de incêndio (Fire Dynamics Simulator- FDS). O FDTs e o FIVE-Rev1 são um conjunto de modelos algébricos relativamente simples. CFAST e MAGIC representam a classe comumente designadas por modelos de zona e o FDS é um exemplo de CFD. A Figura 4.5 apresenta algumas características destes cinco modelos.

Modelos	Simplicidade de uso	Resultados rápidos	Capacidade de simular cenários complexos
FDTs	✓	✓	✗
FIVEReV1	✓	✓	✗
CFAST	✓	✗	✗
MAGIC	✓	✗	✗
FDS	✗	✗	✓

Figura 4.5: Comparação dos métodos

O primeiro passo na seleção de um modelo é determinar quais deles são capazes de realizar a análise que se pretende fazer. Posteriormente, deve-se examinar quais características são fundamentais na realização deste estudo e, por último, estabelecer qual se adequa melhor às características escolhidas.

Segundo o NUREG-1934, os modelos disponíveis para calcular a temperatura do jato de teto são FIVE-Rev1, MAGIC, CFAST e FDS. Como o cenário que será analisado por esse trabalho tem geometria simples e está no intervalo de aplicabilidade do FIVE-Rev1, ele foi o modelo escolhido.

4.5 FIVE-Rev1

O FIVERev1 é uma coleção de modelos algébricos que inclui cálculos representativos realizados com vários modelos de incêndio de última geração. Ele se encontra no Guia de Modelagem de Incêndio para Aplicações em Usinas Nucleares [24], publicado pelo EPRI.

Em geral, as equações contidas nessa coleção são expressões analíticas que podem ser resolvidas à mão. Dentre as capacidades dessas várias equações incluem a previsão de temperatura e fluxo de calor convectivo do jato de teto, fluxo de calor de radiação, temperatura da camada superior, tempo de detecção e aquecimento do alvo entre outros. Para calcular a temperatura do jato de teto, a correlação apresentada pelo relatório é a correlação de Alpert [25].

Capítulo 5

Modelos para o cálculo de temperatura dos gases

O presente capítulo apresenta modelos que são capazes de estimar a temperatura máxima dos gases em um incêndio. Estes modelos são empíricos e tem a mesma finalidade, porém cada um tem seu método específico para a realização do cálculo.

Estudos relacionados com o escoamento de gases quentes, resultantes do impacto de uma pluma de incêndio com o teto de um compartimento, são realizados desde a década de 50. Porém, só a partir da década de 70 é que surgiram pesquisas que procuravam quantificar as temperaturas e velocidades dos gases na parte mais quente do escoamento produzido por incêndios sob tetos horizontais lisos e não confinados, que é o objetivo deste trabalho. Neste cenário enquadraram-se três modelos empíricos consagrados [26], ou seja, o Modelo de Alpert, o Modelo de Heskestad & Delichatsios e o Modelo de L. Y. Cooper. O objetivo deste capítulo é apresentar as principais características desses modelos.

5.1 Modelo de Alpert

Alpert desenvolveu uma teoria generalizada para prever as velocidades e temperatura dos gases, além da profundidade dos jatos de teto direcionados por um incêndio. Relacionado a este estudo, ele também apresentou correlações simplificadas para quantificar a temperatura máxima dos gases em uma determinada posição, em um escoamento produzido por uma chama constante. Nos cálculos de análise de risco essas correlações são amplamente usadas e esse método é apresentado no

NUREG 1934 como V&V (verificado e validado). Portanto o modelo de Alpert será considerado como modelo de referência para comparar com os demais modelos apresentados neste trabalho.

As correlações são baseadas em medidas coletadas durante queima-teste de matrizes de combustível feitas de madeira, plásticos, caixas de papelão e combustíveis líquidos, com taxa de liberação de energia variando de 668 kW a 98 MW e altura de teto entre 4.6 a 15.5 metros [25].

Dois parâmetros muito importantes para a determinação da temperatura máxima dos gases quentes são a taxa de calor liberada pelo combustível queimado e a altura do teto. Assim eles devem estar devidamente definidos. As correlações desenvolvidas por Alpert [25] são apresentadas abaixo.

$$T - T_{\infty} = 16,9 \left(\frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \right) \quad \text{para} \left(\frac{r}{H} \right) \leq 0,18 \quad (5.1)$$

$$T - T_{\infty} = 5,38 \left[\frac{\dot{Q}_c^{2/3}}{\left(\frac{r}{H} \right)^{2/3} H^{5/3}} \right] \quad \text{para} \left(\frac{r}{H} \right) > 0,18 \quad (5.2)$$

onde:

T - Temperatura máxima dos gases quentes [°C];

T_{∞} - Temperatura ambiente [°C];

\dot{Q}_c - Taxa de liberação de calor [kW].

