



Alan da Silva Esteves

**MODELAGEM MATEMÁTICA
DE DERRAMES CRIOGÊNICOS
E DE INCÊNDIOS EM POÇA
NO TRANSPORTE MARÍTIMO DE
GÁS NATURAL LIQUEFEITO (GNL)**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: José Alberto dos Reis Parise

Volume I

Rio de Janeiro, julho de 2010



Alan da Silva Esteves

**Modelagem matemática de derrames criogênicos e de
incêndios em poça no transporte marítimo de
gás natural liquefeito (GNL)**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. José Alberto dos Reis Parise

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Alcir de Faro Orlando

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Carlos Valois Maciel Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Sergio Leal Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Helcio Rangel Barreto Orlando

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Prof. Gilson Brito Alves Lima

Universidade Federal Fluminense

Prof. Salvador Simões Filho

Universidade PETROBRAS/ECT-Gás & Energia

Prof. José Eugenio Leal

Coodenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 6 de julho de 2010

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do do orientador.

Alan da Silva Esteves

Engenheiro Químico pela UFRJ em 1970; Mestre (MSc) em Engenharia da Produção pela UFF em 2004; MBE em Meio Ambiente pela COPPE/UFRJ em 2002; Engenheiro de Segurança pela PUC-Rio em 1984. Engenheiro da PETROBRAS até 2007, atuando em consultoria de Segurança de Processo nas Áreas de Exploração & Produção e de Gás & Energia. Engenheiro de processamento até 1985, na implantação de empreendimentos industriais de plantas de processo. Pesquisador da PUC-Rio (LRA), trabalha atualmente na avaliação de tecnologias de GNL, cogeração e trigerção com Gás Natural e na determinação de propriedades de novos fluidos refrigerantes.

Ficha Catalográfica

Esteves, Alan da Silva

Modelagem matemática de derrames criogênicos e de incêndios em poça no transporte marítimo de gás natural liquefeito (GNL) / Alan da Silva Esteves ; orientador: José Alberto dos Reis Parise. – 2010.

2 v. : il.(color.) ; 30 cm

Tese (doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2010.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Gás natural liquefeito (GNL). 3. Modelagem matemática. 4. Derrame/espalhamento de poça criogênica. 5. Incêndio em poça de difusão turbulenta. 6. Poder emissivo médio temporal. 7. Transporte de radiação na pluma térmica. I. Parise, José Alberto dos Reis. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

A meus Pais, Manoel e Resoleta, *in memoriam*, pelo legado e exemplos de honra, integridade, ética, trabalho e perseverança, valores que me passaram e que aprendi a praticar por toda minha vida.

À minha Esposa, Marina, com quem tenho eterno débito por tê-la privado parcialmente de meu convívio, companheira sempre presente em todas as horas e sustentáculo de toda a minha paz. Com sua paciência oceânica, soube compreender este momento. Ela é parte indissociável dele.

Agradecimentos

A **DEUS**, acima de todos e de tudo, pela saúde que me concede e pela força espiritual com que ilumina meus caminhos e guia a minha trajetória nesta vida;

À Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, e ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), pela oportunidade concedida na busca pelo conhecimento e melhoria contínua do processo de evolução profissional, para melhor servir ao Brasil e à Sociedade;

À Petróleo Brasileiro S.A.-PETROBRAS, como seu engenheiro, ora aposentado após 25 anos de dedicação, pela experiência profissional e ensinamentos proporcionados;

Aos Professores Hans Ingo Weber e Marco Antonio Meggiolaro, respectivamente, ex-Coordenador à época e Coordenador atual do Programa de Pós Graduação do DEM da PUC-Rio, pela acolhida de meu pleito para ingresso e prosseguimento no Curso de Doutorado;

Ao Professor José Alberto dos Reis Parise, do DEM da PUC-Rio, **Orientador** e mentor no Curso de Doutorado, pelos saberes transmitidos e sinergia profissional e pessoal;

Aos Professores: Alcir de Faro Orlando, Carlos Maciel Valois Braga e Sergio Leal Braga, do DEM da PUC-Rio; Helcio Rangel Barreto Orlande, do DEM da COPPE/UFRJ; Gilson Brito Alves Lima, do Departamento de Engenharia de Produção da UFF, Orientador do Curso de Mestrado; como produtores de Ciência e pelas presenças na Banca Examinadora;

Ao Engenheiro Salvador Simões Filho, DSc, da Universidade PETROBRAS/ETC-Gás&Energia, pela amizade, competência e presença na Banca Examinadora;

À Professora Angela Ourivio Nieckele, do DEM da PUC-Rio, pela ajuda nos meus primeiros passos no Departamento;

Ao Engenheiro Alberto Oliveira Fontes Junior, meu ex-Gerente na PETROBRAS, nas Áreas de E&P e de Gás&Energia, pelo apoio incondicional e incentivo em busca deste título;

Ao Geofísico Milas Evangelista da Silva, MSc, meu ex-Gerente na PETROBRAS, pela confiança profissional e sinergia para vencer os desafios da Área de E&P;

Aos Amigos Carlúcio Souza, Fábio Mesquita, Flávia Rocha, Márcia Magalhães, Roberta Barbosa e Rosely Marins, que merecem todo reconhecimento por seus importantes e abnegados trabalhos, e a toda a Equipe Técnica e Administrativa do DEM da PUC-Rio, pelo apoio, paciência, tolerância e compreensão com todos os meus erros e falhas como aluno;

Às pessoas queridas, parentes e amigos, colegas do DEM da PUC-Rio, pelo companheirismo ao longo de quase cinco anos, em especial a Américo Cunha Jr., David Maldonado, Herberth Vásquez e Nestor Gálvez, e a todos enfim, pela ajuda, apoio e incentivo recebido, sem o que este trabalho não teria sido possível.

Resumo

Esteves, Alan da Silva; Parise, José Alberto dos Reis (Orientador). **Modelagem Matemática de Derrames Criogênicos e de Incêndios em Poça no Transporte Marítimo de Gás Natural Liquefeito (GNL)**. Rio de Janeiro, 2010. 381 p. Tese de doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Gás Natural Liquefeito (GNL) vem sendo transportado desde 1959 em navios metaneiros, eles essenciais na movimentação do GNL entre as locações de produção e consumo. Este trabalho apresenta modelagens para: (i) mecânica do derrame e espalhamento de fluido criogênico no mar, decorrente de punção no casco desses vasos, e (ii) subsequente incêndio de difusão turbulenta. A revisão bibliográfica contepou seis décadas, e não foram encontradas evidências de que os temas, espalhamento criogênico e incêndio da poça com difusão turbulenta, tivessem sido tratados em único trabalho. Essa lacuna foi identificada, e os assuntos foram acoplados de forma inédita e implementados em dois códigos computacionais. O derrame/espalhamento é modelado com formulação integral conservativa, tendo como parâmetros a área do rasgo, área máxima da poça derramada e tempos de descarga e vaporização do criogênico no mar. O escoamento foi modelado com rasgos de 1 a 100 m² coerentes com a indústria de GNL, formando poças semicirculares. A modelagem da pluma térmica contempla poças circulares entre 10 e 500 m de diâmetro, bem como zonas de combustão e intermitência da pluma térmica. Provê esquema consistente e robusto para o desenvolvimento de parâmetros adimensionalizados de escala, possibilitando correlacionar e extrapolar o comprimento da pluma visível, com a inclinação e o arrasto da mesma, com o poder emissivo de sua superfície e a vazão mássica de vaporização do combustível criogênico na poça. Avalia também: (i) a variação axial do poder emissivo com a altura da pluma visível, (ii) a queima do combustível ao longo da zona 'luminosa' (base do incêndio), e (iii) o transporte de radiação térmica emitida por gases cinza e partículas de fuligem na zona de combustão, considerando a emissão e absorção nas regiões oticamente fina e espessa da pluma térmica.

Palavras-chave

Gás natural liquefeito (GNL); modelagem matemática; derrame/espalhamento de poça criogênica; incêndio em poça de difusão turbulenta; poder emissivo médio temporal; transporte de radiação na pluma térmica.

Abstract

Esteves, Alan da Silva; Parise, José Alberto dos Reis (Advisor). **Mathematical Modeling of Cryogenic Spills and Pool Fires in the Liquefied Natural Gas (LNG) Maritime Transportation**. Rio de Janeiro, 2010. 381 p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Liquefied Natural Gas (LNG) has been carried since 1959 in methane carriers, which are the essential link in the movement of LNG between the locations of production and consumption. This thesis presents modeling to: (i) the fluid mechanics of spills/scattering at sea of a cryogenic fluid, due to puncture the hull of these vessels, and (ii) the subsequent burning of the pool by turbulent diffusion fire. The literature review contemplated six decades, and no evidence was found that the themes such as scattering of cryogenic pool followed by turbulent diffusion fires were treated in a single work. This gap was identified, and the subjects were connected in an unprecedented manner and implemented in two computer codes. The spill/scattering is modeled with conservative integral formulation, having as parameters the area of maximum pool poured on the sea and unloading and vaporization times of cryogenic. The flow was modeled with tears between 10 and 100 m², consistent with the LNG industry, forming semicircular pools. The modeling of the fire thermal plumes considers circular pools with diameters varying between 10 and 500 m, and combustion and intermittency zones of the thermal plume. Provides a consistent and robust scheme for the development of dimensionless scale parameters, allowing to correlate and extrapolate the length of the visible plume, with the its tilt and drag, its surface emissive power and with cryogenic fuel vaporization mass flow rate in the pool. It also evaluates: (i) the axial variation of emissive power with height of the visible plume, (ii) the burning of fuel along the 'luminous' zone (the base of the fire), and (iii) the transport of thermal radiation emitted by gray gases and soot particles within the combustion zone, considering the emission and absorption in optically thin and thick regions of the thermal plume.

Keywords

Liquefied Natural Gas (LNG); mathematical modeling; spillage/scattering of cryogenic pool at sea; turbulent diffusion pool fire; time averaged surface emissive power; radiation transport in fire thermal plume.

Sumário

1	Introdução	42
2	Contextualização, metodologia da pesquisa e estrutura do trabalho	44
2.1	Contextualização	44
2.2	Metodologia da pesquisa	46
2.3	Questões abordadas no presente trabalho	48
2.4	Resultados obtidos com o trabalho	49
2.5	Estrutura do trabalho	50
3	Definição do tema e sua relevância	52
4	Panorama amplo sobre GNL	56
4.1	Dimensão multidisciplinar, áreas de conhecimento consideradas e delimitação da abrangência do trabalho	56
4.2	Principais características do Gás Natural	59
4.3	A indústria de Gás Natural atualmente	60
4.4	A indústria de Gás Natural no futuro	61
4.5	Atividades marítimas do transporte de GNL	61
4.5.1	Sistemas de contenção	62
4.5.1.1	Navios de tanques esféricos	64
4.5.1.2	Navios de tanques de membrana dupla	65
4.5.1.3	Navios de tanques prismáticos auto-portantes	66
4.5.1.4	Navios de tanques independentes auto-portantes	67
4.5.2	Comparação entre as tecnologias <i>Kværner Moss</i> [®] Tipo B, <i>Tecnigaz GTT</i> [®] e <i>IHI SPB</i> [®] Tipo B	67
4.6	Contribuição do trabalho para o estado da arte: uma abordagem simplificada	68
5	Revisão bibliográfica do estado da arte	
5.1	Introdução	70
5.2	Inserção do tema	72
5.3	Considerações preliminares	72
5.3.1	Fenomenologia do derramamento e dispersão do GNL	74
5.3.2	Formação e espalhamento da poça	78
5.3.2.1	Experimentos e modelagem da ebulição da poça de GNL	82
5.3.2.2	Experimentos e modelagem do espalhamento não confinado de GNL na água	86
5.4	Dispersão de GNL derramado e efeitos da combustão e radiação térmica	87
5.5	Investigações experimentais com eventos de combustão	89
5.5.1	Experimentos de incêndios em poça e em nuvem com GNL	89
5.5.2	Experimentos com poça na terra	92
5.5.2.1	Experimentos do U.S. <i>Bureau of Mines</i> (' <i>Lake Charles</i> ')	92
5.5.2.2	Experimentos da ' <i>ESSO</i> ' (' <i>Libya</i> ')	93
5.5.2.3	Experimentos da <i>American Gas Association</i> (' <i>AGA</i> ')	93
5.5.2.4	Experimentos da <i>Shell Research Co.</i> (' <i>Thornton Center</i> ')	94
5.5.2.5	Principais descobertas com os testes em terra ($D \leq 20$ m)	95
5.5.2.6	Experimentos da <i>Gaz de France</i> (' <i>Montoir</i> ') ($D = 35$ m)	95
5.5.2.6.1	Sumário das medições	97

¹ [®]Denota tecnologia proprietária, patenteada e registrada pela empresa que a criou.

