



DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM UM FORNO AQUECEDOR DE ÓLEO DE
UMA PLANTA DE TRATAMENTO DE HIDROCARBONETOS

Angela Catherine Arana Andia

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Marcos Vicente de Brito Moreira

Rio de Janeiro
Setembro de 2014

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM UM FORNO AQUECEDOR DE ÓLEO DE
UMA PLANTA DE TRATAMENTO DE HIDROCARBONETOS

Angela Catherine Arana Andia

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE
JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
ELÉTRICA.

Examinada por:

Prof. Marcos Vicente de Brito Moreira, D.Sc.

Prof. João Carlos dos Santos Basilio, Ph.D.

Prof. Maurício Bezerra de Souza Junior, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2014

Andia, Angela Catherine Arana

Diagnóstico de falhas em um forno aquecedor de óleo de uma planta de tratamento de hidrocarbonetos/Angela Catherine Arana Andia. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2014.

XIV, 96 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Marcos Vicente de Brito Moreira

Dissertação (mestrado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2014.

Referências Bibliográficas: p. 94 – 96.

1. Diagnóstico de Falhas. 2. Sistemas a Eventos Discretos. I. Moreira, Marcos Vicente de Brito. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

*A Deus, meu pai, por ter me
dado condições de lutar e
alcançar meus objetivos até hoje.*

*À minha melhor amiga e
conselheira, minha mãe Eva,
pelo incentivo e apoio em todas
minhas decisões e escolhas. A
meu pai Guillermo pela força,
suas palavras sábias e apoio
incondicional em todos os
momentos. A meu irmão
Guillermo por sua ajuda e
presença constante em minha
vida. Sem vocês não haveria
chegado até aqui. Em memória
da minha avó e meu avô.*

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. João C. Basílio pelo grande apoio para iniciar meu mestrado na COPPE/UFRJ.

Agradeço ao meu orientador, Marcos Vicente de Brito Moreira, que se portou como só os mestres fazem. Mesmo sem me conhecer direito, aceitou-me como sua orientada. Agradeço seus ensinamentos acadêmicos, orientações, puxões de orelha, infinita paciência e dedicação.

Agradeço ao Prof. Eduardo Mach pelos ensinamentos, orientações, incentivo, amizade e dedicação. Agradeço por estar ao meu lado durante esse tempo de trabalho, e não medir esforços para me ajudar, sempre com uma solução simples para os meus problemas que pareciam ser gigantes.

Agradeço ao Prof. Priamo Albuquerque por sempre estar à disposição, respondendo minhas dúvidas e me incentivando a acreditar que tudo daria certo.

Agradeço ao CNPq e à PETROBRAS, pelo auxílio financeiro e apoio concedido, que foi de fundamental importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Manuel Manyari, quem me brinda sua desinteressada amizade, orientações e motivação para continuar seguindo em frente na constante busca pelo conhecimento.

Aos amigos que fizeram parte desta experiência, em especial à Mirella Santos, Maria del Pilar Lizarazo, Cristiano Carvalho, Ivan Salcedo pela amizade, ajuda e conselhos nas horas difíceis.

Agradeço aos alunos da turma do Mestrado, principalmente ao Nerito Oliveira, Eduardo Nunes e Gustavo Viana pelo companheirismo e sábios conselhos.

Agradeço a minha amiga Mirella Santos e o meu amigo Felipe Cabral pela paciência e por ler meus textos, corrigi-los e me aconselhar.

Com vocês, queridos, divido a alegria desta experiência.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM UM FORNO AQUECEDOR DE ÓLEO DE UMA PLANTA DE TRATAMENTO DE HIDROCARBONETOS

Angela Catherine Arana Andia

Setembro/2014

Orientador: Marcos Vicente de Brito Moreira

Programa: Engenharia Elétrica

Este trabalho tem como objetivo projetar um diagnosticador de falhas, a partir da teoria de sistemas a eventos discretos, para um sistema usado em um processo de tratamento de hidrocarbonetos. Esse sistema é constituído por um forno aquecedor de óleo, uma válvula de fluxo de combustível e um controlador. A análise da diagnosticabilidade é realizada com base no modelo em autômato do sistema completo considerando-se dois tipos de falha: travamento da válvula nas posições completamente aberta e completamente fechada. As operações para a obtenção dos diagnosticadores foram realizadas utilizando-se o software Deslab. Finalmente, verificou-se que os diagnosticadores das falhas de travamento da válvula em posição aberta e fechada são diagnosticáveis.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

FAULT DIAGNOSIS ON AN OIL FIRED HEATER OF AN HYDROCARBON
TREATMENT PLANT

Angela Catherine Arana Andia

September/2014

Advisor: Marcos Vicente de Brito Moreira

Department: Electrical Engineering

This work aims to design a failure diagnoser from the theory of discrete events systems for an unit used on hydrocarbon treatment process. This unit consists of a hot oil fired heater, a fuel flow valve and a temperature controller. The analysis of diagnosability is based on automaton model of the full system and considers two kinds of failure: valve locked in positions completely open and closed respectively. The operations for obtaining the diagnosers were performed using the software Deslab. Finally, it was verified that fault diagnosers of valve locked open and locked closed are diagnosable.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiv
1 Introdução	1
2 Fundamentos teóricos de diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos	5
2.1 Sistemas a Eventos Discretos	5
2.2 Linguagem de um SED	6
2.3 Autômatos	9
2.3.1 Autômato determinístico	9
2.3.2 Linguagens gerada e marcada por um autômato	11
2.3.3 Operações com autômatos	12
2.3.4 Sistemas a eventos discretos parcialmente observados	16
2.4 Diagnóstico de falhas	18
2.4.1 Autômato Diagnosticador	19
3 Modelagem e simulação do forno aquecedor de óleo	22
3.1 Transferência de calor	22
3.1.1 Transferência de Calor por condução	23
3.1.2 Transferência de calor por convecção	23
3.1.3 Transferência de calor por radiação	23
3.1.4 Transmissão de calor por radiação em meio participante	29
3.2 Forno aquecedor de óleo	36
3.2.1 Partes do forno aquecedor de óleo	37
3.2.2 Variáveis operacionais do forno	40
3.3 Processo de aquecimento de óleo no forno	41
3.4 Modelo Matemático do forno aquecedor de óleo	43
3.4.1 Linearização da expressão de transferência de calor para tubulação Q_{tubo}	46
3.4.2 Equações de balanço de energia do forno	46

3.4.3	Funções de transferência do forno aquecedor e válvula de controle	47
3.5	Projeto do Controlador	50
3.5.1	Obtenção da função de transferência da planta	51
3.5.2	Simulação do controlador PID	54
3.6	Verificação do modelo linearizado	56
4	Modelo a eventos discretos do forno aquecedor de óleo	60
4.1	Introdução	60
4.2	Modelo a eventos discretos do processo de aquecimento de óleo	60
4.3	Modelo a eventos discretos do comportamento de falha do processo de aquecimento de óleo	70
5	Diagnóstico de falhas do forno aquecedor de óleo	78
5.1	Diagnosticadores das falhas de travamento da válvula na posição fechada e na posição aberta	78
5.2	Simulações e Resultados	81
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	92
6.1	Conclusões	92
6.2	Proposta de trabalhos futuros	92
	Referências Bibliográficas	94

Lista de Figuras

2.1	Diagrama de transição de estados do autômato G do exemplo 2.5 . . .	11
2.2	$Ac(G)$ do exemplo 2.5 e $CoAc(G)$ do exemplo 2.5.	13
2.3	$Trim(G)$ do exemplo 2.5.	14
2.4	Autômato (G_1) e (G_2) do exemplo 2.8	16
2.5	Resultados da composição produto e paralela do exemplo 2.8	16
2.6	Autômato G e seu observador apresentado no exemplo 2.9	18
2.7	Autômato rotulador A_{label}	20
3.1	Radiação emitida por uma superfície. (a)Distribuição espectral. (b)Distribuição direcional.	25
3.2	Propriedades da radiação.	25
3.3	Aproximação do corpo negro por uma cavidade.	27
3.4	Poder emissivo. (a)Poder emissivo monocromático E_λ . (b) Poder emissivo total E	28
3.5	Geometria para trocas radiantes entre duas áreas diferenciais.	29
3.6	Fator de visão entre um plano e um feixe de tubulações paralelos a um plano ou dois planos, com ou sem refratário.	30
3.7	Radiação à primeira fila o segunda fila de tubulação.	30
3.8	Emissividade do CO_2 para 1 atm [1].	32
3.9	Fator de correção para a Emissividade do CO_2 para pressões diferen- tes de 1 atm [1].	32
3.10	Emissividade do vapor de água para 1 atm [1].	33
3.11	Fator de correção para a Emissividade do vapor de água, para pressões diferentes de 1 atm [1].	34
3.12	Correção de Emissividades para misturas de CO_2 e vapor de água [1].	34
3.13	Forno cilíndrico vertical	37
3.14	Partes do forno	38
3.15	Válvula de controle tipo globo.	40
3.16	Válvula tipo globo e seus partes.	41
3.17	Diagrama do processo e instrumentação do forno.	42
3.18	Transferência de calor por radiação na região de radiação	44

3.19	Representação da dinâmica de energia na tubulação	47
3.20	Diagrama de blocos da planta	47
3.21	Diagrama de blocos de um sistema de controle	50
3.22	Diagrama de blocos do processo de aquecimento no forno.	52
3.23	Diagrama de simulação do modelo linear do forno e PID em Simulink.	54
3.24	Diagrama de simulação forno e PID em Simulink.	55
3.25	Diagrama de simulação da válvula em Simulink.	55
3.26	Resposta linear da perturbação de $-10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível	56
3.27	Resposta linear da perturbação de $10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível	57
3.28	Diagrama de simulação do modelo não linear do forno e PID em Simulink.	57
3.29	Resposta linear e não linear da perturbação de $-10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível	58
3.30	Resposta linear e não linear da perturbação de $10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível	59
4.1	(a) Gráfico do comportamento da temperatura de saída do óleo (cor verde) e sua derivada (cor azul) quando ocorre uma perturbação de fluxo gás de combustível em 4000 s. (b) Gráfico do fluxo de gás combustível quando acontece uma perturbação de $100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ no tempo de 4000 s.	62
4.2	(a) Gráfico do comportamento da temperatura de saída do óleo (cor verde) e sua derivada (cor azul) quando ocorre uma perturbação de fluxo de gás combustível em 4000 s. (b) Gráfico do fluxo de gás combustível quando acontece uma perturbação de $-100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ no tempo de 4000 s.	63
4.3	(a) Gráfico da análise dos estados de temperatura do gráfico 4.1 (b) Gráfico da análise dos estados do controlador de temperatura do gráfico 4.1	64
4.4	Gráfico da construção do autômato sem falha (normal) a partir do evento (<i>ltd</i>) ativo no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}).	65
4.5	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.4 acrescentando-se o evento (<i>ltr</i>) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}) e o estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}).	65
4.6	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.5 acrescentando-se o evento (<i>fp</i>) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr}).	66
4.7	(a) Gráfico da análise dos estados de temperatura do gráfico 4.2 (b) Gráfico da análise dos estados do controlador do gráfico 4.2	66

4.8	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.6 acrescentando-se o evento (<i>htr</i>) ativo no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}).	67
4.9	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.8 acrescentando-se o evento (<i>htd</i>) ativo no estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}).	67
4.10	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.9 acrescentando-se o evento (<i>ap</i>) ativo no estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}) e o estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}).	68
4.11	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.10 acrescentando-se o evento (<i>ltd</i>) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}) e o estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}).	68
4.12	Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.11 acrescentando-se o evento (<i>T_{reg}</i>) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}) e o estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}).	69
4.13	Gráfico do autômato sem falha (normal) do processo de aquecimento de óleo no forno.	69
4.14	(a) Eventos do comportamento da temperatura de saída do óleo pelo tempo quando a válvula trava em posição fechada e encontra-se no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}). (b) Curva da derivada da temperatura de saída do óleo. (c) Estados e eventos da ação do controlador.	72
4.15	Construção do autômato com falha, quando a válvula trava na posição fechada, apresentando a análise da figura 4.14 e acrescentando-se o grafo da figura 4.13.	73
4.16	(a) Eventos do comportamento da temperatura de saída do óleo pelo tempo quando a válvula trava em posição aberta e encontra-se no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}). (b) Curva da derivada da temperatura de saída do óleo. (c) Estados e eventos da ação do controlador.	74
4.17	Continuação da construção do autômato com falha, quando a válvula trava na posição aberta, apresentando a análise da figura 4.16 e acrescentando-se o grafo da figura 4.15.	75
4.18	Gráfico do autômato do processo de aquecimento de óleo no forno com comportamento normal e falha.	76
4.19	Gráfico do autômato do processo de aquecimento de óleo no forno com comportamento normal e falha apresentando os autolaços não que não ficam eternamente no comportamento real.	77
5.1	Autômato rotulador $A_{label_{ff}}$	79
5.2	Autômato rotulador $A_{label_{fa}}$	79

5.3	Diagrama de transições de estados do processo de aquecimento de óleo no forno apresentando um comportamento normal e de falha quando a válvula trava em posição fechada.	83
5.4	Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada.	84
5.5	Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada apresentando os estados normais (cor azul), os estados certos (cor verde) e os estados incertos (cor roxo)	85
5.6	Diagrama de transições de estados do processo de aquecimento de óleo no forno apresentando um comportamento normal e de falha quando a válvula trava em posição aberta.	86
5.7	Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta.	87
5.8	Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada.	88
5.9	Simulação dos diagnosticadores das falhas de travamento da válvula na posição fechada e na posição aberta	89
5.10	Simulação do diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada quando encontra-se no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, implementado no Stateflow/Simulink/Matlab.	90
5.11	Simulação do diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta quando encontra-se no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, implementado no Stateflow/Simulink/Matlab.	91

Lista de Tabelas

3.1	Comprimentos semiesféricos equivalentes para geometrias comuns. . .	31
3.2	Valores numéricos para o balanço de energia do forno	48
3.3	Coefficientes da fórmula para válvula	49
3.4	Os coeficientes da função de transferência $G(s)$	52
4.1	Descrição dos estados do controlador de temperatura, válvula de controle e forno	61
4.2	Descrição dos eventos do controlador de temperatura, válvula de controle e forno	62
4.3	Descrição dos estados de falhas do controlador de temperatura, válvula de controle e da temperatura do forno	71
4.4	Descrição dos eventos falhas da válvula de controle	71

Capítulo 1

Introdução

Os fornos são uma classe versátil de equipamentos, em que, um fluido flui através dos tubos montados no interior da fornalha, para ser aquecido pelos gases de combustão. A finalidade dos fornos é elevar a temperatura de grandes vazões de fluido (pré-aquecedores do fluido de processo), viabilizando as operações de destilação, craqueamento, entre outras operações. Esses aquecedores são amplamente utilizados em processos que envolvem hidrocarbonetos e indústrias químicas, como petróleo e gás, refino e petroquímica, e possuem grande importância econômica, pois representam 20% do investimento total e 80% do consumo de energia [1], obtida por meio da queima de derivados combustíveis.

Os gases de combustão são gerados em presença de uma fonte de calor, geralmente uma chama piloto. A mistura inflamável do combustível (hidrocarboneto) e comburente (ar) (reação de combustão) gera a chama, que se propaga através do espaço a uma velocidade inferior a do som e é acompanhada de radiações visíveis.

Para maximizar a eficiência da combustão, ou seja, levar as substâncias combustíveis à sua forma mais oxidada com chama estável e curta, é necessário que essa combustão seja completa [1]. Portanto, é fundamental a boa mistura combustível-ar. Recomenda-se operar o forno com um mínimo de excesso de ar, normalmente de 10% a 15% para a queima de gás combustível, e de 20% a 30% para a queima de óleo combustível [1]. Por outro lado, a operação com baixa quantidade de excesso de ar dificulta o controle da combustão, podendo ocorrer, se o ajuste for mal feito, falta de ar, o que levaria à combustão incompleta, detectável por chamas fumacentas e de forma instável.

No forno em estudo, forno aquecedor de óleo, o combustível utilizado é um gás, composto principalmente por metano (CH_4). Ao acontecer a combustão com 15% de excesso de ar, isto é, combustão completa, são gerados como produtos de combustão o CO_2 (dióxido de carbono) e H_2O (água) na forma de vapor. Esses gases são importantes na radiação porque emitem e absorvem uma grande gama de temperaturas [2]. Assim, para o cálculo da transferência de calor em fornos ou em

câmaras de combustão é necessário determinar as propriedades radiantes do CH_4 e H_2O . Para altas temperaturas, a radiação da chama constitui quase sempre o principal modo de transferência de calor [3]. Assim, quando existe radiação entre duas superfícies, a troca de calor entre elas vai depender das suas características geométricas (fator de forma), temperatura e propriedades radiantes [2].

Os fornos controlam a temperatura de saída do produto manipulando a vazão de combustível, através de uma válvula de controle, para os queimadores ou maçaricos do forno. Em outras palavras, quanto maior é a vazão de combustível para os maçaricos, maior é a temperatura de saída dos gases de combustão e conseqüentemente, maior é a temperatura de saída do óleo aquecido.

No processo de aquecimento no forno, cabe mencionar que, ao utilizar grandes quantidades de energia, é necessário que o sistema de controle e automação funcione de maneira adequada. Assim, se uma falha acontece e não é identificada rapidamente pelo operador do sistema, pode ocorrer a interrupção do seu funcionamento ou até mesmo provocar danos ao sistema e oferecer riscos aos operadores.

Uma forma de diagnosticar uma falha é utilizando modelos a eventos discretos. Um sistema a eventos discretos (SED) é um sistema no qual o conjunto de estados é discreto e sua evolução se dá pela ocorrência instantânea de eventos. Os SEDs podem ser aplicados não somente a sistemas em que esses modelos são mais apropriados, como por exemplo sistemas de computação, redes de comunicação e de manufatura, como também a diversos sistemas dinâmicos de variáveis contínuas (SDVC), uma vez que esses sistemas podem também ser modelados como SEDs dependendo do grau de abstração.

Entre as formas mais utilizadas para modelar SEDs destacam-se os autômatos e as redes de Petri [4], [5]. Neste trabalho o modelo a eventos discretos do sistema será obtido utilizando-se autômatos.

Quando a ocorrência de um evento faz com que o sistema se comporte de maneira indesejável, diz-se que ocorreu uma falha, e o evento que levou o sistema a esse comportamento é dito ser um evento de falha. Os eventos em SED podem ser observáveis ou não observáveis. Um evento é dito ser observável quando sua ocorrência pode ser registrada por sensores e/ou comunicadas para o agente observador. Assim, para informar e inferir a ocorrência de uma falha não observável, pode-se construir um sistema de diagnóstico de falhas. Dessa forma, o desafio no estudo de diagnóstico de falhas de um sistema consiste em inferir e informar a ocorrência de falhas, tendo como base somente os eventos observáveis.

Uma das maneiras de abordar esse problema é por meio da construção de um modelo a eventos discreto do sistema, em que se representa o comportamento normal e de falha. A partir desse modelo são construídos os diagnosticadores, cujos estados são conjuntos formados por estados do sistema alcançáveis após a ocorrência de um

evento observável.

O problema de diagnóstico de falhas no contexto de sistemas a eventos discretos foi introduzido por LIN [6], que apresentou o conceito da capacidade de se diagnosticar a ocorrência de uma falha em um sistema. Logo, a seguir, SAMPATH *et al.* [7] apresentaram condições necessárias e suficientes para o diagnóstico de falhas de SEDs, e propuseram a construção de um autômato diagnosticador que permite verificar se o sistema é diagnosticável e realizar o diagnóstico online de falhas.

Visando tornar mais confiável e segura a operação de fornos, neste trabalho é proposto um sistema de diagnóstico de falhas baseado na teoria de sistemas a eventos discretos (SEDs). Para projetar o sistema de diagnóstico de falhas definiu-se como falhas a serem diagnosticadas no sistema, o travamento da válvula de fluxo de combustível nas posições aberta ou fechada. Baseado nessa informação, é necessário construir um modelo matemático para a transferência de calor na câmara de combustão (fornalha), utilizando-se balanços de energia dinâmicos. Em seguida, baseado nesse modelo foi obtida a função de transferência do forno junto com o projeto do controlador e suas simulações, com o propósito de representar o comportamento do forno em uma planta de tratamento de hidrocarbonetos. Assim, o diagnosticador a ser desenvolvido neste trabalho está baseado no modelo matemático de um forno aquecedor de óleo de uma planta de processamento de gás natural, e tem como objetivo o diagnóstico da falha de travamento da válvula de fluxo de combustível nas posições aberta ou fechada, pela análise da sequência de estados e eventos do processo aquecedor, com a finalidade de auxiliar o operador do sistema de forma rápida e eficiente.

Existem poucos trabalhos de aplicação de sistemas de diagnóstico de falhas em fornos. Dentre os existentes, DA SILVA [8] utiliza técnicas de inteligência computacional gerando uma nova topologia de rede neuro fuzzy (variação da topologia ANFIS) para diagnosticar a formação de cascão, que é uma falha que pode causar grandes prejuízos financeiros e riscos de acidentes em um alto-forno (reator metalúrgico de contra corrente).

Não existem trabalhos de aplicação de diagnóstico de falhas utilizando a teoria de sistemas a eventos discretos no processo de aquecimento de um forno. Contudo, existem alguns poucos trabalhos aplicando essa teoria, como é o caso de SAMPATH *et al.* [9] que propõem uma abordagem de sistemas a eventos discretos para o problema de diagnóstico de falhas em um sistema de calefação, ventilação e ar condicionado (HVAC), mostrando dois modelos, um diagnosticável e outro não diagnosticável. Na área de petróleo, NUNES [10] propõe um diagnosticador que sirva de suporte na operação de um processo de tratamento primário de petróleo (separação trifásica de água-óleo-gás) e, RIVERA [11] propõe um sistema de diagnóstico de falhas para um processo de separação bifásica óleo-gás, mediante a teoria de SED

para sistemas modelados por redes de Petri.

Este trabalho está organizado conforme indicado a seguir. O capítulo 2 apresenta alguns conceitos preliminares que serão necessários para o entendimento desta dissertação e faz uma breve revisão sobre SEDs e o conceito de diagnosticabilidade de falhas. Também, são apresentadas as condições necessárias e suficientes para o diagnóstico de falhas utilizando um diagnosticador. No capítulo 3, são apresentados os fundamentos teóricos envolvidos na transferência de calor no interior do forno. Além disso, são apresentadas as características do forno e o processo de aquecimento junto com suas variáveis operacionais para o desenvolvimento do modelo matemático. Finalmente, são apresentadas as funções de transferência do forno e da válvula e o projeto do controlador de temperatura. No capítulo 4, são apresentadas as simulações do travamento da válvula de fluxo de combustível nas posições aberta ou fechada. Baseado nas simulações foi construído o modelo a eventos discretos do comportamento normal e de falha. No capítulo 5, é apresentado o diagnosticador e os resultados obtidos na análise da diagnosticabilidade da linguagem do sistema. No capítulo 6, são apresentadas as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentos teóricos de diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos

O objetivo deste capítulo é apresentar os fundamentos teóricos de sistemas a eventos discretos. Dentre os principais conceitos, será apresentada a definição de linguagem gerada por um sistema a eventos discretos. Em seguida, se apresentará a teoria de autômatos com suas operações fundamentais, para depois abordar o problema de diagnóstico de falhas. Por último, serão apresentados os passos necessários para a construção do autômato diagnosticador.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Na seção 2.1 são apresentadas as definições de SEDs, enquanto, na seção 2.2 é introduzido o conceito de linguagem gerada por um SED. Na seção 2.3 são apresentados os fundamentos teóricos de autômatos e as operações realizadas entre dois ou mais autômatos. Finalmente, na seção 2.4 é abordada a teoria de diagnosticadores de falhas em SEDs.

2.1 Sistemas a Eventos Discretos

De acordo com CASSANDRAS e LAFORTUNE [4], um sistema a eventos discretos (SED) é um sistema dinâmico, invariante no tempo, não linear, de estado discreto e dirigido por eventos, ou seja, sistemas a eventos discretos são sistemas dinâmicos cujo espaço de estados é um conjunto discreto, e que evoluem pela ocorrência abrupta e instantânea de estímulos, denominados eventos.

A definição formal de um sistema a eventos discretos é dada a seguir [4], [12].

Definição 2.1 (*Sistema a eventos discretos*) *Um sistema a eventos discretos é caracterizado por apresentar duas características:*

1. *Possuem variáveis de estado discretas;*

2. São dirigidos por eventos;

O estado é descrito por um conjunto discreto, por exemplo: valores numéricos pertencentes ao conjunto N ou Z ($\{0, 1, 2, \dots\}$), valores simbólicos ($\{aberto, fechado, travado\}$). Por outro lado, os eventos podem ser definidos como ocorrências instantâneas que provocam transições nos estados do sistema. Em outras palavras, os eventos podem estar relacionados a uma ação específica (e.g. apertar um botão, ativação de um switch), uma ocorrência espontânea (e.g. quebra de uma peça, ativação de um alarme, desligamento de um queimador), ou o resultado de condições já esperadas (e.g. chegada do nível de fluido num tanque a um valor estabelecido).

2.2 Linguagem de um SED

Antes de apresentar com a definição de linguagem, algumas considerações e notações são definidas a seguir. Primeiramente, pode-se dizer que o conjunto de eventos de um SED, representado por Σ é um *alfabeto* em que é suposto que Σ é finito. O comportamento de um SED, pode ser descrito em termos de seqüências de eventos. Essas seqüências a partir desses eventos são interpretadas como as *palavras* de uma linguagem. Então, a linguagem gerada por um SED é o conjunto de todas as seqüências de eventos de comprimento finito, ou palavras, geradas pelo sistema. Dessa forma, conhecendo-se linguagem gerada pelo sistema e o seu estado inicial, pode-se descrever o comportamento futuro do sistema. Assim, pode-se dizer que uma linguagem é um formalismo matemático que modela e descreve o comportamento de um SED [4].

A definição formal de linguagem é dada a seguir [13].

Definição 2.2 (*Linguagem*) *Uma linguagem definida em um conjunto de eventos Σ é um conjunto de seqüências de comprimento finito formadas a partir de eventos pertencentes a Σ .*

Neste trabalho, a notação Σ , representa o conjunto de eventos de um SED. O símbolo σ será usado para representar um evento genérico, o símbolo \emptyset representa a linguagem vazia e ε representa a seqüência vazia. A cardinalidade do alfabeto de Σ denotada por $|\Sigma|$.

Para uma seqüência w definida sobre Σ seu comprimento é denotado por $\|w\|$. Além disso, $\sigma_1 \in s$, denota que σ_1 aparece na seqüência s . Por definição $\|\varepsilon\| = 0$.

A linguagem de um SED está contida em um conjunto de todas as seqüências de comprimento finito possíveis de serem construídas por elementos de Σ , incluindo a seqüência vazia ε . Esse conjunto é denotado como Σ^* , e é chamada de *Fecho de Kleene* de Σ . Em particular, \emptyset , Σ e Σ^* são linguagens.

Exemplo 2.1 Seja $\Sigma = \{c, d, u\}$. Pode-se definir, entre outras, as seguintes linguagens sobre Σ^* :

- $L_1 = \{\varepsilon, c, d, u, cd, bc, cdu\}$;
- $L_2 = \{c, cc, dd, ccdd\}$ e
- $L_3 = \{\text{conjunto das sequências que contêm } cd\}$.

As operações usuais com conjuntos, tais como união, intersecção, diferença e complemento com relação a Σ^* , são aplicáveis a linguagens, uma vez que linguagens são conjuntos. Além disso, existem outras operações, como *concatenação* e *fecho de Kleene*, as quais são formalmente definidas a seguir [13].

Definição 2.3 (*Concatenação*) Sejam duas linguagens $L_a, L_b \subseteq \Sigma^*$, então a concatenação de L_a e L_b , denotado por $L_a L_b$, é definida como:

$$L_a L_b = \{s \in \Sigma^* : (s = s_a s_b) \wedge (s_a \in L_a) \wedge (s_b \in L_b)\}.$$

Uma sequência s pertence a $L_a L_b$, se pode ser construída como uma concatenação de uma sequência de L_a e uma sequência de L_b . O símbolo ε é o elemento neutro da operação de concatenação.

Exemplo 2.2 Sejam as sequências $s_1 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_5 \sigma_3$ e $s_2 = \sigma_5 \sigma_1$, então a concatenação de s_1 com s_2 é dada por: $s_1 s_2 = \sigma_1 \sigma_2 \sigma_5 \sigma_3 \sigma_5 \sigma_1$. A concatenação de ε com s_1 é dada por: $s_1 \varepsilon = \varepsilon s_1 = s_1$.

Definição 2.4 (*Fecho de Kleene*) Seja $L \subseteq \Sigma^*$, então o fecho de Kleene de L , denotado por L^* , é definido como:

$$L^* = \{\varepsilon\} \cup L \cup LL \cup LLL \cup LLLL \dots$$

Os elementos de L^* são formados pela concatenação dos elementos de L , incluindo a sequência vazia ε . O fecho de Kleene é idempotente, isto é $(L^*)^* = L^*$.

Exemplo 2.3 Seja $L = \{s_1, s_2, s_3\}$, o fecho de Kleene L, L^* , de é dado por:

$$L^* = \{\varepsilon, s_1, s_2, s_3, s_1 s_1, s_1 s_2, s_1 s_3, s_2 s_1, s_2 s_2, s_2 s_3, s_3 s_1, s_3 s_2, s_3 s_3, s_1 s_1 s_1, \dots\}.$$

Além dessas operações, outras operações também podem ser realizadas sobre linguagens. Tais operações são definidas a seguir [4].

Definição 2.5 (*Fecho de Prefixo*) Seja $L \subseteq \Sigma^*$, então o fecho de prefixo de L , denotado por \bar{L} , é definido como:

$$\bar{L} = \{s \in \Sigma^* : (\exists t \in \Sigma^*)(st \in L)\}$$

Note que \bar{L} contém todos os prefixos de todas as sequências de L . Uma linguagem L , é dita ser *prefixo-fechada* quando $L = \bar{L}$.

Exemplo 2.4 Considere o conjunto $\Sigma = \{t, v, z\}$, e as linguagens $L_1 = \{\varepsilon, t, tv\}$ e $L_2 = \{z\}$ definidas sobre Σ . Observe que tanto L_1 quanto L_2 não são prefixo-fechadas, pois $tv \notin L_1$ e $\varepsilon \notin L_2$. O fecho de prefixo de L_1 e L_2 são iguais a:

- $\bar{L}_1 = \{\varepsilon, t, tv, tvv\}$;
- $\bar{L}_2 = \{\varepsilon, z\}$;

As seguintes observações são verdadeiras:

1. $\varepsilon \notin \emptyset$.
2. $\{\varepsilon\}$ é uma linguagem não vazia contendo somente a sequência vazia.
3. Se $L = \emptyset$ então $\bar{L} = \emptyset$, e se $L \neq \emptyset$ então necessariamente $\varepsilon \in \bar{L}$.
4. $\emptyset^* = \{\varepsilon\}$ e $\{\varepsilon\}^* = \{\varepsilon\}$.

Definição 2.6 (*Pós-linguagem*) Seja $L \subseteq \Sigma^*$, então a pós linguagem de L após s , denotada por L/s , é definida como:

$$L/s = \{t \in \Sigma^* : (st \in L)\}.$$

Por definição, $L/s = \emptyset$ se $s \in \bar{L}$.

Definição 2.7 (*Projeção*) Sejam Σ_s e Σ_l dois conjuntos de eventos tais que $\Sigma_s \subset \Sigma_l$. A projeção de uma sequência é definida como:

$$P : \Sigma_l^* \rightarrow \Sigma_s^*,$$

com as seguintes propriedades:

$$P(\varepsilon) := \varepsilon,$$

$$P(e) := \begin{cases} e, & \text{se } e \in \Sigma_s \\ \varepsilon, & \text{se } e \in \Sigma_l \setminus \Sigma_s, \end{cases}$$

$$P(s\sigma) := P(s)P(\sigma) \text{ para } s \in \Sigma_l^*, \sigma \in \Sigma_l.$$

A operação de projeção pode ser estendida para linguagens, aplicando as propriedades de projeção a todas as sequências dessa linguagem. Seja $L \subset \Sigma^*$, então a projeção de L é definida como:

$$P(L) := \{t \in \Sigma_s^* : (\exists s \in L)[P(s) = t]\}.$$

Além da operação de projeção, pode-se definir a inversa como é mostrado a seguir.

Definição 2.8 (*Projeção inversa*) A projeção inversa $P^{-1} : \Sigma_s^* \longrightarrow 2^{\Sigma_t^*}$, é definida como:

$$P^{-1}(t) := \{s \in \Sigma_t^* : P(s) = t\},$$

A projeção inversa de uma linguagem $L \subseteq \Sigma_s^*$, $P^{-1}(L)$, é definida como:

$$P^{-1}(L) := \{s \in \Sigma_t^* : (\exists t \in L)[P(s) = t]\}.$$

Na prática, as linguagens tornam-se complexas no momento de representar-se, por isso, existem duas estruturas para representá-las: o autômato e a rede de Petri. Este trabalho trata dos modelos representados por autômatos por ser mais apropriado para lidar com o problema de diagnóstico de falhas. Uma breve revisão da teoria de autômatos é apresentada a seguir.

2.3 Autômatos

Os autômatos também são chamados de máquinas de estados ou geradores. O autômato é um dispositivo capaz de representar uma linguagem de acordo com regras bem definidas, através das relações entre estados e eventos.

2.3.1 Autômato determinístico

A definição formal de um autômato determinístico é dada a seguir [13].

Definição 2.9 (*Autômato determinístico*) Um autômato determinístico, denotado por G , é uma sêxtupla:

$$G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m),$$

Em que:

X é o conjunto de estados do autômato;

Σ é o conjunto finito de eventos associados às transições de G ;

$f : X \times \Sigma \rightarrow X$ é a função de transição de estados;

$\Gamma : X \rightarrow 2^\Sigma$ é o conjunto de eventos ativos;

x_0 é o estado inicial do sistema;

$X_m \subseteq X$ é o conjunto de estados marcados ou finais.