A taxa de liberação total de calor máxima pode ser determinada pela seguinte equação:

$$\dot{Q}_c = \frac{M_c H_c}{t} \quad (5.3)$$

onde:

M_c - Massa do material combustível que pode queimar no incêndio, [Kg];

H_c - Potencial calorífico do material combustível, [kJ/Kg];

t - Tempo para se atingir a taxa de liberação de calor \dot{Q}_c [s].

Certas restrições devem ser observadas ao aplicar essas correlações, pois elas são validas apenas durante um período de tempo após a ignição do fogo, ou seja, quando o escoamento de gases no teto pode ser considerado não confinado, isto é, quando ainda não ocorre o acúmulo de gases aquecidos nessa região. Tanto a

temperatura como a velocidade do jato de teto são influenciadas pelo calor irradiado das paredes que se encontram próximas ao foco de incêndio, independente da taxa de queima do fogo.

5.1.1 Validação do Modelo de Alpert

Como já exposto no Capítulo 4, o uso de modelos de incêndio requer um bom entendimento de suas limitações e capacidades preditivas.

O modelo de Alpert é um dos métodos apresentados pelo NUREG [18] para modelagem de incêndios e está incluso no projeto de V&V conduzido pelo escritório de Pesquisa Nuclear Reguladora da NRC e o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (EPRI). Vinte e seis experimentos de incêndios em larga escala de seis diferentes séries de testes foram usados para avaliar a capacidade dos modelos estimar treze grandezas de interesse para cenários de incêndio que foram considerados típicos dentre aqueles que podem ocorrer em uma usina nuclear. Com os resultados do estudo, foram determinados dois parâmetros estatísticos para cada modelo e cada quantidade prevista [27].

O primeiro parâmetro, δ , é o fator de polarização. Indica até que ponto o modelo, em média, subestima ou superestima as medidas de uma dada quantidade.

O segundo parâmetro, $\tilde{\sigma}_M$, é o desvio padrão relativo ao modelo. Este indica a incerteza ou o grau de dispersão do modelo.

A previsão do modelo é denotada como M . O valor "verdadeiro" da quantidade prevista é especificado como uma variável aleatória normalmente distribuída com uma média $\mu = \frac{M}{\delta}$, e um desvio padrão, $\sigma = \tilde{\sigma}_M \frac{M}{\delta}$. Usando esses valores, a probabilidade de exceder um valor crítico, x_c , é:

$$P(x > x_c) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\frac{x_c - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \quad (5.4)$$

A função erfc é a função erro complementar que é definida como:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (5.5)$$

Também é possível traçar o gráfico da distribuição normal com os dados estatísticos fornecidos.

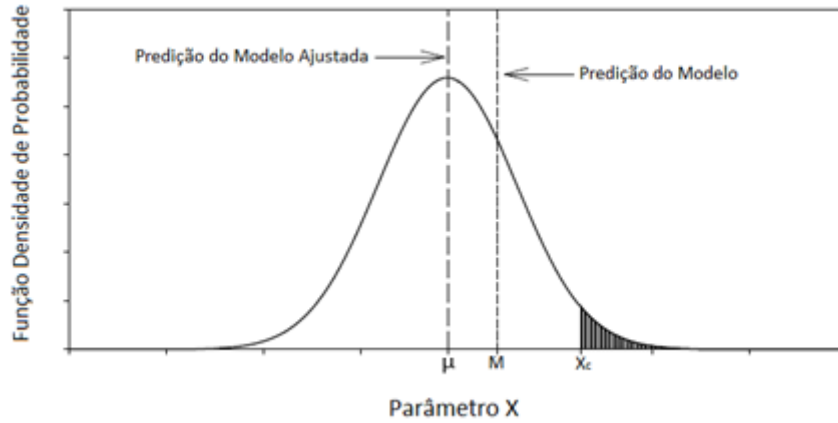


Figura 5.1: Distribuição Normal do valor "verdadeiro" de um determinado parâmetro em um incêndio hipotético [16]

5.2 Modelo de Heskestad & Delichatsios

Assim como o modelo de Alpert, o modelo de Heskestad & Delichatsios é baseado em dados experimentais e válido quando o escoamento de gases no teto pode ser considerado não confinado.

