Guilherme Lima Barbarioli

Modelagem e Controle Preditivo dos queimadores de uma Caldeira

Vitória, ES

2019

Guilherme Lima Barbarioli

Modelagem e Controle Preditivo dos queimadores de uma Caldeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Orientadora: Prof. Dra. Jussara Farias Fardin.

Vitória, ES

2019

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Lima Barbarioli, Guilherme, 1989-
L732m Modelagem e Controle Preditivo dos queimadores de uma Caldeira / Guilherme Lima Barbarioli. - 2019.
168 f. : il.

Orientadora: Jussara Farias Fardin.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Sistemas híbridos. 2. Controle. 3. MLD. 4. HYSDEL. 5. Kalman. I. Farias Fardin, Jussara. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

Guilherme Lima Barbarioli

Modelagem e Controle Preditivo dos queimadores de uma Caldeira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 02 de dezembro de 2019.

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dra. Jussara Farias Fardin.
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof. Dr. José Leandro Felix Salles.
Universidade Federal do Espírito Santo
(Externo)

Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha.
Universidade Federal do Espírito Santo
(Interno)

Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida.
Instituto Federal do Espírito Santo - Serra
(Externo)

Vitória, ES
2019

Dedico este trabalho aos meus pais, Jorge e Petronilha, à minha irmã, Juliana, e minha à noiva Mariana, pelo apoio incondicional, zelo e contribuição.

Agradecimentos

Agradeço aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da UFES - em especial ao professor José Leandro Felix Salles, pelas orientações fornecidas durante o Curso, o indispensável treinamento e atendimentos dedicados a resolução e melhoria do projeto.

Agradeço aos meus sócios e amigos, os engenheiros Henrique Silva Costa e Paulo José de Almeida Barbosa, pela consideração e apoio nos desafios da pesquisa.

Agradeço também ao engenheiro Mestre Danilo De Paula e Silva (doutorando em engenharia elétrica), que deu amplo suporte ao processo de estudo e discussão.

Agradeço ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de financiamento 001, na realização deste trabalho.

"É a tensão entre a criatividade e o ceticismo que produz os resultados impressionantes e inesperados da ciência." Carl Sagan

Resumo

Em industrias de base, como as metalúrgicas, a eficiência energética aliada a redução de emissões atmosféricas são fatores relevantes para sustentabilidade ambiental. Nas usinas metalúrgicas integradas houve um aumento em 60% da eficiência energética na produção do aço nos últimos 50 anos. Entretanto, aprimoramentos futuros na eficiência energética requerem controle e gerenciamento dos gases combustíveis residuais dos processos siderúrgicos. Estes gases são comumente reutilizados na produção do aço e também na geração de energia elétrica, via termelétrica a vapor. Para otimizar o consumo destes gases residuais, deve haver um otimizador para gerenciar o encaminhamento e consumo dos gases por cada setor ao longo da usina. Abaixo deste otimizador, para cada processo consumidor destes gases, deve haver preferencialmente um controlador avançado para assegurar que os objetivos definidos no nível de otimização sejam adequadamente alcançados. Neste trabalho é proposto um sistema de controle híbrido baseado no modelo da fornalha da caldeira de uma termelétrica, de modo a fornecer um seguimento de trajetória para vazão do gás sem *offset*. Neste sentido foi necessário propor uma modelagem híbrida para a fornalha da caldeira, utilizando formulação MLD (*Mixed Logical Dynamics*), a partir da utilização das ferramentas disponibilizadas da linguagem HYSDEL (*Hybrid System DEscription Language*). Este modelo híbrido integra todos os procedimentos de inicialização, parada, limites físicos do sistema e o modelo comutado por partes, que definem as dinâmicas de vazão do gás. O controle preditivo proposto utiliza o método otimização quadrática inteira-mista on-line, com horizonte de previsão deslizante. Para estimar os estados foi proposto um filtro de Kalman projetado por partes, possibilitando rejeição de ruídos brancos e distúrbios com média diferente de zero. Para avaliar a performance do sistema realizou-se cinco estudos de caso, incluindo uma comparação com um sistema de controle PI (Proporcional Integrativo).

Palavras-chaves: Sistemas híbridos. Controle. MLD. HYSDEL. Kalman.