O autômato é representado graficamente como um grafo orientado rotulado [14] chamado de diagrama de transições de estados, onde se representam a evolução dos estados que podem ocorrer. Nesses gráficos, utiliza-se a seguinte representação:

- \circ (círculo) representa os estados.
- \xrightarrow{d} (seta rotulada) representa as transições entre estados, onde a letra em cima da seta denota o evento que causou a transição.
- $(\rightarrow \circ)$ (estado inicial) é identificado através de um seta apontando para ele.
- \odot (dois círculos concêntricos) são os estados marcados, os quais representam a conclusão de uma tarefa.

Exemplo 2.5 *Seja G um autômato cujo diagrama de transição de estados é apresentado na figura 2.1, tem-se:*

- Os estados estão representados por $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$;
- Os eventos são $\Sigma = \{a, b, c, d\}$;
- A função de transição de estados de G é: $f(0, a) = 1$; $f(1, c) = 2$; $f(2, a) = 4$; $f(4, a) = 4$; $f(3, b) = 1$; $f(3, a) = 6$; $f(2, b) = 5$; $f(5, c) = 5$ e $f(5, d) = 2$.
- O conjunto de eventos ativos de cada estado é: $\Gamma(0) = \{a\}$; $\Gamma(1) = \{c\}$; $\Gamma(2) = \{a, b\}$; $\Gamma(3) = \{b, a\}$; $\Gamma(4) = \{a\}$; $\Gamma(5) = \{c, d\}$ e $\Gamma(6) = \emptyset$.
- O estado inicial de G é $x_0 = 0$.
- O estado marcado de G é $X_m = \{4\}$

Um autômato processa um subconjunto de sequências de Σ^* , isto é, uma linguagem sobre o alfabeto Σ . Do ponto de vista da teoria de SEDs, duas linguagens são importantes: a *linguagem gerada* e *linguagem marcada*.

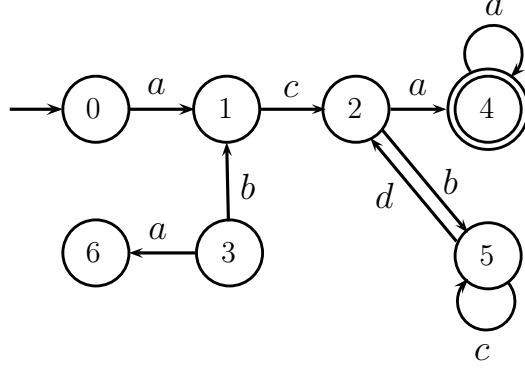


Figura 2.1: Diagrama de transição de estados do autômato G do exemplo 2.5

2.3.2 Linguagens gerada e marcada por um autômato

A partir de um autômato que modela um SED pode-se definir duas linguagens, a linguagem gerada e a linguagem marcada por G . A linguagem gerada por um autômato G , denotada por $\mathcal{L}(G)$, é um conjunto formado por todas as sequências de eventos que são definidas a partir do estado inicial.

Por outro lado, a linguagem marcada por G , denotada por $\mathcal{L}_m(G)$, contém todas as sequências de eventos que levam o autômato do estado inicial a um estado marcado.

A definição formal para as linguagens gerada e marcada é dada a seguir [13].

Definição 2.10 (*Linguagem gerada*) A linguagem gerada por um autômato $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$ é dada por:

$$\mathcal{L}(G) := \{s \in \Sigma^* : f(x_0, s) \text{ é definida}\}.$$

Note que $\mathcal{L}(G)$ é prefixo-fechada por definição, uma vez que um caminho só é possível se todos os seus correspondentes prefixos são também possíveis. Além disso, é possível existirem eventos definidos em Σ que não fazem parte do diagrama de transição de estados de G e, por tal motivo, não fazem parte de $\mathcal{L}(G)$.

Definição 2.11 (*Linguagem marcada*) A linguagem marcada por $G = (X, \Sigma, f, \Gamma, x_0, X_m)$ é dada por:

$$\mathcal{L}_m(G) := \{s \in \mathcal{L}(G) : f(x_0, s) \in X_m\}.$$

Pode-se observar que $\mathcal{L}_m(G)$ será sempre um subconjunto de $\mathcal{L}(G)$, uma vez que $\mathcal{L}_m(G)$ é formada por todas as sequências s , tais que $f(x_0, s) \in X_m$. É importante observar que $\mathcal{L}_m(G)$ não necessariamente é prefixo-fechada, já que nem todos os estados de X precisam ser marcados.

No caso de um autômato sem estados, é dito que ele gera e marca o conjunto vazio.

Com a finalidade de analisar SEDs modelados por autômatos é necessário definir um conjunto de operações capazes de modificar apropriadamente o diagrama de transição de estados do autômato. Essas operações com autômatos serão mostrados na próxima seção.

2.3.3 Operações com autômatos

São apresentadas, a seguir, as operações de acessibilidade, coacessibilidade e a operação *trim*, consideradas operações unárias, ou seja, operações que alteram um único autômato. Além disso, também são apresentadas as operações de produto e composição paralela, ambas operações constroem um autômato a partir da composição de outros autômatos.

Essas operações são fundamentais para a obtenção de diagnosticadores de falhas, cujo algoritmo de construção será mostrado na próxima seção.

Acessibilidade

A acessibilidade toma a parte acessível de um autômato G e elimina todos os estados de G que não são alcançáveis, ou seja inacessíveis, a partir do estado inicial x_0 . Também são apagadas as transições associadas a esses estados. A definição formal da parte acessível de um autômato é dada a seguir [4].

Definição 2.12 (*Parte acessível*) *Seja: $G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)$. A operação de acessibilidade de G , denotada por $Ac(G)$, é o subautômato:*

$$Ac(G) = (X_{ac}, \Sigma, f_{ac}, x_0, X_{ac,m}),$$

em que :

$$\begin{aligned} X_{ac} &= \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*)[f(x_0, s) = x]\}, \\ X_{ac,m} &= X_{ac} \cap X_m, \\ f_{ac} &: X_{ac} \times \Sigma^* \rightarrow X_{ac}. \end{aligned}$$

É importante observar que após a operação de acessibilidade de um autômato, a função de transição é restrita a um domínio menor dos estados acessíveis X_{ac} . Além disso, a acessibilidade não altera a linguagem gerada $\mathcal{L}(G)$ e linguagem marcada $\mathcal{L}_m(G)$.

Coacessibilidade

O estado $x \in G$ é dito ser coacessível, se existe um caminho a partir do estado x que leva a um estado marcado em X_m . Em outras palavras a coacessibilidade apaga todos os estados de G a partir dos quais não se pode alcançar um estado marcado, e também apaga suas transições correspondentes. A definição formal da parte coacessível de um autômato é dada a seguir [4].

Definição 2.13 (Coacessibilidade) *Seja um autômato $G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)$. A coacessibilidade de G , denotada por $CoAc(G)$, é o subautômato:*

$$CoAc(G) = (X_{coac}, \Sigma, f_{coac}, x_{0,coac}, X_m),$$

em que :

$$\begin{aligned} X_{coac} &= \{x \in X : (\exists s \in \Sigma^*) [f(x, s) \in X_m]\}, \\ x_{0,coac} &= \begin{cases} x_0, & \text{se } x_0 \in x_{coac} \\ \text{indefinido,} & \text{caso contrário,} \end{cases} \\ f_{coac} &: X_{coac} \times \Sigma^* \rightarrow X_{coac}. \end{aligned}$$

É importante observar que a coacessibilidade não causa alteração na linguagem marcada, mas pode alterar a linguagem gerada.

Exemplo 2.6 *Considere o autômato G mostrado na figura 2.1. As figuras 2.2(a) e (b) mostram os autômatos após as operações de parte acessível e coacessível de G , respectivamente.*

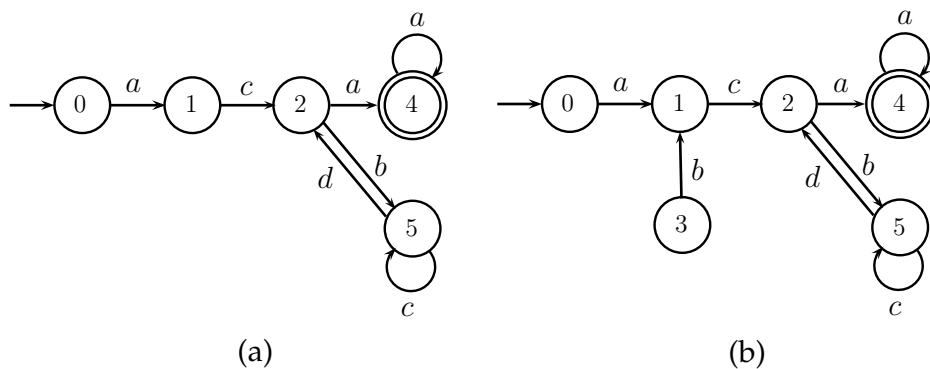


Figura 2.2: $Ac(G)$ do exemplo 2.5 e $CoAc(G)$ do exemplo 2.5.

Operação Trim

Um autômato que é acessível e coacessível é chamado de *Trim*. A definição formal da operação *trim* é apresentada a seguir [4].

Definição 2.14 (*Operação trim*) Seja $G = (X, \Sigma, f, x_0, X_m)$. A operação trim pode ser definida como:

$$\text{Trim}(G) = \text{CoAc}[\text{Ac}(G)] = \text{Ac}[\text{CoAc}(G)].$$

Em outras palavras, a operação trim, apresenta um autômato com a parte acessível e coacessível.

Exemplo 2.7 Considere o autômato G mostrado na figura 2.1, a figura 2.3 mostram o autômato após a operação de trim. Observe que neste caso, a operação $\text{Trim}(G)$ é igual à operação $\text{Ac}(G)$.

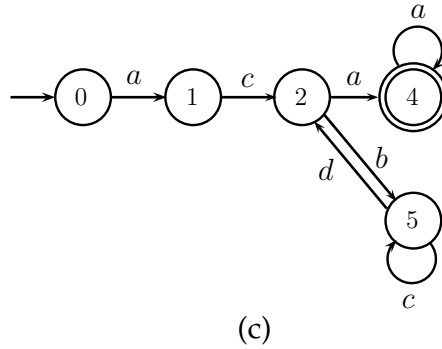


Figura 2.3: $\text{Trim}(G)$ do exemplo 2.5.

Composição Produto

A operação produto também é chamada de composição completamente síncrona e é denotada por \times . O produto sincroniza mediante um evento em comum ($\Sigma_1 \cap \Sigma_2$) o comportamento de dois ou mais autômatos que operam concorrentemente, ou seja, uma transição de estados ocorrerá em $G_1 \times G_2$ se, e somente se, a transição ocorrer em G_1 e G_2 ao mesmo tempo.

Caso não exista nenhum evento em comum entre os autômatos G_1 e G_2 , o produto, $G_1 \times G_2$ gera um autômato com um único estado. A definição formal do produto é apresentada a seguir [4].

Definição 2.15 (*Produto*) Sejam os autômatos $G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, x_{01}, X_{m1})$ e $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, x_{02}, X_{m2})$, então, o produto de G_1 e G_2 , denotado por $(G_1 \times G_2)$ é dado por:

$$G_1 \times G_2 = \text{Ac}(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f_{1 \times 2}, \Gamma_{1 \times 2}, (x_{01}, x_{02}), X_{m1} \times X_{m2}),$$

em que:

$$f_{1 \times 2}((x_1, x_2), \sigma) = \begin{cases} (f_1(x_1, \sigma), f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2) \\ \text{indefinido}, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

$$\Gamma_{1 \times 2}(x_1, x_2) = \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2).$$

Os estados de $G_1 \times G_2$ são denotados por pares, onde o primeiro componente é o estado atual de G_1 e o segundo componente é o estado atual de G_2 .

Consequentemente, a linguagem gerada e marcada pelo produto $G_1 \times G_2$ é a interseção das linguagens gerada e marcada por G_1 e G_2 . Essa relação pode ser observada abaixo:

$$\mathcal{L}(G_1 \times G_2) = \mathcal{L}(G_1) \cap \mathcal{L}(G_2),$$

$$\mathcal{L}_m(G_1 \times G_2) = \mathcal{L}_m(G_1) \cap \mathcal{L}_m(G_2).$$

Composição paralela

A composição paralela, também chamada de composição síncrona, é denotada por \parallel e sincroniza somente os eventos que são comuns em dois autômatos. A maneira mais comum de se construir modelos de sistemas completos a partir dos modelos individuais é fazendo a composição paralela entre eles. A definição formal de composição paralela entre dois autômatos é apresentada a seguir [4].

Definição 2.16 (*Composição paralela*) *Sejam os autômatos $G_1 = (X_1, \Sigma_1, f_1, x_{01}, X_{m1})$ e $G_2 = (X_2, \Sigma_2, f_2, x_{02}, X_{m2})$. Então, a composição paralela desses autômatos, denotada por $G_1 \parallel G_2$, é dada por:*

$$G_1 \parallel G_2 = Ac(X_1 \times X_2, \Sigma_1 \cup \Sigma_2, f_{1 \parallel 2}, \Gamma_{1 \parallel 2}, (x_{01}, x_{02}), X_{m1} \times X_{m2}),$$

em que:

$$f_{1 \parallel 2}((x_1, x_2), \sigma) = \begin{cases} (f_1(x_1, \sigma), f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2) \\ (f_1(x_1, \sigma), x_2), & \text{se } \sigma \in \Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2 \\ (x_1, f_2(x_2, \sigma)), & \text{se } \sigma \in \Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1 \\ \text{indefinido}, & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

e

$$\Gamma_{1 \parallel 2}(x_1, x_2) = [\Gamma_1(x_1) \cap \Gamma_2(x_2)] \cup [\Gamma_1(x_1) \setminus \Sigma_2] \cup [\Gamma_2(x_2) \setminus \Sigma_1].$$

É possível definir as linguagens gerada e marcada do autômato resultante de $G_1 \parallel G_2$ utilizando a seguinte definição de projeções.

$$P_i : (\Sigma_1 \cup \Sigma_2)^* \rightarrow \Sigma_i^* \text{ para } i = 1, 2.$$

Utilizando essas projeções, tem-se que as linguagens gerada e marcada por $G_1||G_2$ são dadas por:

$$\begin{aligned}\mathcal{L}(G_1||G_2) &= P_1^{-1}[\mathcal{L}(G_1)] \cap P_2^{-1}[\mathcal{L}(G_2)], \\ \mathcal{L}_m(G_1||G_2) &= P_1^{-1}[\mathcal{L}_m(G_1)] \cap P_2^{-1}[\mathcal{L}_m(G_2)].\end{aligned}$$

Exemplo 2.8 Considere os autômatos (G_1) e (G_2) mostrados na figura 2.4. As figuras 2.5(a) e 2.5(b) mostram o resultado da composição produto e da composição paralela entre G_1 e G_2 .

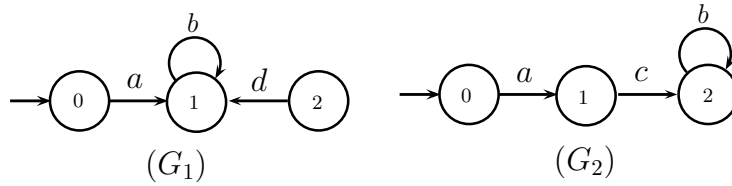


Figura 2.4: Autômato (G_1) e (G_2) do exemplo 2.8

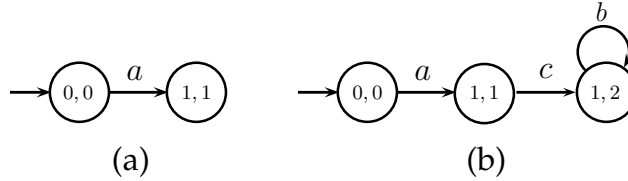


Figura 2.5: Resultados da composição produto e paralela do exemplo 2.8

2.3.4 Sistemas a eventos discretos parcialmente observados

Seja Σ o conjunto de todos os eventos de um SED parcialmente observado. Então esse conjunto pode ser particionado em dois subconjuntos disjuntos $\Sigma = \Sigma_o \dot{\cup} \Sigma_{uo}$, em que Σ_o denota o conjunto dos eventos observáveis e Σ_{uo} denota o conjunto dos eventos não observáveis do sistema. Os eventos observáveis são os eventos cujas ocorrências podem ser observadas por um agente externo, enquanto os eventos não observáveis são aqueles que não podem ser observados. Na prática, pode-se dizer, que a ocorrência dos eventos é observável quando sua ocorrência puder ser registrada por sensores ou quando estiver relacionado a comandos. Por outro lado, os eventos não-observáveis não podem ser observados por sensores (incluindo os eventos de falhas) ou o evento ocorreu em uma localização remota e sua ocorrência não foi registrada.

As principais causas para não observabilidade dos eventos são as limitações dos sensores anexados ao sistema e a distribuição natural de alguns sistemas onde os eventos de um local não podem ser vistos de outro local [4].

A linguagem gerada observada por G é formada por todas as sequências de $\mathcal{L}(G)$, sem os eventos não observáveis. Essa linguagem é obtida mediante a operação de projeção P_o , ou seja, a linguagem gerada observada por G será $P_o[\mathcal{L}(G)]$, em que $P_o : \Sigma^* \rightarrow \Sigma_o^*$. O mesmo acontece para obter a linguagem marcada observada de G , que será $P_o[\mathcal{L}_m(G)]$. Note que diferentes sequências poderão ter a mesma projeção, por isso, é necessário introduzir uma estrutura chamada de observador de G , denotada por $Obs(G)$ a qual identifique os possíveis estados após a observação de uma sequência de eventos.

Para o completo entendimento da construção do autômato observador, $Obs(G)$, é necessário definir o conceito de alcance não-observável de um estado, denotado por $UR(x)$, apresentado a seguir [13].

Definição 2.17 (*Alcance não observável*) *O alcance não observável de um estado $x \in X$, denotado por $UR(x)$, é definido como:*

$$UR(x) = \{y \in X : (\exists t \in \Sigma_{uo}^*)(f(x, t) = y)\}.$$

O alcance não observável para um conjunto $B \in 2^X$, é definido como:

$$UR(B) = \bigcup_{x \in B} UR(x).$$

O alcance não observável do estado x , é formado por todos os estados que podem ser alcançados a partir do estado x , através de transições rotuladas por eventos não observáveis.

A seguir, é apresentada a definição de observador ($Obs(G)$).

Definição 2.18 (*Observador*) *O observador de um autômato G com relação a um conjunto de eventos observáveis Σ_o , definido por $Obs(G)$, é dado por:*

$$Obs(G) = (X_{Obs}, \Sigma_o, f_{Obs}, \Gamma_{Obs}, x_{0_{Obs}}, X_{m_{Obs}})$$

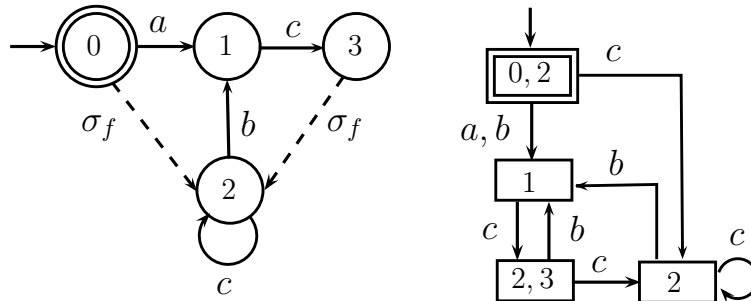
sendo $X_{Obs} \subseteq 2^X$ e $X_{m_{Obs}} = \{B \in X_{Obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$. f_{Obs}, Γ_{Obs} , e $x_{0_{Obs}}$ são definidos de acordo com o algoritmo 2.1.

Baseado nas definições 2.17 e 2.18 é possível apresentar o algoritmo de construção do observador $Obs(G)$, apresentado a seguir [15].

Algoritmo 2.1 (*Observador*) *O observador de G , $Obs(G) = (X_{Obs}, \Sigma_o, f_{Obs}, x_{0_{Obs}}, X_{m_{Obs}})$, é construído da seguinte forma:*

- *Passo 1:* Defina $x_{0_{Obs}} = UR(x_0)$ e faça $X_{Obs} = \{x_{0_{Obs}}\}$ e $\tilde{X}_{Obs} = X_{Obs}$.
- *Passo 2:* Para cada $\bar{X}_{Obs} = \tilde{X}_{Obs}$ e $\tilde{X}_{Obs} = \emptyset$.
- *Passo 3:* Para cada $B \in \bar{X}_{Obs}$,
 - *Passo 3.1:* $\Gamma_{Obs}(B) = (\bigcup_{x \in B} \Gamma(x)) \cap \Sigma_o$.
 - *Passo 3.2:* Para cada $\sigma \in \Gamma_{Obs}(B)$:
 $f_{Obs}(B, \sigma) = UR(\{x \in X : (\exists y \in B) [x = f(y, \sigma)]\})$.
 - *Passo 3.3:* $\tilde{X}_{Obs} \leftarrow \tilde{X}_{Obs} \cup \{f_{Obs}(B, \sigma)\}$.
- *Passo 4:* $X_{Obs} \leftarrow X_{Obs} \cup \tilde{X}_{Obs}$.
- *Passo 5:* Repita os passos 2 a 4 até que toda a parte acessível de $Obs(G)$ tenha sido construída.
- *Passo 6:* $X_{m_{Obs}} = \{B \in X_{Obs} : B \cap X_m \neq \emptyset\}$.

Exemplo 2.9 Seja G o autômato mostrado na figura 2.6(a). O conjunto de estados de G é $X = \{0, 1, 2, 3\}$ e o conjunto de eventos é $\Sigma = \{a, b, c, \sigma_f\}$. Neste exemplo, $\Sigma_o = \{a, c, b\}$ e $\Sigma_{uo} = \{\sigma_f\}$. A figura 2.6 mostra o observador após a execução do algoritmo 2.2.



(a) Autômato G .

(b) Observador de G .

Figura 2.6: Autômato G e seu observador apresentado no exemplo 2.9

2.4 Diagnóstico de falhas

A medida que os sistemas tecnológicos tornam-se mais complexos, também suas falhas tornam-se mais difíceis de se prever, entender e consertar, o que leva à criação de um novo desafio para a detecção de falhas. Existem falhas que não podem ser detectadas por dados monitorados, nem sensores. e precisam de um processo de

diagnóstico. Portanto, para atender a crescente demanda, é necessário contar com métodos para a detecção e o diagnóstico de falhas. A falha pode ser modelada em muitos casos como um evento não observável e sua ocorrência pode ser inferida utilizando a teoria de diagnóstico de falhas em SEDs.

A *diagnosticabilidade* da linguagem de um SED está relacionada com a capacidade de se inferir a ocorrência do(s) evento(s) de falha não observável, após um número finito de observações. Assim, o processo de diagnose é interrompido quando a estimativa de estados da planta indica com certeza que a falha ocorreu. Mas, em muitos casos, o processo de diagnose pode continuar desnecessariamente mesmo que a falha não tenha ocorrido e não possa mais ocorrer.

Nos trabalhos feitos de diagnóstico de falhas em SED, as seguintes hipóteses são usualmente realizadas [15].

- H1 - A linguagem gerada por G é viva ($\Gamma(x_i) \neq \emptyset$ para todo $x_i \in X$).
- H2 - O autômato G não possui caminhos cíclicos compostos somente por eventos não observáveis, com a finalidade de evitar que a ocorrência do evento de falha seja sucedida por ciclos de estados não observáveis.
- H3 - Existe um único evento de falha, ou seja, $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$. Para o caso de mais de um tipo de falha, a diagnosticabilidade será analisada para cada tipo de falha, individualmente.

2.4.1 Autômato Diagnosticador

A definição formal de autômato diagnosticador é apresentada a seguir [15].

Definição 2.19 (*Autômato Diagnosticador*) *Um diagnosticador G_d é definido como:*

$$G_d = (X_d, \Sigma_o, f_d, \Gamma_d, x_{o_d})$$

em que seu conjunto de eventos é igual ao conjunto de eventos observáveis de G e cujos estados possuem rótulos Y e N , para indicar se o evento de falha ocorreu ou não. Assim, N indica a não ocorrência de eventos de falha (estado normal), e Y indica a ocorrência do evento de σ_f .

A seguir, é apresentado o algoritmo, usado neste trabalho, para a obtenção de G_d .

Algoritmo 2.2 (*Diagnosticador*)

- *Passo 1: Faça a composição $G||A_{label}$, sendo G o autômato que modela o sistema e A_{label} é o autômato que incluirá os rótulos aos estados G , vide figura 2.7.*
- *Passo 2: Calcule $G_d = Obs(G||A_{label})$.*

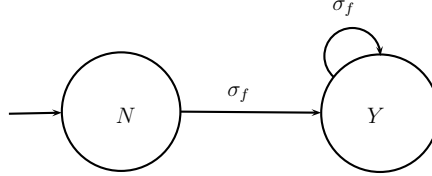


Figura 2.7: Autômato rotulador A_{label}

No algoritmo anterior, pode-se observar que, quando G_d alcança um estado cujos rótulos são iguais a N , significa que o estado é normal ou negativo e a falha não ocorreu. Pelo contrário, se os rótulos são iguais a Y , então o estado é certo ou positivo e com certeza a falha ocorreu. No caso que existam rótulos N e Y ao mesmo tempo, o estado é incerto, o que significa que não é possível garantir a ocorrência da falha. O diagnosticador pode mudar de um estado normal para incerto ou certo, mas, se o diagnosticador já alcançou o estado de falha, todos os estados futuros serão também de falha.

Definição 2.20 *Um estado $x_d \in X_d$ é denominado certo, se $l = Y$ para todo $(x, l) \in x_d$, e normal se $l = N$ para todo $(x, l) \in x_d$. Caso exista $(x, l), (y, \tilde{l}) \in x_d$, x não necessariamente distinto de y tal que $l = Y$ e $\tilde{l} = N$, então x_d é um estado incerto de G_d .*

Observação 2.1 *Seja x_d um estado incerto de G_d , então existem $s_1 \in L \setminus L_N$ e $s_2 \in L_N$ tais que $P_o(s_1) = P_o(s_2) = v$ e $f_d(x_{0_d}, v) = x_d$.*

Observação 2.2 *Seja $x_d = f_d(x_{0_d})$, se x_d é um estado certo de G_d , então $\forall w \in (P_o^{-1}(v) \cap L), w \in L_N$.*

Baseado nas observações 2.21 e 2.2 é que a linguagem gerada por G será diagnosticável com relação a Σ_f e P_o , somente, se o diagnosticador G_d alcançar um estado certo para toda sequência arbitrariamente longa de L contendo o evento σ_f .

Definição 2.21 (Ciclo) *Um conjunto de estados $\{x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+l}\}$ forma um ciclo em um autômato G se existir uma sequência $s = \sigma_1\sigma_2\dots\sigma_l$ tal que $(x_k, \sigma_1, x_{k+1}, \sigma_2, \dots, \sigma_l, x_{k+l})$, $l > 0$, forme um caminho cíclico em G . Além disso, um ciclo é dito simples se, além das condições anteriores, os estados $x_k, x_{k+1}, \dots, x_{k+l-1}$ são distintos.*

Definição 2.22 (*Ciclo indeterminado*) Um conjunto de estados incertos $\{x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_p}\} \subseteq X_d$ forma um ciclo indeterminado se as condições forem satisfeitas:

- $\{x_{d_1}, x_{d_2}, \dots, x_{d_p}\}$ forma um ciclo em G_d .
- $\exists(x_l^{k_l}, Y), (\tilde{x}_l^{k_l}, N) \in x_{d_l}$, sendo $x_l^{k_l}$ não necessariamente distinto de $\tilde{x}_l^{k_l}$, $l = 1, 2, \dots, p$, $k_l = 1, 2, \dots, m_l$, e $r_l = 1, 2, \dots, \tilde{m}_l$ de tal forma que os estados $\tilde{x}_l^{k_l}$, $l = 1, 2, \dots, p$, $k_l = 1, 2, \dots, m_l$ e $\{\tilde{x}_l^{k_l}\}$, $l = 1, 2, \dots, p$, $r_l = 1, 2, \dots, \tilde{m}_l$ podem ser rearrumados para formar ciclos em G .

Finalmente a linguagem L gerada por um autômato G será diagnosticável com relação a projeção P_o e $\Sigma_f = \{\sigma_f\}$ se e somente se, o diagnosticador G_d não tiver ciclos indeterminados. Então, após a obtenção do diagnosticador do sistema, $G_d = Obs(G \parallel A_{label})$, passo 2 do algoritmo 2.2, deve-se basta verificar a existência de algum ciclo indeterminado para determinar a diagnosticabilidade da linguagem gerada por G . Se existir um ciclo indeterminado, a linguagem é não diagnosticável com relação a Σ_f e P_o . Caso contrário, se não existir nenhum ciclo indeterminado, L é diagnosticável.

Capítulo 3

Modelagem e simulação do forno aquecedor de óleo

Considerando a relevância que possui a transmissão de calor no projeto e funcionamento do forno aquecedor de óleo, neste capítulo são apresentados os principais fundamentos teóricos envolvidos na transferência de calor no interior do forno. Além disso, são apresentadas as características físicas e o processo de aquecimento do forno para o entendimento deste trabalho. Em seguida, o desenvolvimento do modelo matemático do forno aquecedor de óleo é apresentado. Finalmente, a função de transferência do forno, a função de transferência da válvula e o projeto do controlador de temperatura são apresentados.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: na seção 3.1 são mostrados os fundamentos teóricos da transferência de calor e as três formas básicas de transmissão de calor, dando ênfase à transmissão de calor por radiação. Na seção 3.2 são introduzidas as características do forno aquecedor e na seção 3.3 é detalhado o processo de aquecimento do óleo. Na seção 3.4 é apresentado o modelo matemático do forno aquecedor utilizado neste trabalho. Por fim, na seção 3.5, é apresentado o projeto do controlador de temperatura do forno.

3.1 Transferência de calor

A transferência de calor é o processo pelo qual a energia, em forma de calor, é transmitida entre partículas do mesmo meio ou de meios diferentes ou entre fronteiras, do ponto de maior temperatura para o ponto de menor temperatura, de modo que o sistema tenda a atingir o equilíbrio térmico.

Existem três formas básicas de transmissão de calor: condução, convecção e radiação. No processo de aquecimento de óleo pelo forno, tema deste trabalho, predominam a convecção e a radiação.

3.1.1 Transferência de Calor por condução

A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de baixa temperatura dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes. Esse mecanismo envolve o movimento em nível molecular/atômico e/ou o movimento de elétrons livres, ou seja as moléculas e átomos trocam energia entre si, mas não mudam de lugar no espaço [2].

3.1.2 Transferência de calor por convecção

O termo convecção refere-se à transferência de calor que ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles. A transferência acontece tanto pelo movimento molecular aleatório quanto pelo movimento global do fluido [16].

A transferência de calor por convecção pode ser natural ou forçada. Na convecção natural o movimento do fluido é provocado pela diferença de densidades (massas específicas) gerada por variações de temperatura no fluido. O exemplo a seguir ilustra o fenômeno da convecção natural.

Exemplo 3.1 *No aquecimento de água em uma panela, a água quente (considerada menos densa) na parte inferior sobe, enquanto a água fria (considerada mais densa) na parte superior desce. Esse movimento de água de maior temperatura e menor temperatura, chamado de corrente de convecção, faz com que a água se aqueça como um todo.*

Na convecção forçada o movimento do fluido é induzido artificialmente por um agente externo, por exemplo um ventilador (ar) ou bomba (água), forçando o fluxo do fluido sobre a superfície. O exemplo a seguir ilustra a convecção forçada.

Exemplo 3.2 *Para que um condicionador de ar seja mais eficiente no resfriamento de uma sala, ele deve ser colocado na parte superior da mesma. Assim, o ar frio lançado pelo aparelho condicionador de ar (e por isso mais denso) desce no ambiente, enquanto o ar quente na parte inferior fica menos denso (mais leve) e sobe.*

3.1.3 Transferência de calor por radiação

O terceiro modo de transferência de calor é denominado radiação térmica, e refere-se à transferência de energia térmica por ondas eletromagnéticas de uma superfície de maior temperatura para outra superfície de temperatura mais baixa. Ao contrário dos outros dois mecanismos, a radiação não necessita da existência de um meio

interveniente, e ocorre mais efetivamente no vácuo. Isso acontece porque a radiação térmica transfere energia na forma de ondas eletromagnéticas (ou, alternativamente, por fótons ou quanta), por conseguinte, se atribui as propriedades padrão de uma onda:

- A frequência ν em Hz ;
- O comprimento de onda λ , (para a radiação térmica de um corpo emissor λ , está concentrada entre $0,1\mu m$ e $100\mu m$);

Para a propagação da radiação em um meio específico, essas duas propriedades estão relacionadas pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{c}{\nu}, \quad (3.1)$$

em que c é a velocidade da luz no meio (para a propagação no vácuo $c = 3 \times 10^8 m/s$) [2]. Ou seja, a radiação térmica propaga-se no vácuo à velocidade da luz. Todos os corpos acima do zero absoluto (*zero Kelvin*) emitem continuamente radiação térmica, em todas as direções. Por outro lado, a intensidade dessas emissões depende somente da temperatura e das características da superfície (propriedades radiantes). Assim, quanto maior for a temperatura de um corpo, maior será a energia radiante emitida.

A radiação térmica tem duas características, uma delas é a *distribuição espectral*, na qual, representa-se a variação da emissão de radiação em função do comprimento de onda, mostrado na figura 3.1(a). Outra característica da radiação é a natureza direcional, na qual uma superfície pode emitir energia térmica preferencialmente em certas direções, criando uma *distribuição direcional*, como mostrado na figura 3.1(b), [17].

Apesar da distribuição direcional da emissão de uma superfície variar de acordo com sua natureza, existe um caso especial que fornece uma aproximação razoável para muitas superfícies. É o caso de um *emissor difuso*, como uma superfície para a qual a intensidade da radiação emitida é independente da direção [2].