Os experimentos para a determinação do modelo envolveram três queimas de madeiras com diferentes taxas de crescimento do fogo e foram combinadas três diferentes alturas de teto ($H=2,44$ m, $H=4,57$ m, $H=8,84$ m), com um total de nove configurações experimentais [28]. As temperaturas ambiente durante os experimentos variaram entre 22 °C a 29 °C.

As correlações desenvolvidas por Heskestad & Delichatsios após estes testes são apresentadas abaixo [26].

Para $T_{\infty} = 293$ K :

$$T - T_{\infty} = \frac{\left[2,75 \left(0,188 + 0,313 \frac{r}{H} \right)^{-4/3} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } 0 < \left(\frac{r}{H} \right) < 8 \quad (5.6)$$

onde:

T - Temperatura máxima dos gases quentes [K];

T_{∞} - Temperatura ambiente [K];

\dot{Q}_c - Taxa de liberação de calor [kW].

Para $T_\infty \neq 293$ K:

$$T - T_\infty \left(\frac{T_\infty}{293} \right) = \frac{\left[2,75 \left(0,188 + 0,313 \frac{r}{H} \right)^{-4/3} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } 0 < \left(\frac{r}{H} \right) < 8 \quad (5.7)$$

5.3 Modelo de Cooper

Cooper modela o incêndio por dados menos diretos que os modelos anteriores [26], pois faz a estimativa baseado em uma série de experimentos em pequena escala. Assume-se que o efeito da radiação é insignificante neste contexto [29].

As correlações obtidas por Cooper para a determinação da temperatura do jato de teto são relatadas a seguir:

Para $T_\infty = 293$ K :

$$T - T_\infty = \frac{\left[28,1 e^{\left(-1,77 \frac{r}{H} \right)} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } \left(\frac{r}{H} \right) \leq 0,75 \quad (5.8)$$

$$T - T_\infty = \frac{\left[5,77 \left(\frac{r}{H} \right)^{-0,88} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } \left(\frac{r}{H} \right) > 0,75 \quad (5.9)$$

Para $T_\infty \neq 293$ K:

$$T - T_\infty \left(\frac{T_\infty}{293} \right) = \frac{\left[28,1 e^{\left(-1,77 \frac{r}{H} \right)} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } \left(\frac{r}{H} \right) \leq 0,75 \quad (5.10)$$

$$T - T_\infty \left(\frac{T_\infty}{293} \right) = \frac{\left[5,77 \left(\frac{r}{H} \right)^{-0,88} \right] \dot{Q}_c^{2/3}}{H^{5/3}} \quad \text{para } \left(\frac{r}{H} \right) > 0,75 \quad (5.11)$$

Capítulo 6

Resultados

Os cálculos para determinar a temperatura máxima dos gases quentes no cenário de incêndio estudado foram realizados com o auxílio do software Mathematica 11.0. Neste capítulo, são apresentados os dados utilizados bem como os resultados obtidos.

6.1 Dados

Alguns dados são essenciais para a realização da análise do acidente e são obtidos de acordo com as características do acidente analisado.

Com base nas informações da Eletronuclear [30], observa-se que as coordenadas radial (r) e azimutal (H) valem, respectivamente, 2,9 m e 13,9 m. Assim $r/H = 0,21$.

Embora rotineiramente a transferência de tambores radioativos do pátio para o depósito 3 do CGR seja realizada por empilhadeira elétrica, como narrado no Capítulo 2, para uma análise conservadora assume-se que a massa correspondente ao material combustível que pode queimar no incêndio é a massa de óleo diesel do caminhão Munck, $M_c = 285$ Kg, pois este é o veículo de transferência com maior carga de incêndio.

Pode-se considerar a temperatura ambiente (T_∞) como 25 °C, o potencial calorífico do material combustível (H_c) como $4,3 \times 10^4$ kJ/Kg e o tempo (t) necessário para se atingir a taxa de liberação de calor máxima no incêndio como 1500 segundos. Pois, de acordo com Alves & Botelho [12], são valores típicos para um incêndio deste tipo.

6.2 Temperatura

Como exposto no Capítulo 5, a temperatura máxima dos gases quentes pode ser determinada, utilizando-se os métodos: Alpert, Heskestad & Delichatsios e L. Y. Cooper.