5.5.2.6.2	Transferência radiativa na pluma térmica	98
5.5.2.6.3	Arrasto (<i>drag</i>)	101
5.5.2.6.4	Emissão espectral	102
5.5.2.6.5	Principais conclusões dos testes de 'Montoir'	104
5.5.3	Experimentos com poça na água	105
5.5.3.1	Experimentos de 'China Lake'	105
5.5.3.2	Experimentos de 'Maplin Sands'	109
5.5.4	Resumo dos resultados dos experimentos com incêndios na terra e na água	109
5.6	Modelos para predição de efeitos físicos	111
5.6.1	Fenomenologia dos perigos da radiação térmica de incêndios em poça de hidrocarbonetos	112
5.6.2	Visão geral dos modelos de incêndio em poça	113
5.6.2.1	Modelos semi-empíricos	115
5.6.2.1.1	Modelos de chama puntiforme	115
5.6.2.1.2	Modelos de chama sólida	116
5.6.2.2	Modelos de campo	116
5.6.2.3	Modelos integrais	123
5.6.2.4	Modelos de zonas múltiplas	124
5.6.3	Breve comparação das predições com modelos de chama sólida vs. chama puntiforme	124
5.6.4	Características dos modelos para incêndios em poça de GNL	126
5.6.4.1	Vazão mássica de vaporização (\dot{m}_v'')	126
5.6.4.2	Modelo de chama puntiforme	129
5.6.4.3	Modelos de chama sólida	132
5.6.4.3.1	Geometria	134
5.6.4.3.2	Comprimento da pluma visível do incêndio (L_V)	135
5.6.4.3.3	Inclinação da chama (<i>tilt</i>)	140
5.6.4.3.4	Arrasto (<i>drag</i>)	140
5.6.4.3.5	Poder emissivo médio temporal da superfície da chama (\bar{E})	141
5.6.4.3.6	Coefficiente de extinção espectral (L_λ)	144
5.6.4.3.7	Transmitância hemisférica total da atmosfera participante (τ_{atm})	145
5.6.4.4	Modelos de zonas múltiplas	145
5.6.4.4.1	Modelo de zonas múltiplas da TMS (2006)	147
5.6.4.4.1.1	Comprimento da pluma visível do incêndio (L_V)	148
5.6.4.4.1.2	Comprimento axial da zona de combustão 'limpa' (L_C)	149
5.6.4.4.1.3	Efeito da produção de fumaça e 'escudo térmico'	149
5.6.4.4.1.4	Modelagem dos efeitos da fuligem, fumaça e radiação térmica	151
5.6.4.4.1.5	Varição do poder emissivo ao longo do comprimento axial da pluma	152
5.6.4.4.1.6	Aspectos desfavoráveis do modelo da TMS (2006)	157
5.6.4.4.1.7	Aspectos favoráveis do modelo da TMS (2006)	158
5.6.4.4.2	Modelo de zonas múltiplas de Fay (2006) (MIT)	159
5.6.4.4.2.1	Conservação da massa, energia e quantidade de movimento linear	159
5.6.4.4.2.2	Zona de combustão	159
5.6.4.4.2.3	Zona da pluma térmica	160
5.6.4.4.2.4	Comprimento da chama visível	161
5.6.4.4.2.5	Modelo de radiação térmica	161
5.6.4.4.2.6	Aspectos desfavoráveis do modelo de Fay (2006) (MIT)	162
5.6.4.4.2.7	Aspectos favoráveis do modelo de Fay (2006) (MIT)	163
5.6.4.4.3	Cotejo entre os modelos da TMS (Raj, 2007c) e MIT (Fay, 2006)	163

5.7	Algumas considerações sobre os resultados dos experimentos e trabalhos existentes	164
5.7.1	Incêndio em poça (<i>pool fires</i>)	167
5.8	Aspectos conclusivos	168
6	Física e formulação matemática da modelagem do incêndio em poça	171
6.1	Introdução	171
6.2	Produção de fuligem em incêndios	172
6.3	Elementos de combustão e turbulência	172
6.3.1	Algumas generalidades sobre a turbulência	172
6.3.2	Tipos básicos de chama	174
6.3.3	Chamas pré-misturadas laminares	176
6.3.4	Chamas não pré-misturadas laminares	176
6.3.4.1	Chamas não pré-misturadas laminares com cinética química rápida	177
6.3.5	Escoamentos turbulentos com reação química	179
6.3.5.1	Alguns fenômenos fundamentais da turbulência	179
6.3.5.2	Escalas da turbulência em fluidos	179
6.3.5.3	Simulação numérica direta (<i>Direct Numerical Simulation-DNS</i>) e simulação de grandes escalas (<i>Large Eddy Simulation-LES</i>)	180
6.3.5.3.1	DNS	180
6.3.5.3.2	LES	182
6.3.5.4	Interações entre turbulência e combustão não pré-misturada	183
6.3.5.5	Alguns aspectos sobre modelos de turbulência	184
6.3.6	Chamas não pré-misturadas turbulentas	185
6.3.6.1	Chamas não pré-misturadas turbulentas com equilíbrio químico	185
6.3.6.2	Equações de transporte com funções de densidade de probabilidade (PDF)	189
6.3.7	Aspectos conclusivos	190
6.4	A física do modelo	191
6.4.1	Introdução	191
6.4.2	Premissas e hipóteses simplificadoras	192
6.5	Incêndio com combustão não pré-misturada de difusão turbulenta	201
6.5.1	Estrutura da pluma térmica	201
6.5.2	O modelo de mistura	206
6.6	Modelagem da pluma térmica	208
6.6.1	Problemática da interação entre turbulência e combustão não pré-misturada e seu acoplamento com transporte radiativo	208
6.6.2	Correlação entre altura da pluma visível, diâmetro e vazão mássica de vaporização	211
6.6.2.1	Conservação da massa, espécies químicas e quantidade de movimento linear na pluma térmica	212
6.6.2.2	Avaliação do termo de decréscimo fracional da densidade ($\Delta\rho/\rho_a$)	215
6.6.2.3	Estimativa de ϕ , $\Delta T/T_a$ e $\Delta\rho/\rho_a$	218
6.6.2.4	Avaliação da vazão mássica de vaporização (\dot{m}_v'')	219
6.6.2.5	Avaliação da espessura ótica (κ_λ) e do coeficiente de extinção (\mathcal{L}_λ)	221
6.6.2.6	Aspectos conclusivos	221
7	Aplicação ampliada das modelagens do derrame/ espalhamento, incêndio de difusão turbulenta e do acoplamento entre ambas	223
7.1	Considerações preliminares	223

7.2	Derrame/espalhamento da poça semicircular	225
7.2.1	Geometria do metaneiro segundo Fay (2003)	225
7.2.2	Geometria do metaneiro segundo Sandia (2008)	228
7.2.3	Geometria Fay (2003) vs. Geometria Sandia (2008)	231
7.2.4	Discussão dos resultados do derrame/espalhamento	234
7.3	Incêndio de poça circular de difusão turbulenta	236
7.3.1	Escalonamento para incêndios com dezoito diâmetros e oito velocidades de vaporização	236
7.3.1.1	Geometria com oito velocidades de vaporização	238
7.3.1.2	Número de Froude da combustão com oito velocidades de vaporização	240
7.3.1.3	Poder emissivo médio temporal com oito velocidades de vaporização	241
7.3.1.4	Emitância média temporal com oito velocidades de vaporização	245
7.3.1.5	Concentração da fuligem com oito velocidades de vaporização	247
7.3.1.6	Produção de fumaça com oito velocidades de vaporização	248
7.3.1.7	Transmitância da fumaça com oito velocidades de vaporização	250
7.3.1.8	Razão Razão L_V/D_{pci} e Número de Froude Fr_C	251
7.3.1.9	Razões L_C/L_V e L_V/D_{pci}	253
7.3.1.10	Emitância média temporal e Poder emissivo na base da pluma térmica do incêndio	255
7.3.1.11	Concentração de fuligem e Produção de fumaça	257
7.4	Modelagem com acoplamento dos códigos computacionais de derrame/espalhamento e incêndio de difusão turbulenta para rasgos de 2 e 5 m ²	258
7.5	Análise das incertezas e alguns aspectos da validação dos modelos	261
7.5.1	Considerações preliminares	261
7.5.2	Análise das incertezas	262
7.5.2.1	Incertezas do modelo de derrame/espalhamento	263
7.5.2.2	Incertezas do modelo de incêndio de difusão turbulenta	264
7.5.2.2.1	Geometria da pluma térmica - L_V/D_{pci} vs. D_{pci}	264
7.5.2.2.2	Geometria da pluma térmica - L_V/D_{pci} vs. Fr_C	266
7.5.2.2.3	Poder emissivo médio temporal variando com o diâmetro da pluma térmica	268
7.5.3	Alguns aspectos da validação dos modelos	270
7.6	Aspectos conclusivos	270
8	Contribuições incrementais do trabalho, conclusões e sugestões para trabalhos futuros	273
	Referências bibliográficas	279
	Apêndice A – Notações utilizadas	304
A.1	Introdução	304
A.2	Nomenclatura	304
A.3	Notações de trabalho	305
A.3.1	Notação funcional de radiação térmica	305
A.3.2	Notações indicial e simbólica	307
A.3.2.1	Considerações preliminares	307
A.3.2.2	Notação indicial	307
A.3.2.3	Notação simbólica	308
A.3.2.4	Escrita das equações	308
A.3.3	Notação física	309
	Apêndice B - Tópicos sobre radiação térmica em um meio participante	310

B.1	Conceituação	310
B.1.1	Introdução	310
B.1.2	Ângulo sólido	310
B.1.3	Mecanismos físicos de absorção e emissão	312
B.1.4	Algumas propriedades fundamentais da intensidade da radiação	313
B.1.5	Atenuação de energia	313
B.1.5.1	Coeficiente de extinção (L_λ)	314
B.1.5.2	Distância média de penetração da radiação	314
B.1.5.3	Espessura (profundidade) ótica [$\kappa_\lambda(S)$]	314
B.1.5.4	Regimes de radiação	315
B.1.5.5	Coeficiente de absorção (a_λ)	316
B.1.5.6	Espalhamento de energia	317
B.1.6	Emissão de energia	317
B.1.7	Propriedades dos gases participantes	319
B.1.7.1	Absortância (α)	319
B.1.7.2	Emitância (ε)	320
B.1.7.3	Transmitância (τ)	320
B.1.8	Equilíbrio termodinâmico local	321
B.2	Equações de transferência de energia para um gás absorvedor-emissor	321
B.2.1	O gás cinza	321
B.2.2	Métodos de difusão em transferência adiativa	322
B.3	Transferência de energia em meios absorvedores, emissores e espalhadores, pelo mecanismo de radiação acoplado com condução e/ou convecção	322
B.3.1	Equação da conservação da energia	322
B.3.2	Transferência global de energia em uma pluma de incêndio combinando os mecanismos de convecção, condução e radiação térmica	326
B.4	Efeitos da radiação nos meios absorvedores e radiadores	326
B.4.1	Introdução	326
B.4.2	Chamas, chamas luminosas e radiação térmica de material particulado	327
B.4.2.1	Temperatura teórica da chama	328
B.4.2.2	Radiação emitida por chamas não luminosas	328
B.4.2.3	Radiação emitida por e através de chamas luminosas	329
B.4.2.3.1	A fuligem	329
Apêndice C - Modelagem matemática do derrame/espalhamento da poça acoplada à do incêndio de difusão turbulenta		333
C.1	Introdução	333
C.2	Busca e análise dos modelos de derrame/espalhamento existentes	334
C.3	Escolha do modelo físico e matemático para modelagem do derrame/espalhamento da poça	338
C.4	Características do modelo escolhido	339
C.4.1	Introdução	339
C.4.2	Mecânica dos Fluidos do processo de vazamento, segundo Fay (2003)	340
C.4.2.1	O modelo analítico	351
C.5	Código computacional do derrame/espalhamento da poça	360
C.6	Dois exemplos de aplicação do modelo de derrame e espalhamento da poça	360