O processo inverso à emissão da radiação é a absorção, que acontece quando um feixe de energia radiante incide sobre um corpo. Nesse caso, é obtido um aumento do nível energético dos átomos ou moléculas devido à energia absorvida. Nos sólidos, a absorção acontece numa distância pequena da superfície, mas, nos líquidos, a radiação atravessa uma distância maior, sendo ainda maior nos gases. Contudo, nem todos os gases absorvem a radiação térmica; é o caso dos gases elementares (H_2, O_2, N_2), que não absorvem radiação sensivelmente. Por outro lado, gases como CO, CO_2 e vapor de H_2O são capazes de absorver a energia em bandas de com-

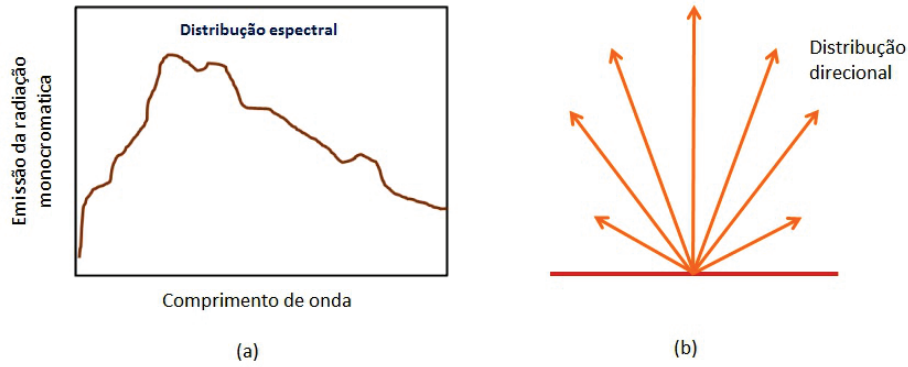


Figura 3.1: Radiação emitida por uma superfície. (a) Distribuição espectral. (b) Distribuição direcional.

primento de onda específicas. Líquidos e sólidos emitem e absorvem radiação de qualquer comprimento de onda. -

Propriedades radiantes de superfícies reais

Quando um feixe de radiação térmica (I) incide, sobre a superfície de um material, uma parte dessa energia é absorvida, outra parte é refletida, e outra transmitida através do meio. A fração absorvida α é o coeficiente de absorção, a fração refletida ρ corresponde ao coeficiente de reflexão, e a fração transmitida τ é o coeficiente de transmissão. A figura 3.2 ilustra esse fenômeno e a equação (3.2) estabelece a relação entre as três frações. Os valores relativos desses coeficientes são função do tipo de material do corpo e do estado de sua superfície [16].

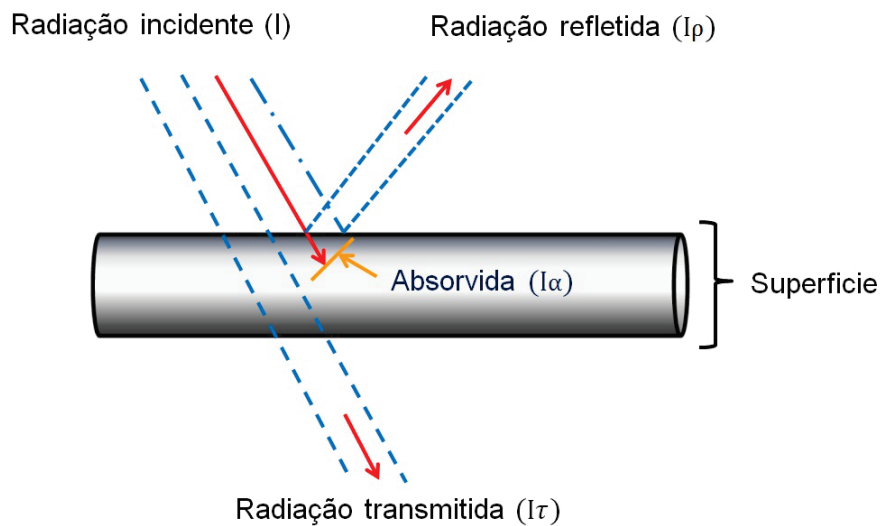


Figura 3.2: Propriedades da radiação.

$$\alpha + \rho + \tau = 1. \quad (3.2)$$

O corpos sólidos, em sua maioria, não transmitem radiação térmica, de modo que o coeficiente de transmissão pode ser considerado zero [16]. Assim, tem-se que a equação (3.2) pode ser reescrita como:

$$\alpha + \rho = 1. \tag{3.3}$$

O coeficiente de absorção depende das propriedades do corpo, de sua temperatura, e do tipo de fonte de radiação utilizada. Assim, um determinado corpo, apresentará um coeficiente diferente de absorção para diferentes radiações nele incidentes.

Um corpo capaz de transmitir toda a radiação incidente (i.e. $\alpha = 0$, $\rho = 0$, e $\tau = 1$), é chamado de *Corpo branco* ou *semi-transparente*, como é o caso da água. Quando $\rho = 1$, a energia é somente refletida para o meio.

O modelo matemático desenvolvido neste trabalho é gerado pelas equações de transmissão de calor por radiação. Por conseguinte, será apresentada a forma como a radiação interage com a matéria, dando uma atenção particular às interações radiantes em uma superfície com suas respectivas propriedades visando conhecer os cálculos na troca radiante entre duas superfícies.

As propriedades radiantes são comparadas em relação a um padrão, conhecido como corpo negro [17].

Corpo Negro

O corpo negro é um corpo ideal, que se caracteriza por absorver toda a radiação nele incidente, e para uma dada temperatura, emite o máximo possível de radiação térmica em qualquer comprimento de onda. Em palavras mais simples, nenhuma luz o atravessa nem é refletida (i.e. $\alpha = 1$, $\rho = 0$ e $\tau = 0$).

O corpo negro possui as seguintes características [2]:

- Para uma dada temperatura e comprimento de onda, nenhuma superfície pode emitir mais radiação que um corpo negro (o que leva a poder ser considerado como um emissor ideal);
- Apesar da radiação emitida por um corpo negro ser função do comprimento de onda e da temperatura, ela é independente de qualquer direção, ou seja, o corpo negro é um emissor difuso;
- Um corpo negro absorve toda a radiação incidente, independente do comprimento de onda e da direção.

Como foi mencionado, o corpo negro serve como um padrão (em cálculos matemáticos, experimentais, etc) em relação ao qual as propriedades radiantes das

superfícies reais são comparadas. Na realidade não existe um corpo negro, ou seja, nenhum corpo possui exatamente as propriedades de um corpo negro ($\alpha = 1$).

Um corpo negro pode ser aproximado por uma cavidade (volume fechado vazio) com uma pequena abertura, onde internamente a superfície encontra-se a uma temperatura uniforme. A energia radiante incide através da abertura e é quase completamente absorvida pela cavidade. Provavelmente sofrerá reflexões múltiplas antes de reemergir através da abertura e portanto, toda a energia incidente é absorvida. A figura 3.3 apresenta o comportamento aproximado do corpo negro.



Figura 3.3: Aproximação do corpo negro por uma cavidade.

A radiação do corpo negro existe dentro da cavidade e independe da superfície ser refletora ou absorvedora.

Emissividade de um corpo

O poder emissivo é introduzido para quantificar a taxa de radiação emitida por unidade de área de superfície [17], se considerada as seguintes características do poder emissivo:

1. **Poder emissivo monocromático** (E_λ), apresentado na figura 3.4(a), é definido como a taxa pela qual a radiação de comprimento de onda λ é emitida em todas direções no espaço hemisférico de uma superfície, por unidade de área da superfície e por unidade de intervalo de comprimento de onda $d\lambda$ no entorno de λ , e por unidade de área superficial, isto é $E_\lambda = f(\lambda)$.
2. **Poder de emissão total** (E), apresentado na figura 3.4(b), é a taxa total de energia radiante emitida por unidade de área em todas as direções possíveis e em todos os possíveis comprimentos de onda. O objetivo do poder emissivo é quantificar a taxa de radiação emitida [17].

Essas duas características se relacionam pela equação do poder emissivo total, dada a seguir:

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda, \quad (3.4)$$

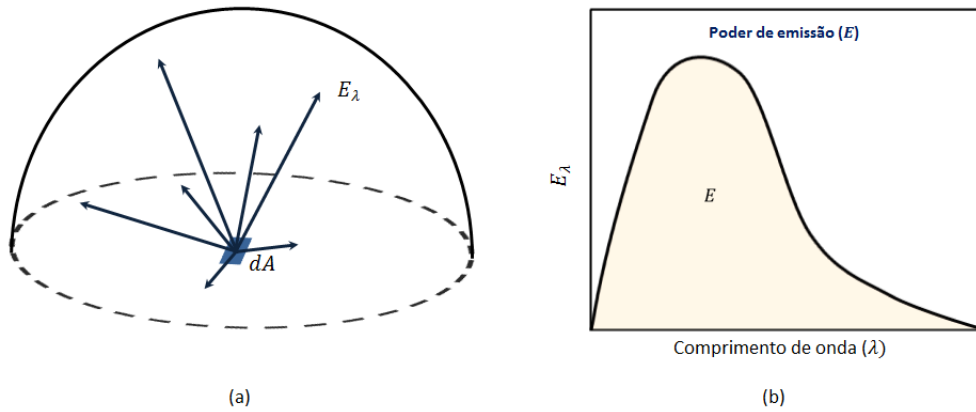


Figura 3.4: Poder emissivo. (a) Poder emissivo monocromático E_λ . (b) Poder emissivo total E

em que, E é dado em W/m^2 e E_λ em $W/m^2\mu m$.

O limite superior para o poder emissivo é determinado pela seguinte equação:

$$E_b = \sigma T^4. \quad (3.5)$$

A equação (3.5) é conhecida como a lei de Stefan-Boltzmann, em que $\sigma = 5,672 \times 10^{-8} [W/(m^2K^4)]$, é chamada de *Constante de Stefan-Boltzmann* e T representa a temperatura do corpo negro (em K). Essa equação representa a quantidade de energia emitida em todas as direções e ao longo de todos os comprimentos de onda [2].

Até o momento, descreveu-se os processos radiantes que acontecem em uma superfície. A seguir será considerada a troca de calor por radiação entre duas ou mais superfícies (considerando os efeitos da orientação das superfícies), a fim de explicar as considerações que foram feitas no desenvolvimento do modelo matemático do forno. Inicialmente foca-se nas características geométricas do problema da troca de calor, desenvolvendo em seguida o conceito de fator de forma.

Fator de forma

A troca de calor por radiação entre superfícies é função da geometria das superfícies e depende da orientação das mesmas uma em relação à outra. Essa dependência de orientação é explicada pelo fator de forma. O fator de forma, $F_{i \rightarrow j}$, é a fração de radiação distribuída difusamente que deixa uma superfície i e é interceptada pela superfície j [2]. O valor do fator de forma está compreendido entre zero e um.

Para desenvolver uma expressão geral para $F_{i \rightarrow j}$, considera-se a orientação arbitrária das superfícies A_i e A_j , e sobre essas superfícies é definido um elemento diferencial de área dA_i e dA_j , respectivamente. A distância entre dA_i e dA_j é uma linha reta de comprimento R , que forma ângulos θ_i e θ_j , respectivamente, com as

normais às superfícies n_i e n_j . Os valores de θ_i e θ_j variam com a posição dos elementos de área sobre A_i e A_j , como pode ser visto na figura 3.5.

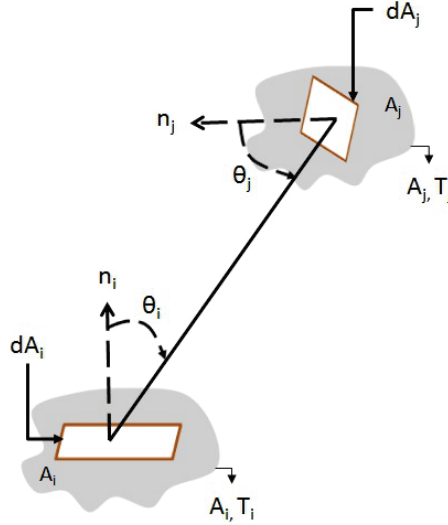


Figura 3.5: Geometria para trocas radiantes entre duas áreas diferenciais.

A taxa de energia que parte de dA_i e chega a dA_j é:

$$dQ_{i \rightarrow j} = I_{bi} dA_i \cos \theta_i \frac{dA_j \cos \theta_j}{r^2}, \quad (3.6)$$

em que, I_{bi} é a intensidade de energia emitida por dA_i .

A troca pura de energia líquida entre as superfícies A_i e A_j , é apresentado por [1]:

$$\begin{aligned} Q_{i \rightleftharpoons j} &= E_{bi} A_i F_{ij} - W_{bj} A_j F_{ji} \\ &= A_i F_{ij} (E_{bi} - E_{bj}) \end{aligned} \quad (3.7)$$

$$= A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (3.8)$$

As integrais que definem os fatores de forma, já foram calculadas para as geometrias mais comuns. A figura 3.6 apresenta os fatores de forma entre um plano e um feixe de tubulações paralelos ao plano. Em outras palavras, considerando que o forno internamente possui duas filas de tubos, e detrás da tubulação está o refratário, a radiação emitida incide diretamente na primeira fila ou na segunda fila da tubulação, e pode também incidir no refratário e, em seguida, ser refletida à fila de tubulação mais próxima. A figura 3.7 mostra esse fenômeno.

3.1.4 Transmissão de calor por radiação em meio participante

Gases formados por moléculas do mesmo tipo de átomos (por exemplo N_2 , O_2 e H_2), são considerados como transparentes à radiação porque não conseguem irradiar

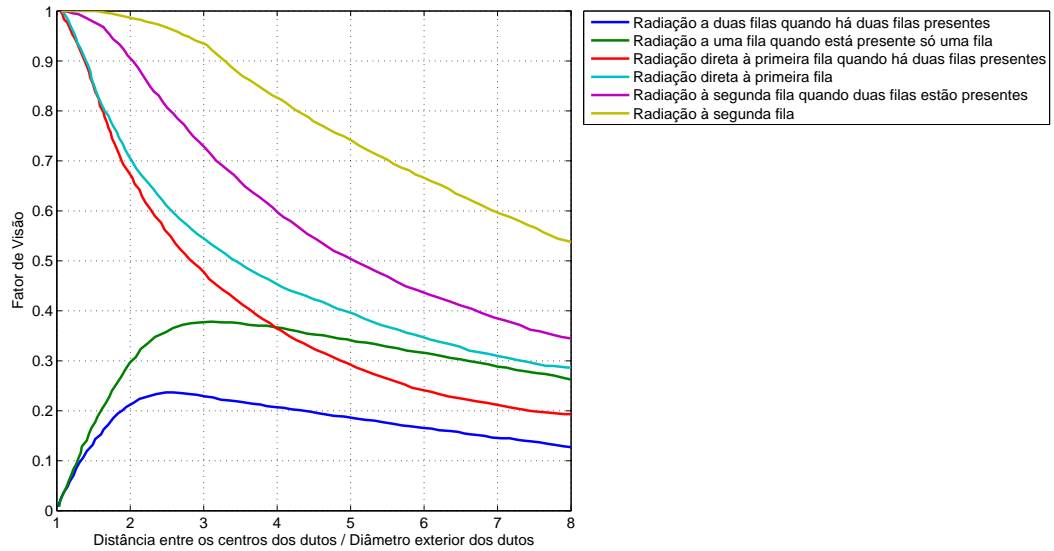


Figura 3.6: Fator de visão entre um plano e um feixe de tubulações paralelas a um plano ou dois planos, com ou sem refratário.

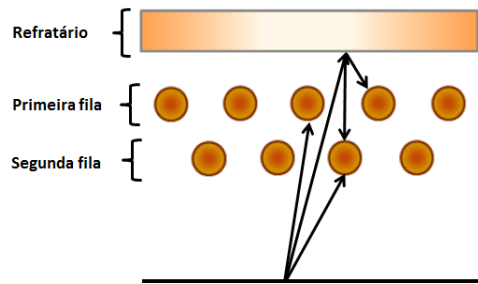


Figura 3.7: Radiação à primeira fila o segunda fila de tubulação.

nem absorver energia radiante. Contudo quando se lida com gases formados por moléculas polares, como o CO_2 , H_2O (vapor), CO , NH_3 , e hidrocarbonetos gasosos, já não se pode dizer o mesmo porque esses gases emitem e absorvem em uma ampla gama de temperaturas [2]. Para tais gases a radiação é concentrada em intervalos de comprimentos de onda específicos, chamados de bandas. Além disso, a radiação em gases não é um fenômeno de superfícies, mas é um fenômeno volumétrico [2].

Neste trabalho, é considerada uma combustão completa com 15% de excesso de ar, originando gases de combustão CO_2 e H_2O (vapor). Como já foi mencionado, esses gases têm um comportamento especial na transferência de radiação ou seja, o CO_2 e H_2O (vapor) são os principais emissores e absorvedores de energia radiante [18]. Assim, existe uma troca de calor entre o gás de combustão e as superfícies vizinhas, o que mostra a necessidade do conhecimento das propriedades da radiação em gases e vapores.

Emissão e absorção em gases

Para determinar o fluxo térmico radiante de um gás, a uma temperatura T_g , para uma superfície adjacente, foi desenvolvido um modelo por Hottel [19]. O modelo considera uma hemisfera de gás radiante de raio L , à temperatura T_g para uma superfície receptora dA , posicionada no centro da base do hemisfério. Portanto o gás emite radiação por unidade de área da superfície, apresentada pela seguinte equação:

$$E_g = \epsilon_g \sigma T_g^4, \quad (3.9)$$

em que ϵ_g denota a emissividade do gás e depende da temperatura do gás e da pressão parcial de CO_2 e H_2O , da pressão total do gás (se admite pressão atmosférica) e do raio L da hemisfera. Pode-se definir L como o comprimento de feixe médio radiante, grandeza que correlaciona a dependência da emissividade do gás, com o tamanho e a forma da geometria do gás [2]. O valor de L , pode ser determinado a partir de tabelas para diversas geometrias [16]. A tabela 3.1 apresenta valores do comprimento L para algumas formas simples.

Tabela 3.1: Comprimentos semiesféricos equivalentes para geometrias comuns.

Forma	L
Cilindro infinito	<i>Diâmetro</i>
Cilindro reto circular altura igual ao diâmetro	$\frac{2}{3} \times \text{Diâmetro}$
Espaço entre planos paralelos	$2 \times \text{Distância entre planos}$
Cubo	$\frac{2}{3} \times \text{Lado}$

Para geometrias não incluída na 3.1 pode-se utilizar uma aproximação satisfatória sugerida por HOTTEL e SAROFIM [20] representada pela expressão a seguir:

$$L = 3.5 \left(\frac{V}{S} \right), \quad (3.10)$$

em que V é o volume e S é a área da superfície.

A figura 3.8 apresenta a emissividade do CO_2 , em função da temperatura do gás, para diferentes produtos $p_C L$, onde, p_C é a pressão parcial do CO_2 [20]. Essa figura é válida para o caso em que a pressão total é de uma atmosfera (101,3 kPa). Para condições diferentes, deve-se tomar o fator de correção C_C da figura 3.9, obtido em função da pressão total e do produto $p_C L$. Dessa forma, o valor da emissividade é calculado utilizando a equação (3.11), em que ϵ é obtido a partir da figura 3.8.

$$\epsilon_{CO_2} = \epsilon C_C. \quad (3.11)$$

Um procedimento similar é realizado para o vapor de água. Chamando de p_W a

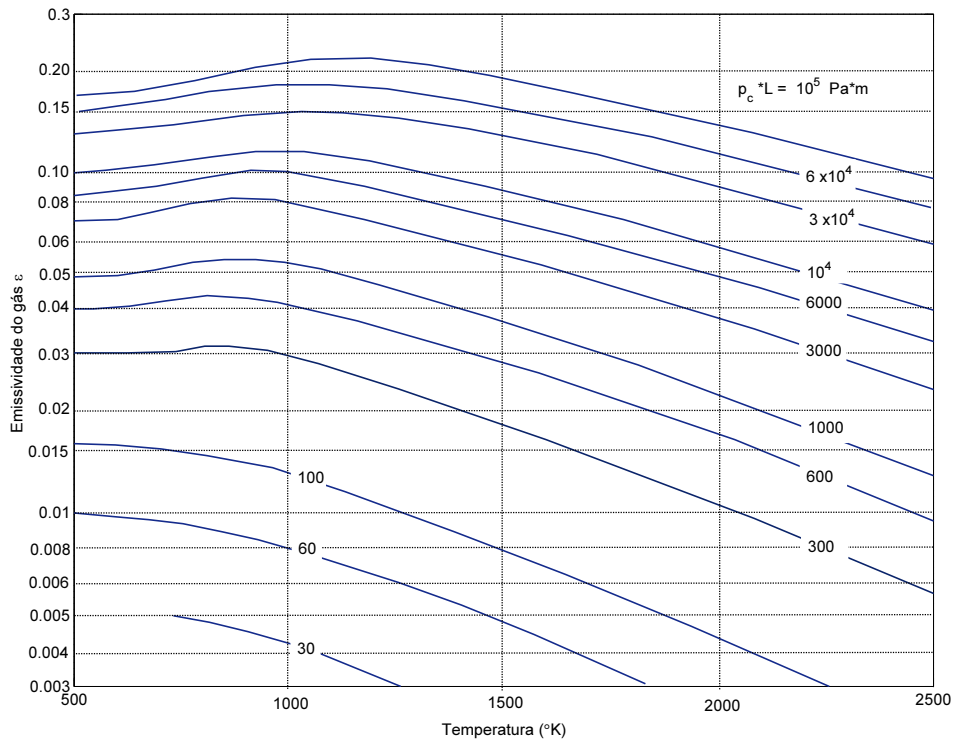


Figura 3.8: Emissividade do CO_2 para 1 atm [1].

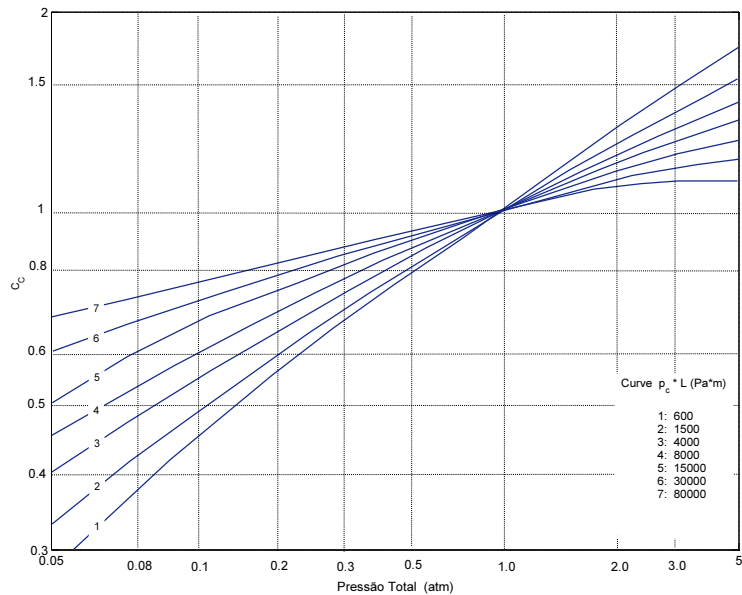


Figura 3.9: Fator de correção para a Emissividade do CO_2 para pressões diferentes de 1 atm [1].

pressão parcial do vapor de água na mistura, pode-se obter a emissividade ε , como função de T_G e $p_w L$ (Hottel e Sarofim, 1967). A emissividade para o vapor de água a uma atmosfera é apresentado na figura 3.10.

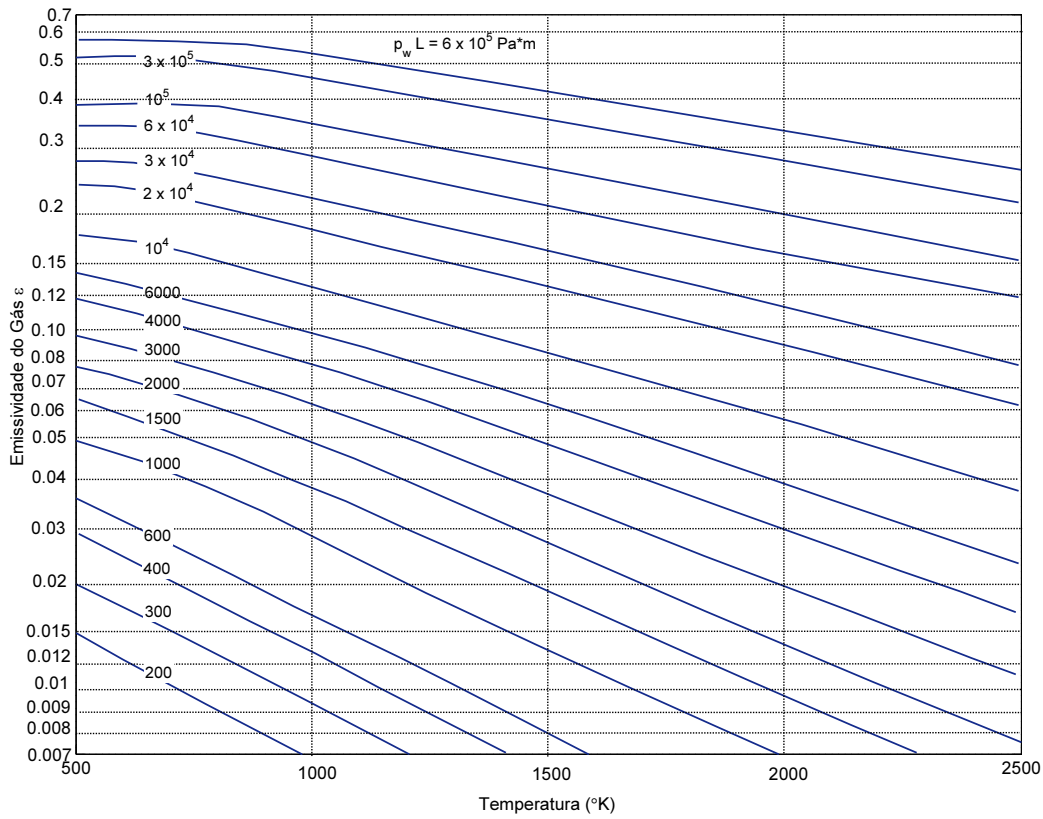


Figura 3.10: Emissividade do vapor de água para 1 atm [1].

Para pressões diferentes de uma atmosfera, utiliza-se o fator de correção C_W da figura 3.11. Nesse caso, o eixo das abcissas corresponde a $\frac{1}{2}(p + p_W)$. Finalmente, a emissividade do vapor de água é calculado através de:

$$\epsilon_{H_2O} = \epsilon C_W. \quad (3.12)$$

Para o caso de uma mistura contendo tanto CO_2 , quanto vapor de água, precisa-se fazer uma correção adicional. Devido às faixas de emissão do CO_2 e do vapor de água apresentarem algum tipo de superposição, em uma mistura de ambos os gases, parte da energia emitida por um deles é absorvida pelo outro. Dessa forma, a emissividade total da mistura é obtida com a seguinte expressão:

$$\epsilon = \epsilon_{CO_2} + \epsilon_{H_2O} - \Delta_\epsilon \quad (3.13)$$

em que, Δ_ϵ é obtido da figura 3.12.

De forma similar, o fator de absorção de uma mistura contendo CO_2 e vapor de água, é calculado por meio da seguinte expressão:

$$\alpha = \alpha_{CO_2} + \alpha_{H_2O} - \Delta_\alpha, \quad (3.14)$$

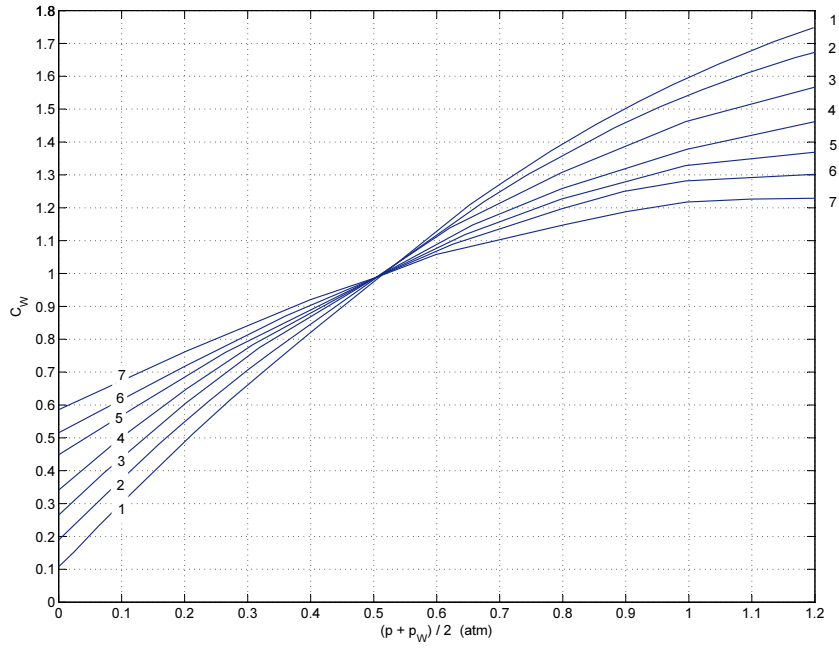


Figura 3.11: Fator de correção para a Emissividade do vapor de água, para pressões diferentes de 1 atm [1].

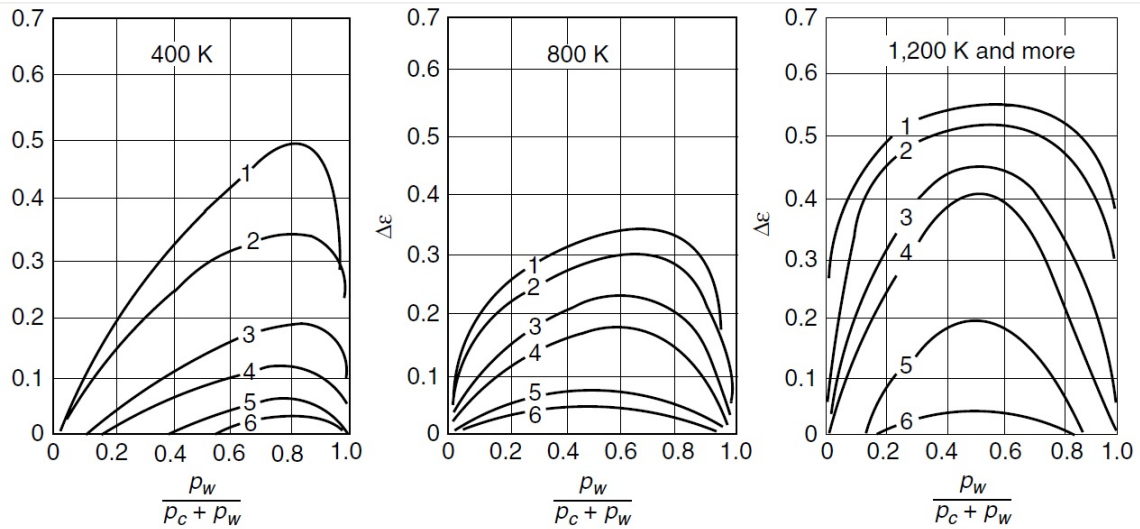


Figura 3.12: Correção de Emissividades para misturas de CO_2 e vapor de água [1].

e o fator de absorção do CO_2 é calculado como segue:

$$\alpha_{CO_2} = \varepsilon' C'_C \left(\frac{T_G}{T_I} \right)^{0.65}, \quad (3.15)$$

em que ε' vem da figura 3.8, porém, selecionando nas abcissas a temperatura da superfície T_I ao invés da temperatura do gás. Além disso, calcula-se o valor do parâmetro $p_C L \left(\frac{T_I}{T_G} \right)$ ao invés de $p_C L$.

O fator de absorção do vapor de água é calculado utilizando a seguinte expressão:

$$\alpha_{H_2O} = \varepsilon' C'_W \left(\frac{T_G}{T_I} \right)^{0.45} \quad (3.16)$$

em que, ε' é obtido da figura 3.10, e, C'_W da figura 3.11, selecionando na abcissa a temperatura T_I com o valor de parâmetro $p_W L \left(\frac{T_I}{T_G} \right)$.

Os fatores de correção C'_C e C'_W são obtidos da mesma forma que no caso das emissividades.

Troca de energia entre um gás e uma superfície qualquer

O comprimento semiesférico equivalente é um comprimento fictício característico da geometria escolhida, o qual, permite calcular os valores de emissividades e fator de absorção, através das figuras 3.8, 3.9, 3.10, 3.11, e, 3.12, apresentadas anteriormente. Dessa forma, a transferência de energia entre o gás e a superfície, é descrita como segue:

$$Q_{G1} = A(\varepsilon E_{bG} - \alpha E_{b1}) = A\sigma(\varepsilon T_G^4 - \alpha T_1^4). \quad (3.17)$$

em que, E_{bG} é o poder emissivo do gás, E_{b1} é o poder emissivo de uma superfície (tubulação) e A é área da superfície.

Emissividade equivalente de um gás cinza

De forma similar ao conceito de corpo cinza, define-se um *gás cinza* como um gás cuja emissividade é igual ao seu coeficiente de absorção.

A equação (3.17) é transformada como segue:

$$Q_{G1} = A\varepsilon(E_{bG} - E_{b1}). \quad (3.18)$$

Embora o CO_2 e o vapor de água não apresentem o comportamento de um gás cinza, eles podem ser aproximados como gases cinza, mantendo-se a forma da equação (3.18), desde que se defina a emissividade equivalente do gás cinza por meio da seguinte expressão [1]:

$$\varepsilon_g = \frac{\varepsilon E_{bG} - \alpha E_{b1}}{E_{bG} - E_{b1}}. \quad (3.19)$$

Finalmente, a troca de energia entre o gás e a superfície é descrita pela seguinte equação:

$$Q_{G1} = A\varepsilon_g(E_{bG} - E_{b1}). \quad (3.20)$$

3.2 Forno aquecedor de óleo

Na indústria de petróleo e gás, refino e petroquímica, o forno é um equipamento de grande importância econômica, representando aproximadamente 20% do investimento total e 80% do consumo de energia das unidades. Essa importância é devida à utilização de chama direta ou indireta, proveniente da queima de combustíveis, que ainda é a melhor maneira de fornecer grandes quantidades de energia necessária para elevar grandes vazões de fluido.