Pelas equações (5.2), (5.7) e (5.10) é possível traçar um gráfico (vide Figura 6.1) da temperatura em função de \dot{Q}_c para os três métodos.

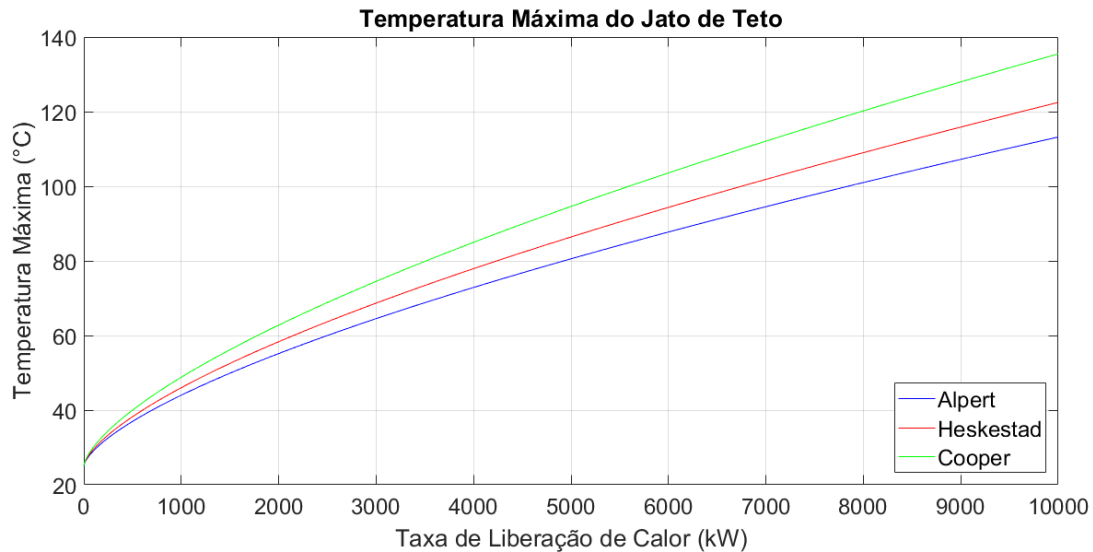


Figura 6.1: Temperatura Máxima do Jato de Teto em Função da Taxa de Liberação de Calor

Apesar da diferença entre os três métodos, todos seguem o mesmo comportamento. Ao analisar o gráfico é possível observar que quanto maior o \dot{Q}_c , maior seria a temperatura e mais grave seria o acidente.

Para o incêndio analisado, com as características apresentadas na Seção 6.1 e o \dot{Q}_c calculado pela Equação 5.3 igual a 8170 kW, a temperatura dos gases quentes encontrada para cada modelo está apresentada na Figura 6.2.

Métodos	Temperatura (°C)
Alpert	102
Hesketad & Delichatsios	110
L.Y. Cooper	121

Figura 6.2: Valores máximos de temperatura do Jato de Teto obtidos com os métodos de Alpert, Hesketad & Delichatsios e L.Y. Cooper

6.3 Análise do Modelo de Alpert

Neste trabalho, analisa-se a possibilidade da temperatura máxima dos gases quentes, na região de armazenamento de embalados do depósito 3 do CGR, atingir o valor de ponto de fulgor do betume. Com isso pretende-se verificar a chance de um foco de incêndio na área de descarregamento deste depósito provocar danos ou ignição em tambores com rejeitos radioativos imobilizados em betume, localizados em compartimentos vizinhos.

A estimativa da temperatura máxima dos gases quentes do incêndio, utilizando três métodos diferentes, já foi apresentada na seção anterior. Entretanto é importante destacar que o uso destes modelos envolve aproximações e ajustes. Este fato faz com que o valor encontrado seja maior que o verdadeiro.

Por isso apurar a validação do modelo no estudo de um determinado incêndio é imprescindível. Essa validação pode ser feita estatisticamente para o modelo de Alpert [18], como mencionado no Capítulo 5. É possível calcular a probabilidade dos gases quentes no jato de teto exceder um valor crítico de temperatura.

De acordo com Guzella & Da Silva [9], o ponto de fulgor do betume é igual a 301 °C. Com essa informação e sabendo que para o caso da predição da temperatura do jato de teto pelo método FIVE-Rev1 [18], os valores dos parâmetros estatísticos são $\delta = 1,84$ e $\tilde{\sigma}_M = 0,29$, obtém-se o gráfico da Figura 6.3.