C.6.1	Reprodução de resultados - geometria do navio segundo Fay (2003)	361
C.6.1.1	Comparação com a literatura	363
C.6.1.2	Discussão dos resultados – Geometria Fay (2003)	364
C.6.2	Aplicação do modelo – Escalonamento da geometria do navio segundo Sandia (2008)	366
C.6.2.1	Comparação com a literatura	369
C.6.2.2	Discussão dos resultados – Geometria Sandia (2008)	373
C.7	Código computacional do incêndio de difusão turbulenta	376
C.8	Exemplos de aplicação do modelo de incêndio de difusão turbulenta	376
C.8.1	Reprodução de resultados – modelo da TMS (2006) acoplando os códigos de espalhamento/derrame e incêndio em poça	376
C.8.1.1	Comparação com a literatura	378
C.8.1.2	Discussão dos resultados – Modelo da TMS (2006)	380

Lista de siglas

ABS: *American Bureau of Shipping*
AGA: *American Gas Association*
AIAA: *American Institute of Aeronautics and Astronautics*
AIChE: *American Institute of Chemical Engineers*
AIP: *Approval in Principle*
ALARP: *As Low As Reasonably Practible*
ANP: *Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Bio-combustíveis*
APELL: *Awareness and Preparedness for Emergencies on a Local Level*
API: *American Petroleum Institute*
ASME: *American Society of Mechanical Engineers*
BLEVE: *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*
BG: *British Gas*
BOG: *Boil-Off Gaugeing*
BP: *British Petroleum*
CEC: *The California Energy Commission*
CEE: *Center for Energy Economics*
CEEA: *Canadian Environmental Assessment Act*
CEN: *Comité Européen de Normalisation*
CFD: *Computational Fluid Dynamics*
CFX®: *Código computacional da ANSYS GmbH*
CFP: *Compagnie Française des Pétroles*
CFR: *Code of Federal Regulation*
CH-IV: *Empresa CH-IV International, referenciando a fórmula química do Metano.*
CHAM: *Concentration, Heat and Momentum*
CLNG: *Center for Liquefied Natural Gas*
CMRI: *Christian Michelsen Research Institute*
CNPE: *Conselho Nacional de Política Energética*
CPU: *Computational Processing Unit*
CTH®: *Código computacional do Labopratório Sandia*
CTV: *Cargo Tank Volume*
CVC: *Cargo Vessel Capacity*
DDT: *Deflagration to Detonation Transients*
DNS: *Direct Numerical Simulation*
DOMAC: *Distrigas of Massachusetts Corporation*
DR: *Draft*
DTM: *Discrete Transfer Method*
DWPA: *Deep Water Ports Act*
ED: *Eddy Dissipation*
EDC: *Eddy Dissipation Concept*
EEUU: *Estados Unidos da América*
EIA: *Energy Information Administration*
E&P: *Exploração & Produção*
ESSO: *Standard Oil*
ExxonMobil: *ExxonMobil Upstream Research Co.*
FANS: *Favre Avarage Navier-Stokes*
FB: *Fractional Bias*
FDM: *Finite Differences Method*
FDS®: *Código computacional do NIST*
FEED: *Front End Engineering and Design*

FEM: *Finite Elements Method*
FERC: *Federal Energy Regulatory Commission*
FLACS®: Código computacional do CMRI
FLUENT®: Código computacional da ANSYS GmbH
FPSO: *Floating Production, Storage and Offloading*
FSRU: *Floating Storage and Regasification Unit*
FTS: *Factor of Two Statistics*
FVM: *Finite Volume Method*
GdF: *Gaz de France*
G&E: Gás & Energia
GLP: Gás Liquefeito de Petróleo
GN: Gás Natural
GNL: Gás Natural Liquefeito
GNLE: Unidade Embarcada de Liquefação de GN ('Gás Natural Liquefeito Embarcado')
GRI: *The Gas Research Institute*
GTI: *Gas Technology Institute*
GTT: *Gaz Transport*
HSE: *Health and Safety Executive*
IBAMA: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IMO: *International Maritime Organization*
IR: *Infrared*
IHI: *Ishikawagima Heavy Industries*
JASMINE®: Código computacional do NIST
JGA: *Japan Gas Association*
KAMALEON Firex®: Código computacional do SINTEF
LES: *Large Eddies Simulation*
LGNFIRE3®: código computacional do GRI
LIM: *Lagrangian Integral Method*
LLNL: *Lawrence Livermore National Laboratory*
LNG: *Liquefied Natural Gas*
LII: Limite Inferior de Inflamabilidade
LSI: Limite Superior de Inflamabilidade
LSM90®: Código computacional do Laboratório Sandia
MARAD: *Maritime Administration*
MEPC: *Resolution Marine Environment Protection Committee*
MIE: *Minimum Ignition Energy*
MIT: *Massachusetts Institute of Technology*
NAR: *Narrow Angle Radiometers*
NACA: *National Advisory Committee for Aeronautics*
ND: Não disponível
NCDC: *The National Climatic Data Center*
NFPA: *National Fire Protection Association*
NIST: *National Institute of Standards and Technology.*
NMSE: *Normalized Mean Square Error*
NOAA: *National Oceanic and Atmospheric Administration*
NPC: *The National Petroleum Council*
NSDOE: *Nova Scotia Department of Energy*
OCIMF: *Oil Companies International Marine Forum*
ORU: *On-board Regasification Unit*
PLANGÁS: Plano e Produção Antecipada de Gás
PDF: *Probability Density Function*

PETROBRAS: Petróleo Brasileiro S.A.
PHOENICS®: Código computacional da CHAM Ltd.
PHMSA: *Pipeline & Hazardous Materials Safety Administration*
POOLFIRE6®: Código computacional do HSE
RANS: *Reynolds Averaged Navier-Stokes*
RPT: *Rapid Phase Transition*
RTE: *Radiative Transfer Equation*
SEA: *Specific Extinction Area*
SCF: *Shear Correction Flow*
SEP: *Surface Emissive Power*
SFPE: *Society of Fire Protection Engineering*
SIGTTO: *Society of International Gas Tanker and Terminal Operators*
SIMPLE: Algoritmo numérico usado em CFD para estimar campos de velocidades
SINTEF: *Stiftelsen for Industriell og Teknisk Forskning, The Foundation for Scientific and Industrial Research*
SOFIE®: Código computacional da *Cranfield University*
SPB: *Self-supporting Prismatic Shape*
SRD: *Safety and Reliability Directorate*
SST: *Shear Stress Transport*
STANJAN®: Código computacional do Departamento de Engenharia da *Stanford University*
STAR: *Stability Array Data*
TKE: *Turbulent Kinetic Energy*
TMS: *Technical & Management Systems*
TNO: *Technical Netherlands Organization*
TRW: *Thompson Ramo Wooldridge Inc (Empresa TRW Systems Group)*
UK: *United Kingdom*
UKAEA: *United Kingdom Atomic Energy Authority*
UNEP: *United Nations Environmental Programme*
USBM: *United States Bureau of Mines*
USCG: *United States Coast Guard*
USDOC: *United States Department of Commerce*
USDOE: *United States Department of Energy*
USDOT: *United States Department of Transportation*
UVCE: *Unconfined Vapor Cloud Explosion*
VULCAN®: Código computacional do Laboratório Sandia
WAR: *Wide Angle Radiometers*

Lista de tabelas

Tabela 4.1	Limites de Inflamabilidade de alguns combustíveis @ 25 °C	59
Tabela 4.2	Composição do GNL segundo a origem (mol %)	60
Tabela 4.3	Comparação entre tecnologias de construção de tanques de navios metaneiros	68
Tabela 5.1	Comparação do comportamento da poça para diversos modelos de atrito viscoso	84
Tabela 5.2	Testes de incêndios em poça de GNL (terra e água) – décadas de '60 e '80	91
Tabela 5.3	Sumário dos resultados das medições dos testes de 'Montoir' na terra ($D = 35$ m)	97
Tabela 5.4	Sumário dos resultados das medições dos testes de 'China Lake' na água	107
Tabela 5.5	Varição da vazão mássica de vaporização com o diâmetro da poça	110
Tabela 5.6	Fração (%) da energia de combustão irradiada (χ_r) para incêndios em poça de hidrocarbonetos	131
Tabela 5.7	Resultados experimentais do coeficiente de extinção espectral, \mathcal{L}_λ , e espessura ótica espectral, κ_λ , para incêndios de GNL	1451
Tabela 5.8	Comparação entre dados experimentais do poder emissivo médio e predições obtidas com modelo de zonas múltiplas de GNL contemplando efeitos da fuligem	156
Tabela 5.9	Testes de incêndios com GNL na água e na terra	166
Tabela 6.1	Propriedades físicas e de combustão do metano	218
Tabela 6.2	Dados experimentais de velocidade e vazão mássica de vaporização	219
Tabela 7.1	Áreas críticas do rasgo em ambas as geometrias do metaneiro	235
Tabela 7.2	Resultados da área máxima da poça para valores notáveis da área do rasgo – Área máxima da poça semicircular	236
Tabela 7.3	Resultados do tempo de vaporização para valores notáveis da área do rasgo - Tempo de vaporização da poça semicircular	236
Tabela 7.4	Comportamento relativo de parâmetros em função do aumento de $D_{p_{ci}}$	238
Tabela 7.5	Comparação de predições a geometria da pluma térmica com a literatura e experimentos	239
Tabela 7.6	Comportamento de parâmetros (I) – variação com diâmetros	245
Tabela 7.7	Comportamento de parâmetros (II) – valores inicial e final do diâmetro	252
Tabela 7.8	Comportamento de parâmetros (III) – valores inicial e final do diâmetro	254
Tabela 7.9	Comportamento de parâmetros (IV)	255
Tabela 7.10	Comportamento de parâmetros (V) – valores inicial e final do diâmetro	257
Tabela 7.11	Resultados da modelagem completa com acoplamento dos dois códigos	259
Tabela 7.12	Incertezas para derrame /espalhamento da poça	264
Tabela 7.13	Incertezas para geometria da pluma variando com o diâmetro da poça	266
Tabela 7.14	Incertezas para geometria da pluma variando com o número de Froude	268

Tabela 7.15	Incertezas para a variação do poder emissivo com o diâmetro da pluma	269
Tabela A.1	Sumário da notação funcional de radiação térmica	306
Tabela C.1	Área da poça e tempo de vaporização	356
Tabela C.2	Parâmetros das eqs. (C.37) a (C.41)	358
Tabela C.3	Características do navio metaneiro com geometria Fay (2003)	361
Tabela C.4	Dados de entrada do GNL derramado	362
Tabela C.5	Reprodução dos resultados de Fay (2003) para a área crítica do rasgo 9,1 m ²	363
Tabela C.6	Características do navio metaneiro com geometria Sandia (2008)	367
Tabela C.7	Dados de entrada do GNL derramado	367
Tabela C.8	Características para o vazamento crítico. Área do rasgo 17,66 m ²	368
Tabela C.9	Comparação entre simulações com outros modelos da literatura. Diâmetro do rasgo: 1 m	371
Tabela C.10	Comparação entre simulações com outros modelos da literatura. Diâmetro do rasgo: 5 m	372
Tabela C.11	Comparação entre simulações com outros modelos da literatura. Área do rasgo: 5 m ²	373
Tabela C.12	Propriedades, parâmetros e dados de entrada	377
Tabela C.13	Resultados obtidos com este trabalho vs. resultados da TMS (2006)	379