O forno atua complementando calor, ou seja, fornecendo calor na forma de chama, a fim de aquecer e elevar a temperatura de grandes vazões de óleo que circula por uma serpentina de tubos no interior do forno.

Cabe destacar que os fornos, além de ser considerados críticos e requererem atenção especial da operação, acompanhamento, manutenção e inspeção (pois são neles que geralmente estão os limites operacionais do processo), também, são responsáveis pelo maior número de acidentes graves. Por esses motivos, existe a necessidade, cada vez mais acentuada, de projetar e operar fornos de maneira eficiente e segura.

Existem vários tipos de fornos, os quais são classificados de acordo com o sistema de aquecimento, o tipo de combustível, o sistema de transferência de calor e o tipo de alimentação empregado. Este trabalho se basa no forno misto, ou seja, um forno cilindro vertical com seção de convecção, apresentado na figura 3.13.

A seguir é apresentada uma breve descrição das características do forno vertical misto com suas partes principais, para mais adiante identificar as possíveis falhas no processo aquecedor.

Descrição

O forno misto, denominado em inglês *Fired Heater*, é de aquecimento direto por transmitir o calor diretamente à serpentina de tubos colocada na câmara inferior (região de radiação), onde se gera o calor da combustão, a fim de aquecer a substância que passa no interior dos tubos. O calor desenvolvido na região de radiação é proveniente de queimadores que são alimentados por gás combustível. A quantidade de calor fornecida pelos queimadores e a vazão do produto através dos tubos são rigidamente controlados por meio de instrumentos, tendo em vista as condições operacionais de pressão e temperatura.

Acima da câmara de combustão, está uma outra câmara chamada câmara de convecção, composta por uma serpentina de dutos interligados. A câmara de convecção está conectada à chaminé, por onde se faz a exaustão dos gases. A figura 3.14 mostra as partes do forno misto.

Cabe mencionar que ao realizar-se a transferência de calor na região de radiação, a substância (óleo) a ser aquecida remove uma grande quantidade de calor dos gases

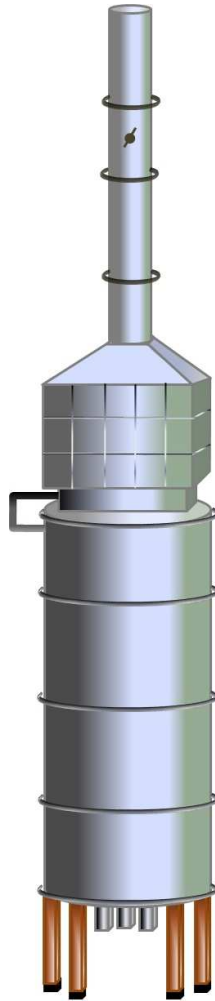


Figura 3.13: Forno cilíndrico vertical

de combustão, antes mesmo de passarem para a seção de convecção.

3.2.1 Partes do forno aquecedor de óleo

Como foi mencionado, um forno é composto por uma região inferior, denominada região de radiação, uma região superior, denominada região de convecção, a chaminé dos gases de combustão e o sistema de combustíveis, que fornece gás combustível para os queimadores, como é apresentado na figura 3.14.

Região de radiação

Na câmara de radiação, câmara de combustão ou simplesmente fornalha, se processa a queima do combustível. Além disso, é instalada uma serpentina constituída de uma série de tubos interligados entre si na sua extremidade por meio de cabeçotes e curvas de retorno. Esses tubos estão dispostos verticalmente ao longo da câmara de combustão e ficam expostos ao calor radiante das chamas. Os tubos

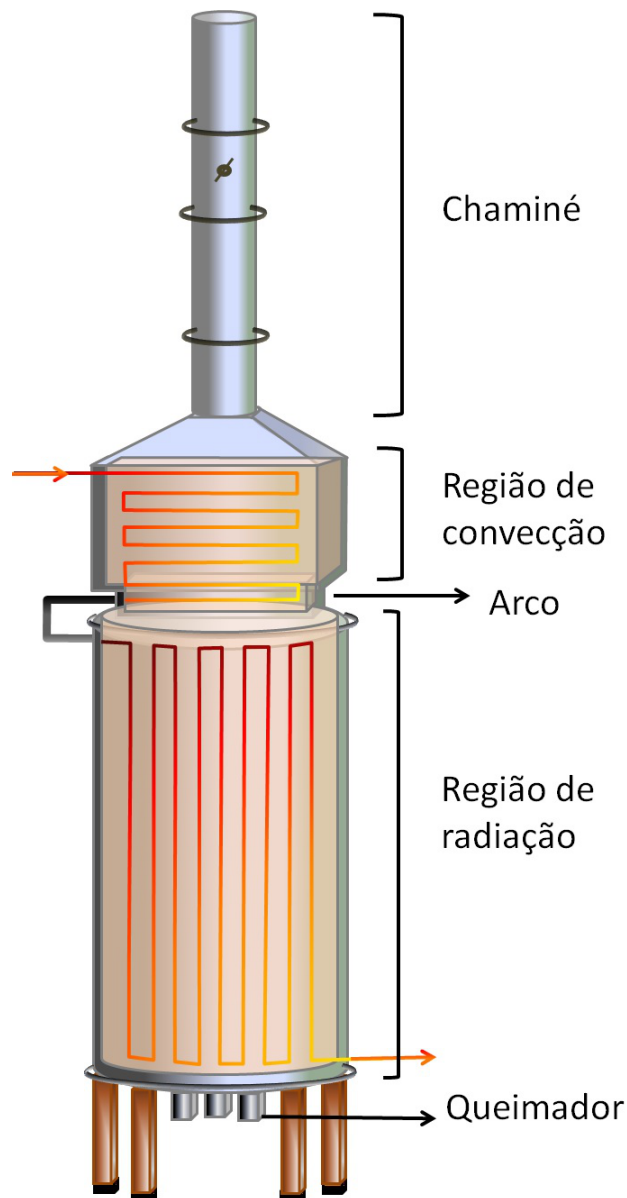


Figura 3.14: Partes do forno

estão distribuídos em um número de passes dividindo estas em áreas, ou seja, o fluxo da substância a ser aquecida pode ser dividido em duas ou mais tubulações de passagens independentes.

Nessa região, o forno possui espaço suficiente para que o ar se misture com o combustível e queime completamente. Por isso, essa região é adequada para altas temperaturas, assim sendo, as paredes da fornalha têm alta resistência ao calor, construídas com tijolos refratários (nas paredes, teto e ao redor dos queimadores), contidos por uma estrutura metálica.

A função do refratário é irradiar o calor não absorvido pelos tubos de volta para dentro da câmara, evitando perdas de calor para o exterior. Além disso o refratário isola a câmara de combustão dos elementos estruturais, evitando que os gases de

combustão atinjam as chapas da carcaça metálica, onde se condensariam, formando ácidos corrosivos.

A denominação dessa câmara é devido à transferência de calor que se dá basicamente por radiação dos gases de combustão para a parede dos tubos. Esse tipo de transferência de calor foi tratado na seção 3.1.3.

Região de convecção

A região de convecção é uma câmara de pré-aquecimento formada por uma caixa de base retangular montada acima da câmara de radiação, onde é instalada a outra parte da serpentina disposta horizontalmente. Esses tubos possuem grande quantidade de pinos e aletas, com o objetivo de aumentar sua superfície de troca de calor e rendimento com um mínimo de área de construção. Nessa câmara, os dutos não são diretamente expostos à radiação da chama. Eles entram em contato com os gases quentes vindos da câmara de radiação.

Essa câmara recebe essa denominação porque o calor dos gases de combustão é transferido para as serpentinas de tubos basicamente por convecção. A transferência de calor por convecção foi tratada na seção 3.1.2.

Chaminé

A chaminé é um trecho cilíndrico montado acima da região de convecção que tem como finalidade a descarga dos gases de combustão para atmosfera. A chaminé é responsável pela tiragem necessária, isto é, permitir que por diferença de densidades os gases subam e succionem o ar para a combustão, mantendo todo o forno com pressões levemente negativas, a fim de evitar fugas de gases pelas paredes, o que poderia aquecer a estrutura do forno. A tiragem desse forno é natural, ou seja, a própria chaminé vence as perdas de carga e garante o fluxo. O ajuste de tiragem é feito pelo “abafador” *dampers* posicionado na saída da chaminé.

Queimador

Os queimadores são acessórios do forno, possuem maçaricos para o gás, pois queimam gás, ou seja, a função do queimador é promover a mistura entre o ar e o gás combustível, e a combustão deles. Para que a combustão se realize de forma completa, se utiliza 15% de excesso de ar. Os queimadores, no forno, estão dispostos no piso do forno. O queimador é composto dos pilotos, os quais são maçaricos a gás de baixa capacidade que fazem a ignição dos maçaricos principais e evitam seu apagamento.

3.2.2 Variáveis operacionais do forno

Na prática existem muitas variáveis operacionais que podem influenciar no forno como: a temperatura de entrada do fluido a ser aquecido, a vazão através de um ou mais passes e a carga térmica a ser fornecida pelo sistema de combustíveis [21]. Neste processo em estudo, a variável controlada é a temperatura de saída da substância (óleo) a ser aquecida.

Para se obter o controle da temperatura, a variável manipulada pelo sistema de controle é a vazão de gás combustível, o qual alimenta os maçaricos do forno. Em outras palavras, quanto maior for a vazão de combustível para os maçaricos, maior será a temperatura de saída dos gases de combustão e, conseqüentemente, maior será a temperatura de saída do óleo aquecido.

Para regular a vazão de combustível, o sistema de controle atua na válvula de controle, permitindo abrir, fechar ou mantê-la em qualquer posição de seu curso, em virtude das necessidades do processo.

Válvula de controle

No processo de aquecimento, apresentado neste trabalho, utiliza-se uma válvula de controle tipo globo *Fisher*, apresentada na figura 3.15.

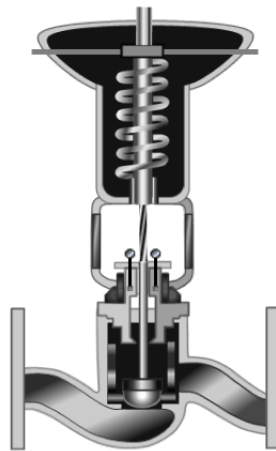


Figura 3.15: Válvula de controle tipo globo.

A válvula de controle e, em geral qualquer válvula, é composta por dois conjuntos principais: o atuador e o corpo, apresentados na figura 3.16.

O atuador recebe o sinal de controle e o converte em abertura modulada mediante a potência adequada. Nessa válvula (tipo globo), o atuador é pneumático, com diafragma e mola. A função do diafragma é a de converter o sinal de pressão em uma força e a função da mola é a de retornar o sistema à posição original.

Por outro lado, o corpo (considerado elemento mecânico), executa a ação de controle porque permite a manipulação de um maior ou menor passo do fluxo no

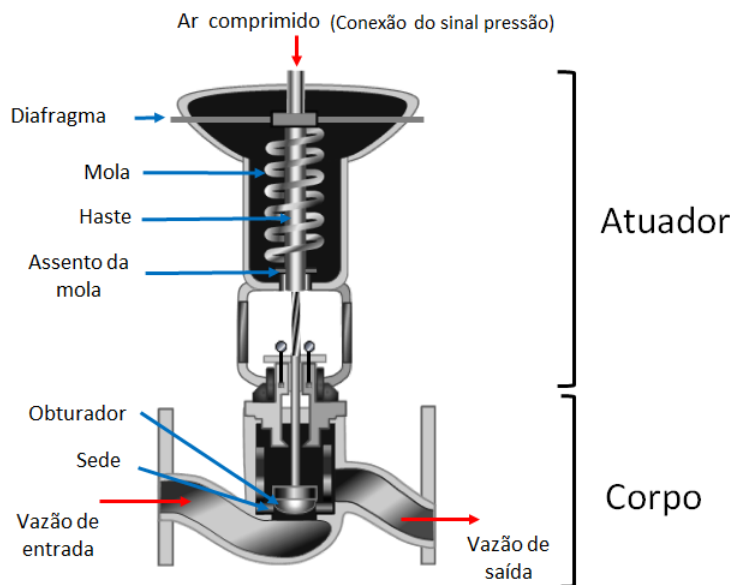


Figura 3.16: Válvula tipo globo e suas partes.

seu interior.

Internamente, o corpo é composto por obturador e a sede da válvula. A sede da válvula é onde se assenta o obturador, e a posição relativa entre o obturador e a sede é que estabelece a abertura da válvula para a passagem da vazão.

O funcionamento da válvula de controle baseia-se em que o atuador pneumático recebe diretamente o sinal do controlador pneumático e o converte numa força que irá movimentar a haste da válvula, onde está acoplado o obturador que irá abrir e fechar continuamente a válvula de controle. Em outras palavras, quando o obturador estiver em contato firme com a sede, a válvula é considerada fechada. Por outro lado, quando o obturador estiver longe da sede, a válvula estará aberta. Assim, o controle da vazão do combustível é determinado pela elevação entre o obturador e a sede.

3.3 Processo de aquecimento de óleo no forno

O processo de aquecimento de óleo é apresentado no diagrama do processo e instrumentação, figura 3.17. Pode-se observar que o óleo frio vem da planta para ser aquecido e ingressa por uma linha de 14". A temperatura e vazão de entrada são registradas pelos transmissores $TT - 102$ e $FT - 103$, respectivamente. O duto de entrada do óleo de 14" se divide em quatro dutos de 6" antes de ingressar na zona de convecção do forno.

Depois do óleo ser aquecido na zona de convecção, os diâmetros da tubulação de óleo quente aumentam para 8", chegando à zona de radiação para completar o aquecimento. A temperatura do óleo no interior da câmara de convecção é registrada pelo transmissor $TT - 105$. Por outro lado, na câmara de radiação, a temperatura

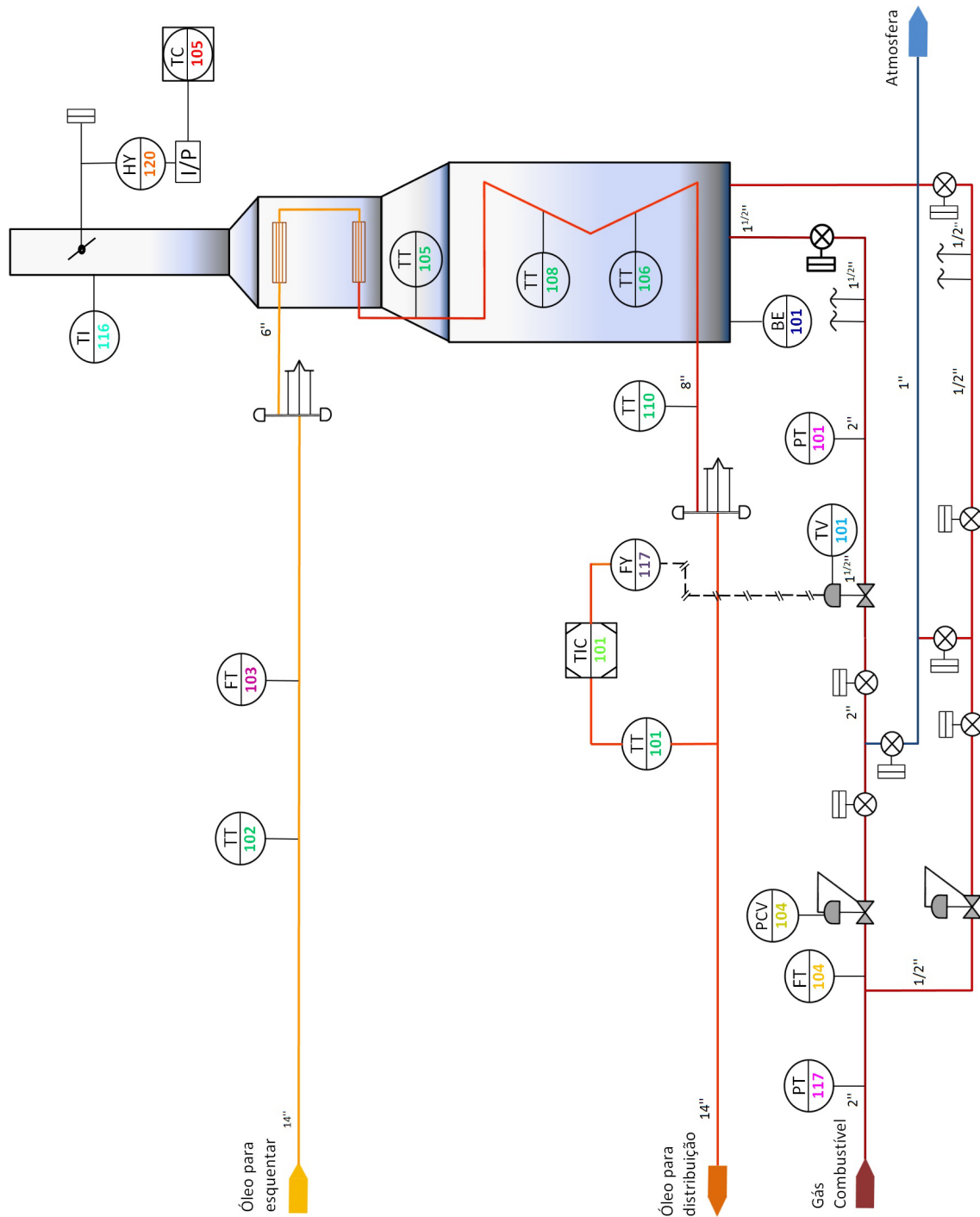


Figura 3.17: Diagrama do processo e instrumentação do forno.

é registrada pelos transmissores $TT - 108$ e $TT - 106$.

Finalmente, o óleo quente sai da zona de radiação do forno pelos dutos de 8" (registrado pelo transmissor de temperatura $TT - 110$), e através de um *manifold* são misturadas em um único duto de 14". O óleo aquecido é utilizado para aquecer circuitos de utilidades da planta.

O controlador de temperatura $TIC - 101$, localizado em um CLP local, controla

a temperatura de saída do óleo registrada por $TT - 101$, através da ação sob a válvula de $1\frac{1}{2}$ denominada $TV - 101$. Essa válvula regula o fluxo de ingresso de gás combustível o queimador de $\frac{1}{2}$ ” do forno, chamado de $BE - 101$, em uma linha de 2”.

A energia entregue pelos queimadores ao óleo quente é uma função direta da vazão de gás combustível através da válvula $TV - 101$. Por outro lado, a linha de entrada de gás combustível está pressurizada a 2.36 atm , sendo regulada pela válvula autoregulável $PCV - 104$.

Uma linha paralela de diâmetro menor ($\frac{1}{2}$ ”) fornece gás combustível aos pilotos de cada queimador, para garantir a presença de chama para o acendimento dos queimadores.

Válvulas de bloqueio do tipo “válvula de paragem de emergência” ($TSO, Tight - shut \ off$), estão instaladas nas linhas de 2” e $\frac{1}{2}$ ” para o isolamento dos circuitos de gás combustível do forno até os queimadores e pilotos. Além disso, uma linha de 1” é conectada ao circuitos de gás combustível para a purga de gás, no caso de um desligamento ($Shut \ down$) de emergência, ou para manutenção.

A vazão e pressão de entrada de gás combustível no forno é registrada pelos transmissores $FT - 104$ e $PT - 117$, respectivamente.

3.4 Modelo Matemático do forno aquecedor de óleo

Conhecidos os fundamentos teóricos apresentados na seção 3.1 e as características do forno (seção 3.2) é possível obter um modelo matemático para o comportamento de transmissão de calor na câmara de combustão e na saída do forno aquecedor. Com essas equações determina-se o valor da temperatura média dos gases na câmara de combustão, T_g (em K), e a temperatura de saída do óleo resultante após aquecimento pelos gases de combustão, T_o (em K).

O modelo desenvolvido baseia-se em um forno geral e os resultados foram analisados com base em suas tendências.

O modelo leva em consideração o seguinte:

- Os gases resultantes da queima encontram-se na câmara de combustão a uma temperatura média T_g .
- Supõe-se que a composição e a temperatura dos gases seja uniforme dentro da câmara de combustão [20], [18], [22].
- Os gases de combustão e o refratário são considerados corpos cinzas, como foi visto na definição 3.1.3. Esses pressupostos definidos foram também usados por outros autores, [20], [18]. Por outro lado, os dutos (serpetina) alocados dentro do forno, são considerados corpos negros.

- Para o coeficiente de emissão (ϵ) e absorção (α) do gases CO_2 e vapor de H_2O foram utilizados as tabelas de Hottel [19] e [20].
- Na região de radiação, a convecção foi levada em consideração no modelo, embora a contribuição de energia por convecção seja pequena em comparação com a radiação.
- As equações de transferência de calor por radiação foram baseadas no método de *Lobo & Evans* [23].

O modelo foi dividido em três seções: a chama, a tubulação e o refratário, cada uma com suas respectivas temperaturas, como pode ser visto na figura 3.18. Assim, os gases resultantes da combustão (com uma temperatura T_g), transmitem calor por radiação e convecção à tubulação (a), que se encontra a uma temperatura média T_t . Ao mesmo tempo, uma outra fração de energia dos gases de combustão, definida por (b), incide sobre o refratário, o qual encontra-se a uma temperatura T_w . Em seguida, uma parte dessa fração é refletida à tubulação, definida por (d), e o resto é refletido de volta aos gases de combustão.

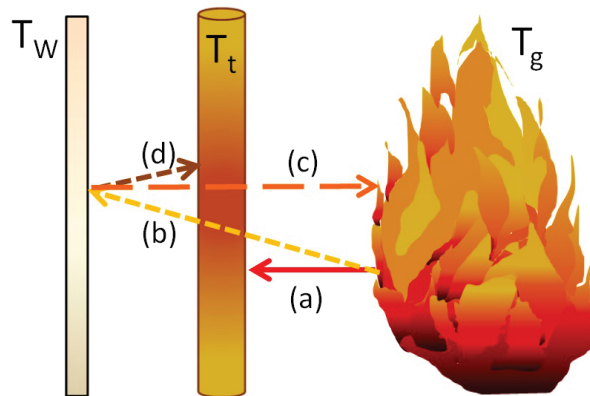


Figura 3.18: Transferência de calor por radiação na região de radiação

A taxa de transferência de calor radiante, denotado por (a), mostrada na figura 3.18 pode ser simplificada através da expressão para a taxa entre os gases e os tubos da serpentina em um forno, denotado como transferência de calor por radiação Q_r , é proposto por CAO [1]:

$$Q_r = A_1 \alpha_{pec} F_{gt} \sigma (T_g^4 - T_t^4). \quad (3.21)$$

em que, A_1 é área do plano equivalente correspondente ao diâmetro das tubulações em (m^2); α_{pec} é a eficiência do plano equivalente; F_{gt} é o fator de forma dos gases de combustão à tubulação; σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($\frac{W}{m^2 K^4}$); T_g e T_t são

a temperaturas dos gases de combustão e da tubulação, respetivamente, ambos em (K^4).

Como foi mencionado, a transferência de calor mais significativa na câmara de radiação é a radiação, mas os gases de combustão também transferem energia por convecção, denotado por Q_c , que pode ser representada pela expressão [1]:

$$Q_c = A_2 h_G (T_g - T_t). \quad (3.22)$$

sendo h_G o coeficiente de transferência de calor por convecção entre os gases e a parede da tubulação, em ($\frac{W}{m^2 K}$); A_2 é a área da tubulação na região de radiação, em (m^2); T_g e T_t são a temperaturas dos gases de combustão e da tubulação, respetivamente, ambos em (K).

Então, a equação geral da transferência de calor dos gases de combustão para a tubulação, definida por Q_{tubo} , é a soma das contribuições radiante, equação (3.21) e contribuição convectiva, equação (3.22), essa relação é apresentada a seguir:

$$Q_{tubo} = A_1 \alpha_{pec} F_{gt} \sigma (T_g^4 - T_t^4) + h_G A_2 (T_g - T_t), \quad (3.23)$$

adotando um valor fixo igual a $11,5 (\frac{kJ}{m^2 s K})$ para h_G [1].

Depois de desenvolver a equação (3.23), com dados geométricos gerais de um forno segundo o procedimento de CAO [1], tem-se:

$$Q_{tubo} = 3,0938 \times 10^{-10} (T_g^4 - T_t^4) + 0,2777 (T_g - T_t), \quad (3.24)$$

Adotando a letra A para o coeficiente de Q_r e a letra B para o coeficiente de Q_c , tem-se:

$$A = 3,0938 \times 10^{-10}, \quad (3.25)$$

$$B = 0,2777, \quad (3.26)$$

Logo, substituindo as equações (3.25) e (3.26) na equação (3.24), tem-se:

$$Q_{tubo} = A (T_g^4 - T_t^4) + B (T_g - T_t), \quad (3.27)$$

ou também, pode ser expressada a equação (3.27) como:

$$Q_{tubo} = AT_g^4 - AT_t^4 + BT_g - BT_t. \quad (3.28)$$

3.4.1 Linearização da expressão de transferência de calor para tubulação Q_{tubo}

Note-se que a equação (3.28) é uma equação não linear. Então, para calcular a função de transferência do forno baseada num modelo linear é preciso linearizar a equação próxima aos pontos de operação do forno. Os pontos de operação foram selecionados de acordo com as temperaturas e fluxos desejados na operação normal do forno para esquentar o óleo até uma temperatura nominal de 155°C , a qual corresponde à média das temperaturas requeridas pelo operador em uma operação normal. O procedimento de linearização da equação (3.28) baseia-se na expansão em series de Taylor da equação não linear, desprezando-se os termos de ordem maior do que um [24].

A equação (3.28), pode ser linearizada numa vizinhança próxima dos pontos de operação normais do forno: $T_{go} = 710.20 \text{ K}$ e $T_{to} = 586,50 \text{ K}$, em que T_{go} e T_{to} , denotam o ponto de operação do gás e o ponto de operação da serpentina, respetivamente. Representam-se as variações da taxa térmica para o tubo ΔQ_{tubo} em função das variações das temperaturas do gás T_g e tubo T_t , pela seguinte equação:

$$\Delta Q_{tubo} = \left. \frac{\partial Q_{tubo}}{\partial T_g} \right|_{T_g=T_{go}} \Delta T_g + \left. \frac{\partial Q_{tubo}}{\partial T_t} \right|_{T_t=T_{to}} \Delta T_t. \quad (3.29)$$

A temperatura de operação do tubo (T_{to}) e a temperatura de operação do gás (T_{go}) são as temperaturas próximas aos pontos de operação do forno, definidas anteriormente.

3.4.2 Equações de balanço de energia do forno

Considere a equação de balanço de energia numa seção da tubulação Δx , definida pela seguinte equação dinâmica:

$$M_t C_{p,t} \Delta x \frac{d\bar{T}_t}{dt} = Q_{tubo}^* \Delta x - \alpha_o A_i \Delta x (\bar{T}_t - \bar{T}_o) \quad (3.30)$$

em que, M_t é a massa da parede do tubo por unidade de comprimento; $C_{p,t}$ é a capacidade térmica do tubo; A_i é a área interna do tubo por unidade de comprimento, \bar{T}_o é a temperatura média do óleo, Q_{tubo}^* é a somatória da transferência de calor do gás das paredes da zona de radiação e convecção para o tubo e Δx é o comprimento do tubo analisado.

Agora, considere-se o balanço de energia para o óleo que será aquecida em Δx dado pela seguinte equação dinâmica:

$$M_o C_{p,o} \Delta x \frac{d\bar{T}_o}{dt} = \alpha_o A_i \Delta x (\bar{T}_t - \bar{T}_o) - \phi_{m,o} C_{p,o} (T_{0,x+\Delta x} - T_{0,x}) \quad (3.31)$$

em que, M_o é a massa do óleo em Δx por unidade de comprimento; $C_{p,o}$ é a capacidade térmica do óleo e $\phi_{m,o}$ é a vazão do óleo. Dado que, a capacidade de calor nas paredes do forno são grandes, será suposto que as variações da temperatura das paredes são nulas, e por tanto que a dinâmica de temperatura nelas seja quase estacionária.

A figura 3.19 apresenta a dinâmica das equações (3.30) e (3.31).

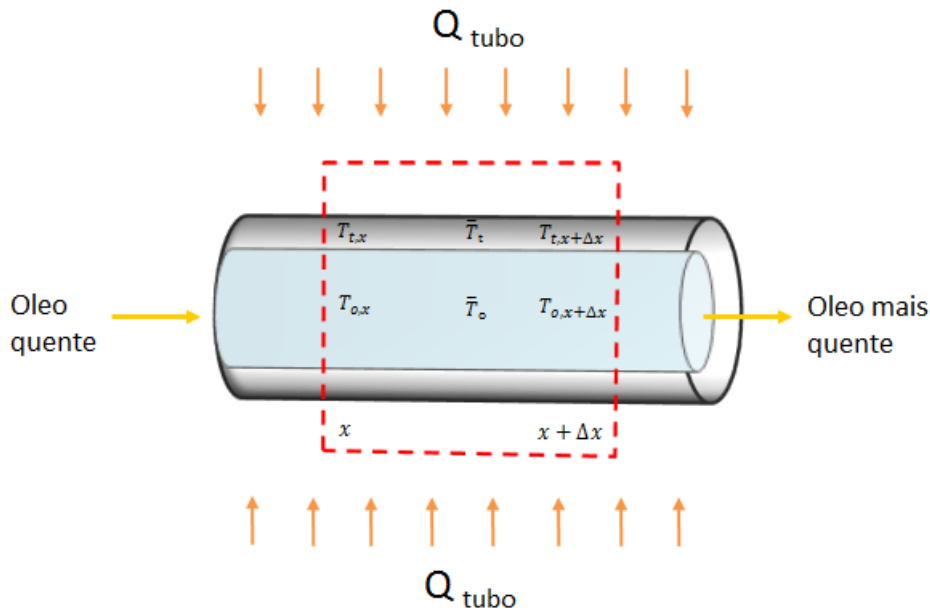


Figura 3.19: Representação da dinâmica de energia na tubulação

3.4.3 Funções de transferência do forno aquecedor e válvula de controle

A figura 3.20 apresenta o diagrama de blocos da planta, utilizado neste trabalho.

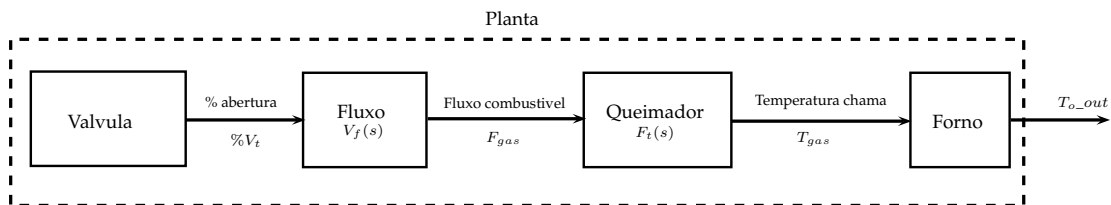


Figura 3.20: Diagrama de blocos da planta

O objetivo de modelar a dinâmica do forno aquecedor de óleo é obter uma função de transferência entre a temperatura de saída de óleo quente T_{o_out} , definido como T_o , e a temperatura do gás no interior do forno T_{gas} , definido como T_g . Para isso, as equações (3.30) e (3.31) foram desenvolvidas mediante o método de derivação

proposto por [25] e [26], para o cálculo da função de transferência, representada pela seguinte equação:

$$\frac{b}{a} = \frac{\gamma}{T_1 T_2 s^2 + \left(T_1 + T_2 + \frac{T_1 T_2}{T_{12}}\right) s + 1}, \quad (3.32)$$

em que γ é uma constante de residência, ela depende da radiação e convecção. Em geral para um forno grande $\gamma \gg 1$. Além disso, tem-se:

$$T_2 = \frac{M_t C_{p,t}}{S}, \quad (3.33)$$

$$T_{12} = \frac{M_t C_{p,t}}{\alpha_o A_i}, \quad (3.34)$$

$$T_1 = \frac{M_o C_{p,o}}{\alpha_o A_i}, \quad (3.35)$$

em que S é uma constante da temperatura de radiação com um valor aproximado de 1.50.

Substituindo os valores da equação 3.32 de acordo com a tabela 3.2 obtém-se a função de transferência parcial do forno cuja entrada é T_{o_out} e a saída é T_g , com $T_{o_out} = T_o$:

Tabela 3.2: Valores numéricos para o balanço de energia do forno

Conceito	Valor	Unidade
M_o	0,32	$\frac{kg}{m}$
M_t	92,80	$\frac{kg}{m}$
C_{po}	2,28	$\frac{kJ}{m^2 s K}$
γ	1.85	—
C_{pt}	0,52	$\frac{kJ}{m^2 s K}$
\dot{m}_o	62,83	$\frac{kg}{s}$
$\phi_{m,o}$	0,098	$\left(\frac{kJ}{m^2 s K}\right)$
h_G	11,50	$\left(\frac{kJ}{m^2 s K}\right)$

$$G_1(s) = \frac{T_{o_out}}{T_g} = \frac{0,95 (1 - 0.54e^{-215s})}{(70,17s + 1)(347,29s + 1)}. \quad (3.36)$$

Note-se que a função de transferência, apresentada na equação (3.36), possui um tempo de atraso alto de 215 segundos, o qual é coerente com os processos de temperatura que apresentam tempos mortos ou atrasos em sua dinâmica.

A válvula desempenha um papel importante no controle de temperatura, portanto, é necessário conhecer a dinâmica da válvula de controle descrita por uma

função de transferência que relaciona a vazão e a posição da válvula, quando ambas variam de 0% a 100%.

Como foi mencionado na seção 3.1.4, o combustível fornecido ao forno é um gás compressível. Portanto, a vazão instantânea de um gás através de uma válvula pode ser calculada mediante a equação (3.37) [27].

$$Q = C_V N F_P P Y \sqrt{\frac{x}{\gamma_G T Z}}; \quad (3.37)$$

em que equação C_V é o coeficiente de vazão da válvula, N é a constante numérica para as unidades de medição usada, F_P é o fator geométrico da tubulação (adimensional), P é a pressão estática absoluta a montante do conjunto válvula-conexão, Y é o fator de expansão (relaciona o coeficiente de vazão de um gás e um líquido e para o mesmo número de Reynolds, adimensional), T é a temperatura absoluta a montante (gás) em Kelvin, Z é fator de compressibilidade (adimensional), $x = \Delta P/P$ é a pressão diferencial de entrada, e γ_G é o peso específico para as condições a montante. A tabela a seguir apresenta os valores numéricos das diferentes características da vazão [27].