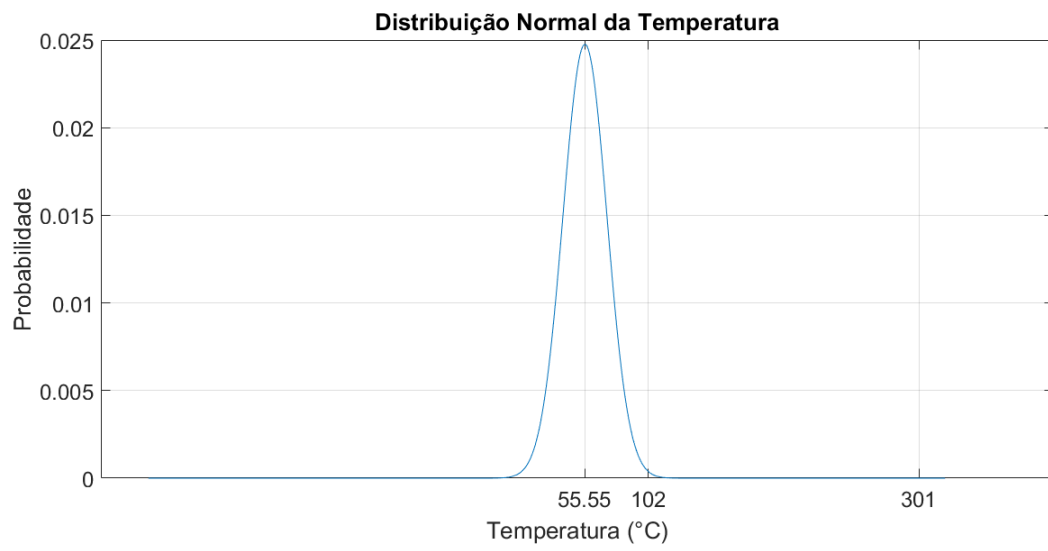


Figura 6.3: Distribuição Normal da temperatura

Capítulo 7

Conclusões

Para a determinação da temperatura máxima dos gases quentes do jato de teto, em um incêndio ocasionado por falhas na empilhadeira elétrica na área de descarregamento do depósito 3 do CGR, foram propostos três modelos: de Alpert, de Heskestad & Delichatsios e de L.Y. Cooper.

Ao observar o gráfico da Figura 6.1, o Modelo de Cooper se mostrou o mais conservador. A diferença entre o modelo de Cooper e o de Alpert, que são os dois extremos do gráfico é de aproximadamente 20%. Esse resultado pode ser atribuído às diversas maneiras que cada autor usou para realizar os experimentos e fazer as aproximações. Porém, todos os modelos seguem o mesmo comportamento.

Verifica-se, com o auxílio da Figura 6.2, que foram estimadas valores da temperatura iguais a 102 ° C (Modelo de Alpert), 110° C(Modelo de Heskestad & Delichatsios) e 121°C (Modelo de L.Y. Cooper). Estes valores estão consideravelmente abaixo da temperatura do ponto de fulgor do betume, que é 301°C [9].

Com o segundo gráfico do Capítulo 6, que está representado na Figura 6.3, é possível ainda analisar a probabilidade da temperatura do jato de teto atingir um valor acima do ponto de fulgor do betume. Esta probabilidade é de 2.10^{-37} . Logo é apropriado concluir que é insignificante a probabilidade dos gases quentes provocarem danos ou ignição em materiais localizados em compartimentos vizinhos.

Referências Bibliográficas

- [1] DEPARTMENT OF ENERGY, *The History of Nuclear Energy book*. Washington DC, USA.
- [2] ALVES, A. S., *Análise de Segurança Determinística e Estocástica em um Cenário de Infiltração de Água no interior de um Repositório próximo à Superfície para a Deposição de Rejeitos Radioativos*. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [3] HIROMOTO, G., DELLAMANO, J. C., MARUMO, J. T.; ENDO, L. S.; VICENTE, R., HIRAYAMA, T., , *Introdução à Gerência de Rejeitos Radioativos*. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/Departamento de Rejeitos Radioativos, São Paulo, Brasil, 1999.
- [4] DIAS, W., *Manual de Controle Radiológico do Meio Ambiente*. ETN, Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [5] CNEN, *Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. CNEN-NN-3.01, Rio de Janeiro, Brasil, 2011.
- [6] CNEN, *Critérios de Aceitação para Deposição de Rejeitos Radioativos de Baixo e Médio Níveis de Radiação*. CNEN-NE-6.09, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [7] IAEA, *Interim Storage of Radioactive Waste Packages*. Technical Report Series n. 390, Vienna, Austria, 1998.
- [8] IAEA, *Storage of Radioactive Waste*. IAEA Safety Standards Series n. WS-G-6.1, Vienna, Austria, 2008.
- [9] GUZELLA, M. F. R., DA SILVA, T. V., *Evaluation of betumens for Radioactive Waste Immobilization*. Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, 30123-970, WM-01 Conference, Tucson, USA, 2001.