Abstract

Environmental sustainability has been a main topic leading industries to a better energy efficiency. Basic industries such as the metallurgic sector, applied many improvements in the last 50 years, mainly through new control and process techniques contributing to a outstanding 60% increase in energy efficiency, throughout all steel plants processes. However, those changes do not involve managing steel mill byproduct gases. The major issue that need to be addressed is the management and control systems that handle the destination of those gases. Mostly, those gases are used to generate electric energy and also to heat up some internal steps in the metal making process. To optimize the gas usage, the management strategies must include some mathematical optimizing models, to manage and predict the best route and time to consume those gases. Subjected to that management tool there must be a set of advanced controls that manage optimally the permissions and regulatory control to achieve the goals set by management algorithm. On this paper is proposed a hybrid control system based on furnace model of a boiler that is used to supply vapor for thermoelectric power plant. The main objective is to track the set-point path without any offset. Targeting this performance is proposed a hybridmodel using MLD (*Mixed Logical Dynamics*) formulation, utilizing HYSDEL(*Hybrid System DEscription Language*) language tools. This mathematical model attach many of the start-up and shut-down procedures, physical operation limits and also the switch affine systems that compose the furnace model. The control system use an on-line quadratic mixed-integer optimization with a receding control horizon, to predict the best control actions. To estimate some of the non-measured variables it was built a switched Kalman filter, allowing the control system to reject white noise and also constant disturb signal such as the valve grasp issue. In order to evaluate the control system performance, it is executed five case studies, including a comparison with a PI (Proportional Integral) controller. **Keywords**: Hybrid System. Control. MLD. HYSDEL. Kalman.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma de produção da usina siderúrgica integrada ArcelorMittal Tubarão. 25
Figura 2 – Diagrama de produção da usina siderúrgica integrada ArcelorMittal Tubarão. 26
Figura 3 – Sistema de distribuição de combustíveis siderúrgicos. 27
Figura 4 – Solução do problema de distribuição de combustíveis siderúrgicos através de vários níveis. 29
Figura 5 – Autômato Híbrido Discreto, DHA - Discrete Hybrid Automata. 35
Figura 6 – Maquina de estado de um aquecedor com interruptor bimetálico. Fonte:Própria 37
Figura 7 – Conceito do horizonte de de previsão móvel 45
Figura 8 – Tecnologias de combustão para caldeiras. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004) 53
Figura 9 – Processos de fluxo de ar e gases de combustão. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004) 54
Figura 10 – Elementos comuns presente em caldeiras. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004) 55
Figura 11 – Fornalha Ciclônica 57
Figura 12 – Circuito típico de um queimador a gás 58
Figura 13 – Circuito do queimador 59
Figura 14 – Perfil de abertura e fechamento da válvula de bloqueio 60
Figura 15 – Sistema de controle de combustão - Combustion control system (CCS) . . . 61
Figura 16 – Sistema de gerenciamento de queimadores - Burner management system (BMS) 62
Figura 17 – DESCRIÇÃO 63
Figura 18 – DESCRIÇÃO 63
Figura 19 – Sistema com perdas concentradas 65
Figura 20 – Efeito isolado do volume V_c 66
Figura 21 – Efeito isolado da resistência fluídica 67
Figura 22 – Comparação entre $\overline{P_{bfg}}(n)$ e medições *in-locu* 78
Figura 23 – Demonstração dos valores de $q_{bfg}(n)$ calculados 79
Figura 24 – Fluxograma da sequência de acendimento de um queimador de BFG 81
Figura 25 – Máquina de estados a elementos finitos do queimador 82
Figura 26 – Máquina de estados a elementos finitos do queimador 86
Figura 27 – Simulação do sistema MLD em malha aberta : Entradas e vazões 91
Figura 28 – Simulação do sistema MLD em malha aberta: Evolução dos estados do FSM 92
Figura 29 – Simulação do sistema MLD em malha aberta: Comparação com resposta não-linear 92
Figura 30 – Fluxograma da simulação do controle do modelo completo 94
Figura 31 – Fluxograma da simulação e controle preditivo 108

Figura 32 – Exemplo de simulação da sequência de degraus para avaliação de desempenho 111
Figura 33 – Sintonia 112
Figura 34 – Simulação do sistema sem distúrbio na medição ou falha 117
Figura 35 – Simulação do sistema sem distúrbio na medição ou falha (Evolução dos estados) 117
Figura 36 – Simulação do sistema com distúrbio na medição de vazão 118
Figura 37 – Comparação entre estados reais e estimados 118
Figura 38 – Simulação do sistema com distúrbio na medição de vazão introduzido em $t = 550s$ 119
Figura 39 – Comparação entre estados reais e estimados 120
Figura 40 – Simulação do sistema com apagamento de chama em $t = 400s$ e $t = 630s$ . . 121
Figura 41 – Simulação do sistema com apagamento de chama em $t = 400s$ e $t = 630s$ (Evolução dos estados) 121
Figura 42 – Comparação entre comtrole via PI e HMPC 122
Figura 43 – Fluxograma da sequência de acendimento de um ignitor 126
Figura 44 – Fluxograma da sequência de acendimento de um estabilizador de chama a gás 127
Figura 45 – Fluxograma da sequência de acendimento de um queimador de BFG 129
Figura 46 – Máquina de estados a elementos finitos do ignitor 132
Figura 47 – Máquina de estados a elementos finitos do estabilizador 133
Figura 48 – Simulação do Ignitor 134
Figura 49 – Simulação do Estabilizador: operação normal 135
Figura 50 – Simulação do Estabilizador: falha de chama 135
Figura 51 – Simulação do Estabilizador: falha de abertura total da válvula 136
Figura 52 – Simulação do Queimador com falha em $t = 154s$ 137

Lista de tabelas

Tabela 1 – Conectivos Lógicos. 38
Tabela 2 – Conversão entre relações lógicas básicas e inequações inteiras. 39
Tabela 3 – Conversão entre relações lógicas-contínuas básicas e inequações inteiras. . . 40
Tabela 4 – Recomendação de modelos para cada cenário de utilização 42
Tabela 5 – Tabela parâmetros R_{tub} 74
Tabela 6 – Tabela parâmetros $R_{tub}(n, \bar{u})$ e $R'_{tub}(n, \bar{u})$ 74
Tabela 7 – Resistência fluídica das válvulas de bloqueio combinadas 76
Tabela 8 – Valores de vazão máxima (Q_{max}) por número de queimadores 76
Tabela 9 – Valores de $U_{min}(n)$ calculados 77
Tabela 10 – Pressão de alimentação para cada número de queimadores acesos $\overline{P_{bfg}}(n)[mmH_2O]$ 78
Tabela 11 – Vazão em ponto de operação $\overline{q_{bfg}}(n)[dam^3/h]$ 79
Tabela 12 – Variáveis do Queimador 82
Tabela 13 – Variáveis do FSM do queimador individual 85
Tabela 14 – Resumo do modelo fornecido pelo *Toolbox* 90
Tabela 15 – Ganhos em regime 97
Tabela 16 – Resumo do modelo fornecido pelo *HYSDEL Toolbox* para o otimizador de n 100
Tabela 17 – Exemplos de resultados do otimizador ($N_{ótimo}$) 102
Tabela 18 – Degraus para avaliação de desempenho 111
Tabela 19 – Degraus para avaliação de desempenho 115
Tabela 20 – Variáveis do Subsistema do Ignitor 131
Tabela 21 – Variáveis do Subsistema do Estabilizador 133
Tabela 22 – Glossário de funções e arquivos 158

Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
TQ	Torre de Queima
CPLEX	IBM ILOG CPLEX Optimization Studio
CHM	Máquinas Híbridas Compostas
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
DAE	Equação Diferencial Algébrica
HS	Sistemas Híbridos
HA	Autômatos Híbridos
PWA	Sistemas Afins por Partes
MLD	Sistemas Dinâmicos Lógicos Mistos
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench
LC	Sistemas Lineares complementares
ELC	Sistemas Lineares complementares estendidos
DHA	Autômato discreto híbrido
SAS	Sistema comutado por partes
FSM	Maquina de estados finitos
EG	Gerador de eventos
MS	Seletor de modos
CNF	Forma conjuntiva normal
HYSDEL	HYbrid System DEscription Language
BFG	Queimadores de gás de alto forno (*Blast Furnace Gas*)
COG	Gás de coqueria (*Coke Oven Gas*)
NFPA	NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION

CCS	Sistema de controle de combustão
BMS	Sistema de gerenciamento de queimadores
SIS	Sistema de intertravamento de segurança
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
ND	Não Detectada
TA	Totalmente Aberta
FEC	Fechada
FIN	Finalizado
CTD	Contando
RHC	janela de horizonte móvel
MPC	Controle preditivo baseado em modelo
MMPS	sistemas max-min-plus

Lista de símbolos

$\delta u(k)$	Variação da posição da válvula no instante k.
X	Variáveis de decisão do problema de otimização do HMPC.
$d(k)$	Estado que representa distúrbio integrativo.
P_{bfg}	Pressão de alimentação do gás BFG[mmH_2O].
q_{bfg}	Vazão de gás BFG pela placa de orifício [dam³/h].
R_{ori}	Resistência fluídica equivalente referente a placa de orifício.
P_{ori}	Pressão após a placa de orifício[mmH_2O].
V_{ori}	Volume da tubulação até a placa de orifício [dam³].
$R_{tub}(n, u)$	Resistência fluídica equivalente da válvula de controle.
q_{tub}	Vazão de gás BFG na tubulação até as válvulas de bloqueio [dam³/h].
V_{tub}	Volume da tubulação até a placa de orifício [dam³].
q_{VB}	Vazão de gás BFG nas válvulas de bloqueio [dam³/h].
P_{ori}	Pressão interna da fornalha [mmH_2O].
$\overline{q_{bfg}}$	Vazão de gás no ponto de operação [dam³/h].
x_1	Variação de vazão de gás q_{bfg} em relação a $\overline{q_{bfg}}$.
x_2	Variação de vazão de gás q_{VB} em relação a $\overline{q_{bfg}}$.
K_n	Constantes que definem a dinâmica comutada por partes ($n = 0, 1..., 8$).
Q_{max}	Vazão máxima de gás BFG pelas válvulas de bloqueio [dam³/h].
U_min	Abertura mínima da válvula de controle.

Sumário

1 INTRODUÇÃO 25
1.1 Objetivos Geral e Específicos 29
1.2 Estado da arte sobre controle avançado em Caldeiras 30
1.3 Organização do Texto 31

2 REFERENCIAL TEÓRICO 33
2.1 Sistemas Híbridos 33
2.1.1 Automato Híbrido Discreto 35
2.1.1.1 Sistema Comutado por Partes (SAS) 35
2.1.1.2 Gerador de Evento (EG) 36
2.1.1.3 Máquina de Estado Finita (FSM) 36
2.1.1.4 Seletor de modo (MS) 37
2.1.2 Lógica e Programação Inteira Linear 37
2.1.3 Sistema Híbrido MLD 41
2.1.4 Caracterização do MLD no HYSDEL 41
2.2 MPC de sistemas híbridos 43
2.2.1 Problema de controle genérico 44
2.2.2 MPC Híbrido com integrador 46
2.3 Procedimentos para resolução do problema de controle 47
2.4 Filtro de Kalman com modelo de ruído com *offset* (média diferente de zero) 49
2.5 Caldeiras: Tipos e sistemas 52
2.5.1 Caldeiras Aquatubulares 52
2.5.1.1 Tecnologia de combustão e suprimento de ar 53
2.5.1.2 Caracteristicas usuais de uma caldeira aquatubular 54
2.5.2 Histórico das modelagens dinâmicas 54
2.6 Caldeira utilizada no estudo : especificações e detalhamento 56
2.6.1 Descrição do sistema de vazão de gás da fornalha 56
2.6.2 Operação segura de uma fornalha 60
2.7 Modelagem dos ciclos de acendimento governado pelo BMS 62

3 MODELAGEM DO SISTEMA COMUTADO POR PARTES (SAS) DA VAZÃO DE COMBUSTÍVEIS DA FORNALHA 65
3.1 Determinação dos parâmetros do sistema 73
3.1.1 Cálculo da resistência R_{ori} 73
3.1.2 Cálculo da resistência $R_{tub}(n, \bar{u})$ e sua derivada $R'_{tub}(n, \bar{u})$ 73