Lista de figuras

Figura 2.1	Terminal de importação de GNL da <i>El Paso</i> e <i>Southern LNG</i> , Ilha de Elba, Geórgia, EEUU	45
Figura 3.1	Terminais de GNL existentes e propostos na América do Norte, segundo a FERC. Posição em 12.4.2010	52
Figura 3.2	Processo de entendimento do risco	55
Figura 4.1	Cadeia de distribuição de GNL	61
Figura 4.2	<i>Carrier</i> com 5 tanques esféricos	63
Figura 4.3	<i>Carrier</i> com tanques de membrana dupla GTT nº 96®	63
Figura 4.4	<i>Carrier</i> com tanques prismáticos tipo SPB®	63
Figura 4.5	Construção e <i>hook-up</i> de tanque esférico <i>Kvaerner Moss</i> Tipo B® em um <i>carrier</i>	64
Figura 4.6	<i>Hook up</i> de um tanque esférico	64
Figura 4.7	Construção e <i>hook-up</i> de tanques de membranas GTT nº 96® em um <i>carrier</i>	65
Figura 4.8	Seção reta de um tanque de membranas duplas GTT nº 96®	65
Figura 4.9	<i>Hook-up</i> de um tanque prismático tipo SPB®	66
Figura 4.10	Desenho esquemático de um <i>carrier</i> com tanque independente Tipo B®	67
Figura 5.1	Mecanismos de punção do costado, derrame, dispersão e consequências no transporte marítimo de GNL	74
Figura 5.2	Perfuração do costado de um metaneiro seguida de derrame de GNL	75
Figura 5.3	Possíveis consequências do vazamento de GNL	79
Figura 5.4	Curva típica do fluxo térmico da ebulição	83
Figura 5.5	Formato típico de incêndio de metano em um dique de concreto isolado. Testes nº 1, 2 e 3 de ' <i>Montoir</i> ', da esquerda para direita	96
Figura 5.6	Distribuição estatística de dados com radiômetro NAR medidos em diferentes momentos em três locais da chama do teste nº 2 de ' <i>Montoir</i> '	98
Figura 5.7	Poder emissivo médio temporal, \bar{E} , calculado a partir de incêndios em poça de GNL de diferentes tamanhos. Altura calculada com a correlação de Thomas (1963)	100
Figura 5.8	Contornos do fluxo de radiação sobre planos de superfícies verticais orientadas a 1m acima do centro do dique. Teste nº 2 de ' <i>Montoir</i> '	101
Figura 5.9	Comparação dos dados medidos com espectrômetro de IR e espectrômetro na região visível da luz, para experimentos de incêndios de GNL com poças de 35 m, no espectro de corpo negro com temperaturas de 1.547 K	102
Figura 5.10	Incêndio de poça de GNL na água. Teste nº 5 de ' <i>China Lake</i> '; poça com 13 m de diâmetro	106
Figura 5.11	Comparação de dados experimentais da razão altura/diâmetro da pluma térmica de GNL com as correlações usadas nos modelos	111
Figura 5.12	Comparação entre modelos puntiforme e chama sólida com dados experimentais medidos com incêndios em trincheiras	125
Figura 5.13	Velocidade de vaporização em incêndios em poça (\dot{y})	126
Figura 5.14	Relação entre altura adimensional da chama e vazão mássica de vaporização adimensional (número de Froude)	137

Figura 5.15	Incêndio em poça de petróleo	146
Figura 5.16	Incêndio em poça de combustível JP-8	146
Figura 5.17	Comparação entre inventários utilizados	165
Figura 6.1	Retroalimentação positiva, mecanismo básico na combustão e explosão de gases	174
Figura 6.2	Incêndio em poça de petróleo decorrente de perfuração no costado do navio	194
Figura 6.3	Principais etapas de um incêndio em poça na água	194
Figura 6.4	Exemplo de metaneiro com unidade de regasificação (FSRU) a bordo	194
Figura 6.5	Componentes de um incêndio em poça	202
Figura 6.6	Modelo de três zonas da TMS (2006)	203
Figura 6.7	Modelo de duas zonas de Fay (2006) (MIT).	203
Figura 6.8	Distribuição das variáveis do escoamento no interior de uma chama de difusão	207
Figura 6.9	Modelo esquemático da pluma térmica de incêndio em poça de base circular na água	212
Figura 6.10	Pluma térmica de um incêndio real	212
Figura 7.1	Tempo de vaporização e área máxima da poça - Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,00021$ m/s	226
Figura 7.2	Tempo de vaporização e área máxima da poça - Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0011$ m/s	226
Figura 7.3	Geometria Fay (2003) – Área máxima da poça: Oito velocidades de vaporização	227
Figura 7.4	Geometria Fay (2003) – Tempo de vaporização: Oito velocidades de vaporização	227
Figura 7.5	Geometria Fay (2003) – Tempo de vaporização: Oito velocidades de vaporização (Detalhe)	228
Figura 7.6	Tempo de vaporização e área máxima da poça - Geometria Sandia (2008) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,00021$ m/s	229
Figura 7.7	Tempo de vaporização e área máxima da poça - Geometria Sandia (2008) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0011$ m/s	229
Figura 7.8	Geometria Sandia (2008) – Área máxima da poça: Oito velocidades de vaporização	230
Figura 7.9	Geometria Sandia (2008) – Tempo de vaporização: Oito velocidades de vaporização	230
Figura 7.10	Geometria Sandia (2008) – Tempo de vaporização (detalhe): Oito velocidades de vaporização	231
Figura 7.11	Geometria Sandia (2008) vs. Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,00021$ m/s	232
Figura 7.12	Geometria Sandia (2008) vs. Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0011$ m/s	232
Figura 7.13	Geometria Sandia (2008) vs. Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,00021$ m/s	233
Figura 7.14	Geometria Sandia (2008) vs. Geometria Fay (2003) com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0011$ m/s	233
Figura 7.15	Variação da geometria da pluma térmica com diâmetro da poça – Oito velocidades de vaporização	239
Figura 7.16	Variação da geometria da pluma térmica com número de Froude da combustão – Oito velocidades de vaporização	240
Figura 7.17	Variação do número de Froude da combustão com diâmetro da poça	241

Figura 7.18	Varição do poder emissivo médio temporal com diâmetro da poça	243
Figura 7.19	Varição do poder emissivo médio temporal com diâmetro da poça - Detalhamento da faixa $1\text{ m} \leq D_{pci} \leq 18\text{ m}$	244
Figura 7.20	Varição da emitância média temporal com diâmetro da poça	247
Figura 7.21	Varição da concentração da fuligem com diâmetro da poça	248
Figura 7.22	Varição da produção de fumaça com diâmetro da poça	249
Figura 7.23	Varição da transmitância média com diâmetro da poça	250
Figura 7.24	Razão L_V/D_{pci} e Fr_C com $\langle \dot{y} \rangle = 0,000324\text{ m/s}$	251
Figura 7.25	Razão L_V/D_{pci} e Fr_C com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0008\text{ m/s}$	252
Figura 7.26	Razão L_C/l_V e L_V/D_{pci} com $\langle \dot{y} \rangle = 0,000324\text{ m/s}$	253
Figura 7.27	Razão L_C/l_V e L_V/D_{pci} com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0008\text{ m/s}$	253
Figura 7.28	Emitância média temporal e poder emissivo na base do incêndio com $\langle \dot{y} \rangle = 0,000324\text{ m/s}$	256
Figura 7.29	Emitância média temporal e poder emissivo na base do incêndio com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0008\text{ m/s}$	256
Figura 7.30	Concentração de fuligem e Produção de fumaça com $\langle \dot{y} \rangle = 0,000324\text{ m/s}$	257
Figura 7.31	Concentração de fuligem e Produção de fumaça com $\langle \dot{y} \rangle = 0,0008\text{ m/s}$	258
Figura 7.32	Varição da geometria da pluma térmica com o diâmetro da poça circular	265
Figura 7.33	Varição da geometria da pluma térmica com o número de Froude da combustão	267
Figura B.1	Intercâmbio radiativo entre dois elementos de área de uma superfície negra	311
Figura B.2	Geometria para dedução da emissão a partir do volume de um gás	318
Figura B.3	Chama azulada de um bico de <i>bunsen</i> e amarelo-aralanzado de uma pluma de incêndio em poça	327
Figura C.1	Esquema de formação da poça semicircular	339
Figura C.2	Sistemas de contenção típicos para navios de GNL a granel. (a) Sistema Moss® com tanques esféricos. (b) Sistema GTT® com Dupla membrana ou tanque prismático	344
Figura C.3	Metaneiro com unidade de regasificação (FRSU) a bordo	344
Figura C.4	Configuração da carga de GNL	345
Figura C.5	Rasgo no costado de um navio metaneiro. Ataque de embarcação terrorista em 6.10.2002, Yemen	346
Figura C.6	Raio da poça <i>versus</i> tempo, para rasgos no casco, $D_h = 1\text{ m}$	347
Figura C.7	Raio da poça vs. diâmetro do rasgo no casco, $D_h = 1\text{ m}$	348
Figura C.8	Diâmetro do incêndio vs. tempo de vaporização	349
Figura C.9	Vazões mássicas vs. tempo de vaporização	349
Figura C.10	Massa de GNL na poça vs. tempo de vaporização.	349
Figura C.11	Equação (C.40)	357
Figura C.12	Equação (C.41)	357
Figura C.13	Tempo de vaporização e área da poça vs área do rasgo	364
Figura C.14	Tempo de vaporização e área da poça vs área do rasgo, conforme Fay (2003)	365
Figura C.15	Tempo de vaporização e área máxima da poça. Dados de Sandia (2008) para área do rasgo de 5 m^2	369

Lista de símbolos

Caracter ^{II}	Descrição	Unidade ^{III}
A	Área de uma superfície, área de uma seção reta transversal da chama que contém r	$[m^2]$
\mathbb{A}	Constante de correlação na equação fundamental de Thomas	$[-]$
A_h	Área do furo no costado do navio	$[m^2]$
$A_{h_{cr}}$	Área do rasgo do costado do navio crítica	$[m^2]$
A_p	Área lateral da poça de líquido fora do navio	$[m^2]$
$A_{p_{sc}}^{max}$	Área máxima da poça semicircular de líquido fora do navio	$[m^2]$
$A_{p_{ci}}^{max}$	Área máxima da poça circular de líquido fora do navio	$[m^2]$
$A_{p_{sc,ub}}^{max}$	Limite superior (<i>upper bound</i>) da área máxima da poça semicircular	$[m^2]$
$A_{p_{ci,ub}}^{max}$	Limite superior (<i>upper bound</i>) da área máxima da poça icircular	$[m^2]$
$A_{p_{sc,cr}}^{max}$	Área máxima crítica da poça semicircular	$[m^2]$
A_i	Área i participante, no cálculo do fator de configuração geométrica	$[m^2]$
A_j	Área j participante, no cálculo do fator de configuração geométrica	$[m^2]$
$A_{\mathcal{L}}$	Área específica da extinção da fuligem	$[m^2/kg]$
$A_{(m)}(t)$	Área de uma superfície material que contém o volume de controle, variável com o tempo	$[m^2]$
A_t	Área da seção reta constante do tanque do metaneiro	$[m^2]$
\mathbf{a}	Campo vetorial da aceleração	$[m/s^2]$
α	Coefficiente do ar de mistura na lateral da pluma	$[-]$
a^*	Área da poça adimensionalizada	$[-]$
$\overline{a^*}$	Área adimensional promediada temporalmente	$[-]$
$a^{*,max}$	Área máxima da poça adimensionalizada	$[-]$
$a_{cr}^{*,max}$	Área máxima crítica da poça adimensionalizada	$[-]$
$a_{\lambda}(\lambda, T, P, \mathcal{C}_i)$	Coefficiente de absorção	$[m^{-1}]$
a_{λ_m}	Coefficiente ponderal de absorção ou a_{λ}	$[m^{-1}]$
$a_{\lambda}^{\dagger}(\lambda, T, P)$	Coefficiente de absorção verdadeira	$[]$
$\overline{\mathbf{B}}$	Ou B_{ij} , parte simétrica de um campo tensorial espacial qualquer de 2ª ordem	$(*)^{IV}$
\mathbf{b}	Campo vetorial espacial qualquer	$(*)$
b_1, b_2, b_3	Componentes do vetor espacial correspondente	$(*)$

^{II} Consultar Apêndice A (Notações utilizadas) sobre o uso das notações de Gibbs (1960), tensorial, indicial e funcional utilizadas neste trabalho.