Tabela 3.3: Coeficientes da fórmula para válvula

Símbolo	Valor	Unidade
P_1	34.54	<i>atm</i>
N_7	0,38	–
F_P	0,41	–
x	2,07	<i>atm</i>
γ_G	0,74	–
T	288.15	<i>K</i>
Z	0,99	–
P_{VG}	0.20	<i>atm</i>
P_{VG_t}	1.02	<i>atm</i>

A área de passagem está relacionada com o coeficiente de vazão da válvula (C_V). Quanto maior for o C_V de uma válvula, maior será a capacidade de vazão dela; por conseguinte a faixa de C_V para as diferentes posições de percentagem de abertura da válvula, denotada por X , deve-se ajustar aos requerimentos do processo. A relação entre o coeficiente da vazão da válvula de controle e sua própria posição é apresentada pela equação (3.38) [27].

$$C_V = f(X) \quad \text{em que } X : 0 - 100\% \quad (3.38)$$

Porém, a função de transferência da válvula que relaciona o comando do controlador com o fluxo de gás combustível, foram desenvolvidas mediante o método de

derivação proposto por FISHER [27], equação 3.39. Logo, substituindo os valores da tabela 3.3 na equação 3.39, tem-se:

$$\frac{U(s)}{(F_{gas})} = \frac{1}{2,103s + 1}. \quad (3.39)$$

Na válvula com característica linear, a vazão é diretamente proporcional à abertura da válvula. A abertura é proporcional ao sinal padrão do controlador, de 20 a 100 kPa (3 a 15 psig), se pneumático e de 4 a 20 mA cc, se eletrônico. A característica linear produz uma vazão diretamente proporcional ao valor do deslocamento da válvula ou de sua posição da haste. A válvula com característica linear possui ganho constante em todas as vazões. O desempenho do controle é uniforme e independente do ponto de operação.

3.5 Projeto do Controlador

Pode-se observar na figura 3.21, o diagrama de blocos de um sistema de controle típico formado por quatro componentes principais: o processo (ou planta a controlar), o controlador, o sensor e o atuador.

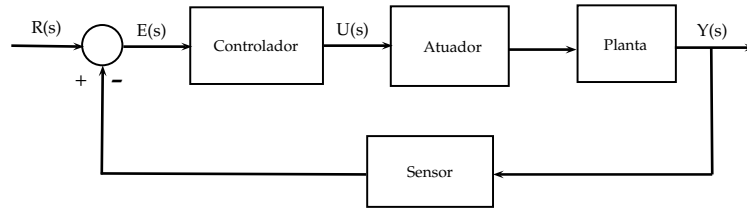


Figura 3.21: Diagrama de blocos de um sistema de controle

Neste trabalho, a variável a ser controlada é a temperatura de saída do óleo do forno (processo), o atuador é a válvula que regula o fluxo de combustível para o queimador e o sensor é um transdutor de temperatura localizado na tubulação de saída de óleo do forno.

Segundo TAKATSU *et al.* [28], o controlador mais amplamente usado nos processos industriais é o controlador PID (Proporcional-Integral- Derivativo) apresentado na forma padrão pela seguinte equação:

$$K(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right), \quad (3.40)$$

em que K_p é o ganho proporcional, T_i é o tempo integral e T_d é o tempo derivativo.

A ação proporcional (P) determina uma variação no sinal de controle proporcional ao valor atual do erro entre a referência e a saída da planta. A resposta proporcional do controlador pode ser ajustada pela variação no ganho proporcional,

denotada por K_p . A ação integral (I) realiza uma variação no sinal de controle baseada na integral do erro. A magnitude da contribuição do termo integral à ação de controle é determinada pelo ganho integral $K_i = K_p/t_i$. A ação derivativa (D) determina uma variação no sinal de controle baseada na taxa de variação do erro no processo.

O ganho que multiplica a ação derivativa é chamado de tempo derivativo T_d . Controladores PID são utilizados em sistemas dinâmicos térmicos, e químicos, controlando o nível, pressão, temperatura, fluxo, etc. Esses processos possuem, em geral, uma dinâmica que pode ser modelada por uma função de transferência de primeira ou segunda ordem, e conseqüentemente, permite ao controlador PID obter um desenvolvimento adequado. A ação integral do controlador permite que o sistema em malha fechada possa rastrear assintoticamente referências em degrau e rejeitar perturbações constantes. Logo, pode-se dizer que para processos com dinâmicas bem comportadas e especificações não muito exigentes, o controlador PID é uma solução que oferece um bom compromisso entre simplicidade e bom desempenho em malha fechada.

Nos fornos petroquímicos e caldeiras, observa-se a utilização de controladores PID no processo regulatório, aplicado a malhas de temperatura do gás de processo uma vez que, o processo é moderadamente lento [29] [30]. Por todas as vantagens explicitadas, é que para o sistema de controle de temperatura de óleo, a saída do forno aquecedor, matéria de estudo neste trabalho, se utilizou um controlador tipo PID.

Para a sintonia do PID, foi usado o método de alocação de pólos, que consiste em posicionar os pólos e zeros do sistema em malha fechada de forma de atender os requisitos de projeto.

Nesta seção serão calculados os parâmetros de sintonia do controlador PID para a malha de controle de temperatura de saída do óleo, considerando a função de transferência da válvula e o forno, apresentados nas seções 3.4.3.

3.5.1 Obtenção da função de transferência da planta

Como mencionado na seção 3.2.2, a premissa de processo para este sistema de controle é que a temperatura de saída do forno é função apenas da vazão de gás combustível que passa pela válvula de controle e ingressa ao forno.

Nas seções anteriores foram modeladas as funções de transferência dos componentes da planta, tais como as funções que relacionam o comando de abertura da válvula de controle $U(s)$ e o fluxo de gás combustível (F_{gas}). A relação entre a temperatura do gás (T_{gas}) e o fluxo de gás combustível $F_t(s)$ foi representada por $g_1(s)$ e considerada como um ganho, dada a sua relação quase linear nas zonas de

operação normal do forno.

Para o projeto do controlador PID não foi considerada a constante de tempo da válvula, uma vez que é uma grandeza muito menor do que as constantes de tempo do forno. Assim, baseado nas funções de transferências do forno e válvula, é possível obter a seguinte função de transferência relativa ao processo de aquecimento completo:

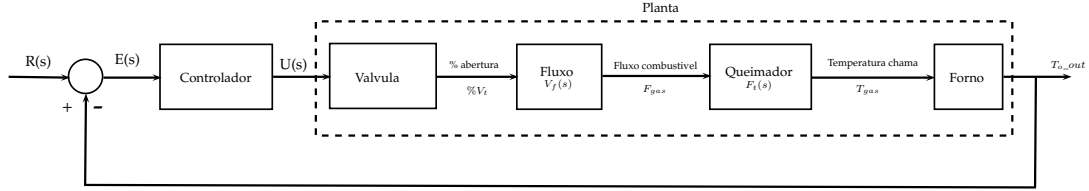


Figura 3.22: Diagrama de blocos do processo de aquecimento no forno.

$$G(s) = \frac{F_{gas}(s)}{U(s)} \times \frac{T_{gas}(s)}{F_{gas}(s)} \times \frac{T_{o_out}(s)}{T_{gas}(s)} = 7.69 \times \frac{(1 - 0,5382e^{-215s})}{(70,1709s + 1)(347,2866s + 1)} \quad (3.41)$$

Também, a equação 3.41, pode ser reescrita com:

$$G(s) = \frac{T_{o_out}(s)}{U(s)} = 7.69 \times \frac{(1 - 0,5382e^{-215s})}{(70,1709s + 1)(347,2866s + 1)} \quad (3.42)$$

A equação (3.42) representa a função de transferência em malha aberta do processo de aquecimento do forno entre T_{o_out} e $U(s)$, apresentada na seção anterior 3.4.3.

Símbolo	Valor
g_1	8,06
b_0	0,95
b_1	0,54
θ	215
a_1	70,17
a_2	347,28

Tabela 3.4: Os coeficientes da função de transferência $G(s)$

O objetivo é obter os parâmetros de sintonização do PID, isto é o ganho proporcional (K_p), os tempos integral (T_i) e derivativo (T_d), com base no conhecimento da função de transferência da planta e utilizando o método de alocação de polos. Para realizar manipulações com a função de transferência, a equação (3.41) é reescrita em função da notação algébrica da função de transferência em malha aberta de acordo com a tabela 3.4, para utilizar-se no cálculo dos parâmetros de ajuste do PID.

$$G(s) = \frac{g_1 b_0 (1 - b_1 e^{-\theta s})}{(a_1 s + 1)(a_2 s + 1)}. \quad (3.43)$$

em que θ representa o atraso da planta.

Com o objetivo de obter a função de transferência equivalente do atraso, foi utilizada a aproximação de Padé de primeira ordem (aproximar uma função não racional por uma racional) [31]. Assim, o termo de atraso é representado por uma função de transferência de primeira ordem de fase não mínima. Então, a função de transferência equivalente será dada por:

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2}s}{1 + \frac{\theta}{2}s} = \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s}. \quad (3.44)$$

Substituindo a aproximação de Padé de primeira ordem para o atraso ($e^{-\theta s}$), na equação (3.43) obtém-se:

$$G(s) \approx \frac{g_1 b_0}{(a_1 s + 1)(a_2 s + 1)} \times \left(1 - b_1 \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s}\right) \quad (3.45)$$

A partir de uma manipulação algébrica, a função de transferência da equação (3.45), pode ser reescrita como:

$$G(s) = \frac{g_1 b_0}{(a_1 s + 1)(a_2 s + 1)} \times \frac{2(1 - b_1) + s\theta(1 + b_1)}{2 + \theta s} \quad (3.46)$$

Ou também na representação numérica, segundo a tabela 3.4 :

$$G(s) = \frac{(0.000484)(s + 0.00278)}{(s + 0.00143)(s + 0.00288)(s + 0.0093)} \quad (3.47)$$

Lembrando a função de transferência do PID, apresentada na equação 3.40, pode ser reescrita como:

$$K(s) = \frac{K_p}{T_i} \left(\frac{T_i T_d s^2 + T_i s + 1}{s} \right). \quad (3.48)$$

Após do calculo dos parâmetros de ajuste do PID usando alocação de polos e posicionamento dos polos em:

$$p_1 = -1,44 \times 10^{-2}, \quad p_2 = -9,28 \times 10^{-3}$$

$$p_3 = -8,41 \times 10^{-3}, \quad p_4 = -2,73 \times 10^{-3}$$

além de uma eliminação de termos, obtém-se:

$$\text{Ganho Proporcional : } K_p = \frac{2KT_i}{g_1 b_0}, \quad (3.49)$$

Onde:

$$K = \frac{a_2}{\theta \tau (1 + b_1)}, \quad (3.50)$$

$$\text{Tempo Integral} : T_i = a_1 + \theta/2, \quad (3.51)$$

$$\text{Tempo Derivativo} : T_d = \frac{a_1 * \theta/2}{a_1 + \theta/2}. \quad (3.52)$$

Onde K_p , T_i e T_d são calculados a partir do conhecimento da função de transferência da planta e com a especificação de uma constante de tempo desejada τ , neste caso $\tau = 30$, para a resposta temporal do sistema. Substituindo as equações 3.49, 3.50, 3.51, 3.52 nos coeficientes da equação 3.48, tem-se:

$$T_i = 177.6709s, \quad T_d = 42.4570s, \quad K_p = 0.4044, \quad (3.53)$$

Finalmente, a função de transferência do controlador PID projetado será dada por:

$$K(s) = 0.4853 \left(1 + \frac{1}{177.6709s} + 42.4570s \right). \quad (3.54)$$

3.5.2 Simulação do controlador PID

Uma vez concluído o projeto, é necessário implementá-lo para controlar a temperatura do forno. O controlador foi implementado no pacote Simulink-Matlab, conforme à figura 3.23, em que distingue-se os blocos relacionados ao PID, válvula, fluxo, queimador e forno. Para o bloco do forno linear, se utilizou a função de transferência apresentada na equação 3.36.

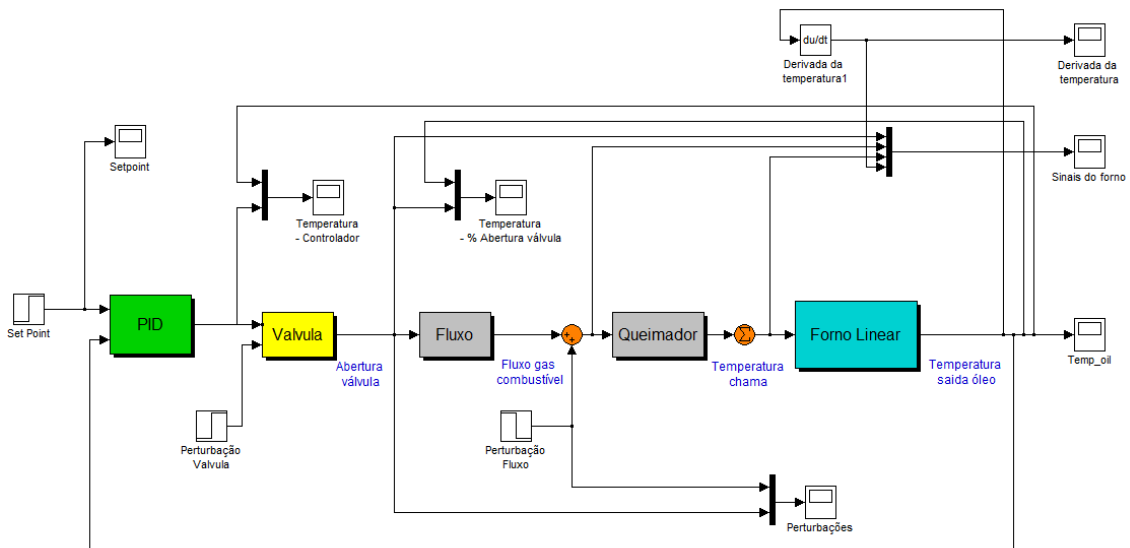


Figura 3.23: Diagrama de simulação do modelo linear do forno e PID em Simulink.

O bloco PID, está conformado pela informação apresentada na figura 3.24.

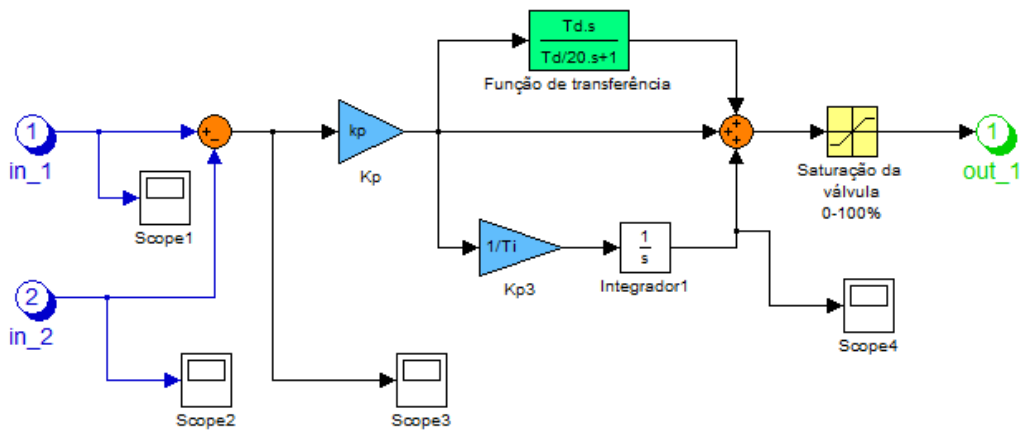


Figura 3.24: Diagrama de simulação forno e PID em Simulink.

No bloco da válvula de controle, relaciona o percentagem de abertura da válvula com a saída do controlador, é conformada pela equação 3.39, apresentada na figura 3.25.

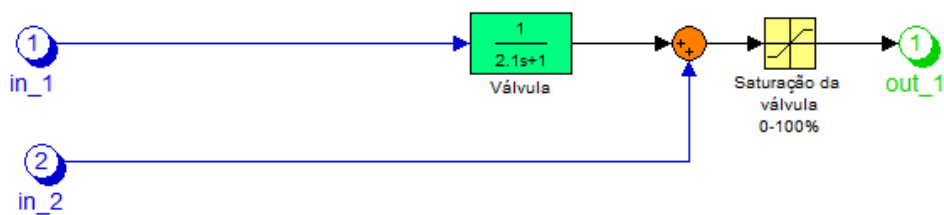


Figura 3.25: Diagrama de simulação da válvula em Simulink.

O bloco de fluxo (relação do fluxo de gás combustível com a abertura da válvula) se considerou como um ganho, ao igual que, o bloco do queimador (relação entre a temperatura de saída do óleo e a quantidade de fluxo de gás combustível).

Para propósitos de verificação do controlador projetado na secção anterior e avaliação do desempenho, foram feitas diversas simulações da malha de controle de temperatura no Simulink do Matlab.

O objetivos do controle do PID foi a rejeição de perturbações em degrau, sendo diferentes tipos de perturbações que podem se apresentar na malha de controle de temperatura. Uma de elas é a ocorrência de perturbações na temperatura de saída do óleo, seja por perdas de calor na câmara de combustão, desligamento inesperado de um dos queimadores ou perda da eficiência dos queimadores.

Outra simulação é a presença de perturbações no fluxo de gás combustível ao forno, que pode se dar por perdas do gás combustível na linha de alimentação ou abertura inesperada da válvula de bloqueio da tubulação de 1" que purga o gás combustível para à atmosfera, ver figura 3.17. Por exemplo, a figura 3.26 apresenta uma resposta temporal do sistema à perturbação tipo degrau do fluxo de gás combustível

de $-10 \frac{m^3}{h}$ no instante 4000 segundos, a mesma que é rejeitada pelo controlador. Observe que, essa perturbação é rejeitada após de 770 s (tempo de estabelecimento), depois de atingir um valor mínimo de 9.9%.

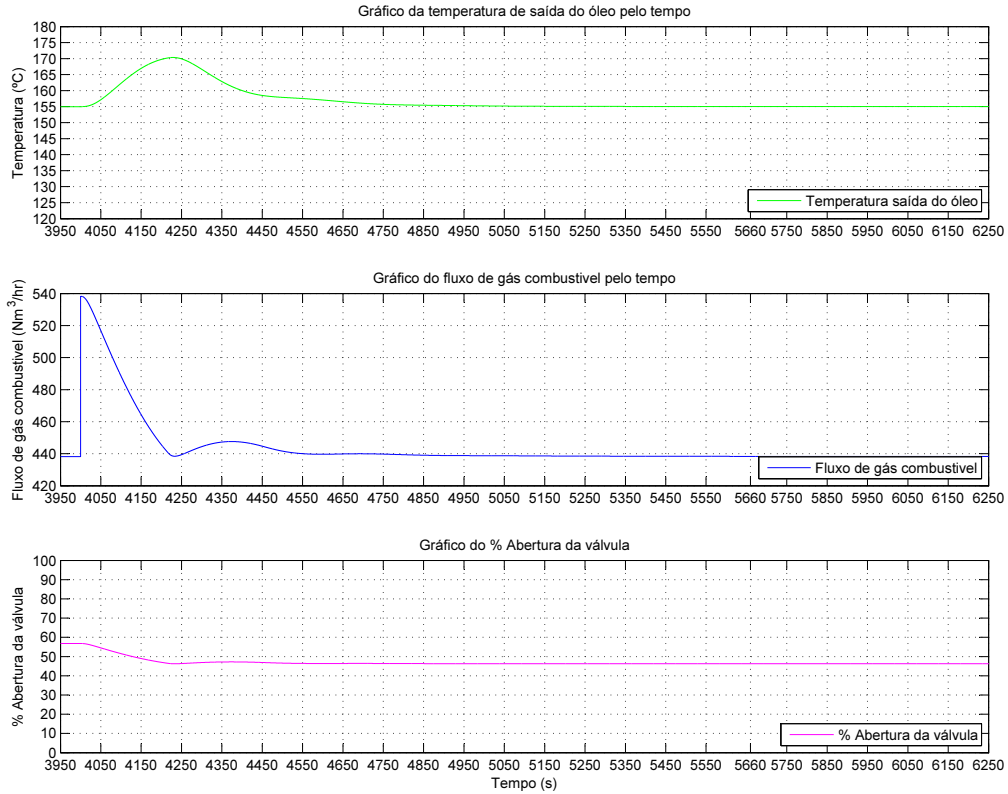


Figura 3.26: Resposta linear da perturbação de $-10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível

A figura 3.27 apresenta a resposta do sistema à perturbação tipo degrau do fluxo de gás combustível de $10 \frac{m^3}{h}$ no instante 4000 segundos. Note que a perturbação é rejeitada pelo controlador, logo de 750 segundos (tempo de estabelecimento), após de atingir um máximo de 9.7%. Cabe mencionar, que o comportamento da válvula, compensa a variação de temperatura causada pela perturbação.

3.6 Verificação do modelo linearizado

Para verificar o processo de linearização do modelo do forno, foram feitas diversas simulações, comparando o modelo linear, figura 3.23 e o modelo não linear da planta, apresentada na figura 3.28. O modelo não linear é construído com as equações do balanço de energia 3.30, 3.31, a transferência de calor à tubulação 3.28 e a equação resultante da linearização 3.36. Essas equações são apresentadas no bloco com o nome: "Modelo não linear", vide figura 3.28. Os blocos chamados de PID, válvula, fluxo e queimador consideram o mesmo modelo do *template* linearizado.

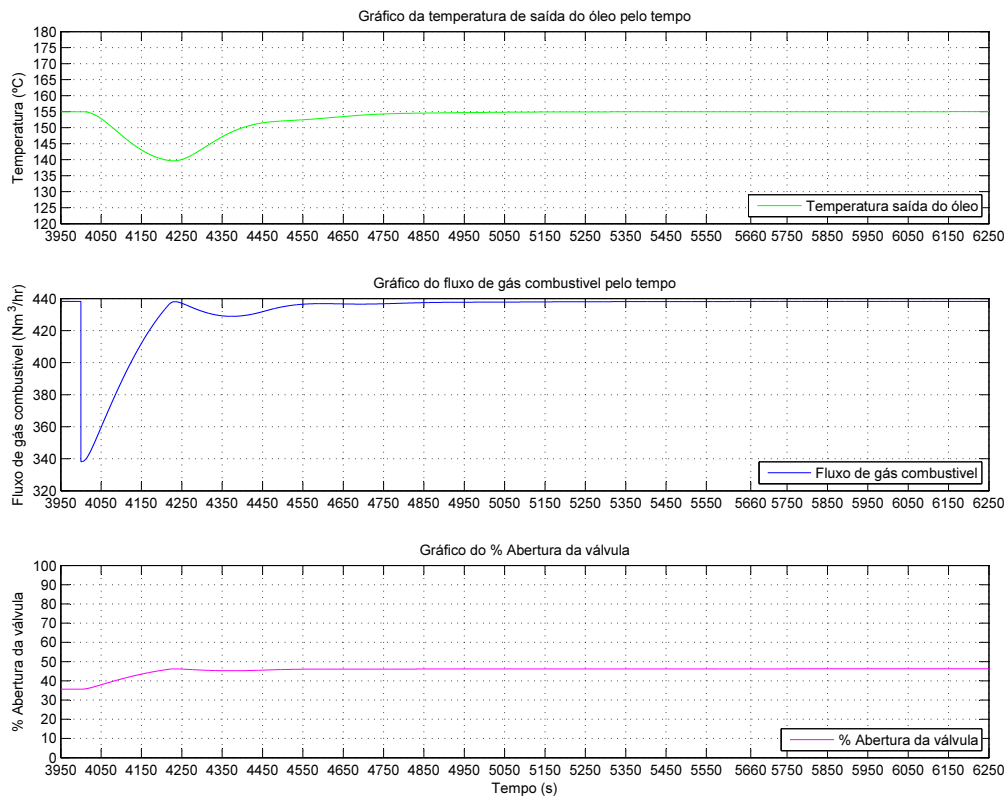


Figura 3.27: Resposta linear da perturbação de $10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível

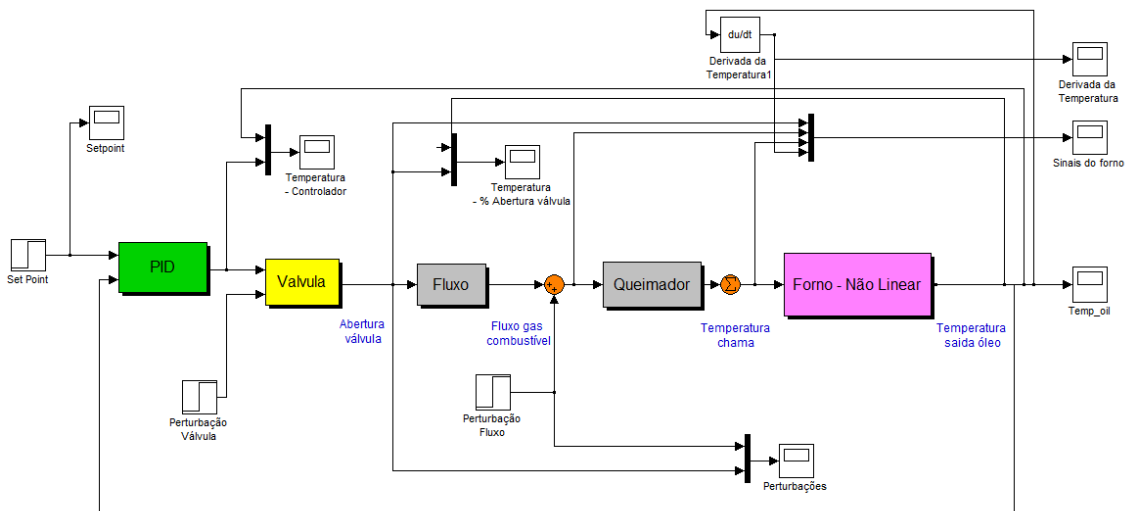


Figura 3.28: Diagrama de simulação do modelo não linear do forno e PID em Simu-link.

As respostas do modelo não linear e modelo resultante da linearização apresentaram comportamentos iguais nas zonas muito próximas aos pontos de linearização. As diferenças de comportamento iniciaram a medida que o modelo se aleija dos pontos de operação.

Por meio das simulações, pode-se ver que o controlador é capaz de rejeitar perturbações dos modelos não linear e linear. Por exemplo, a simulação da figura 3.29, em que a resposta de temperatura de saída do forno do modelo linear (cor azul) e o modelo não linear (cor vermelho) ante uma perturbação negativa de $-10Nm^3/hr$ no instante 4000 s, rejeita a perturbação em 950 segundos aproximadamente

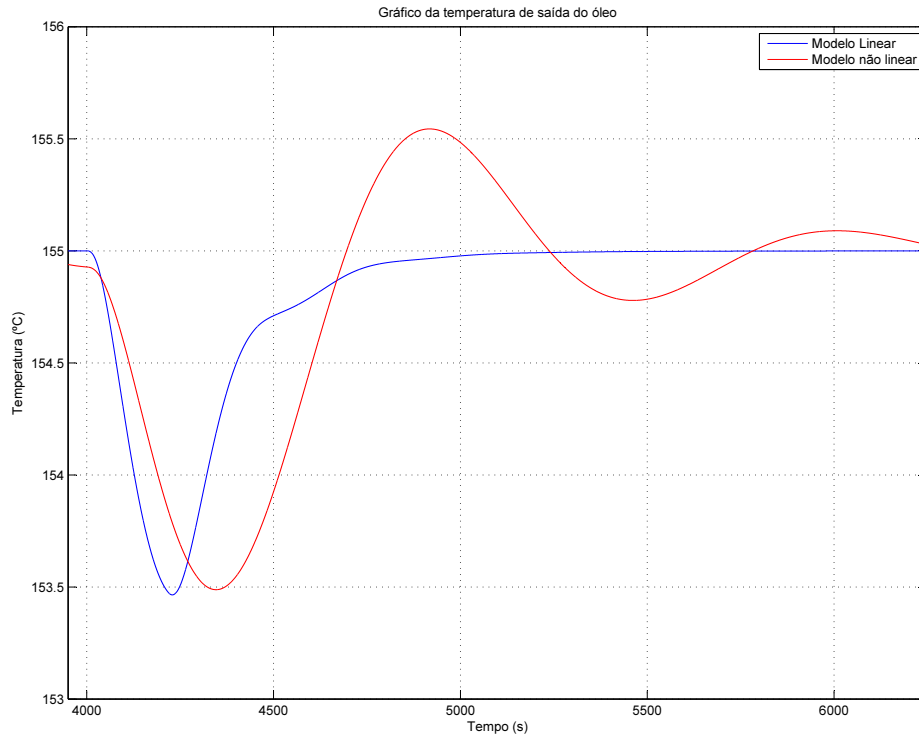


Figura 3.29: Resposta linear e não linear da perturbação de $-10 Nm^3/hr$ de gás combustível

A figura 3.30, compara a resposta da temperatura de saída do forno com o modelo linear (cor azul) e o modelo não linear (cor vermelho) ante uma perturbação de $+10Nm^3/hr$ no instante 4000 s. Note-se que no modelo linearizado, tem uma resposta sem oscilações pelo fato de ter polos reais negativos na função de transferência a malha fechada dele. A perturbação foi rejeitada em 900 segundos aproximadamente.

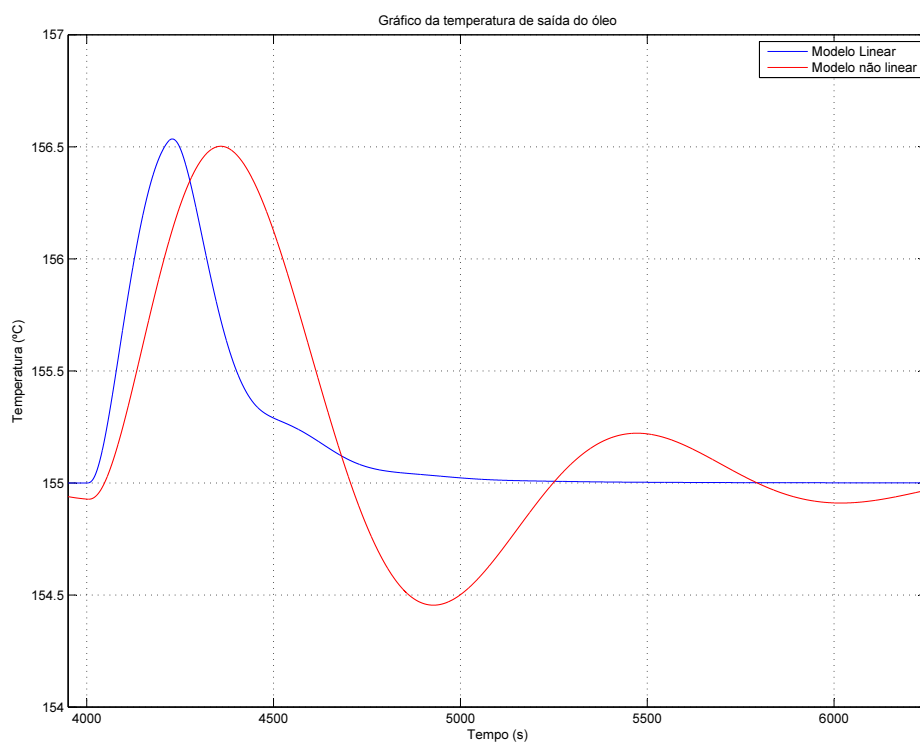


Figura 3.30: Resposta linear e não linear da perturbação de $10 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ de gás combustível

Capítulo 4

Modelo a eventos discretos do forno aquecedor de óleo

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os modelos, baseados em SEDs, do processo de aquecimento de óleo no forno, no comportamento normal e de falha. Para a construção do modelo normal (sem falha), foi necessário observar as simulações realizadas no capítulo 3. Por outro lado, para o comportamento de falha, foram realizadas novas simulações, onde se apresenta o comportamento do travamento da válvula de fluxo de combustível nas posição aberta ou fechada.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Na seção 4.2 são apresentados a construção e o modelo normal do sistema. Na seção 4.3 são apresentadas as simulações baseadas na perturbação da válvula (travamento), assim como a construção do modelo do processo aquecedor com falha.

4.2 Modelo a eventos discretos do processo de aquecimento de óleo

Para construir o modelo normal e de falha, considera-se as partes mais relevantes, a saber: o forno, o controlador de temperatura e a válvula de controle.

A modelagem do comportamento normal, ou seja, sem falhas, está baseada nas simulações do modelo não linear, em tempo contínuo apresentadas no capítulo 3. Essas informações, foram necessárias para identificar e analisar o comportamento normal e assim, baseado na teoria de sistemas a eventos discretos, modelar e definir os eventos e estados para a construção do autômato normal.

Nas figuras 4.1 e 4.2, é possível observar o comportamento da temperatura ante a ação de rejeição da perturbação no tempo de 4000 s. Além disso, nas figuras

são apresentadas a derivada da temperatura da saída do óleo (cor azul) com uma faixa entre -0.005 e 0.005 (cor vermelho), chamada, neste trabalho de faixa nula. Em outras palavras, quando a temperatura alcança os valores máximos e mínimos locais, a curva da derivada da temperatura passa pelo zero e entra na faixa nula. No segundo gráfico das figuras 4.1 e 4.2, são apresentadas as curvas do controlador que comanda abrir ou fechar a válvula para aumentar ou diminuir o fluxo de gás combustível, a fim de rejeitar a perturbação e manter constante a temperatura.

Na figura 4.1, a temperatura é aproximadamente constante até o tempo 4000 s, onde acontece uma perturbação. Por conseguinte, a temperatura diminui e a derivada é negativa. Quando a temperatura atinge o valor mínimo no tempo 4346 s, a derivada da temperatura entra na faixa nula. Além disso, o controlador comanda abrir a válvula para rejeitar a perturbação, e atinge um máximo valor no tempo 4505 s. Por outro lado, na figura 4.2, a temperatura é aproximadamente constante até o tempo 4000 s, onde acontece uma perturbação. Em seguida, a temperatura aumenta e a derivada é positiva. Quando a temperatura atinge o valor máximo, no tempo 4358 s, a derivada da temperatura entra na faixa nula. No mesmo gráfico, pode-se observar ação do controlador, fechando a válvula para rejeitar essa perturbação.