3.1.3 Cálculo da resistência fluídica $R_{VB}(n)$ . . . 74
3.1.4 Limite superior de vazão (Q_{max}) . . . 76
3.1.5 Limite inferior de abertura da válvula de controle (U_{min}) . . . 76
3.1.6 Cálculo da pressão de fornecimento $P_{bfg}(n)$ . . . 77
3.1.7 Cálculo do dos pontos de operação $\overline{q_{bfg}}(n)$ . . . 78
3.2 Modelagem das máquinas de estado da fornalha (FSM) . . . 80
3.2.1 Máquina de estado do Queimador único . . . 80
3.3 Modelo MLD Completo da Fornalha . . . 83
3.3.1 Considerações gerais e modificações no FSM da Fornalha . . . 83
3.3.2 Equações do SAS, MS e EG da Fornalha . . . 84

4 IMPLEMENTAÇÃO DO SIMULADOR . . . 93
4.1 Controle Preditivo com modelo completo . . . 93
4.2 Controle Preditivo com modelos simplificados . . . 95
4.3 Otimizador e modelo para cálculo do número de queimadores . . . 96
4.4 Filtro de Kalman . . . 102
4.5 Algoritmo do Simulador . . . 105
4.6 Sintonia do MPC Híbrido da fornalha . . . 109
4.6.1 Sintonia dos pesos . . . 110
4.7 Cálculo das matrizes de covariância dos ruídos de processo e medição 112

5 ESTUDOS DE CASO . . . 115
5.1 Caso 1: Simulação sem distúrbio de medição, sem agarramento ou falha de queimador . . . 116
5.2 Caso 2: Simulação com ruído branco na medição de q_{BFG} . . . 117
5.3 Simulação com agarramento de $\pm 10\%$ na válvula de controle de gás 119
5.4 Simulação com apagamento inesperado da chama de queimadores . 120
5.5 Simulação de sistema controlado com PI e comparado ao HMPC . 121

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS . . . 123

ANEXO A – FLUXOGRAMAS DOS CICLOS DE ACENDIMENTO DE UMA CALDEIRA . . . 125
A.1 Ciclo de acendimento do ignitor . . . 125
A.2 Ciclo de acendimento do estabilizador . . . 126
A.3 Ciclo de acendimento do queimador . . . 128

ANEXO B – MÁQUINAS FINITA DE ESTADO IGNITOR/ESTABILIZADOR . . . 131
B.1 Máquinas Finita de estado Ignitor . . . 131
B.2 Máquinas Finita de estado Estabilizador . . . 132

B.3 Simulação da máquina de estado de um único queimador 133
B.3.1 Simulação do ignitor 134
B.3.2 Simulação do estabilizador 134
B.3.3 Simulação do queimador 136

REFERÊNCIAS 139

APÊNDICES 145

APÊNDICE A – MATRIZES DO CONTROLE PREDITIVO GENÉRICO BASEADO NO MODELO MLD 147
A.1 Cálculo e determinação dos parâmetros da função custo 147
A.2 Restrições de Igualdade 149
A.3 Inequações 153
A.4 *Scripts* geradores das matrizes para o HMPC 155

APÊNDICE B – CÓDIGOS 157
B.1 Glossário de códigos 157
B.2 Código HYSDEL fornalha simplificada 159
B.3 Código do simulador não linear e cálculo do Filtro de Kalman 164

1 Introdução

A metalurgia esteve presente na vida humana durante os últimos cinco mil anos. Sendo a siderurgia um importante setor, esta lida com a fabricação de aço e ferro fundido a partir do minério de ferro. Reconhecida como indústria de base, a siderurgia abastece diversos setores econômicos como indústria automobilística, construção civil, indústria de eletrodomésticos e outros bens duráveis, indispensáveis ao desenvolvimento econômico de um país. (PENA; SALLES; Oliveira Jr,) O aço é produzido a partir de três tipos de matérias primas básicas: materiais com alta concentração de ferro tal como minério de ferro, sucatas de ferro e aço; materiais fundentes para purificação do aço como pedras de calcário e dolomita; combustível para o processo de redução, como carvão vegetal, carvão mineral e coque. (MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V. P. F. M.; ARRIVABENE, 2003)

Há três principais tipos de usinas siderúrgicas que fabricam aço: as semi-integradas, não integradas e as totalmente integradas. A diferença principal entre elas está no nível de verticalização. A usina integrada realiza todo o processo de preparação e redução do minério de ferro, refino, lingotamento e laminação. No último processo de laminação são produzidos os produtos finais, como perfis, vergalhões, tiras, boninas e chapas. (OZORIO, 2010)

O processo de produção do aço de uma usina integrada, está exemplificado no diagrama da **Figura** 1 e no fluxograma da **Figura 2**. Na usina siderúrgica integrada, em

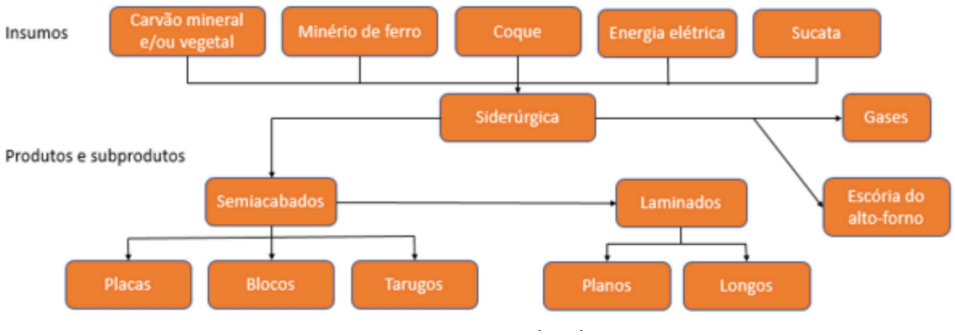


Figura 1 – Fluxograma de produção da usina siderúrgica integrada ArcelorMittal Tubarão.