^{III} IMPORTANTE: Todas as unidades das grandezas das equações apresentadas neste trabalho são escritas com unidades métricas do Sistema Internacional (SI) sendo, portanto, desnecessário sua menção. Salvo nos casos quando houver termos adimensionais ou coeficientes específicos que requeiram citação explícita de unidades diversas daquele Sistema. Unidades derivadas (múltiplos, etc.), diferentes do SI serão, entretanto, mencionadas explicitamente. Por outro lado, a não citação das faixas de aplicabilidade das equações, decorre de não terem sido citadas na literatura original referenciada.

^{IV} O asterisco (*) que aparece nesta lista de símbolos denota que as unidades dependem da grandeza considerada.

b	Constante de correlação na equação fundamental de Thomas	[]
\bar{C}	Ou C_{ij} , tensor cruzado, representa as interações entre escalas filtradas e não filtradas da turbulência	[m ² /s ²]
C	Combustível consumido em uma reação de combustão	[-]
C	Curva arbitrária de fronteira da superfície orientada no espaço Euclidiano, usada para a formulação da integração curvilínea	[m]
C_d	Coeficiente de descarga	[-]
C_i	Linha de contorno da área participante i no cálculo do fator de configuração geométrica \mathcal{F}	[m]
C_j	Linha de contorno da área participante j no cálculo do fator de configuração geométrica, \mathcal{F}	[m]
C_{smk}	Concentração mássica das partículas de fumaça na pluma térmica do incêndio	[kg/m ³]
C_{soot}	Concentração mássica das partículas de fuligem na pluma térmica do incêndio	[kg/m ³]
\hat{C}_{soot}	Fração volumétrica de fuligem, volume médio de partículas por unidade de volume da nuvem de partículas	[]
CTV	<i>Cargo tank volume</i> , volume do tanque de carga de um metaneiro	[m ³]
C_1	Primeira constante de Plank para distribuição espectral de energia, valendo $0,59544 \times 10^{-12}$	[W.cm ²]
C_2	Segunda constante de Plank para distribuição espectral de energia, valendo 1,438	[cm.K]
\mathcal{C}_i	Composição das espécies químicas que compõem o material onde se propaga a radiação	[% v/v] [mol %]
c_p	Calor específico à pressão constante	[J/kg.K]
c_v	Calor específico a volume constante	[J/kg.K]
c_{pa}	Calor específico à pressão constante do ar	[J/kg.K]
c_{pg}	Calor específico (constante) à pressão constante dos gases de combustão no interior da pluma	[J/kg.K]
c_{pv}	Calor específico à pressão constante do vapor do combustível	[J/kg.K]
c_{pv}^0	Calor específico à pressão constante do vapor do combustível no interior da pluma de incêndio, onde os fluxos de massa e das espécies químicas, de entalpia, e das tensões normais compressivas e de cisalhamento são desprezíveis	[J/kg.K]
$C_p(T)$	Capacidade térmica específica à pressão constante, função da temperatura	[J/K]
$c_p(T)$	Calor específico à pressão constante	[J/kg.K]
\bar{D}	Ou D_{ij} , campo tensorial espacial qualquer de 2ª ordem; parte simétrica do tensor das deformações	(*) [N/m ²]
D	Diâmetro da base do incêndio, da poça de líquido	[m]
Da	Número de Damköhler	[-]
D_{est}	Comprimento estendido do arrasto causado pela ação do vento	[m]
DR	<i>Draft</i> , distância vertical entre a linha d'água e a quilha do navio, com a embarcação à plena carga	[m]
D_h	Diâmetro do rasgo do costado do navio	[m]

$D_{h,cr}$	Diâmetro crítico do rasgo do costado do navio	[m]
D_p	Diâmetro da partícula	[m]
$D_{p,ci}$	Diâmetro da poça semicircular	[m]
$D_{p,ci,ub}$	Limite superior diâmetro da poça circular	[m]
$D_{p,sc}$	Diâmetro da poça semicircular	[m]
$D_{p,sc,cr}$	Diâmetro crítico da poça semicircular	[m]
D_{soot}	Diâmetro da partícula de fuligem	[m]
$D_{p,sc,ub}$	Limite superior do diâmetro da poça semicircular	[m]
\mathcal{D}	Difusividade molecular mássica da mistura de gases por onde se propaga a chama	[m ² /s]
dA_i	Elemento de área i participante, no cálculo do fator de configuração geométrica	[m ²]
dA_j	Elemento de área j participante, no cálculo do fator de configuração geométrica	[m ²]
$d\kappa_\lambda$	Espessura ou espessura ótica diferencial	[m]
E	Designação geral do poder emissivo de uma chama; poder emissivo de uma superfície qualquer; poder emissivo da chama na superfície externa das zonas de combustão da poça	[kW/m ²]
\bar{E}	Poder emissivo (SEP-Surface Emissive Power) hemisférico total médio temporal da superfície da chama	[kW/m ²]
E_b	Poder emissivo hemisférico total de corpo negro	[kW/m ²]
\bar{E}_b	Poder emissivo hemisférico total de corpo negro médio temporal	[kW/m ²]
E_{eff}	Poder emissivo efetivo da superfície da chama das regiões da pluma obscurecidas pela fumaça	[kW/m ²]
$E_{\mathbb{F}}$	Poder emissivo da pluma térmica do incêndio	[kW/m ²]
E^{max}	Poder emissivo máximo da superfície da chama	[kW/m ²]
E^{med}	Poder emissivo médio da superfície da chama não associado à uma condição específica	[kW/m ²]
E_{smk}	Poder emissivo efetivo da superfície da chama das regiões da pluma obscurecidas pela fumaça	[kW/m ²]
$E_{smk}(Z)$	Poder emissivo da camada fumaça na cota Z no interior da pluma	[kW/m ²]
$E_{\mathbb{V}}$	Poder emissivo de corpo cinza equivalente da parte visível da chama; poder emissivo médio da superfície da chama, medido com radiômetro WAR, tomado na média de acordo com o comprimento visível da chama, na parte exterior a pluma térmica; poder emissivo de corpo negro na banda visível para uma superfície na temperatura T	[kW/m ²]
$E(Z)$	Poder emissivo da chama, variável ao longo das diferentes cotas Z no interior da pluma de incêndio	[kW/m ²]
E_0	Poder emissivo da superfície nominal da pluma de incêndio próximo à base e à superfície da poça	[kW/m ²]
$E_{\lambda,b}(\lambda)$	Ou, simplificada, $E_{\lambda,b}$, poder emissivo hemisférico espectral (monocromático) de corpo negro	[kW/m ²]
$E_{\lambda_i}(\lambda)$	Poder emissivo espectral dependente do comprimento de onda, λ , de um elemento i de superfície da pluma térmica do incêndio	[kW/m ²]

$(\hat{e}_i, \hat{e}_j, \hat{e}_k)$	Vetores unitários que compõem as unidades diádicas nas direções, respectivamente, das posições dos eixos x, y, z em coordenadas Cartesianas retilíneas retangulares	[-]
e	Energia específica; base dos logaritmos naturais	[J/kg]
F	Uma função qualquer	[-]
Fr	Número de Froude, forças inerciais vs. gravitacionais em fluidos	[-]
Fr_C	Número de Froude do combustível (ou da combustão)	[-]
$Fr_{C_{10}}$	Número de Froude com U_{wind} , a 10 m de altura	[-]
\mathcal{F}	Fator de configuração geométrica (<i>view factor</i>)	[-]
$\mathcal{F}_{A_i \rightarrow A_j}$	Ou $\mathcal{F}_{A_j \rightarrow A_i}$; contribuição ao fator de configuração a partir da área finita A_i da na posição i , em relação à área finita A_j receptora da radiação térmica emitida pela chama, ou vice versa	[-]
$\mathcal{F}_{dA_i \rightarrow A_j}$	Ou $\mathcal{F}_{dA_j \rightarrow A_i}$; contribuição ao fator de configuração a partir do elemento dA_i de área da pluma na posição i , em relação à área finita A_j ou vice versa	[]
$\mathcal{F}_{dA_i \rightarrow A_{obj}}$	Contribuição ao fator de configuração a partir do elemento dA_i de área da pluma na posição i , em relação à área de um objeto A_{obj} receptor da radiação térmica emitida pela chama	[-]
\mathbf{f}	Campo vetorial espacial das funções contínuas P, Q, R usadas no integrando do Teorema de Stokes; campo vetorial das forças de corpo	[N]
$f()$	Função de uma (ou mais) variável qualquer	[-]
\mathcal{f}	Fração mássica de produtos de combustão em relação ao combustível na mistura estequiométrica	[%]
\mathbf{g}	Campo vetorial da aceleração gravitacional	[m/s ²]
g	Módulo do campo da aceleração gravitacional	[m/s ²]
\dot{h}	Taxa de transporte axial de entalpia ao longo da pluma	[J/s]
h	Altura hidrostática do nível do líquido no tanque do navio, função do tempo; entalpia específica	[m] [J/kg]
h^*	Altura adimensionalizada do tanque do navio	[-]
h_v	Entalpia específica do vapor do combustível	[J/kg]
h_{ox}	Entalpia específica do oxidante	[J/kg]
h_0	Altura inicial do líquido dentro tanque de carga correspondente ao volume inicial V_0	[m]
h_C	Calor de aquecimento do combustível na zona de combustão por unidade de massa do combustível	[J/kg]
h_{cv}	Coefficiente de transferência de calor por convecção; coeficiente de película; coeficiente de filme	[J/s.m ² .K]
I	Intensidade hemisférica total da radiação térmica	[W/m ² .sr] ^v

^v Esferorradiano é a unidade de ângulo sólido, e seu símbolo é sr. Um esferorradiano é o ângulo subtendido por um segmento esférico, cuja área é igual ao quadrado de seu raio. Uma esfera completa subtendendo, por conseguinte, $4\pi r^2/r^2 = 4\pi$ esferorradianos. Um elemento de área nessa esfera subtendendo a calota de um ângulo sólido $d\Omega = dA_i/r^2$. (Lienhard IV e Lienhard V, 2005)