Após vários testes e análises, se definiu os estados e eventos do controlador de temperatura, da válvula de controle e do forno, descritos nas tabelas 4.1 e 4.2, respectivamente.

Tabela 4.1: Descrição dos estados do controlador de temperatura, válvula de controle e forno

	Descrição	Estado
Controlador de temperatura	Controlador em estado inicial	C_o
	Controlador fecha parcialmente	C_{fp}
	Controlador abre parcialmente	C_{ap}
Válvula de Controle	Válvula em regime	V_{reg}
	Válvula fecha parcialmente	V_{fp}
	Válvula abre parcialmente	V_{ap}
Forno	Temperatura em regime	T_{reg}
	Temperatura acima do SP e subindo	T_{htr}
	Temperatura acima do SP e descendo	T_{htd}
	Temperatura abaixo do SP e subindo	T_{ltr}
	Temperatura abaixo do SP e descendo	T_{ltd}

Nas simulações estudadas, se observa que o comportamento das curvas, aparentemente, têm sempre uma mesma inclinação até que a temperatura atinja um valor mínimo ou máximo e troca de inclinação. Em outras palavras, uma maior perturbação de temperatura gera uma maior inclinação na curva, que vai diminuir progressivamente mudando sua inclinação (subida e descida) a medida que o contro-

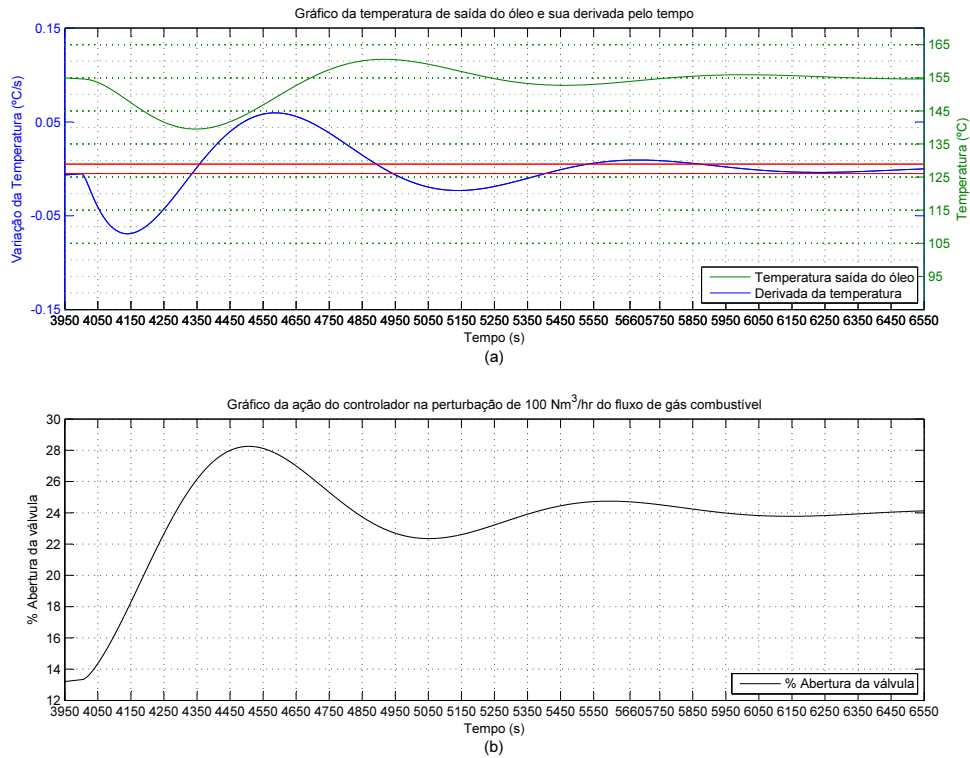


Figura 4.1: (a) Gráfico do comportamento da temperatura de saída do óleo (cor verde) e sua derivada (cor azul) quando ocorre uma perturbação de fluxo gás de combustível em 4000 s. (b) Gráfico do fluxo de gás combustível quando acontece uma perturbação de $100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ no tempo de 4000 s.

Tabela 4.2: Descrição dos eventos do controlador de temperatura, válvula de controle e forno

	Descrição	Evento
Controlador de temperatura, válvula de controle e Forno	Abrir parcialmente	a_p
	Fechar parcialmente	f_p
	Temperatura em regime	T_{reg}
	Temperatura acima do SP e subindo	htr
	Temperatura acima do SP e descendo	htd
	Temperatura abaixo do SP e subindo	ltr
	Temperatura abaixo do SP e descendo	ltd

lador rejeita essa perturbação e atinge o regime. Contrariamente, se acontece uma perturbação de menor quantidade, a inclinação da curva vai ser pequena, e atingirá o regime rapidamente.

Depois dessas observações, com relação à inclinação, considera-se implementar um modelo em SEDs, baseado na temperatura, isto é, uma temperatura acima do *setpoint* e abaixo do *setpoint*. Os eventos considerados são: acima do *setpoint* subindo (*htr*), acima do *setpoint* e descendo (*htd*), abaixo do *setpoint* e descendo

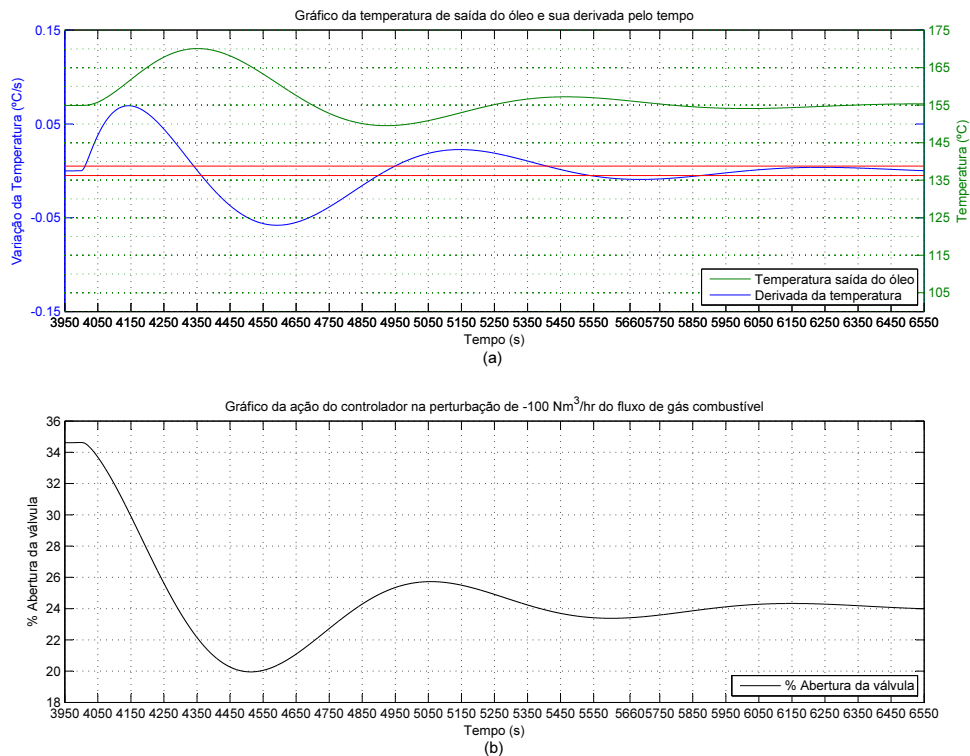


Figura 4.2: (a) Gráfico do comportamento da temperatura de saída do óleo (cor verde) e sua derivada (cor azul) quando ocorre uma perturbação de fluxo de gás combustível em 4000 s. (b) Gráfico do fluxo de gás combustível quando acontece uma perturbação de $-100 \text{ Nm}^3/\text{hr}$ no tempo de 4000 s.

(*ltd*), e abaixo do *setpoint* e subindo (*ltr*). Além disso, também se considera a temperatura quando não estiver em nenhum desses estados, ou seja, a temperatura está estável (em regime). O evento T_{reg} faz referência a quando a temperatura entra na faixa muito próximo ao valor de regime, e diz-se, que o valor da temperatura está na faixa nula. Essas cinco possibilidades, têm que ser representadas no modelo a SEDs.

Como foi mencionado, o controlador vai rejeitar a perturbação, para tanto, basta observar a curva da inclinação da temperatura, e assim perceber se a temperatura está descendo ou subindo, assim como, se a temperatura tem uma curva de inclinação baixa ou não.

No caso em que a temperatura possuía uma inclinação pequena e fique na faixa nula, então, a temperatura está em regime permanente.

Por outro lado, se o comportamento da temperatura possui uma inclinação, significativa, o comportamento é relevante, e deve ser considerado na modelagem do SED, mediante a inclinação e o número de picos, até que a inclinação diminua e entre em regime (na faixa nula). Assim, o controlador consegue rejeitar a perturbação de temperatura após um determinado número de picos.

Esse raciocínio foi feito pensando numa futura implementação, ou seja, se a curva de temperatura possui derivada aproximadamente igual a zero, pode-se esperar um tempo determinado para verificar se a curva de derivada sai da faixa nula. Passado esse tempo, se a temperatura não vê um próximo estado (pela inclinação da curva), considera-se que está na faixa nula, ou seja a curva de temperatura está próxima do valor de regime permanente.

Baseado nessas considerações, pode-se observar que, na figura 4.3 acontece uma diminuição de temperatura (ltd), ou seja, a temperatura fica abaixo do *setpoint* e descendo (T_{ltd}). Ao perceber isso o controlador, comanda abrir parcialmente a válvula (ap) a fim de rejeitar a perturbação. Esse mesmo comportamento é construído por autômatos, figura 4.4. Em que de um estado inicial (C_o, V_{reg}, T_{reg}), acontece o evento (ltd) e passa ao estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}), comandando (ap) e (ltd).

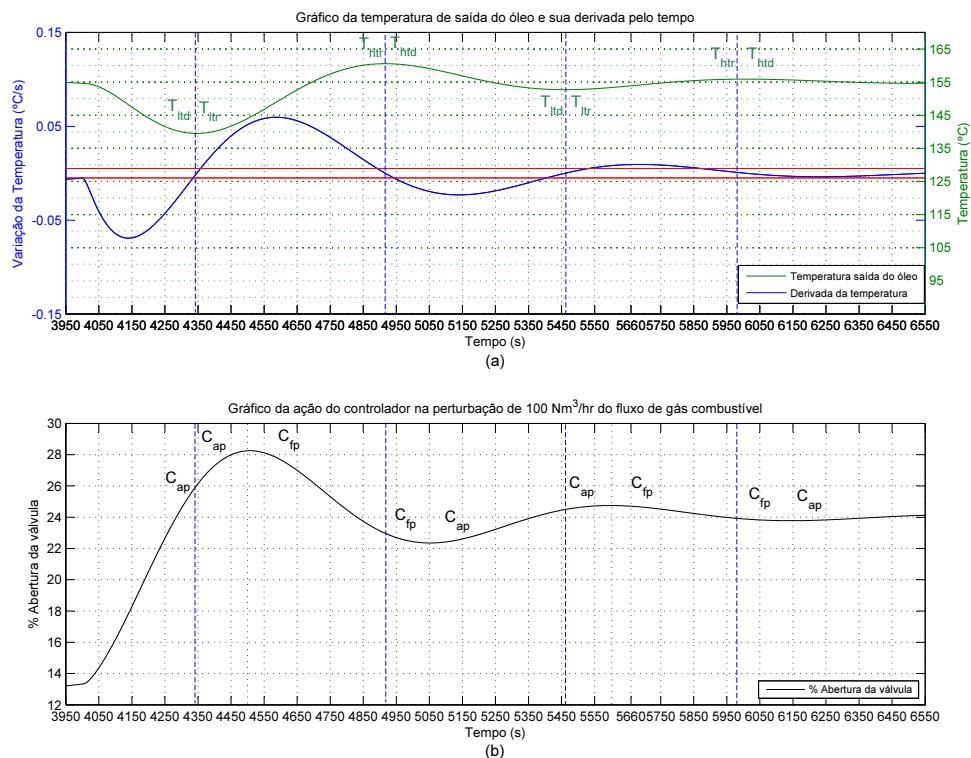


Figura 4.3: (a) Gráfico da análise dos estados de temperatura do gráfico 4.1 (b) Gráfico da análise dos estados do controlador de temperatura do gráfico 4.1

Segundo a figura 4.3, a temperatura atinge o mínimo, percebe uma variação na inclinação, originando uma derivada nula, e a temperatura começa a subir (ltr). Ao mesmo tempo, o controlador continua abrindo parcialmente (C_{ap}) e a temperatura continua subindo (ltr). Na construção do modelo por autômatos, figura 4.5, de um estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}), vai comandar (ap) e (ltd) até que acontece o evento (ltr) e passa ao estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}), comandando (ap) e (ltr).

Observe que, na figura 4.3, a temperatura vai continuar subindo (ltr) pas-

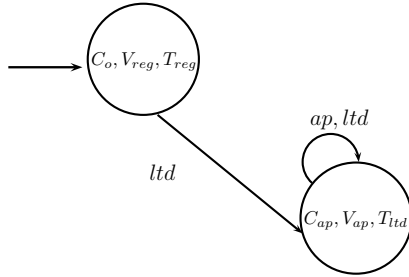


Figura 4.4: Gráfico da construção do autômato sem falha (normal) a partir do evento (*ltd*) ativo no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}).

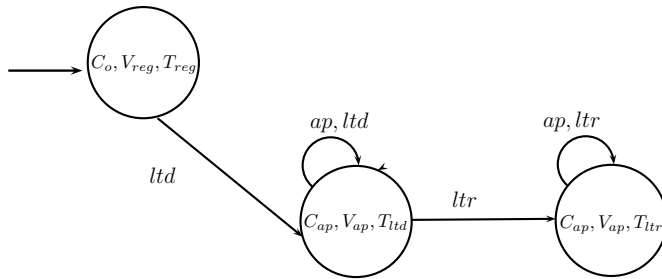


Figura 4.5: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.4 acrescentando-se o evento (*ltr*) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}) e o estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}).

sando pelo *setpoint* gerando o evento (*htr*). Note que a temperatura possui a mesma inclinação, e o controlador manda fechar parcialmente a válvula (*fp*). Da mesma forma, na construção do modelo por autômatos, figura 4.6, de um estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}), vai comandar (*ap*) e (*ltr*) até que fecha parcialmente (*fp*) e passa ao estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr}), comandando (*fp*) e (*ltr*).

Por outro lado, pode-se observar que, na figura 4.7 acontece uma perturbação gerando um incremento de temperatura (*ltr*), ou seja, a temperatura fica acima do *setpoint* e subindo (T_{ltr}). Ao perceber isso o controlador, comanda fechar parcialmente a válvula (*fp*) a fim de rejeitar a perturbação. Continuando com a construção do modelo por autômatos, figura 4.8, de um estado inicial (C_o, V_{reg}, T_{reg}), acontece o evento (*htr*) e passa ao estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}), comandando (*fp*) e (*htr*).

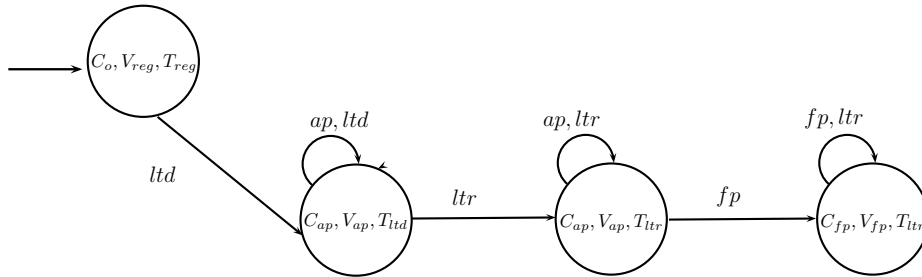


Figura 4.6: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.5 acrescentando-se o evento (fp) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr}).

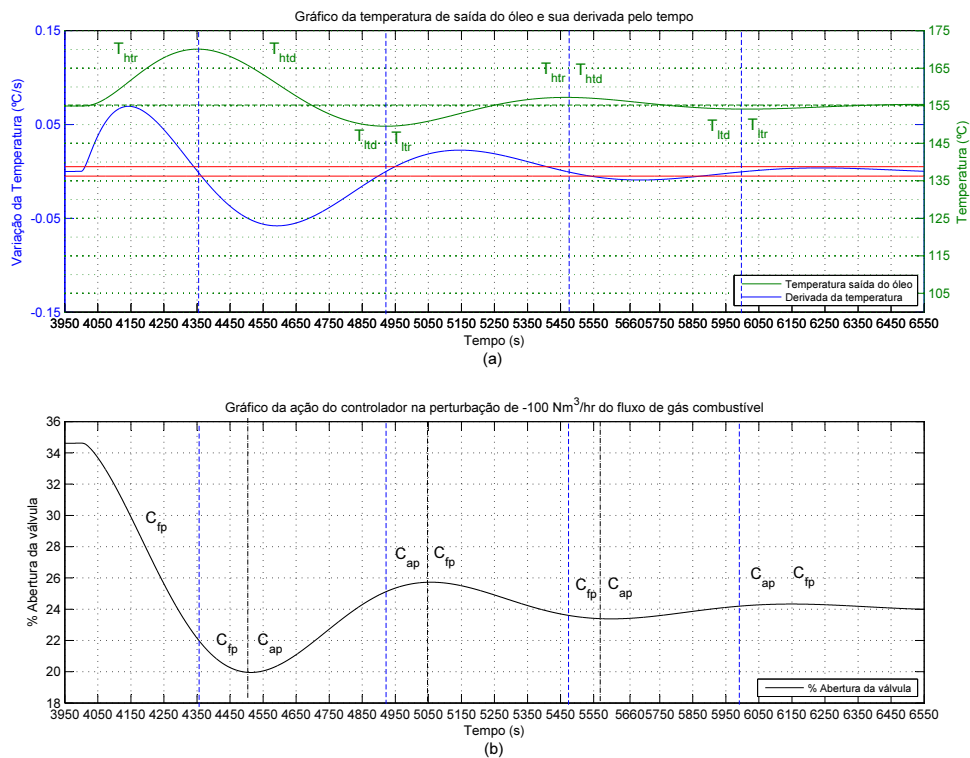


Figura 4.7: (a) Gráfico da análise dos estados de temperatura do gráfico 4.2 (b) Gráfico da análise dos estados do controlador do gráfico 4.2

Baseado na figura 4.7, note que a temperatura atinge o valor máximo gerado (htr) e a inclinação da curva varia, originando uma derivada nula. A temperatura vai descer (htd), o controlador continua fechando parcialmente (C_{fp}) e a temperatura continua descendo (htd). Esse comportamento é modelado por autômatos, na figura 4.9, de um estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}), vai comandar (fp) e (htr) até que acontece o

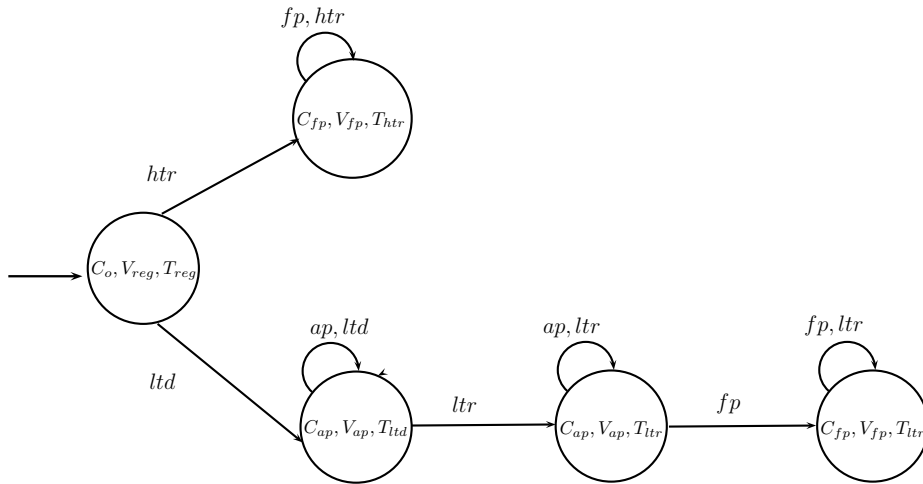


Figura 4.8: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.6 acrescentando-se o evento (*htr*) ativo no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}).

evento (*htd*) e passa ao estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}), comandando (*fp*) e (*htd*).

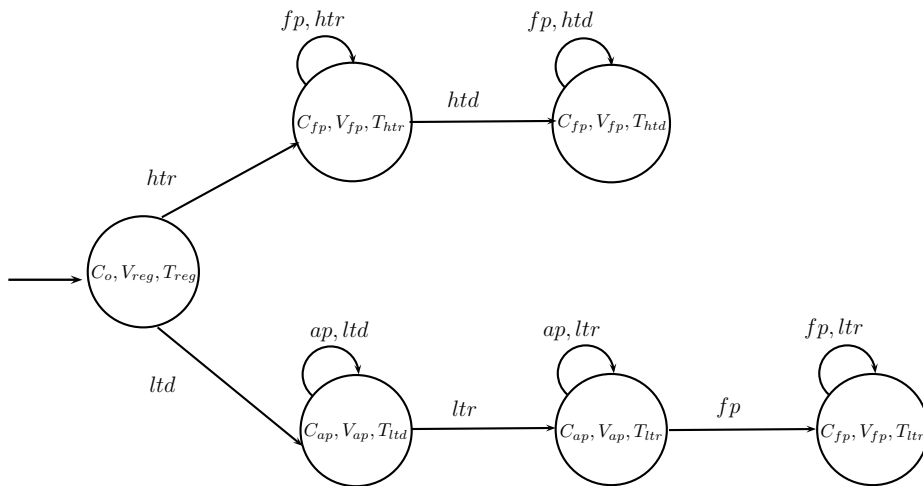


Figura 4.9: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.8 acrescentando-se o evento (*htd*) ativo no estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}) e o estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}).

Observe que, na figura 4.7, a temperatura vai continuar descendo (*htd*) passando pelo o *setpoint* e gerando (*ltd*). Note que a temperatura possui a mesma inclinação, nesse caso, o controlador manda abrir parcialmente a válvula (*ap*). Da mesma forma, na construção do modelo por autômatos, figura 4.10, de um estado (C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}), vai comandar (*fp*) e (*htd*) até que abre parcialmente (*ap*) e passa ao estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}), comandando (*ap*) e (*htd*).

Na figura 4.7, observe que, no estado T_{ltd} , a curva da temperatura chega ao início do comportamento da figura 4.3, então, do estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}) acontece o evento (*ltd*), indo para o estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}). Nesse caso, a curva da temperatura possui

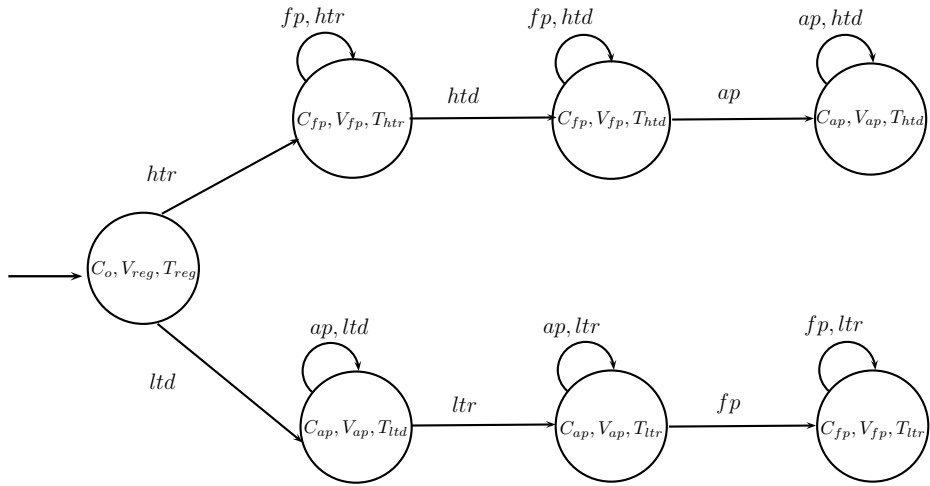


Figura 4.10: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.9 acrescentando-se o evento (*ap*) ativo no estado $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htd})$ e o estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{htd})$.

uma inclinação pequena, o que vai permitir entrar na faixa nula, voltando ao estado inicial (C_o, V_{reg}, T_{reg}) .

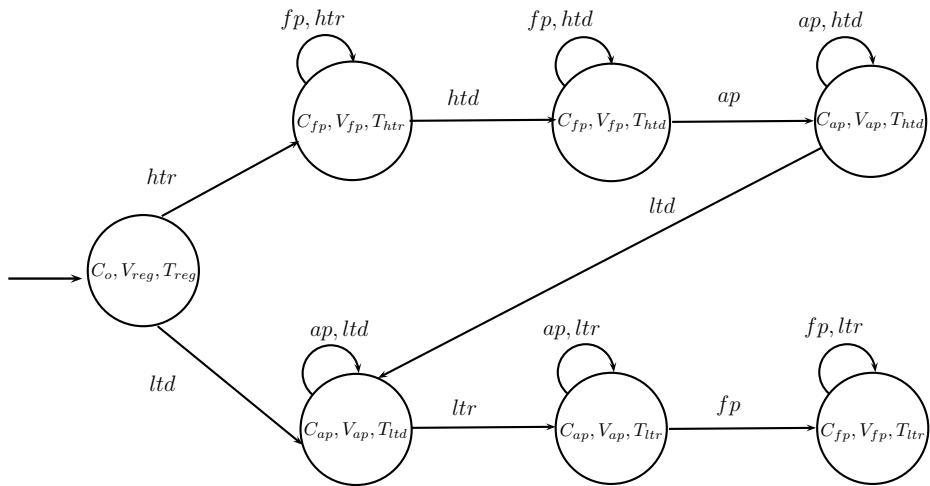


Figura 4.11: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.10 acrescentando-se o evento (*ltd*) ativo no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{htd})$ e o estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$.

O mesmo acontece na figura 4.3, no estado T_{ltd} , a curva da temperatura chega ao início do comportamento da figura 4.7, então, do estado $(C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr})$ acontece o evento (*htr*) e vai para o estado $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htr})$. Nesse caso, a curva da temperatura possui uma inclinação pequena, o que vai permitir entrar na faixa nula (regime) voltando ao estado inicial (C_o, V_{reg}, T_{reg}) , apresentado na figura 4.13.

Note que, o autômato da figura 4.13 representa a evolução do controle de temperatura, válvula e forno ao mesmo tempo, ou seja, o autômato indica de forma síncrona como estão evoluindo os três elementos para cada instante de tempo.

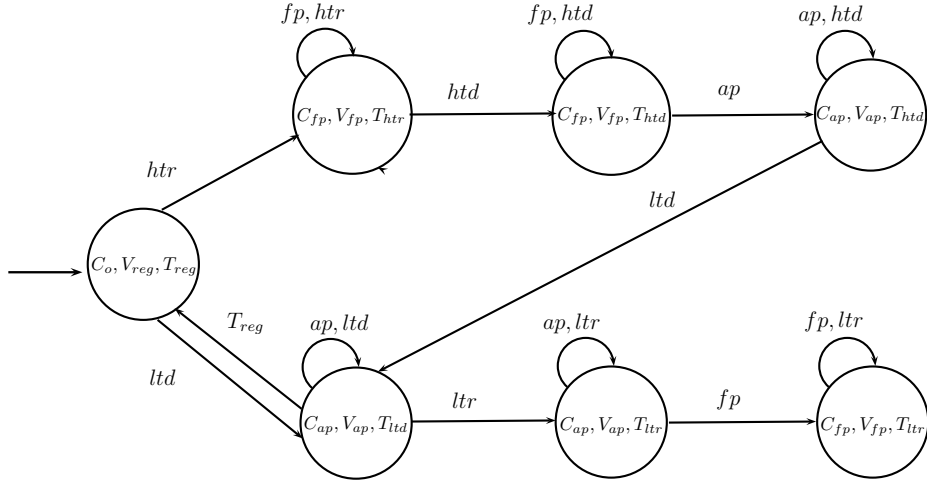


Figura 4.12: Continuação da construção do autômato sem falha (normal) a partir do grafo da figura 4.11 acrescentando-se o evento (T_{reg}) ativo no estado (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}) e o estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}).

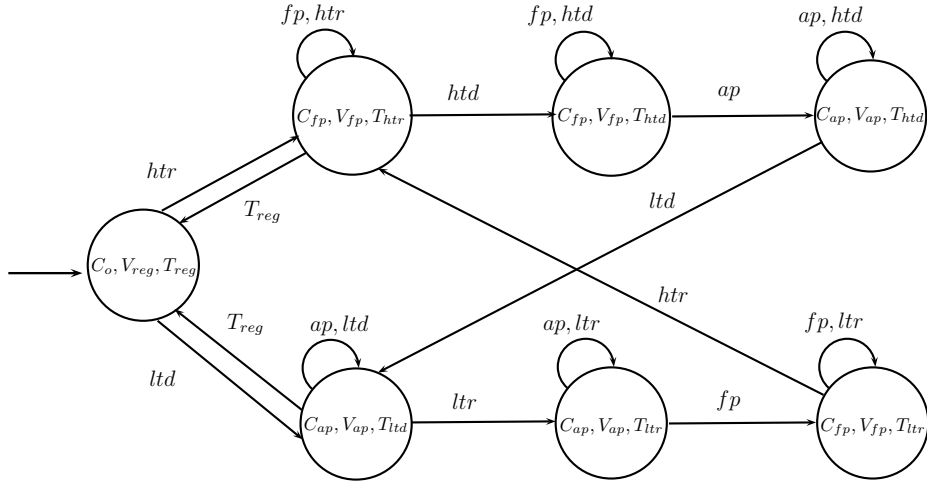


Figura 4.13: Gráfico do autômato sem falha (normal) do processo de aquecimento de óleo no forno.

Para o autômato que modela o comportamento normal do processo de aquecimento de óleo, tem-se:

- $X = \{(C_o, V_{reg}, T_{reg}), (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}), (C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}), (C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}), (C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}), (C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}), (C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr})\}$,
- $\Sigma = \{a_p, f_p, htr, htd, ltr, ltd, T_{reg}\}$,
- $x_0 = (C_o, V_{reg}, T_{reg})$,
- $X_m = \emptyset$.

Além disso, na figura 4.13, foi inserido um autolaço em cada estado, exceto no estado inicial, o que significa que a linguagem do autômato não é fiel à linguagem

que o sistema na realidade executa. Por exemplo, o estado $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htr})$ apresenta um autolaço com os eventos (f_p) e (htr) , ou seja, o grafo mostra que esses eventos podem acontecer um número infinito de vezes. Contudo, na realidade, esses eventos (apresentados no autolaço) vão acontecer um número finito de vezes até que o sistema possa evoluir para o próximo estado, nesse caso, ocorre o evento (htd) e o estado alcançado é $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htd})$.

Para representar a linguagem gerada pelo sistema seria necessário acrescentar estados e eventos visando representar o número finito de vezes que os eventos acontecem no sistema real. Contudo, isso geraria um autômato com um número grande de estados, dificultando a sua análise. Por tal motivo, se adotou a simplificação de inserir autolaços, aumentando a linguagem gerada pelo autômato.

4.3 Modelo a eventos discretos do comportamento de falha do processo de aquecimento de óleo

Como foi mencionado, as falhas consideradas são: travamento da válvula na posição aberta e o travamento da válvula na posição fechada.

Foram feitas simulações no modelo não linear do processo de aquecimento utilizando o Simulink/Matlab. O sistema foi simulado durante um tempo de observação de 8000 s, em que se considerou, primeiramente, o processo com fluxo de alimentação constante e depois considerou-se o processo com variação no fluxo de combustível. Essas simulações foram feitas em cada estado do autômato de comportamento normal do processo de aquecimento de óleo, apresentada na figura 4.13.

A partir das observações das simulações, definem-se os estados e eventos quando acontece travamento na válvula de controle e leva a temperatura e controlador a um comportamento de falha. Os estados e eventos definidos para o comportamento de falha, no processo de aquecimento de óleo, estão descritos nas tabelas 4.4 e 4.3, respectivamente.

No estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}) , a válvula trava em posição fechada ff , como é apresentado na figura 4.14. Por um pequeno período de tempo, a temperatura vai permanecer constante, assim como o sinal de controle, mesmo que a válvula esteja em posição travada fechada V_{tf} . Depois, a temperatura vai descer e o evento ltd será gerado, além disso, o controlador efetuará o comando de “abrir parcialmente (ap)”. Logo, a temperatura vai continuar descendo e o controlador efetuará o comando de “abrir totalmente (at)”. Finalmente, a temperatura vai atingir o valor mínimo de 15°C e permanecerá ali. A construção do autômato é apresentada na figura 4.15.

Da mesma forma, no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}) , a válvula trava em posição aberta fa , como é apresentado na figura 4.16. Por um curto período de tempo, a temperatura

Tabela 4.3: Descrição dos estados de falhas do controlador de temperatura, válvula de controle e da temperatura do forno

	Descrição	Estado
Controlador de temperatura	Controlador abre totalmente	C_{at}
	Controlador fecha totalmente	C_{ft}
Válvula de Controle	Válvula travada aberta	V_{ta}
	Válvula travada fechada	V_{tf}
Temperatura do forno	Temperatura em regime	T_{reg}
	Temperatura acima do SP e subindo	T_{htr}
	Temperatura acima do SP e descendo	T_{htd}
	Temperatura abaixo do SP e subindo	T_{ltr}
	Temperatura abaixo do SP e descendo	T_{ltd}

Tabela 4.4: Descrição dos eventos falhas da válvula de controle

Descrição	Eventos
Trava fechada	ff
Trava aberta	fa
Fecha totalmente	ft
Abre totalmente	at

permanece constante. Depois, a temperatura vai subir e o evento htr será gerado, além disso, o controlador efetuará o comando de “fechar parcialmente (fp)”. Logo, a temperatura vai continuar subindo, e o controlador efetuará o comando de “fechar totalmente (ft)”. Finalmente, a temperatura atinge o valor máximo de 194°C . A construção do autômato é apresentado na figura 4.17.