ARCELORMITTAL BRASIL S.A.(2016).

cada etapa do processo de produção (coqueria, alto-forno e aciaria) ocorre a liberação de quatro tipos de combustíveis possíveis de serem reaproveitados:

- Gás de alto-forno (Blast Furnace Gas - BFG);
- Gás de coqueria (Coke Oven Gas - COG);

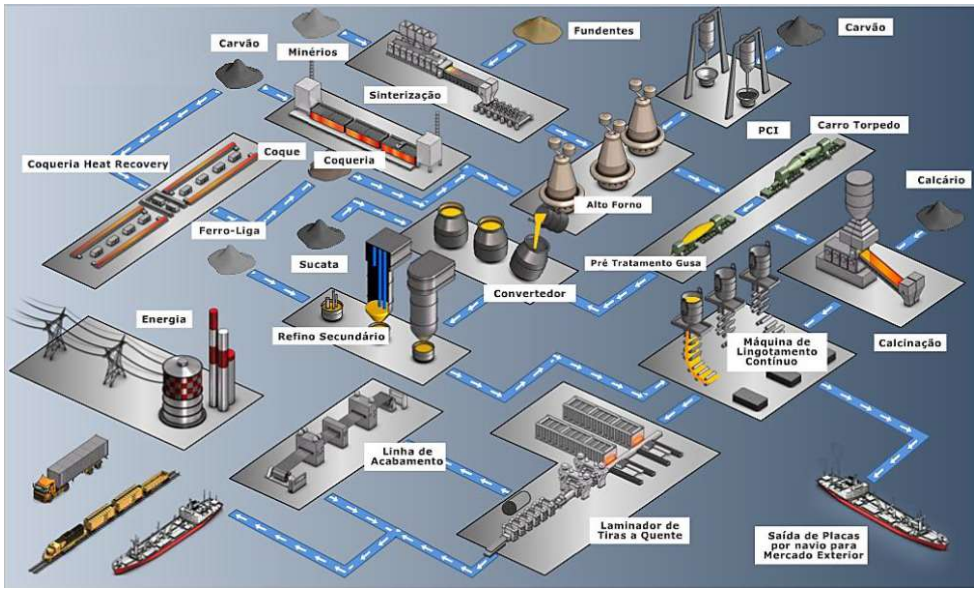


Figura 2 – Diagrama de produção da usina siderúrgica integrada ArcelorMittal Tubarão.

ARCELORMITTTAL BRASIL S.A.(2016).

- Gás de aciaria (Linz-Donawitz Gas – LDG ou BOFG);
- Alcatrão (TAR) - Óleo viscoso produzido na coqueria.

Estes gases geralmente são reaproveitados como fontes de combustível nas termelétricas. Os gases combustíveis são utilizados para aquecer as caldeiras que geram vapor pressurizado. Este vapor aciona as turbinas que estão acopladas à geradores produzindo então energia elétrica. Nestas usinas, estes gases e óleo são transportados, armazenados por um sistema de distribuição que inclui dutos, válvulas, instrumento, atuadores e sistemas de controle. A **Figura 3** ilustra o sistema de distribuição do BFG, COG e LDG mostrando como estes gases são transportados, armazenados e consumidos. O alcatrão é produzido em batelada e não está na figura, pois este é somente utilizado em baixa quantidade e o excesso é revendido. O objetivo principal do sistema de distribuição consiste em balancear o rotear destes combustíveis para serem utilizados nos processos industriais, alimentação das usinas termelétricas e comercialização do alcatrão, in natura. Cerca de 2% do aço produzido mundialmente é brasileiro, sendo que no ano de 2017 o Brasil exportou 7,7 bilhões de reais em produtos siderúrgicos (VIANA, 2018). Paralelo a cifra para exportação deste *commoditie*, são igualmente significativos os gastos energéticos para produção do aço vendido. Para suprir esta demanda energética, muitos centros siderúrgicos utilizam-se de combustíveis fosseis, aumentando então a emissão de gases poluidores na atmosfera. Entretanto, segundo Kanto Filho et al. (2017) nos últimos 50 anos houve uma redução em 60% no consumo energético para produção da tonelada de aço produzida, logo, melhorias subsequentes serão desafios cada vez maiores. Os principais focos para melhorar a sustentabilidade ambiental do setor siderúrgico está no melhor aproveitamento dos gases de