$I'_{\lambda}(\lambda, T, \Omega, \kappa_{\lambda})$	Ou, simplificada, I'_{λ} , intensidade direcional espectral da radiação térmica no comprimento de onda λ , na temperatura T subtendido pelo ângulo sólido Ω , percorrendo a espessura (profundidade) ótica κ_{λ}	[W/m ² .sr]
$I'_{\lambda,b}(\kappa_{\lambda})$	Intensidade direcional espectral de corpo negro da radiação térmica, dependente da espessura ótica	[W/m ² .sr]
I'	Intensidade direcional total	[W/m ² .sr]
$\mathcal{J}(Z)$	Intermitência da pluma térmica do incêndio, fração do tempo em que pelo menos parte da pluma é 'vista' acima da elevação Z	[-]
i	Energia interna específica; base unitária dos números complexos	[J/kg]
\mathbf{j}_i	Campo vetorial do fluxo de difusão mássica da espécie i	[kg/m ³ .s]
\mathbb{J}	Dilatação de um meio deformável, dada pelo Jacobiano da função mapeamento	[-]
\dot{j}	Taxa de transporte axial de quantidade de movimento linear ao longo da pluma	[kg.m/s ²]
\mathcal{K}	Fator de compressibilidade isotérmica	[Pa ⁻¹]
k	Condutividade térmica, coeficiente de transferência de calor por condução	[W/m.K]
k_{mix}	Condutividade térmica da mistura dos gases que participam da reação de combustão	[W/m.K]
$\bar{\kappa}$	Coeficiente de extinção para radiação eletromagnética (atenuação exponencial que multiplica a amplitude da onda na equação da propagação de onda), coeficiente de extinção da teoria do eletro-magnetismo, relacionado com a permissividade do meio	[m ⁻¹]
$\bar{\mathbf{L}}$	Ou L_{ij} , tensor de Leonard, representa as interações entre as escalas resolvidas da turbulência que incluem as contribuições de escala sub-malha	[m ² /s ²]
L	Comprimento qualquer	[m]
L_{beam}	Comprimento do feixe ótico	[m]
$L_{\mathbb{C}}$	Comprimento da chama, ou altura, da região de combustão intensa (combustão 'limpa')	[m]
L_{ch}	Dimensão característica para uma particular geometria da chama	[m]
Le	Número de Lewis, difusão molecular vs. difusão térmica	[-]
L_{\parallel}	Comprimento da zona intermitente da chama visível	[m]
L_P	Livre percurso médio do fóton	[m]
$L_{\mathbb{V}}$	Comprimento (ou altura média) da chama visível	[m]
\mathcal{L}_{λ}	Coeficiente de extinção espectral para a radiação térmica	[m ⁻¹]
$\mathcal{L}_{\lambda_{soot}}$	Coeficiente de extinção espectral da fuligem	[m ⁻¹]
\mathcal{L}_{λ}^*	Variável fictícia de integração do coeficiente de extinção	[m ⁻¹]
\mathcal{L}_{λ_m}	Coeficiente mássico de extinção espectral para a radiação térmica	[m ⁻¹]

\mathcal{L}_m	Livre percurso médio de extinção; distância média de penetração no meio antes de haver extinção (absorção ou espalhamento)	[m ⁻¹]
\mathcal{L}_{mix}	Coefficiente de extinção da mistura	[m ⁻¹]
$\mathcal{L}_{mix}L_{ch}$	Parâmetro adimensional, denominado na literatura como 'espessura ótica simplificada'	[-]
$\mathcal{L}_{\lambda_{mix}}$	Coefficiente de extinção espectral da mistura homogênea espectralmente 'cinza', dependente do comprimento de onda do espectro emissor	[m ⁻¹]
l	Comprimento de um percurso atravessado pela radiação térmica, expresso nas mesmas unidades do comprimento de onda, μm ; co-seno diretor na direção x , adimensional	[m]
l_i, m_i, n_i	co-senos diretores de dA_i	[-]
l_j, m_j, n_j	co-senos diretores de dA_j	[-]
l_0	Maior escala de comprimento corresponde à dimensão geométrica do sistema, a escala de comprimento integral, na turbulência.	[m]
l_K	Comprimento da escala de Kolmogorov da turbulência	[m]
l_T	Escala de comprimento integral característico de um escoamento turbulento	[m]
M	Massa de um corpo, massa de um volume material	[kg]
\dot{M}	Taxa de derrame de GNL pelo rasgo no costado do navio	[kg/s]
\mathcal{M}	Quantidade de elementos químicos na mistura do material fluido	[-]
\mathcal{M}_i	Massa molar da espécie i	[kg/mol]
\dot{m}	Taxa global de transporte axial de massa (vazão mássica) dos gases que cruzam as seções da pluma térmica	[kg/s]
$\dot{m}_a(Z)$	Taxa global de transporte de massa (vazão mássica) de ar de mistura alimentado no interior da pluma térmica, até uma cota vertical qualquer Z da pluma térmica, acima da base da poça do combustível	[kg/s]
\dot{m}_d	Taxa de descarga de massa (vazão mássica) de GNL através do rasgo no costado do navio	[kg/s]
$\dot{m}_g(Z)$	Taxa global de transporte de massa de gases quentes de combustão no interior da pluma térmica, numa cota vertical qualquer Z acima da base da poça do combustível líquido criogênico	[kg/s]
$\dot{m}_v(Z)$	Ou Taxa global de transporte de massa de vapor de combustível criogênico no interior da pluma térmica, até uma cota vertical qualquer Z acima da base da poça do combustível	[kg/s]
\dot{m}_{v_0}	Ou $\dot{m}_{v_0}(0)$, taxa de alimentação de massa de combustível líquido criogênico vaporizado na poça (base do incêndio) na cota $Z = 0$, para o interior da pluma térmica do incêndio	[kg/s]
m_i	Fração molar da espécie química i na fase líquida do combustível	[-]

\dot{m}_e''	Vazão mássica de vaporização do combustível líquido criogênico por unidade de área devido à ebulição da poça devido à transferência de calor do substrato água (aquecimento) para a poça, doravante denominada de forma abreviada 'vazão mássica por ebulição', expressa em (massa de combustível em vaporização devido à ebulição)/(área da poça)(tempo)	[kg/m ² .s]
\dot{m}_r''	Vazão mássica de vaporização do combustível líquido criogênico por unidade de área devido à transferência de calor por radiação do incêndio da chama para a poça, com subsequente aquecimento da mesma, doravante denominada de forma abreviada 'vazão mássica por radiação', expressa em (massa de combustível em vaporização devido à radiação)/ (área da poça) (tempo)	[kg/m ² .s]
\dot{m}_v''	Vazão mássica global de vaporização do combustível líquido criogênico por unidade de área, doravante denominada de forma abreviada 'vazão mássica de vaporização' expressa em (massa global de combustível em vaporização)/(área da poça)(tempo)	[kg/m ² .s]
N	Enésimo elemento de área da superfície da chama; quantidade total de componentes do GNL (combustível misturado); componente de uma mistura de combustíveis, quantidade total de espécies químicas em uma mistura de combustíveis; quantidade total de valores da grandeza considerada	[-]
N_A	Número de Avogadro, 6,022045 x 10 ⁵	[mol ⁻¹]
N_{gl}	Número de graus de liberdade na turbulência	[-]
N_s	Densidade do número de partículas	[m ⁻³]
N_{soot}	Densidade do número de partículas de fuligem por volume	[m ⁻³]
\mathbf{n}	Campo vetorial normal a uma superfície A orientada no espaço	[-]
$\hat{\mathbf{n}}$	Vetor normal unitário	[-]
$\hat{\mathbf{n}}_i, \hat{\mathbf{n}}_j$	Vetores normais unitários, perpendiculares aos elementos de superfície infinitesimais dA_i, dA_j	[-]
n	Índice de refração simples; quantidade de predições que se situam entre valores correspondentes de observações	[-]
η	Expoente de ajuste da função polinomial, $\check{p}(\xi)$, que descreve a probabilidade da fração do tempo com que as camadas externas da chama cilíndrica 'mostra' o núcleo luminoso da chama que irradia com poder emissivo máximo	[-]
n	Número de moles	[-]
n_i	Fração molar, fração mássica da espécie química i na fase vapor do combustível	[-]
n_{H_2}	Número de moles de hidrogênio na reação para a completa combustão do combustível formando CO ₂ e H ₂ O	[-]

n_{O_2}	Número de moles do oxigênio na reação para a completa combustão do combustível formando CO ₂ e H ₂ O	[-]
n_{prod}	Fração mássica do produto da combustão	[-]
n_{soot}	Número de partículas de fuligem	[-]
O	Oxidante consumido em uma reação de combustão	-
O	Ordem de magnitude	-
$\bar{\mathbf{P}}$	Tensor das pressões (ou das tensões totais)	[N/m ²]
P	Pressão; Produtos de uma reação de combustão	[N/m ²]
P_a	Pressão atmosférica	[N/m ²]
P_w^{sat}	Pressão do vapor d'água saturado na temperatura de bulbo seco do ar na pressão atmosférica reinante	[N/m ²]
\mathbb{P}	Constante de correlação na equação fundamental de Thomas	[-]
$\check{p}(\epsilon)$	Intermitência da chama, probabilidade da fração do tempo com que as camadas externas da chama cilíndrica 'mostra' o núcleo luminoso da chama que irradia com poder emissivo máximo, adimensional	[-]
$\bar{\mathbf{Q}}$	Ou Q_{ij} , tensor Reynolds, relaciona as interações entre as escalas não filtradas da turbulência	[m ² /s ²]
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor; taxa de calor liberado; taxa ^{vi} de energia radiante	[kJ/s]
$\dot{Q}_{\lambda,a}$	Taxa de energia absorvida no comprimento de onda λ	[J/s]
$\dot{Q}_{\lambda,e}$	Taxa de energia emitida no comprimento de onda λ	[J/s]
\dot{Q}'''	Taxa de energia térmica gerada ou armazenada por unidade de volume	[J/s.m ³]
\dot{Q}/A	Taxa de calor liberado por unidade de área (ou fluxo por unidade de tempo)	[W/m ²]
\mathbf{q}_c	Campo vetorial do fluxo de calor transferido por condução	[kW/m ²]
\mathbf{q}_r	Campo vetorial do fluxo de calor transferido por radiação	[kW/m ²]
$\mathbf{q}_{r,\lambda}$	Campo vetorial do fluxo de calor transferido por radiação monocromática	[kW/m ²]
q	Fluxo de radiação térmica emitida pelo incêndio incidente em um receptor a uma dada distância contada a partir da borda da poça, ou do centro da pluma do incêndio	[kW/m ²]
q	Propriedade qualquer transportada no tensor do estresse de Reynolds (fração mássica, entalpia, fração molar, velocidade)	(*)
\tilde{q}_i	Média de Favre da quantidade transportada pela espécie química i	(*)
$\overline{q_i''}$	Média temporal de Reynolds da flutuação de Favre da propriedade transportada pela espécie química i	(*)
R	Raio da esfera; raio do hemisfério que contém um gás; raio da poça de diâmetro D ; constante de um gás	[m] [J/kg.K]
Re	Número de Reynolds	[-]
Re_T	Número de Reynolds turbulento	[-]

^{vi} Na literatura encontram-se também os termos, por exemplo, *radiative heat flow* e *radiative heat flux*, respectivamente, para taxa e fluxo de energia térmica.