- [10] ALVES, A. S. e MONTEIRO, L. G., *Conteúdo Radioativo para Tambores, Liners e Caixas Metálicas Produzidos na CNAAB*. Relatório Eletronuclear no GSN.T.039.12, Rio de Janeiro, Brasil, 2013.
- [11] CNEN, *Parecer Técnico, PT-DIREJ-037/2008*. Rio de Janeiro, Brasil, 2008.
- [12] ALVES, A. S., BOTELHO, R. X., *Estudo de um cenário de incêndio no interior de um prédio do Centro de Gerenciamento de Rejeito (CGR)*. Relatório Eletronuclear N° GSN.T.016.14, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.
- [13] ETN, *Relatório Final de Análise de Segurança(RFAS) do Centro de Gerenciamento de Rejeitos (CGR) da CNAAB*. Rio de Janeiro, Brasil, 2004.
- [14] DI NENNO, P.J., ***SFPE Handbook of Fire Protection Engineering***. Quincy, MA., National Fire Protection Association, 4th edn, 2008.
- [15] DRYSDALE, D., ***An Introduction to Fire Dynamics***. Wiley, Third Edition, Chapter 2, University of Edinburgh, Scotland, UK , 2011
- [16] BYSTROM, A., *Compartment Fire Temperature: Calculations and Measurements*. Tese de Doutorado Luleå University of Technology, 2017.
- [17] BORGNAKKE, C., SONNTAG, R. E., ***Fundamentos da Termodinâmica***. Blucher, Sétima Edição, Capítulo 6, University of Michigan, 2009.
- [18] NUREG, *NUREG-1934*. Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines (NPP Fire MAG) Final Report, USA, 2012.
- [19] EPRI/NRC-RES, *Fire PRA Workshop*. USA, 2017
- [20] Crowl, D. A., Louvar, J. F., ***Chemical Process Safety: Fundamentals with Applications***. Prentice Hall, Upper Caddle River, New Jersey, 2011.
- [21] ***SPE- Handbook of Fire Protection Engineering***. Society on Fire Protection & National Fire Protection Association, Third Edition, Sec. 2, USA, 2002.
- [22] EVANS, D. D., *Ceiling Jet Flows*. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd Edition, Chapter 4, Section 2, p. 32-39.

- [23] NRC, *Nuclear Regulatory Commission*. Disponível em <<https://www.nrc.gov/about-nrc.html>>. Acesso em 25 mai. 2018.
- [24] EPRI, *Fire Modeling Guide for Nuclear Power Plant Applications*. Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Agosto, 2002.
- [25] ALPERT, R. L., *Calculation of Response Time of Ceiling-Mounted Fire Detectors*. Factory Mutual Research Corporation, Philadelphia, 1972.
- [26] BEYLER, C. L., *Fire Plumes and Ceiling Jets*. Fire Safety Journal, 11(1986), p. 53 - 75.
- [27] NUREG, *NUREG-1824, Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications*. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research (RES), Volume 1: Main Report, Washington, D.C., 2007.
- [28] HESKESTAD, G., DELICHATSIOS, M. A., *The Initial Convective Flow in Fire*. Proc. 17th International Symposium on Combustion, The Combustion Institute, Pittsburg, 1978, p. 1113.
- [29] COOPER, L Y., *Heat Transfer From a Buoyant Plume to an Unconfined Ceiling*. Center for Fire Research, National Bureau of Standards, Washington, D.C., 1982.
- [30] ELETRONUCLEAR, *CNAAA - Unidade 3 - Depósito Intermediário de Rejeitos Radioativos, Arranjo Geral, Plantas e Cortes*. No. EU - DEP - 00049 - R1, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.