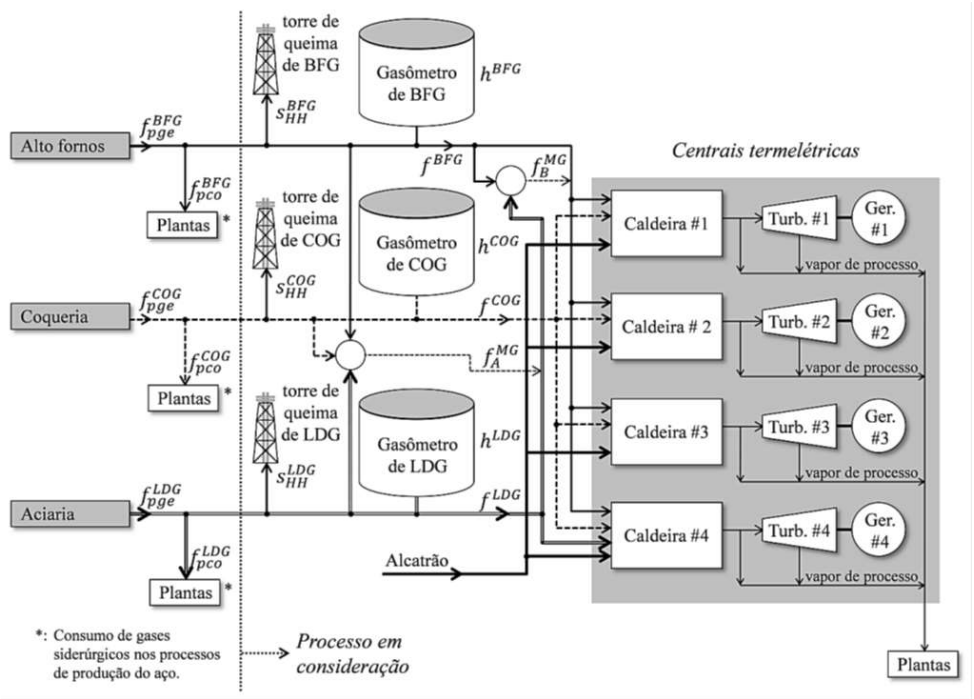


Figura 3 – Sistema de distribuição de combustíveis siderúrgicos.

ARCELORMITTAL BRASIL S.A. (2013) - Unidade Tubarão.

alto-forno e aciaria, que hoje se encontram entre 70% e 90% de reaproveitamento (Kanto Filho et al., 2017).

Portanto, a distribuição e consumo ótimo dos combustíveis gasosos são assuntos relevantes no âmbito econômico e ambiental, pois visa a diminuição na emissão de gás carbônico no meio ambiente e o aumento da eficiência energética do setor produtivo. Concentrado neste foco de reaproveitamento eficiente dos combustíveis gasosos Oliveira Jr. (2016) centralizou esforços na otimização de um sistema de gerenciamento e balanço de energia, de modo a gerenciar o consumo desses gases residuais gerados nos processos siderúrgicos. Neste estudo foi projetado não só o gerenciamento dos gases, mas também inciou-se a modelagem e controle preditivo das fornalhas, com o intuito de propor um sistema de controle avançado que integra os níveis de otimização e controle regulatório das vazões dos gases usados na caldeira.

Segundo Oliveira Jr. (2016), em usinas integradas, geralmente operadores do Centro de Utilidades (Centro de Energia), operam diretamente no despacho de combustíveis, destinando os combustíveis armazenados nos gasômetros para queima nas caldeiras e consequentemente produção de energia. Para isto estes operadores administram os gasômetros sempre em nível alto, para desta forma garantir o funcionamento ininterrupto da rede elétrica. Entretanto, quando há uma queda no consumo, ou um aumento na produção do gás, estes gasômetros atingem os limites máximos de armazenamento. Para então manter condições de operação seguras, automaticamente a torre que queima (TQ) é acionada e

este gás sobressalente é queimado na atmosfera, desperdiçando o poder calorifico do mesmo. Outra questão operacional está na acuidade do operador das caldeiras das termelétricas a gás. Este deve estabelecer, a cada situação de consumo e produção, um tipo de combustível para ser utilizado e a quantidade de queimadores a serem acionados. Anexo a decisões mencionadas o operador ainda precisa executar numerosas manobras para acendimento dos queimadores das caldeiras da termelétrica.

Oliveira Jr. (2016) propôs em sua tese um sistema para gerenciar de modo eficiente o consumo dos gases, separando-o em duas partes: nível de otimização - determinação dos volumes combustíveis a serem consumidos durante intervalo de tempo - e no nível de controle avançado para assegurar que os objetivos definidos no nível de otimização sejam adequadamente alcançados a partir da intervenção sobre o nível de controle regulatório, veja **Figura 4**. O nível de otimização foi implementado no MATLAB enquanto que o nível de controle avançado foi implementado no aplicativo Simulink do mesmo programa. Conforme Oliveira Jr. (2016), a programação no Simulink tem alta complexidade de implementação, devido a elevada quantidade de restrições geradas na modelagem dos queimadores. Além disto, os blocos que estruturam o controle preditivo, no Simulink, foram desenvolvidos por Torrisi et al. (2002), os quais não permitem modificar facilmente o algoritmo de controle, prejudicando assim o desenvolvimento de novas estratégias de controle, integração e correção de erros.