Da mesma forma, se realizaram simulações de travamento da válvula de combustível nas posições aberta e fechada para os seguintes estados: $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htr})$, $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htd})$, $(C_{ap}, V_{ap}, T_{htd})$, $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr})$ e $(C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr})$.

Finalmente, se construiu o autômato do processo de aquecimento de óleo com comportamento normal e de falha, apresentado na figura 4.18. Também, pode-se observar a presença de autolaços (explicação apresentada na seção 4.2). Com a finalidade de diferenciar os eventos que não representam o comportamento real do sistema com os eventos que representam o comportamento real, se traçou uma linha acima do autolaço, apresentado na figura 4.19.

Agora, o próximo passo para o diagnóstico de falhas será construir o autômato do diagnosticador, que será visto no capítulo 5.

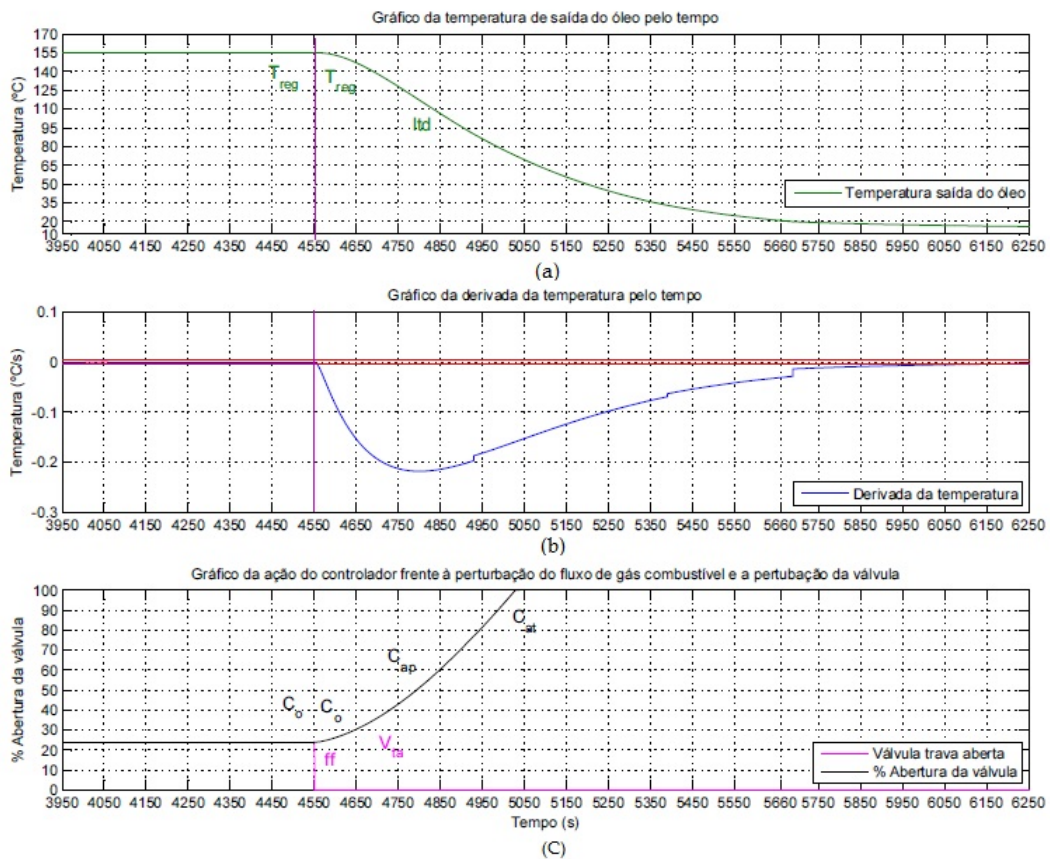


Figura 4.14: (a) Eventos do comportamento da temperatura de saída do óleo pelo tempo quando a válvula trava em posição fechada e encontra-se no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}). (b) Curva da derivada da temperatura de saída do óleo. (c) Estados e eventos da ação do controlador.

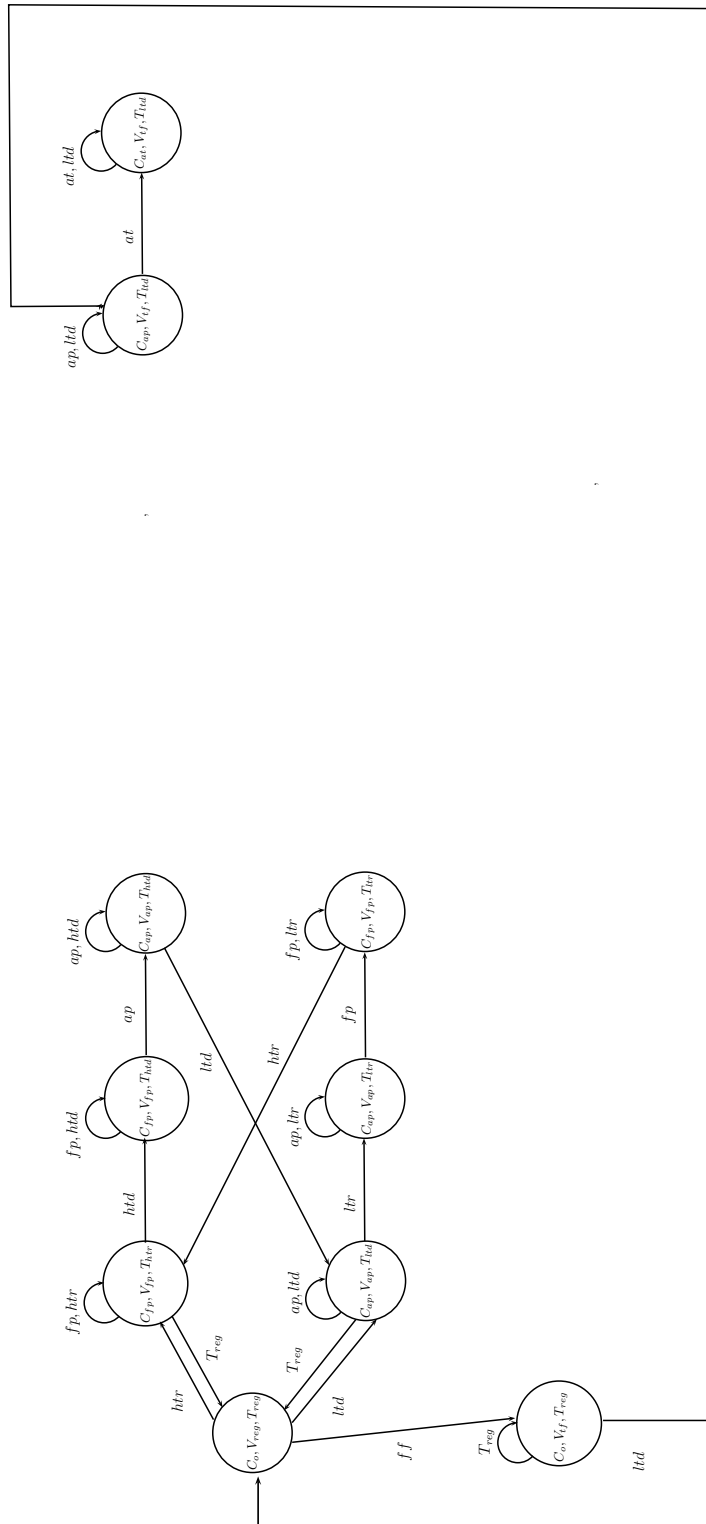


Figura 4.15: Construção do autômato com falha, quando a válvula trava na posição fechada, apresentando a análise da figura 4.14 e acrescentando-se o grafo da figura 4.13.

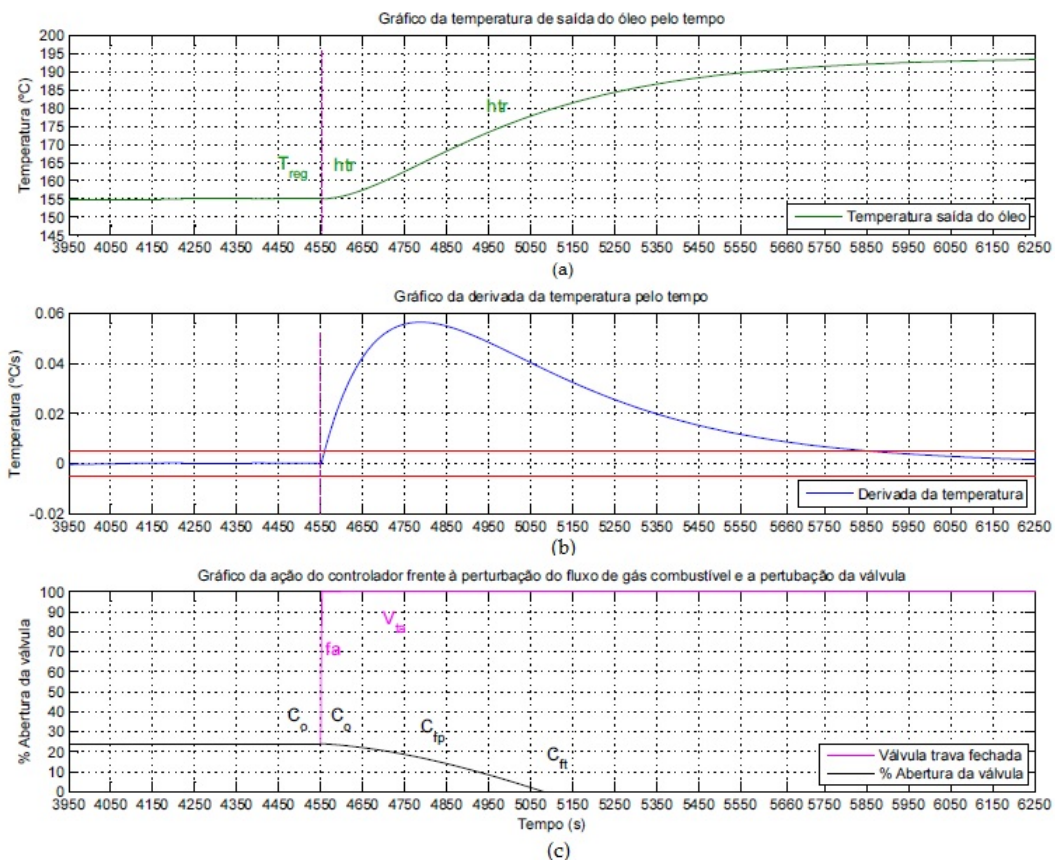


Figura 4.16: (a) Eventos do comportamento da temperatura de saída do óleo pelo tempo quando a válvula trava em posição aberta e encontra-se no estado (C_o, V_{reg}, T_{reg}). (b) Curva da derivada da temperatura de saída do óleo. (c) Estados e eventos da ação do controlador.

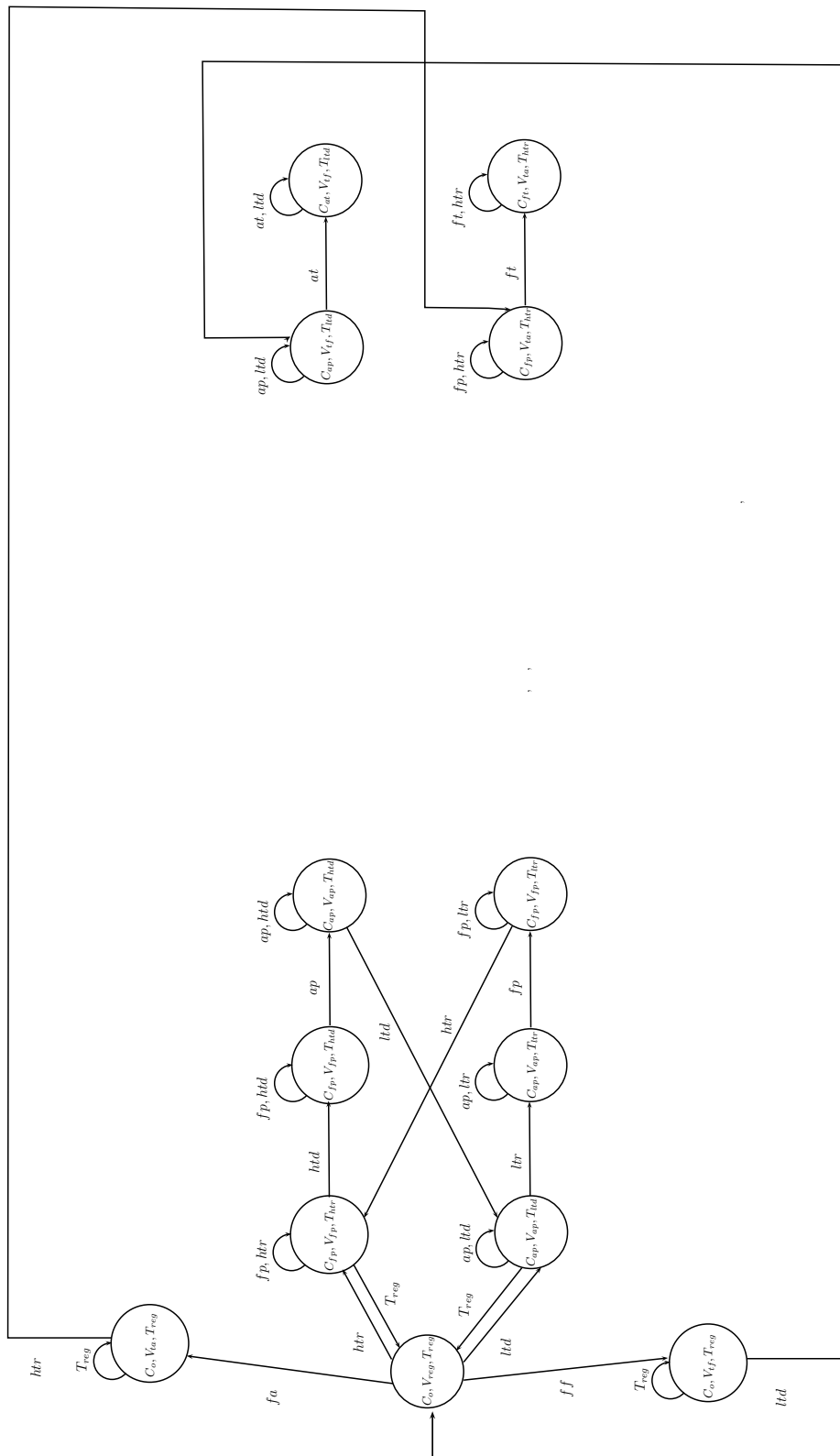


Figura 4.17: Continuação da construção do autômato com falha, quando a válvula trava na posição aberta, apresentando a análise da figura 4.16 e acrescentando-se o grafo da figura 4.15.

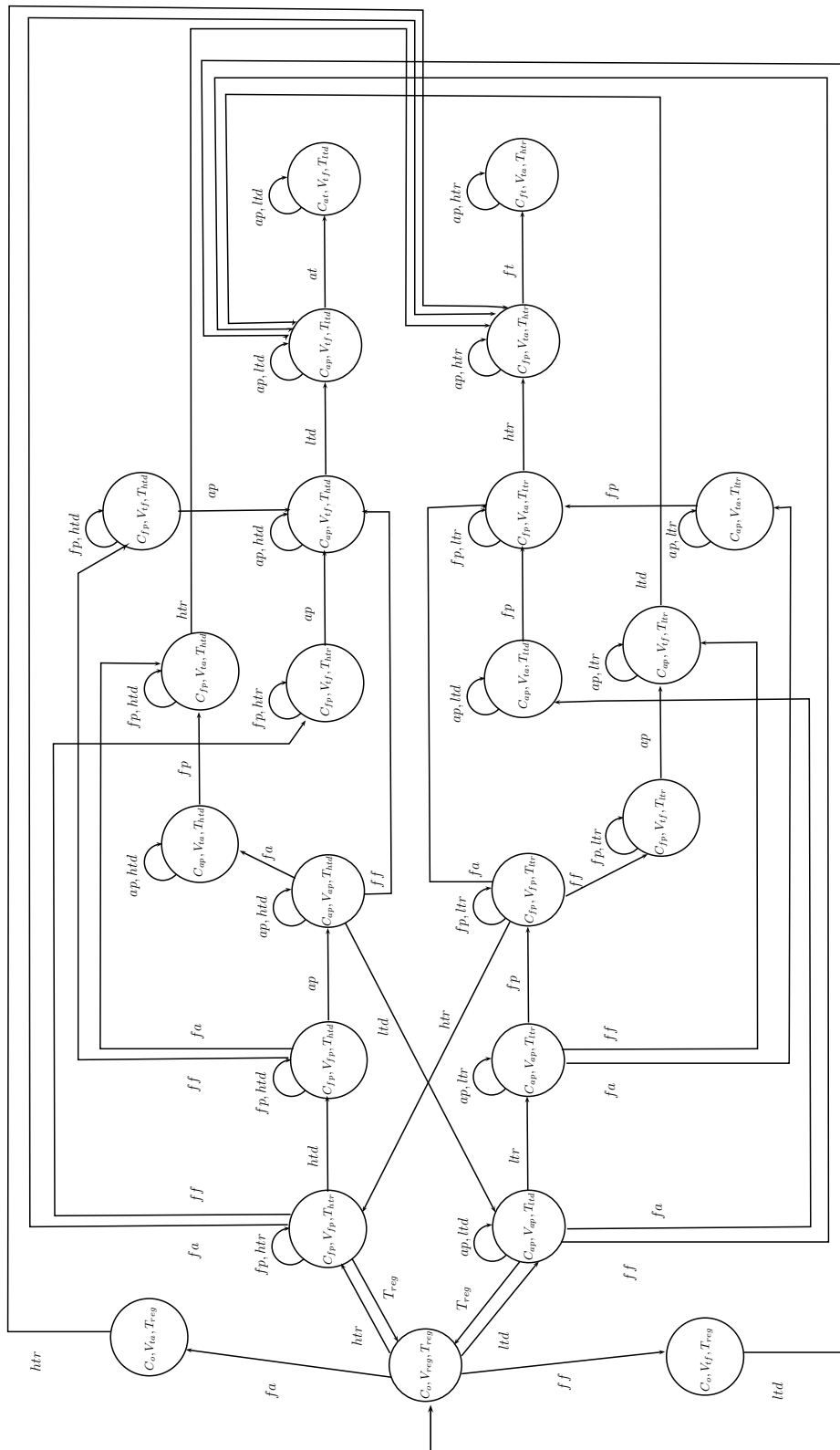


Figura 4.18: Gráfico do autômato do processo de aquecimento de óleo no forno com comportamento normal e falha.

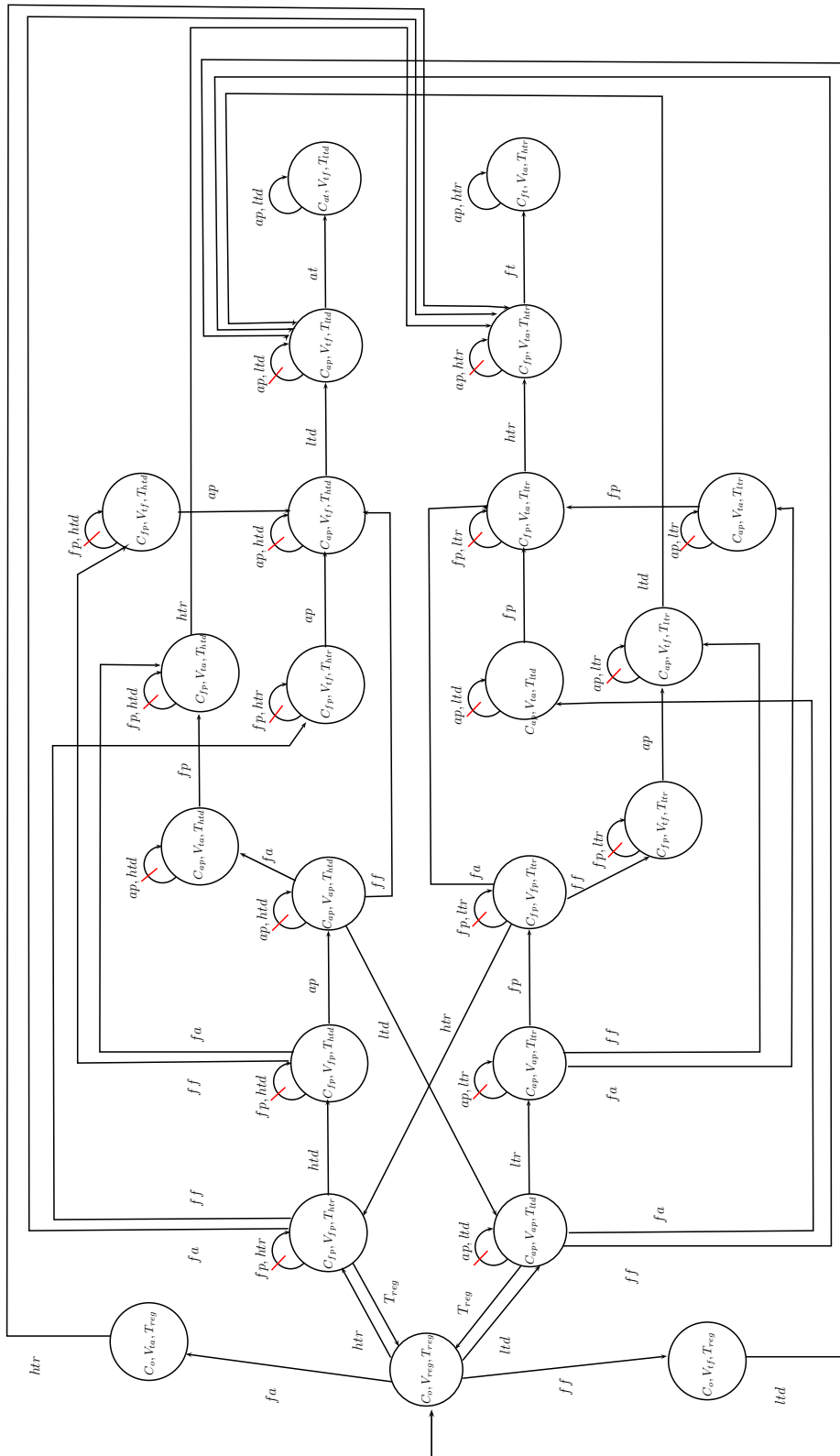


Figura 4.19: Gráfico do autômato do processo de aquecimento de óleo no forno com comportamento normal e falha apresentando os autolaços não que não ficam eternamente no comportamento real.

Capítulo 5

Diagnóstico de falhas do forno aquecedor de óleo

Neste capítulo serão apresentadas as metodologias para a construção do diagnosticador quando a válvula trava em posição aberta e quando trava em posição fechada, assim como, a análise da diagnosticabilidade de ambas as falhas. Também serão realizadas simulações utilizando-se o software Matlab, para testar o desempenho do diagnosticador de falhas.

Este capítulo está estruturado da seguinte forma. Na seção 5.1 é apresentada a construção do diagnosticador quando a válvula trava na posição fechada, assim como, o diagnosticador resultante. Também, é apresentada a construção do diagnosticador quando a válvula trava na posição aberta, e o diagnosticador resultante. Na seção 5.2 são apresentadas as simulações e resultados obtidos.

5.1 Diagnosticadores das falhas de travamento da válvula na posição fechada e na posição aberta

O diagnosticador construído neste trabalho é baseado na teoria proposta por SAMPATH *et al.* [7] e SAMPATH *et al.* [9]. O diagnosticador foi construído utilizando a informação do comportamento apresentado no modelo da figura 4.19.

Para o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada, se construiu, segundo o algoritmo 2.2, o autômato $G||A_{label_{ff}}$, sendo G o autômato que modela o comportamento normal e de falha do processo de aquecimento (figura 4.19), e $A_{label_{ff}}$, o autômato rotulador quando a válvula trava em posição fechada (figura 5.1), essa composição é apresentada na figura 5.3. O próximo passo, foi construir o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada, ou seja, $Obs(G||A_{label_{ff}})$, apresentado na figura 5.4. Finalmente, foi necessário realizar a análise da diagnosticabilidade, isto é, verificar se existem ciclos indeterminados

que violem a diagnosticabilidade.

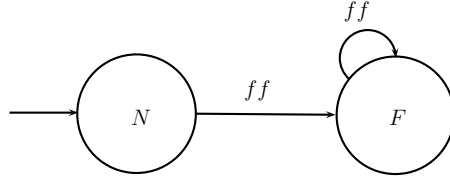


Figura 5.1: Autômato rotulador $A_{label_{ff}}$.

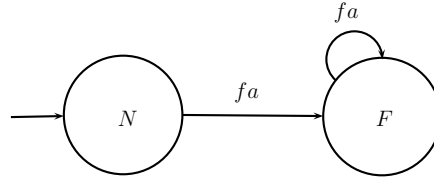


Figura 5.2: Autômato rotulador $A_{label_{fa}}$.

Note-se que o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada, apresenta estados normais, certos e incertos. Lembre-se que, um estado normal é aquele que contém o rótulo N , ou seja, não ocorreu a falha. Se o estado possui apenas rótulos iguais a F , significa que o estado é certo e ocorreu a falha. Mas, quando o estado possui o rótulo N e F , no mesmo estado, o estado é incerto, é dizer, a ocorrência da falha está em dúvida. Na figura 5.5 são apresentados os estados normais (cor azul), os estados certos (cor verde) e os estados incertos (cor roxo). Também, observa-se linhas acima dos autolaços. Essas linhas provêm da explicação apresentada na seção 4.2.

A análise, desse diagnosticador, está baseada na teoria apresentada na seção 2.4.1. Para tanto, se analisou cada ciclo incerto a fim de conhecer se o ciclo além de incerto é indeterminado ou não. Também, se desconsiderou os eventos dos autolaços que não possuem uma ocorrência infinita, ou seja, eles evoluem de estado em estado. Para isso, se fez uma comparação com o processo real de aquecimento de óleo no forno. Por exemplo, para o seguinte ciclo incerto: $((C_o, V_{reg}, T_{reg}, N)(C_o, V_{ta}, T_{reg}, N)(C_o, V_{tf}, T_{reg}, F)), htr, ((C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{tf}, T_{htr}, F)), T_{reg}, ((C_o, V_{reg}, T_{reg}, N)(C_o, V_{ta}, T_{reg}, N)(C_o, V_{tf}, T_{reg}, F)))$, logo da análise, se concluiu que, não é um ciclo indeterminado, porque ao fazer a comparação com o sistema real, note-se que o evento T_{reg} só se ativa quando está em condições normais, ou seja, sem travamento da válvula. Por conseguinte, se desconsidera o evento T_{reg} na análise e assim, o ciclo incerto não é indeterminado.

Na análise do ciclo: $((C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{tf}, T_{htr}, F)), f_p, htr, ((C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{tf}, T_{htr}, F)))$, pode-se observar que, a ocorrência dos eventos f_p, htr não é ilimitada, pois, o estado

$(C_{fp}, V_{fp}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{htr}, N)(C_{fp}, V_{tf}, T_{htr}, F)$ vai evoluir ao estado $(C_{fp}, V_{fp}, T_{htd}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{htd}, N)(C_{fp}, V_{tf}, T_{htd}, F)$ por meio do evento htd ativo. Também, pode evoluir meio do evento ativo ap para o estado certo $(C_{ap}, V_{tf}, T_{htd}, F)$.

Para o ciclo: $((C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{htd}, N)(C_{ap}, V_{tf}, T_{htd}, F)), ap, htd, ((C_{ap}, V_{ap}, T_{htd}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{htd}, N)(C_{ap}, V_{tf}, T_{htd}, F)))$, logo de fazer uma comparação com o processo real de aquecimento de óleo, tem-se que, os eventos ap, htd não possuem uma ocorrência ilimitada, pelo contrario, eles possuem uma ocorrência finita e logo, evoluem para outro estado incerto.

Dessa forma, foram analisados os demais ciclos incertos, o que levou à conclusão que o diagnosticador não possui ciclos indeterminados, conseqüentemente, diagnostica a falha do travamento da válvula na posição fechada.

Para o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta, se construiu o autômato $G||A_{label_{fa}}$, neste caso, $A_{label_{fa}}$ contém o evento (fa) , como é apresentado na figura 5.2. Essa composição paralela é apresentada na figura 5.6. Logo, se construiu o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta, apresentada na figura 5.7. Por último, foi feita a análise da diagnosticabilidade.

Na figura 5.8 são apresentados os estados normais (cor azul), os estados certos (cor verde) e os estados incertos (cor roxo) do diagnosticador da falha quando a válvula trava em posição aberta.

A metodologia da análise foi a mesma que se utilizou no outro diagnosticador. Nesse caso, se tem o seguinte ciclo incerto: $((C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{ltd}, F)(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltd}, N)), ap, ltd, ((C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{ltd}, F)(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltd}, N)))$, logo da análise, se concluiu que, não é um ciclo indeterminado, porque ao fazer a comparação com o sistema real, note-se que os eventos ap, ltd não possuem uma ocorrência ilimitada. Quando acontece a falha, esse estado evolui para o estado certo de falha, $(C_{fp}, V_{ta}, T_{ltr}, F)$, mediante o evento fp ativo. Outra opção do estado incerto $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{ltd}, F)(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltd}, N)$ é evoluir para um estado normal, $(C_{at}, V_{tf}, T_{ltd}, N)$ por meio do evento a_t ativo.

Na análise do ciclo: $((C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{ltr}, F)(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltr}, N)), ap, ltr, ((C_{ap}, V_{ap}, T_{ltr}, N)(C_{ap}, V_{ta}, T_{ltr}, F)(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltr}, N)))$, pode-se observar que, a ocorrência dos eventos ap, ltr não é ilimitada, pois, esse estado não possui uma ocorrência ilimitada dos eventos ap, ltr . Pelo contrario, a ocorrência dos eventos é limitada, até que esse estado evoluía tanto para um estado normal, $(C_{ap}, V_{tf}, T_{ltd}, N)$ mediante o evento ltd ativo, ou para outro estado incerto, $(C_{fp}, V_{fp}, T_{ltr}, N)(C_{fp}, V_{ta}, T_{ltr}, F)(C_{fp}, V_{tf}, T_{ltr}, N)$ mediante o evento fp ativo.

Os demais estados incertos foram analisados dessa forma. Finalmente, pode-se

dizer que, o diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta não possui ciclos indeterminados, conseqüentemente, diagnostica a falha.

5.2 Simulações e Resultados

Os diagnosticadores das figuras 5.4 e 5.7 foram implementados no software Stateflow/Simulink/Matlab® para suas respectivas simulações, como é apresentado no Simulink, figura 5.9, e no Stateflow, figuras 5.10 e 5.11.

Cada estado dos diagnosticadores no Stateflow, possui o nome do estado junto com a letra N e F, em que N representa o estado normal (sem falha) e F representa o estado com falha, tanto para o travamento da válvula em posição aberta ou fechada. Para ativar um estado, tanto, N ou F, se inseriu o número 1 e para desativar um estado, se inseriu o número 0. Ou seja, têm-se: o estado normal ativo ($N = 1$); o estado normal inativo ($N = 0$); o estado de falha ativo ($F = 1$) e o estado de falha inativo ($F = 0$). Cabe mencionar que, o nome dos estados dos diagnosticadores (figuras 5.4 e 5.7) são diferentes das figuras 5.11 e 5.10, isso é, porque o software Stateflow só reconhece, no nome, um estado e não três como é apresentado nos diagnosticadores. Mesmo assim, isso não impede uma boa simulação porque o software Stateflow trabalha com os estados ativos e inativos.

Alem disso, nas figuras 5.11 e 5.10, os eventos nos autolaços são desconsiderados devido à explicação apresentada na seção 4.2 também, cabe mencionar que, o diagnosticador procura evoluir de estado e não ficar eternamente em um mesmo estado.

Para cada estado do autômato normal, apresentado na figura 4.13, foram simuladas as falhas de travamento da válvula em posição aberta e fechada, com a finalidade de observar o comportamento do diagnosticador. Ou seja, quando na simulação, no Simulink, a válvula trava na posição aberta ou fechada, o diagnosticador, no Stateflow, deve acompanhar esse comportamento e detectar a falha.

O primeiro teste foi feito no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, em que a válvula fica presa em posição fechada, no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, no tempo de 4180 s, como é apresentado na figura 4.19. Observa-se no diagnosticador da falha de travamento na posição fechada, figura 5.10, em que do estado inicial, acontece o evento *ltd* que vai para o estado normal ($N = 1$), seguidamente, acontece a falha e o diagnosticador detecta a falha mediante o evento *at*, quem leva para o estado de falha ($F = 1$).

Por outro lado, quando a válvula fica presa em posição aberta, no tempo de 4180 s, como é apresentado na figura 4.19. Observa-se no diagnosticador da falha de travamento na posição aberta, figura 5.11, em que a partir do estado inicial, acontece o evento *ltd*, logo, quando acontece a falha, o diagnosticador detecta a falha mediante o evento *fp* que vai para um estado de falha ($F = 1$), a continuação,

mediante o evento *htr* va para outro estado de falha ($F = 1$). Finalmente, mediante o evento *ft* vai para o ultimo estado de falha ($F = 1$).

Da mesma forma, se realizaram simulações de travamento da válvula de combustível nas posições aberta e fechada para todos os estados apresentados na figura 4.19.

Finalmente, se constata que as simulações feitas para o travamento da válvula na posição aberta e fechada possuem o comportamento igual as simulações feitas em tempo real no Simulink.