RH	Umidade relativa	[%]
$\mathbf{r}(x)$	Vetor posição da função de mapeamento (ou transformação), tal que $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{r}_0, t)$	[m]
r	Distância radial a partir do eixo da pluma térmica até sua borda, incêndio	[m]
\tilde{r}	Razão ou variável de avanço do progresso da reação de combustão	[-]
r	Razão entre massa de ar estequiométrico de mistura e massa de vapor de combustível, 17,17 para CH_4	[-]
S	Distância em linha reta entre dois pontos; distância do centro de um incêndio; distância ao longo da linha de centro da pluma do incêndio; coordenada ao longo do percurso da radiação; distância entre pontos das curvas C_i e C_j respectivas, quando usada no cálculo do fator de configuração geométrica; espessura da camada de gás	[m]
S	Quantidade de espécies químicas diferentes no processo de combustão	[-]
S^*	Variável fictícia de integração	(*)
\mathbf{s}	Vetor distância	[m]
$\hat{\mathbf{s}}$	Direção do vetor distância unitário	[m]
s	Entropia específica;	[J/K.kg]
$\bar{\mathbf{T}}$	Seção reta do espalhamento	[cm ²]
$\bar{\mathbf{T}}$	Campo tensorial espacial (2ª ordem) qualquer; tensor das tensões	(*) [N/m ²]
$\bar{\mathbf{T}}_{\hat{\mathbf{n}}}$	Tensor das tensões de contato	[N/m ²]
T	Temperatura absoluta; temperatura absoluta variável qualquer	[K]
$\langle T \rangle$	Temperatura absoluta média ao longo do eixo da pluma	[K]
T_A	Temperatura da superfície A	[K]
T_a	Temperatura de bulbo seco do ar; temperatura ambiente ou do ar atmosférico externo à pluma	[K]
T_{ad}	Temperatura adiabática da chama	[K]
T_b	Temperatura de corpo negro	[K]
T_e	Temperatura normal de ebulição	[K]
T_F	Temperatura da chama	[K]
T_g	Temperatura dos gases quentes no interior da pluma térmica	[K]
$T_g(Z)$	Temperatura dos gases quentes no interior da pluma térmica, na cota Z do incêndio	[K]
T_v	Temperatura do vapor do combustível no interior da pluma térmica	[K]
$T_v(0)$	Temperatura do vapor do combustível na base do incêndio ($Z = 0$)	[K]
T_1	Temperatura inicial do combustível	[K]
T_2	Temperatura final de ebulição do combustível	[K]
\mathbf{t}_n	Campo vetorial das tensões compressivas normais	[N]
t	Tempo	[s]
t^*	Tempo adimensionalizado	[-]
t_v^*	Tempo de vaporização adimensionalizado	[-]

t_{vcr}^*	Tempo de vaporização adimensionalizado	[-]
t_{chm}	Tempo característico da reação química	[s]
t_d	Duração da descarga do tanque perfurado do navio	[s]
t_T	Tempo característico do transporte mecânico turbulento	[s]
t_v	Tempo de vaporização da poça	[s]
t_{vcr}	Tempo de vaporização crítico	[s]
t_{vlb}	Valor limite inferior do tempo de vaporização	[s]
U^*	Módulo do vetor velocidade adimensional do vento	[-]
U_{ch}	Módulo do vetor velocidade característica do vento	[m/s]
U_{wind}	Módulo do campo vetorial \mathbf{u} da velocidade do vento	[m/s]
U_{10}^*	Velocidade adimensional do vento a 10 m de altura a partir da superfície do substrato	[m/s]
\mathbf{u}	Campo vetorial espacial qualquer; campo vetorial da velocidade linear; vetor velocidade axial ao longo da pluma; vetor da velocidade média do centro de massa do escoamento no interior da pluma	[m/s]
$ \overline{\mathbf{u}_g(Z)} $	Velocidade média temporal dos gases como função da cota de elevação ao longo do eixo da pluma	[m/s]
$\tilde{\mathbf{u}}$	Média de Favre do vetor velocidade	[m/s]
\mathbf{u}''	Flutuação do vetor velocidade em torno da média de Favre	[m/s]
$\overline{\mathbf{u}''}$	Média temporal de Reynolds da flutuação do vetor velocidade em torno da média de Favre	[m/s]
$\mathbf{u}(Z, t)$	Campo vetorial da velocidade axial ao longo da pluma, na componente axial Z	[m/s]
u'	Flutuação do vetor velocidade em torno da média de Reynolds	[m/s]
V	Volume	[m ³]
V_0	Volume inicial derramado (ou dentro do tanque), quando a altura do líquido é h_0 , através do rasgo no costado do navio	[m ³]
$V_{(m)}(t)$	Volume material da configuração no tempo t	[m ³]
$V_{(m)}(t = 0)$	Volume material da configuração no tempo $t = 0$	[m ³]
V_{soot}	Volume médio das partículas de fuligem	[m ³]
V_p	Volume do fluido na poça derramado a partir do tanque na poça através do rasgo no costado do navio	[m ³]
V_t	Volume total da nuvem de partículas de fuligem	[m ³]
$\forall(t)$	Volume de controle dependente do tempo, região do espaço ocupada por um corpo na configuração corrente, que contém sempre as mesmas partículas	[m ³]
\dot{V}	Vazão volumétrica de derramamento de GNL na poça	[m ³ /s]
\mathbf{v}	Campo vetorial espacial qualquer	-
$\boldsymbol{\nu}$	Campo vetorial espacial do vetor vorticidade	[rad/s]
v	Volume específico	[m ³ /kg]
v^*	Volume adimensionalizado	[-]
v/v	Concentração percentual volumétrica	[%]
\tilde{u}'	Flutuação do módulo da velocidade em torno da média temporal de Reynolds	[m/s]
\mathbf{w}	Campo vetorial espacial qualquer	(*)

w	Componente do vetor velocidade \mathbf{u} na direção axial Z da pluma térmica do incêndio	[m/s]
w_{cl}	Velocidade ao longo da linha de centro	[m/s]
$\langle w \rangle$	Valor médio da componente vertical da velocidade na zona de combustão da pluma térmica	[m/s]
w	Fração mássica	[-]
w_i	Fração mássica da espécie química i na pluma de incêndio	[-]
w_j	Fração mássica da espécie química j na pluma de incêndio	[-]
w_{prod}	Fração mássica dos produtos de combustão	[-]
\dot{w}_i	Taxa de produção molar da espécie i por unidade de volume	[mol/m ³ .s]
w_{cl}	Componente da velocidade ao longo da linha de centro da pluma térmica	[m/s]
\bar{w}	Valor médio da componente vertical da velocidade na zona de combustão da pluma térmica	[m/s]
X_{O_i}	i valores medidos (ou observados) de uma grandeza relatados na literatura	(*)
X_{P_i}	i valores previstos (ou calculados) de uma grandeza simulados pelo modelo	(*)
x	Comprimento da coordenada Cartesiana retangular x ; um ponto qualquer do espaço Euclidiano	[m]
$\mathbf{x} = \mathbf{r}(x)$	Dependência funcional entre o vetor posição e o mapeamento de cada ponto x do espaço Euclidiano	-
\mathbf{x}	Vetor posição de um ponto qualquer do espaço Euclidiano, medido em relação a uma origem	[m]
x_{L_F}	Coordenada da posição de um dado ponto na superfície da chama	[-]
x_j, y_j, z_j	Coordenadas de qualquer ponto da linha de contorno da área participante C_j	[m]
Y	Fração mássica do combustível queimado que é emitido como fumaça	[%]
y	Comprimento da coordenada Cartesiana retangular y	[m]
\dot{y}	Velocidade linear de regressão do combustível líquido na poça devido à vaporização do líquido criogênico na poça, doravante denominada 'velocidade de vaporização' em unidades de comprimento de regressão da poça devido à combustão por unidade de tempo. Esta velocidade é denominada na literatura como 'velocidade de regressão', 'velocidade aparente de vaporização', 'velocidade de combustão', 'taxa de combustão'	[m/s]
$\langle \dot{y} \rangle$	Velocidade linear média de diversas medições da regressão do combustível líquido na poça devido à vaporização do líquido criogênico na poça	[m/s]
$\langle \dot{y}_b \rangle$	Velocidade de vaporização por ebulição da poça não confinada na água	[m/s]
$\langle \dot{y}_r \rangle$	Velocidade de vaporização por radiação da poça não confinada na água	[m/s]
$\langle \dot{y} \rangle^{max}$	Velocidade máxima de vaporização da poça de diâmetro infinito	[m/s]

Z	Altura da coordenada vertical axial acima da base da poça de combustível, uma cota qualquer no interior da pluma de incêndio	[m]
Z_0	Cota da fonte virtual localizada a uma distância abaixo da superfície da poça (base do incêndio)	[m]
Z_i	Fração mássica do elemento químico i	[-]
$Z_{v, stch}$	Fração molar estequiométrica do vapor do combustível	[-]
z	Comprimento da coordenada Cartesiana retangular z	[m]

Símbolos gregos

Caracter	Descrição	Unidade
α	Absortância (corpo) hemisférica total; absortividade (superfície) hemisférica total, adimensional; difusividade térmica	[-]
$\alpha'_\lambda(\lambda, T, P, S)$	Absortância direcional espectral	[-]
$\tilde{\beta}$	Campo tensorial espacial (3ª ordem)	(*)
β	Coefficiente de expansão volumétrica; constante adimensional de espalhamento da poça; viscosidade global	[K ⁻¹] [-] [Pa.s]
Δ	Razão entre a diferença de densidades entre a água do mar e do GNL e a densidade da água do mar	[-]
ΔT_{cl}	Aumento da temperatura ao longo da linha de centro da pluma	[K]
ΔH_{C_l}	Calor de combustão inferior do combustível líquido	[J/kg]
ΔH_{v_l}	Calor de vaporização do combustível líquido no ponto de ebulição	[J/kg]
$\Delta \mathcal{H}_{v_l}$	Calor de vaporização modificado do combustível líquido no ponto de ebulição	[J/kg]
$\Delta \varepsilon_{\lambda_{dc,w}}$	Fator de correção da emitância para o entrelaçamento das bandas do CO ₂ e do H ₂ O(v).	[-]
$\Delta \rho$	Diferença entre as densidades do ar e dos gases quentes no interior da pluma térmica	[kg/m ³]
$\bar{\delta}$	Espessura média temporal da poça semicircular ao longo da radial da poça	[m]
ϵ	Razão entre o comprimento de uma cota vertical ao longo do eixo do incêndio e o comprimento visível da pluma do incêndio	[-]
ε	Emitância (corpo) hemisférica total; emissividade hemisférica total (superfície); taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[-] [m ² /s ²]
$\tilde{\varepsilon}$	Média de Favre da taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	[J/s]
ε_v	Emissividade (superfície), emitância (corpo) do vapor (gás cinza) do combustível	[-]
$\varepsilon'_\lambda(\lambda, T, P; S)$	Emitância direcional espectral	[-]
$\varepsilon_{\lambda_{dc}}$	Emitância hemisférica espectral integrada espectralmente pela banda molecular do CO ₂	[-]

$\varepsilon_{\lambda_{mix}}$	Emitância hemisférica espectral de uma mistura homogênea	[-]
$\varepsilon_{\lambda_{soot}}$	Emitância hemisférica espectral da fuligem	[-]
$\bar{\varepsilon}_{\lambda_{soot}}$	Emitância média ponderada espectralmente da fuligem	[-]
ε_{λ_w}	Emitância hemisférica integrada espectralmente pela banda molecular do H ₂ O(v)	[-]
$\bar{\varepsilon}$	Emitância hemisférica total média temporal do incêndio	[-]
$\bar{\varepsilon}_{\lambda}$	Emissividade hemisférica espectral tomada na média pelo comprimento de onda	[-]
θ	Ângulo de inclinação da chama (<i>tilt</i>) devido ao arrasto provocado na chama pela ação do vento, grau; ângulo polar cônico em coordenadas esféricas, medido a partir da normal à superfície \hat{n}_i ou \hat{n}_j , para um hemisfério, $0 \leq \theta \leq \pi/2$	[sr] [°]
K	Segundo coeficiente da viscosidade global (<i>bulk</i>), viscosidade volumétrica, dilatacional	[Pa.s]
κ	Energia cinética turbulenta	[m ² /s ²]
$\tilde{\kappa}$	Média de Favre da energia cinética turbulenta (<i>Turbulent Kinetic Energy-TKE</i>)	[m ² /s ²]
$\kappa - \varepsilon$	Modelo que define produção de energia cinética turbulenta e taxa de dissipação da turbulência	-
$\kappa - \omega$	Modelo que define produção de energia cinética turbulenta κ e a razão ω entre a produção dessa energia κ e sua dissipação ε	-
$\kappa_{\lambda}(S)$	Ou, simplificada, κ_{λ} , espessura óptica espectral, profundidade óptica espectral, opacidade, comprimento do percurso ótico	[m]
κ_{λ}^*	Variável fictícia de integração da espessura óptica	[m]
λ	Comprimento de onda da radiação; Comprimento de onda no meio	[μm]
μ	Viscosidade dinâmica ou absoluta	[Pa.s]
$\bar{\mu}$	Viscosidade dinâmica média temporal	[Pa.s]
μ_{ij}	Proporção mássica do elemento químico <i>i</i> na espécie <i>j</i>	[-]
ζ_{C_1}	Primeiro fator adimensional de configuração para a combustão	[-]
ζ_{C_2}	Segundo fator adimensional de configuração para a combustão	[-]
ζ_{F_1}	Primeiro fator adimensional de configuração para a zona da pluma térmica	[-]
ζ_{F_2}	Segundo fator adimensional de configuração para a zona da pluma térmica	[-]
ρ	Densidade	[kg/m ³], [-]
$\bar{\rho}$	Densidade média temporal	[kg/m ³]
ρ_a	Densidade do ar atmosférico	[kg/m ³]
ρ_g	Densidade dos gases dentro da pluma	[kg/m ³]
ρ_i	Densidade parcial da espécie química <i>i</i>	[kg/m ³]
ρ_l	Densidade do combustível líquido	[kg/m ³]
ρ_v	Densidade do vapor do combustível líquido	[kg/m ³]