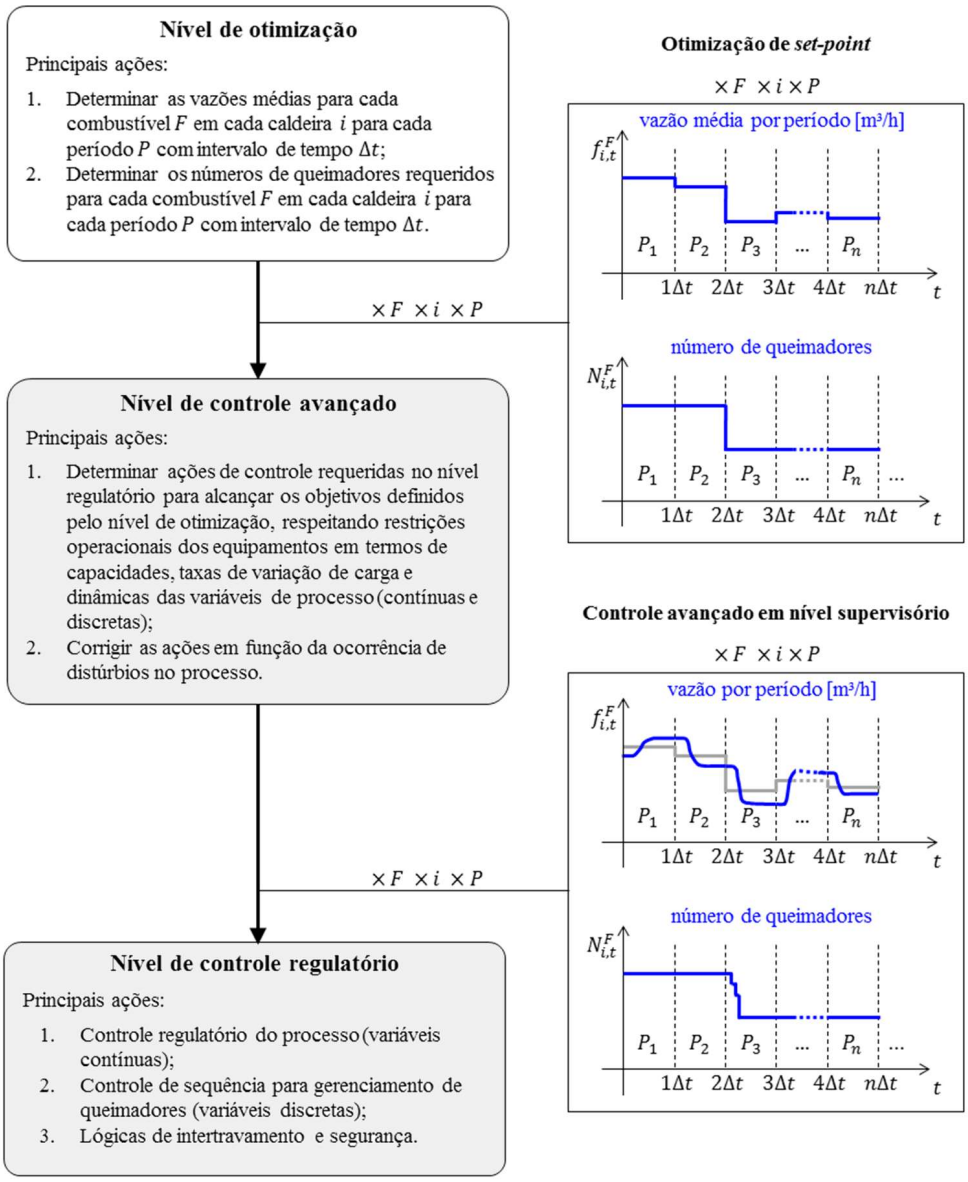


Figura 4 – Solução do problema de distribuição de combustíveis siderúrgicos através de vários níveis.

Fonte: (Oliveira Jr., 2016).

1.1 Objetivos Geral e Específicos

Com o intuito de realizar uma simulação integrada, entre os níveis de otimização e regulatório de forma mais flexível, este trabalho tem como objetivo geral a reprogramação da modelagem da fornalha e do controle preditivo da vazão dos queimadores da fornalha via programação estruturada em MATLAB (marcado em cinza na **Figura 4**). O objetivo primário deste trabalho é desenvolver um simulador do controle de vazão de gás capaz de seguir um setpoint enviado pelo otimizador, considerando um controle preditivo baseado em modelo híbrido da fornalha (HMPC - *Hybrid Model Preditive Control*). O simulador deve ser eficiente computacionalmente e capaz de rejeitar ruídos brancos de medição e

distúrbios provocados por agarramento na válvula de controle. Desta forma, o controle avançado será suficientemente robusto para seguir os pontos de ajustes fornecido pelo nível de otimização. Para isto, é necessário realizar os seguintes objetivos específicos:

(i) Desenvolver uma nova modelagem das dinâmicas comutadas por partes para a fornalha, presente na Arcelor Mittal em Vitória, Espírito Santo;

(ii) Desenvolvimento de um algoritmo de controle MPC (*Model Predictive Control*) para sistemas híbridos que representam as dinâmicas de vazão dos gases da fornalha;

(iii) Desenvolvimento de um filtro de Kalman para o sistema híbrido considerando ruídos de medição e erros de modelagem;

(iv) Atualização do método de solução dos problemas de otimização utilizando ferramentas atuais como CPLEX;

Este trabalho apresenta-se como relevante para o estudo em aplicação de MPC à sistemas de geração de energia com modelagem híbrida em especial sistema MLD. Vale ressaltar que as principais diferenças deste trabalho, ao executado por Oliveira Jr. (2016), estão na modelagem do sistema de equações que definem a dinâmica de vazão, a estratégia de implementação do HMPC, estimativa dos estados não mensurados e simulação do sistema. Propõe-se a utilização programação estruturada e desenvolvimento de um método universal e reutilizável para aplicação de um controle preditivo híbrido. Para a simulação, substitui-se o método de simulação via *Simulink* do MATLAB por *scripts* de simulação que podem ser facilmente modificados. Esta nova abordagem de simulação e cálculo das ações futuras, no controle preditivo, pretende reduzir o esforço e tempo de computação em conjunto com uma contribuição ao programa de pós graduação, pois permite maior flexibilidade para alterações e melhorias futuras.

Outro ponto relevante está na aplicação de um observador de estado a este sistema híbrido, em especial o SAS (*Switched Affine System*), para rejeitar ruídos proveniente das medições/modelagem.