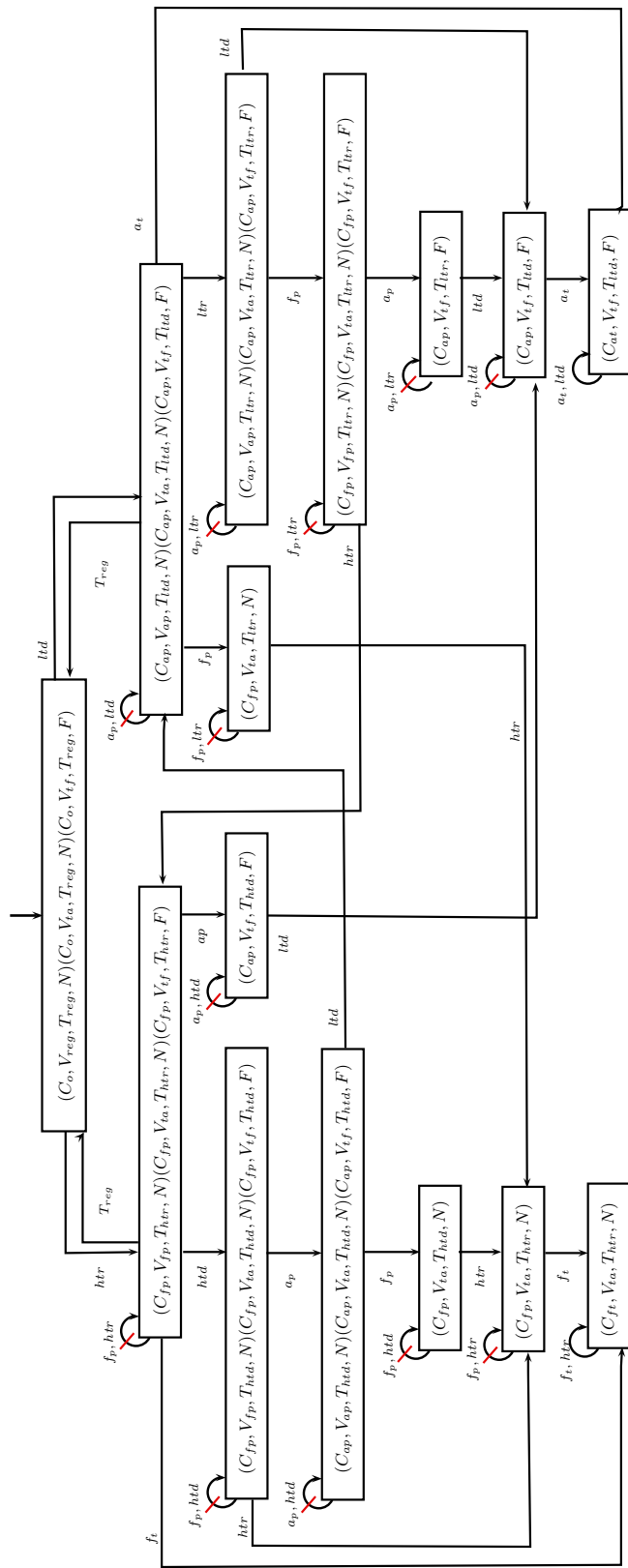


Figura 5.4: Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada.

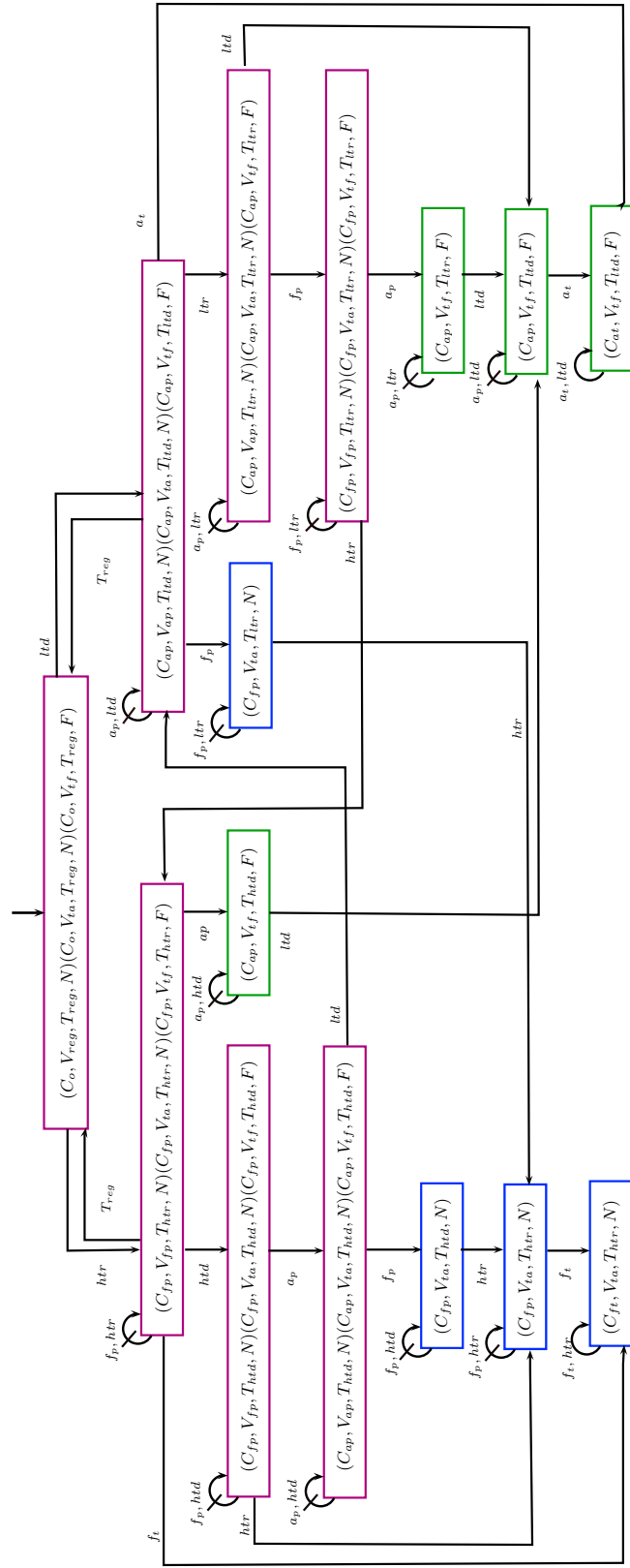


Figura 5.5: Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada apresentando os estados normais (cor azul), os estados certos (cor verde) e os estados incertos (cor roxo)

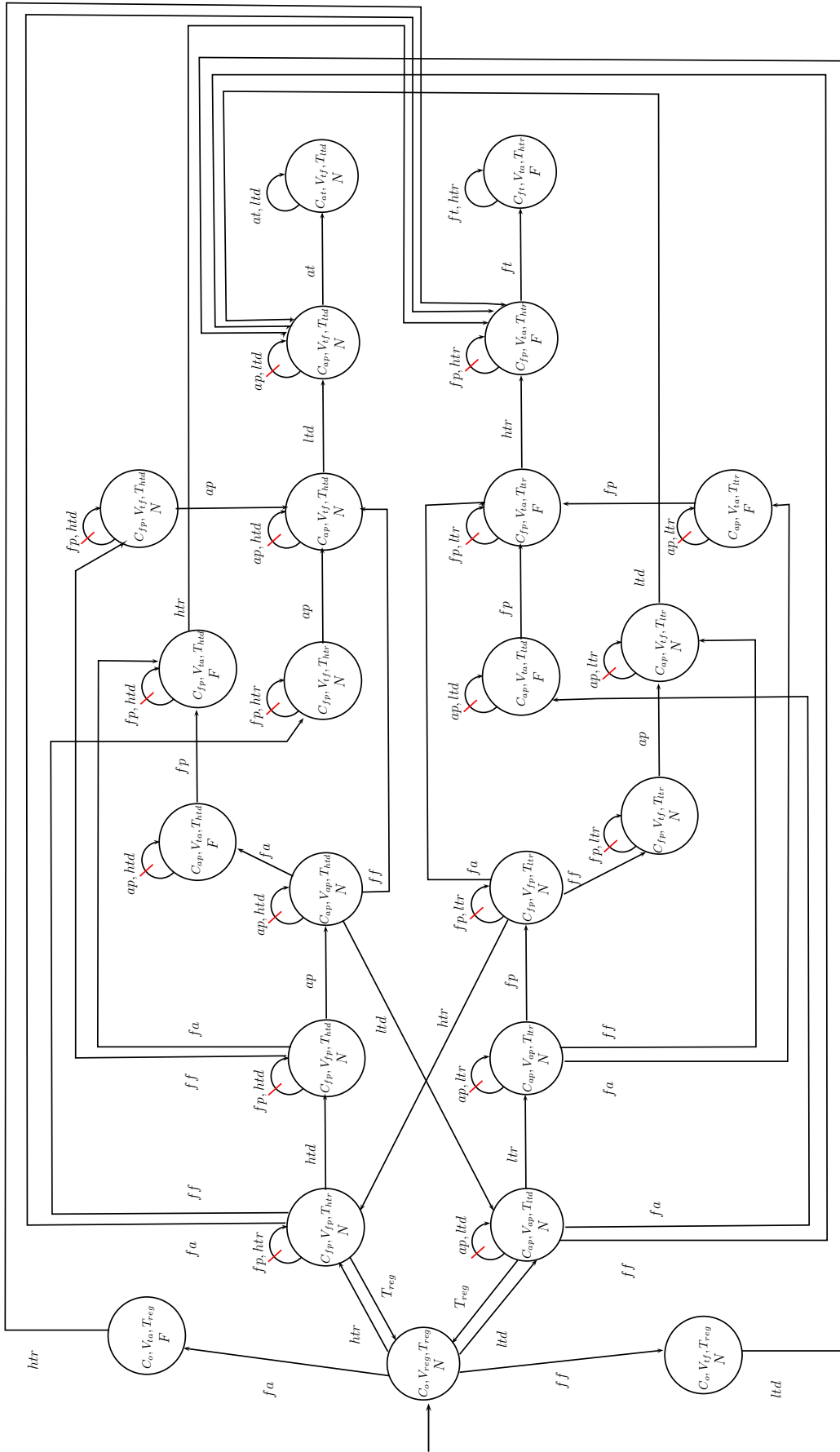


Figura 5.6: Diagrama de transições de estados do processo de aquecimento de óleo no forno apresentando um comportamento normal e de falha quando a válvula trava em posição aberta.

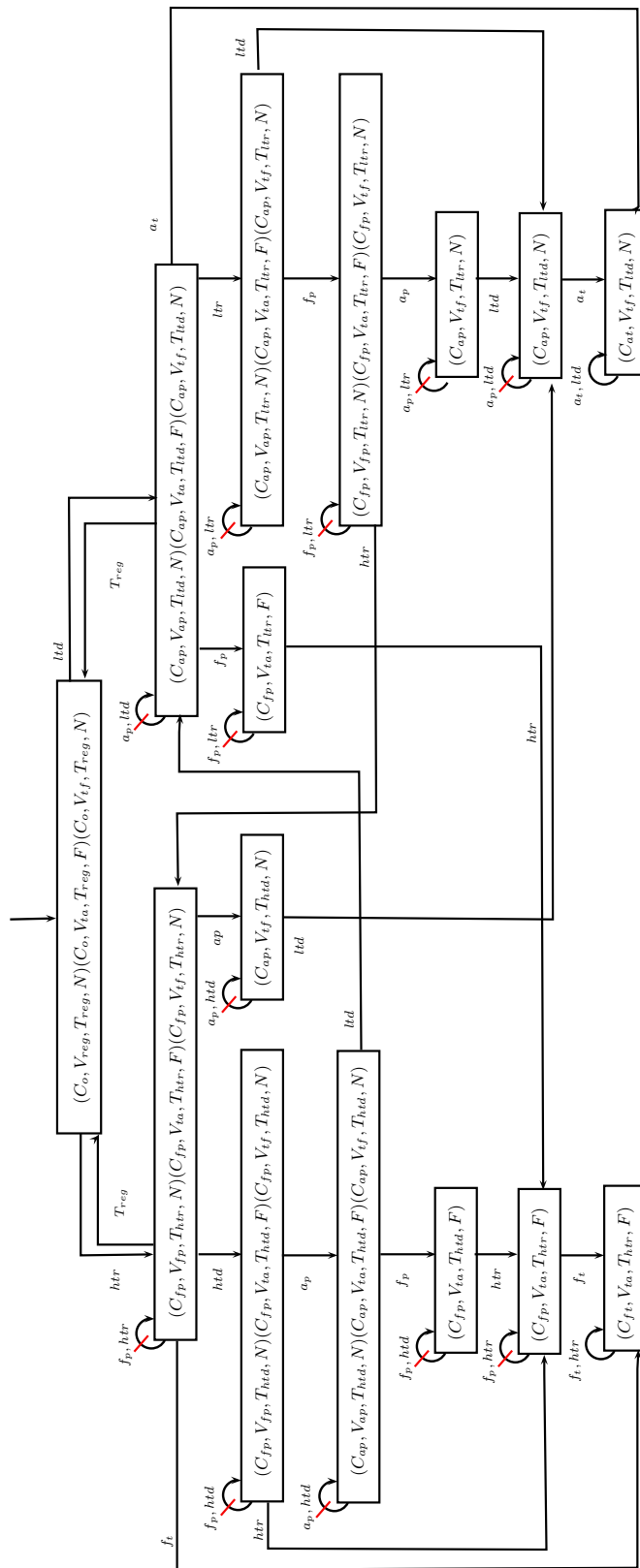


Figura 5.7: Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta.

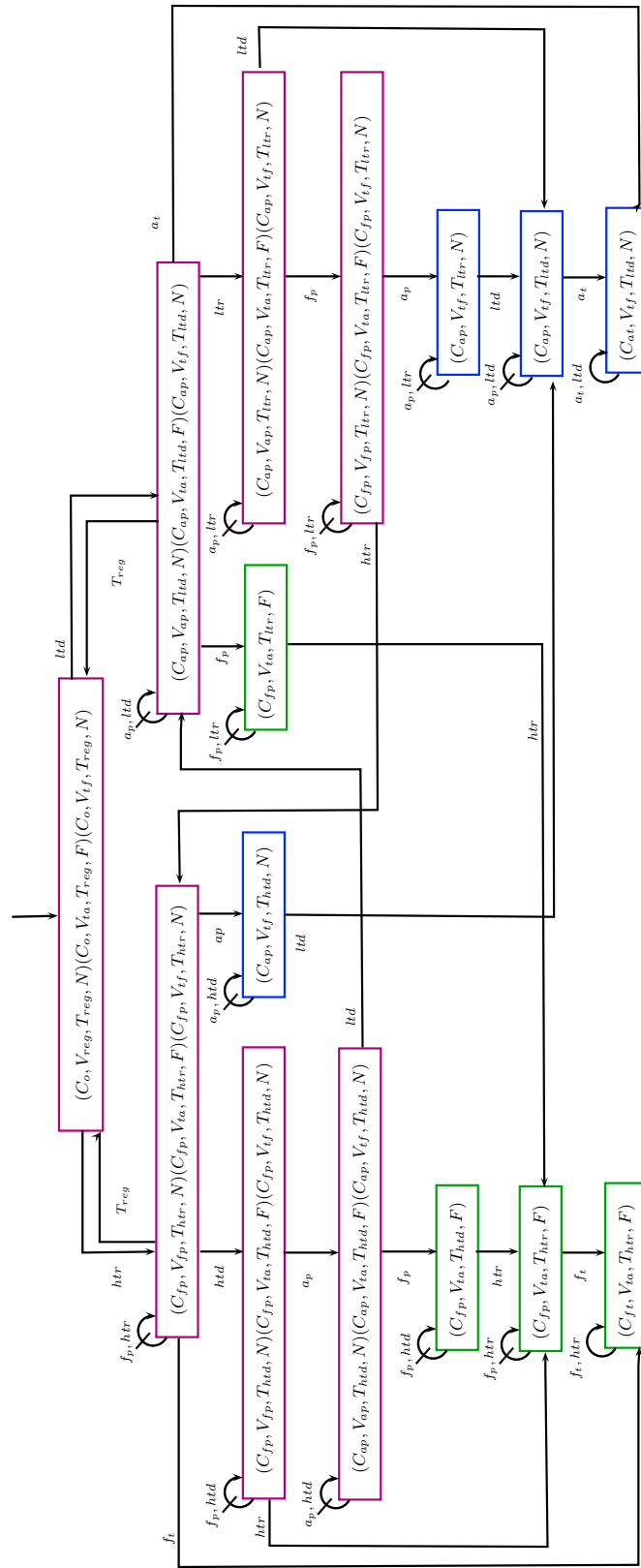


Figura 5.8: Diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada.

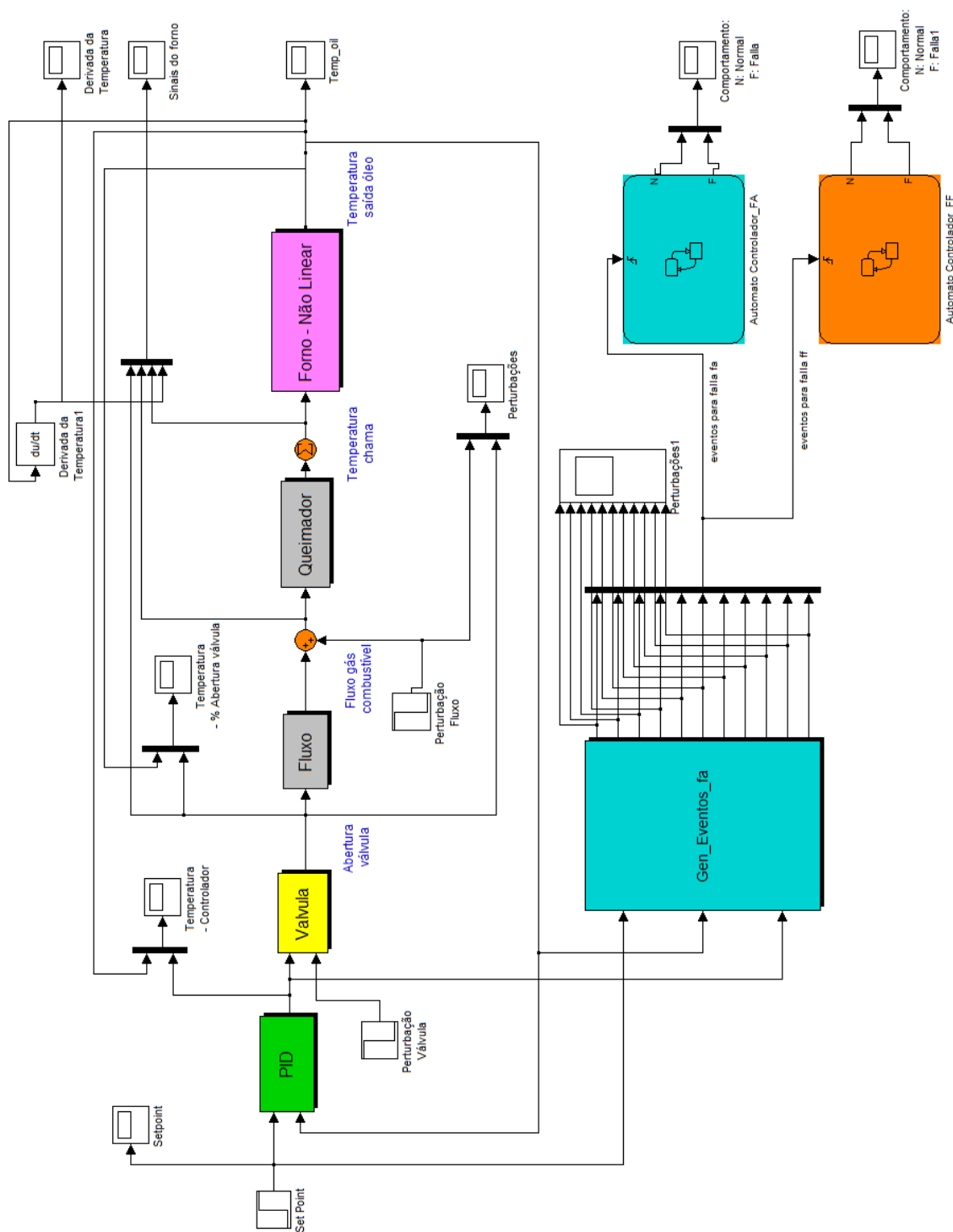


Figura 5.9: Simulação dos diagnosticadores das falhas de travamento da válvula na posição fechada e na posição aberta

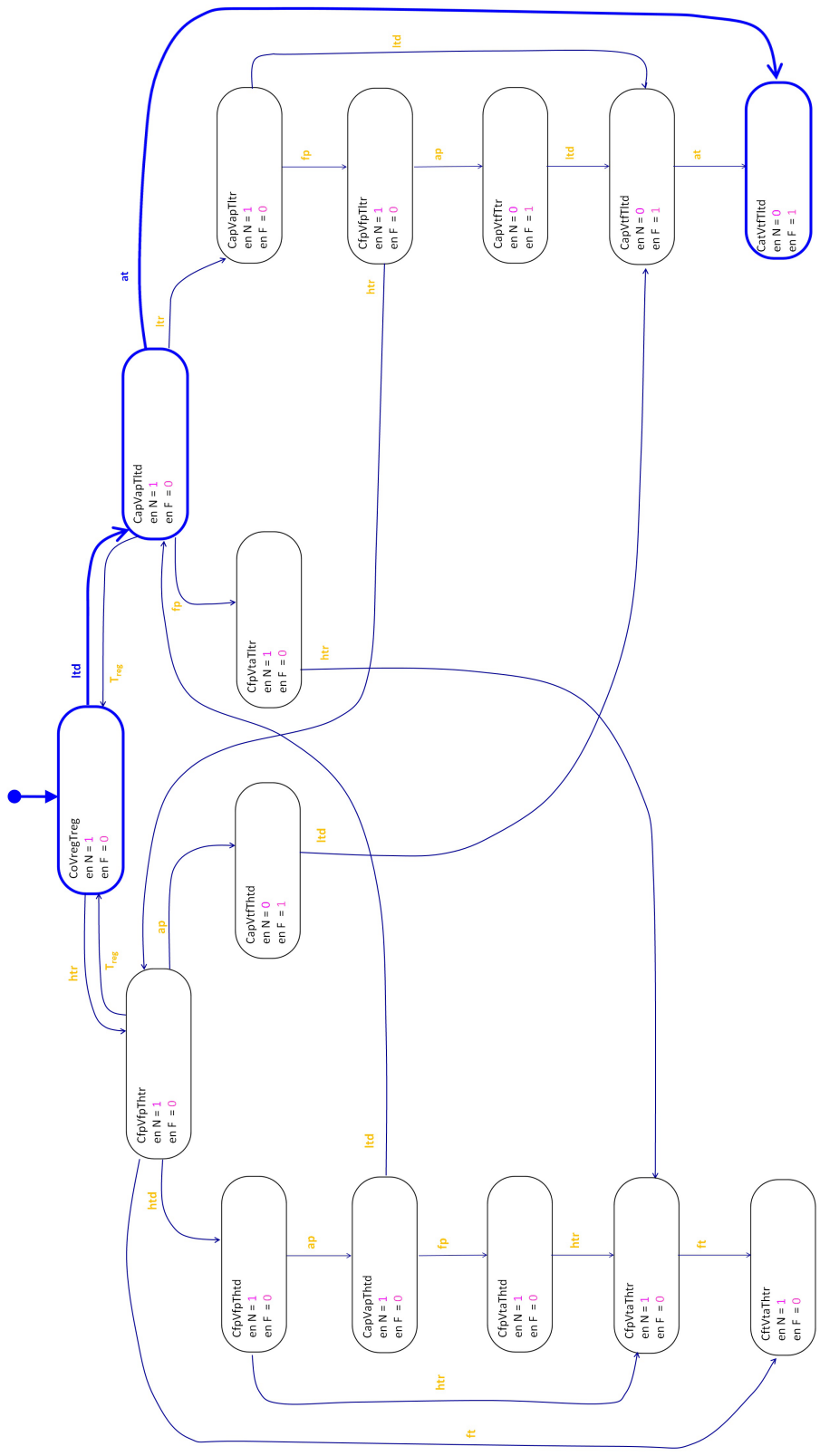


Figura 5.10: Simulação do diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição fechada quando encontra-se no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, implementado no Stateflow/Simulink/Matlab.

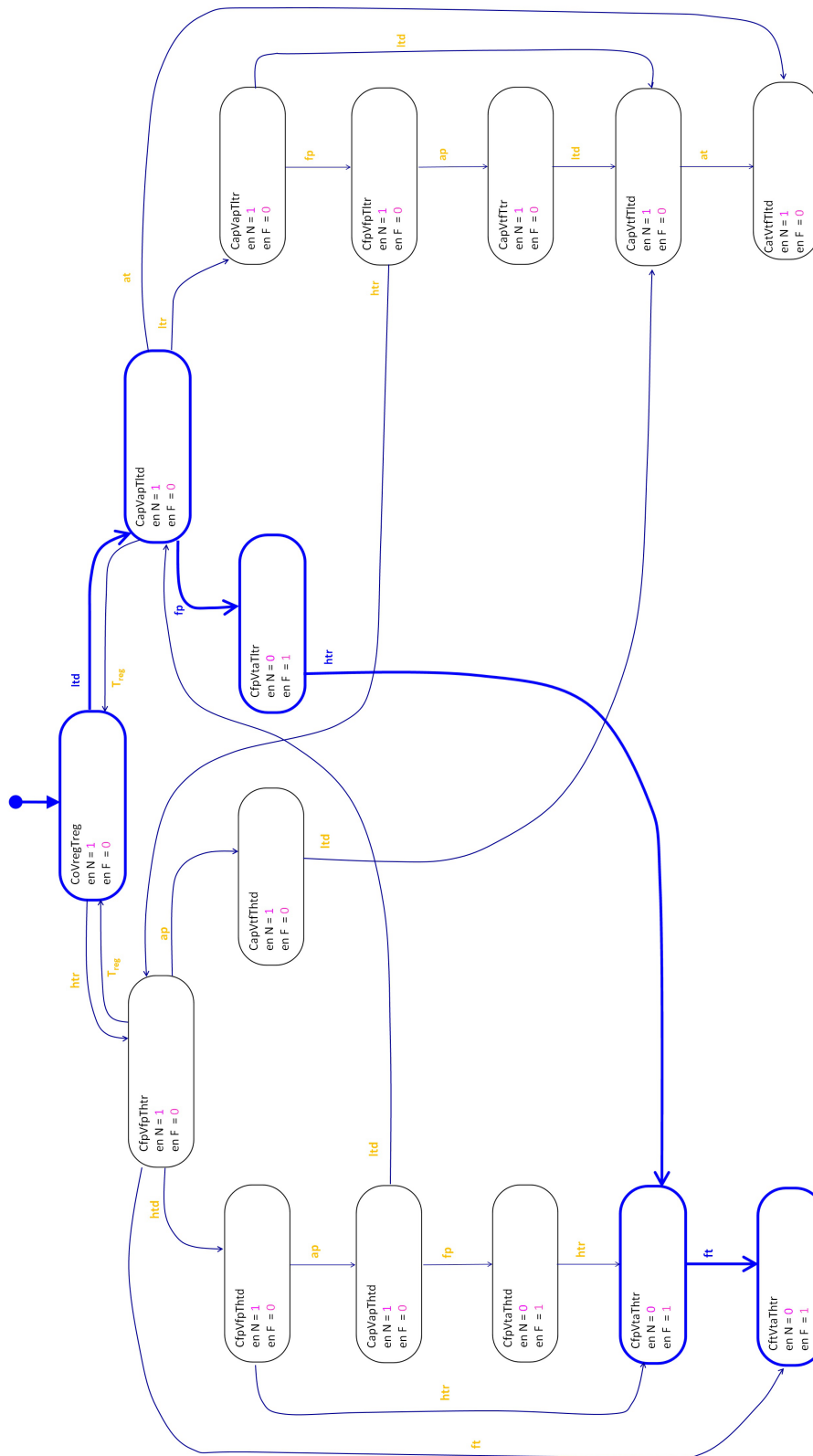


Figura 5.11: Simulação do diagnosticador da falha de travamento da válvula na posição aberta quando encontra-se no estado $(C_{ap}, V_{ap}, T_{ltd})$, implementado no Stateflow/Simulink/Matlab.

Capítulo 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um diagnosticador de falhas para a válvula de controle em uma planta de tratamento de hidrocarbonetos, especificamente no processo de aquecimento de óleo no forno. Para projetar o sistema de diagnóstico de falhas considerou-se a falha de travamento da válvula de fluxo de combustível nas posições aberta ou fechada, baseada na teoria de diagnosticadores em sistemas a eventos discretos. Em seguida, através dos balanços de energia dinâmicos, obteve-se um modelo matemático de variáveis contínuas do processo. Esse modelo não linear, foi linearizado a fim de se obter a função de transferência e o projeto do controlador do tipo PID.

O modelo linearizado foi simulado no software Matlab. Para verificar o processo de linearização, foi comparado o modelo linear com o modelo não linear. Baseado nas simulações do modelo não linear, foi construído o modelo a eventos discretos do controlador, planta e válvula. Assim, foi obtido um autômato para modelar o controlador com a válvula e o comportamento da temperatura. O modelo foi projetado no software Deslab, e também, nesse software se construiu o diagnosticador baseado em sistemas a eventos discretos. O próximo passo do trabalho consistiu em analisar a diagnosticabilidade das falhas consideradas e foi verificado que ambas as falhas de travamento da válvula são diagnosticáveis.

6.2 Proposta de trabalhos futuros

Como trabalhos futuros são propostos: *(i)* a modelagem de outros tipos de falhas (intermitentes e estruturais); *(ii)* tentar fazer a mesma abordagem para outras formas de perturbações utilizando a teoria de sistemas de eventos discretos; *(iii)* abordar o diagnóstico de falhas do processo de aquecimento de óleo no forno utilizando a

teoria de sistemas híbridos.

Referências Bibliográficas

- [1] CAO, E. *Heat transfer in process engineering*. McGraw-Hill Professional, 2009.
- [2] INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P. *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*. 6ta ed. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan S.A., 2008.
- [3] TAYLOR, P., FOSTER, P. “The total emissivities of luminous and non-luminous flames”, *International journal of Heat and Mass transfer*, v. 17, n. 12, pp. 1591–1605, 1974.
- [4] CASSANDRAS, C. G., LAFORTUNE, S. *Introduction to discrete event systems*. Springer, 2008.
- [5] DAVID, R., ALLA, H. *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Springer, 2010.
- [6] LIN, F. “Diagnosability of discrete event systems and its applications”, *Journal of Discrete Event Dynamic Systems*, v. 4, pp. 197–212, 1994.
- [7] SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S. “Diagnosability of discrete-event systems”, *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, v. 40, pp. 1555–1575, 1995.
- [8] DA SILVA, R. A. *Detecção e Diagnóstico de Falhas em Alto-Forno: um Estudo de Caso*. Tese de Doutorado, 2002.
- [9] SAMPATH, M., SENGUPTA, R., LAFORTUNE, S., et al. “Failure diagnosis using discrete-event models”, *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, v. 4, n. 2, pp. 105–124, 1996.
- [10] NUNES, C. E. V. *Sistema Inteligente de Suporte Operacional em Processos de Tratamento Primário de Petróleo*. Dissertação (mestrado), 2012.
- [11] RIVERA, M. H. M. *Diagnóstico de falhas em sistemas a eventos discretos: uma proposta de aplicação em processo de separação óleo-gás*. Dissertação (mestrado).

- [12] CAO, X.-R., HO, Y.-C. “Models of Discrete Event Dynamic Systems”, *IEEE Control Systems Magazine*, p. 69, 1990.
- [13] HOPCROFT, J. E., MOTWANI, R., ULLMAN, J. D. *Introduction to automata theory, languages, and computation*. Pearson Education India, 1939.
- [14] SAKAROVITCH, J. *Elements of Automata Theory*. 1st edition ed. New York, USA, Cambridge University Press, 2009.
- [15] BASILIO, J. C., CARVALHO, L. K., MOREIRA, M. V. “Diagnose de falhas em sistemas a eventos discretos.” *Revista Controle e Automação, SBA*, v. 44, pp. 510–533, 2010.
- [16] HOLMAN, J. *Heat Transfer*. 10th ed. New York, McGraw-Hill, 2010.
- [17] MORAN, M., SHAPIRO, H., MUNSON, B., et al. *Introdução à Engenharia de Sistemas Térmicos: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor*. Livros Téc. e Cient. Editora, 2005.
- [18] SIEGEL, R., HOWELL, J. R. *Thermal Radiation Heat Transfer*. 3rd ed. New York, McGraw-Hill, 1992.
- [19] HOTTEL, H. “The Melchett Lecture for 1960. Radiative Transfer in Combustion Chambers”, *Journal of the Institute of Fuel*, pp. 220–234, 1960.
- [20] HOTTEL, H., SAROFIM, A. *Radiative Transfer*. New York, McGraw-Hill, 1967.
- [21] LOPES JUNIOR, S. *Curso de Fornos de Processo*. Rio de Janeiro, Chemtech, 2009.
- [22] MIRANDA, M. M. L. P. F. *Estudo do comportamento térmico de um esquentador pressurizado*. Tese de mestrado, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia do Porto, Departamento de Mecânica e Gestão Industrial, 2001.
- [23] LOBO, W. E., EVANS, J. E. “Heat Transfer in the Radiant Section of Petroleum Heaters”, *AIChE Transactions of the American Institute of Chemical Engineers*, v. 35, n. 4, pp. 743–778, 1939.
- [24] GOODWIN, G. C., GRAEBE, S. F., SALGADO, M. E. *Control system design*. New Jersey, USA, Prentice Hall, 2000.
- [25] HARRIOTT, P. *Process control*. Tata McGraw-Hill Education, 1972.

- [26] ROFFEL, B., RIJNSDORP, J. “Dynamics and control of a gas-fired furnace”, *Chemical Engineering Science*, v. 29, n. 10, pp. 2083–2092, 1974.
- [27] FISHER. “Control Valve Handbook”, *Emerson Process Management*, v. 4, 2005.
- [28] TAKATSU, H., ITOH, T., ARAKI, M. “Future needs for the control theory in industries report and topics of the control technology survey in Japanese industry”, *Journal of Process Control*, v. 8, n. 5, pp. 369–374, 1998.
- [29] LUYBEN, W. L. *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. McGraw-Hill Companies, 1989.
- [30] SEBORG, D., EDGAR, T., MELLICHAMP, D. *Process dynamics and control*. 1ra ed. New York, Wiley, New York, 1989.
- [31] BAKER JR, G. A., GRAVES-MORRIS, P. “Padé approximants”, *Encyclopedia of Mathematics and its Applications*, v. 59, 1996.