$\rho_{v,a}$	Razão entre as densidades do vapor do combustível e do ar	[-]
ρ_w	Densidade do vapor d'água	[kg/m ³]
$\rho'_\lambda(\lambda, T, P, S)$	Refletância direcional espectral	[-]
$\bar{\sigma}$	Ou, σ_{ij} , tensor da taxa líquida de estiramento da chama	[s ⁻¹]
σ	Constante de Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$	[W/m ² .K ⁴]
$\sigma_{S,\lambda}(\lambda, T, P, \mathcal{C}_i)$	Coefficiente de espalhamento	[-]
σ_{S,λ_m}	Coefficiente mássico de espalhamento	[-]
Φ	Função dissipação viscosa de Rayleigh	[m ² /s ³]
$F(\Phi)$	Função intermediária associada à dissipação viscosa	[m ² /s ³]
ϕ	Fração da massa do ar misturado até uma dada cota Z da pluma térmica que é queimada com seu equivalente estequiométrico de combustível, eficiência de combustão	[-]
φ_C	Razão entre a massa de combustível e massa estequiométrica de ar consumido ^{vii}	[-]
φ_V	Razão de equivalência na pluma na borda visível da chama	[-]
ξ	Escalar passivo, escalar conservado da fração de mistura, fração de mistura	[-]
$\bar{\xi}$	Média de Favre da fração de mistura	[-]
$\overline{(\xi'')^2}$	Média de Favre da variância das flutuações do escalar passivo	[-]
ξ_i	Fração de mistura da espécie química i	[-]
ξ_{prod}	Fração de mistura dos produtos de combustão	[-]
ξ_{stch}	Fração de mistura estequiométrica	[-]
$\bar{\tau}$	Campo tensorial espacial (2ª ordem) das tensões viscosas	[N/m ²]
τ	Transmitância, transmissividade	[-]
τ_{atm}	Transmitância hemisférica total da atmosfera	[-]
τ_{smk}	Transmitância hemisférica total da fumaça	[-]
τ_{soot}	Transmitância hemisférica total da fuligem	[-]
$\tau'_\lambda(\lambda, T, P, S)$	Transmitância direcional espectral da atmosfera entre a superfície elementar da pluma do incêndio e o objeto	[-]
$\tau_\lambda(\lambda)$	Transmitância hemisférica espectral da atmosfera entre a superfície elementar da pluma do incêndio e o objeto receptor, dependente do comprimento de onda, λ , da radiação	[]
ν	Viscosidade cinemática	[m ² /s]
ν_a	Viscosidade cinemática do ar	[m ² /s]
ν_T	Viscosidade turbulenta do escoamento, coeficiente de troca turbulenta	[m ² /s]
Y	Parâmetro global do escoamento usado na modelagem do espalhamento da poça de GNL	[]
Y_{cr}	Valor crítico do parâmetro do escoamento	[]

^{vii} Este parâmetro é o inverso da mesma razão adotada pela TMS (2006), que considera ϕ como a razão entre a massa de ar estequiométrico e massa de combustível, reportada no capítulo 5 (Revisão bibliográfica do estado da arte). O símbolo adotado naquele capítulo é o mesmo, porém grafado de outra forma, para manter a coerência de notação.

κ_r	Fração média da energia de combustão irradiada pela chama	[%]
$\tilde{\chi}$	Taxa de dissipação do escalar passivo ξ da fração de mistura	[s ⁻¹]
Ψ	Razão entre o comprimento da zona de combustão 'limpa' e o comprimento da chama visível	[]
ψ	Ângulo azimutal plano em coordenadas esféricas, medido no plano da superfície, entre um eixo arbitrário na projeção de \hat{s} , para um hemisfério, $0 \leq \psi \leq 2\pi$	[rad]
$\bar{\Omega}$	Ou Ω_{ij} , tensor antissimétrico da vorticidade	[N/m ²]
Ω	Ângulo sólido subtendido por uma calota hemisférica	[sr]
ω	Campo vetorial espacial da velocidade angular	[rad/s]
ω	Inverso do coeficiente a razão da expansão volumétrica devido à combustão, $1/\beta$; taxa de dissipação específica da turbulência	[-]

Subscritos

Caracter	Descrição
A	Superfície
a	Absorvido; ar
ad	Adiabático
atm	Atmosfera
$beam$	Feixe ótico
b	Corpo negro
c	Calor trocado por condução
d	Descarga
ci	Circular
\mathbb{C}	Zona de combustão, combustão 'limpa'
ch	Valor característico
chm	Característico da reação química
\mathbb{C}	Linha de centro (<i>centerline</i>)
cr	Valor crítico
cv	Calor trocado por convecção
dA_i, dA_j	Avaliado na área elementar i ou j
$dA_i \rightarrow A_{obj}$	Saindo da área elementar i para a área do objeto A_{obj}
dc	Dióxido de carbono
e	Emissor, emitido, ebulição, valor médio do comprimento que considera o feixe ótico
eff	Efetivo
est	Estendido
\mathbb{F}	Pluma térmica do incêndio, chama
g	Gás
gl	Graus de liberdade na turbulência
gr	Corpo cinza
\mathbb{I}	Zona intermitente da pluma de incêndio

i, j	Elementos de área da pluma na posição; componente qualquer de uma mistura; índice ou contador da notação indicial do 'i-ésimo' e 'j-ésimo' item (componente, superfície, etc.), adimensional; incidente
i, j, k, l, m	Índices da notação indicial
inc	Incidente
\mathcal{K}	Escala de Kolmogorov da turbulência
l	Combustível líquido
lb	Limite inferior (<i>lower bound</i>)
m	Coefficiente referido à massa (coeficiente 'mássico')
(m)	Material, seguindo o movimento, coordenadas materiais Lagrangeanas
mix	Mistura
n	Normal à superfície
obj	Objeto
ox	Oxidante
P	Fóton; pressão constante
p	Partícula; poça de GNL fora do navio
$prod$	Produtos de combustão dentro da pluma
$proj$	Projetado; projeção
r	Refletido, refletor; calor trocado por radiação; irradiado
S	Coordenada ao longo do percurso da radiação, m
sc	Semicircular
smk	Fumaça
$soot$	Fuligem
$stch$	Estequiométrico
T	Turbulência, turbulento
t	Total, transmitido
tan	Tangencial, tangent
ub	Limite superior (<i>upper bound</i>)
V	Volume, volumétrico
\mathbb{V}	Zona visível da chama, não obscurecida pela fumaça
v	Vapor do combustível
v	Vaporização do combustível
w	Água, vapor d'água
$wind$	Vento
λ	Dependência espectral (comprimento de onda); monocromático; um dado comprimento de onda
0	(Zero) na base do incêndio em poça
1, 2, 3 ...	Ordem seqüencial
10	A 10 m de altura

Sobrescritos e adornos

Caracter	Descrição
.	Taxa temporal
*	Grandeza adimensionalizada, adimensional; variável fictícia de integração, ou indicado explicitamente com outro significado como, p. ex., em ΔH_{vl}^*

—	Grandeza tomada na média em relação a alguma outra grandeza (tempo, comprimento de onda, volume), ex.: média temporal de Reynolds (tempo)
~	Grandeza tomada pela média ponderada em relação à densidade, ex.: média de Favre
=	Campo vetorial espacial de 2ª ordem; segunda decomposição da média temporal (média da média temporal) de Reynolds
⌋	Campo tensorial espacial de 3ª ordem
^	Grandeza expressa em volume médio de uma dada quantidade por unidade de volume de outra quantidade, adimensional; vetor unitário
⌋	Função de probabilidade
2, 3, 4 ...	Diferenciais de ordem superior, 2ª, 3ª, 4ª, 4ª,..., usadas normalmente em transporte de energia radiativa
<i>max</i>	Referente ao valor máximo, de pico
<i>med</i>	Valor médio não associado a uma condição específica
<i>sat</i>	Saturado
'	Primo, grandeza direcional, que depende de uma direção; flutuação da medida de uma grandeza em torno da média (temporal) de Reynolds
"	Duplo primo, grandeza bi-direcional, que depende de duas direções; fluxo de uma grandeza através da área normal ao escoamento por unidade de área; flutuação da medida de uma grandeza em torno da média de Favre (pela densidade)
'''	Triplo primo, grandeza ou variação de uma grandeza por unidade de volume
+	Valor verdadeiro, não modificado pela adição e emissão induzida
[] ^T	Transposto, normalmente referido uma matriz ou entidade vetorial ou tensorial
()	Dependência funcional; quando envolver análise tensorial, representa uma entidade escalar
[]	Quando envolver análise tensorial, representa uma entidade vetorial
{ }	Quando envolver análise tensorial, representa uma entidade tensorial
⟨ ⟩	Valor médio tomado entre vários valores de uma mesma grandeza
1, 2, 3 ...	Ordem seqüencial

Operadores matemáticos

Caracter	Descrição
D/Dt	Derivada material, seguindo o movimento; derivada Lagrangeana
d	Diferencial primeira
d^2, d^3, d^4, d^5	Diferencial de ordem superior
J	Jacobiano de uma função
\int_{Ω}	Integração sobre um ângulo sólido englobando todo o hemisfério
\oint_C, \oint	Integração de linha orientada (ou não) ao longo de uma curva C
∇	Gradiente (ou nabla, del, <i>grad</i>), razão de variação espacial de um campo, na direção do máximo crescimento do campo; aplicado a um escalar, vetor ou tensor, forma um vetor
$\nabla \bullet$	Divergente, divergência (ou <i>div</i>), fluxo volumétrico líquido do campo espacial através de uma superfície; aplicado a um escalar, vetor ou tensor, forma um escalar

$\nabla \wedge$	Rotacional, (ou <i>rot, curl</i>) promove a rotação de um corpo rígido ou de um fluido, aplicado a um vetor ou tensor, formando um vetor
∇^2	Laplaciano (ou <i>div grad</i>), característico de processos de difusões aplicado a um escalar e a um vetor forma um escalar, a um tensor forma um vetor
•	Produto escalar; produto interno
\wedge	Produto vetorial
:	Produto escalar duplo
\otimes	Produto diádico
δ	Ou δ_{ij} , tensor de 2ª ordem unitário do delta de Kröenecker, associado ao produto escalar entre entidades vetoriais e/ou tensoriais
ϵ	Ou e_{ijk} , tensor de 3ª ordem unitário da permutação, associado ao produto vetorial entre entidades vetoriais e/ou tensoriais

Fórmulas químicas

CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Gás carbônico
C/H	Relação carbono/hidrogênio
H/C	Relação hidrogênio/carbono
C/O	Relação carbono/oxigênio
C_3H_3	Radical livre de hidrocrboneto
$\text{H}_2\text{O}(\text{v})$	Vapor d'água
N_2	Nitrogênio
NO_x	Óxidos de nitrogênio
O_2	Oxigênio

Tempora mutantur, nos fecit et mutamur in illis

(Harrison, 1517)

*Agradece a la llama su luz, pero no olvides el
pie del candil que, constante y paciente, la
sostiene en la sombra*

(Tagore, Nobel de Literatura em 1913)