1.2 Estado da arte sobre controle avançado em Caldeiras

Na literatura, diversos estudos abordam o tema de modelagem e controle de sistemas fornecedores de energia e gerenciamento de caldeiras. Solberg et al. (2008) apresenta um MPC para controle de pressão e temperatura de uma caldeira via chaveamento de dois queimadores de baixo e alto volume de queima, utilizando modelo MLD. Heymann, Lin e Meyer (1997) e Keshavarz et al. (2007) propõem controles do nível de água nas caldeiras de vapor, acionando as bombas de alimentação de água; o primeiro utiliza técnicas de controle específicas para modelos de Máquinas Híbridas Compostas (CHM), e o segundo utiliza a

técnica de controle de horizonte deslizante a um sistema MLD. Rusinowski, H. and Szapajko, G. and Stanek (2008) propuseram um modelo para uma usina termelétrica utilizando-se de modelagem analítica e modelagem por meio de inteligência artificial (redes neurais). Sarailoo, Rahmani e Rezaie (2012), realizam estudo sobre um subsistema da termelétrica, englobando caldeira e turbina, descrevendo este como um sistema MLD (*Mixed Logical Dynamics*) em conjunto com modelo afim por partes (PWA - *Piece Wise Affine*) para descrever a dinâmica contínua. Dongfeng e Yingbao (2018) apresentam métodos de controle para minimizar o gasto com combustível e emissão de NO_x; o primeiro utiliza um modelo neural de uma fornalha de caldeira, em LABVIEW, usando predição via rede neural e controle a partir de um sistema de evolução diferencial melhorada; o segundo utiliza controle *Fuzzy* para otimizar o consumo de combustível com baixo custo computacional.

Baseado neste estudo revisado, percebe-se a relevância que o controle de caldeiras e consumo de combustível nas fornalhas exercem no meio acadêmico. No que tange o controle preditivo e modelos híbridos em fornalhas de caldeira percebe-se que até o momento não foi observado nenhum artigo que aborde HMPC no controle da fornalha.

1.3 Organização do Texto

Primeiramente, no capítulo 2, realiza-se uma revisão bibliográfica sobre a teoria necessária para realizar o controle avançado da vazão dos queimadores da fornalha como: sistemas híbridos, Filtro de Kalman de sistemas híbridos, e controle preditivo de sistemas híbridos. Em seguida, no capítulo 3 atualiza-se o modelo comutado por partes (SAS) do sistema de controle de vazão dos gases de combustão da caldeira a partir dos princípios físicos que englobam fenômenos de transporte, linearizando as equações para simplificar o modelo e resultar em controle e simulações mais eficientes. No capítulo 4 apresenta-se a implementação do simulador que aplica o controle preditivo utilizando o modelo híbrido em conjunto com o Filtro de Kalman para estimar os estados não mensuráveis. No capítulo 5 apresenta-se os estudos de caso que simulam cenários realísticos encontrados no controle de vazão de gás, incluindo ruído branco e agarramento de válvula.

2 Referencial teórico

De acordo com o mencionado no capítulo 1, este trabalho abordará três principais tópicos: sistemas híbridos, caldeiras e controle preditivo. Estes assuntos possuem uma literatura ampla, com diversas ramificações e demandam um referencial teórico básico e contextualização de modo a justificar proposições e introduzir separadamente estes conteúdos. Na seção 2.1 apresenta-se um resumo sobre sistemas híbridos e principalmente o sistema de dinâmica lógica mista (MLD). Na seção 2.2 é realizada a revisão de alguns conceitos sobre controle preditivo, focado na temática de sistemas híbridos MLD. Na seção 2.3 aborda-se os procedimentos necessários para resolução do problema de otimização contido no controle preditivo de um modelo híbrido. Na seção 2.4, apresenta-se ao leitor uma revisão sobre observadores, focando no Filtro de Kalman e introduz a técnica de rejeição de ruídos constantes. Por fim, na seção 2.5 revisa-se os diversos tipos de caldeiras e estreita o foco do leitor no tipo de caldeira utilizado neste trabalho e as considerações das modelagens seguintes.

2.1 Sistemas Híbridos

Modelos híbridos relacionam duas áreas historicamente desconectadas, modelos binários, regido por lógicas sequenciais e/ou combinacionais, e sistemas contínuos construídos a partir de equações a diferença ou diferenciais. Na engenharia de controle, os sistemas modelados a partir de equações diferenciais são derivados de leis da física ou modelados a partir de técnicas de identificação, aplicada a dados experimentais do sistema. Estes modelos contínuos são criados e combinados com modelos de controladores que visam a estabilização, rejeição a ruido e robustez de sistemas. Sistemas de eventos discretos, por sua vez, são abordados pela ciência da computação e sistemas digitais.(MIGNONE, 2002a).

Sistemas de eventos discretos são subdivididos em duas principais classes, sistemas qualitativos e quantitativos. A primeira classe trata da natureza qualitativa das sequências de eventos, com foco em evitar conflitos de eventos, garantir controlabilidade e observabilidade. A segunda classe concentra-se na natureza quantitativa, ou seja, na performance destes sistemas quanto ao tempo. Os eventos são baseados em limites temporais e podem ser definidos de forma determinística ou aleatória. Sistemas qualitativos, são descritos pelas teorias de Autômatos, redes Petri e suas variações. Os sistemas quantitativos são divididos em dois subsistemas, determinísticos no tempo, descritos por rede Petri e álgebra min-max; sistemas estocásticos no tempo são descritos pela teoria de filas (WESTPHAL, 2001).

Modelos híbridos são ferramentas generalistas que podem descrever matematicamente sistemas complexos que são descritos separadamente por vários subsistemas. Pode-se citar sistemas mecânicos, como todos sistemas internos de um automóvel, baseados em eventos discretos sendo estes representados pelas troca de marchas, freios, sistemas de segurança e sistemas contínuos como alimentação de combustível. Sistemas elétricos e digitais podem ser modelados como sistemas híbridos, por exemplo, para descrever lógicas combinacionais/sequenciais, relés, chaves e comportamentos de histerese. Igualmente pode-se estender o modelo híbrido para sistemas mais complexos e extensos como redes de computadores, controle de tráfico aéreo e outros (DRGOňA, 2012).

A formulação teórica de sistemas híbridos é recente. Umas das primeiras tentativas de criar uma estrutura matemática para descrever sistema híbridos foi realizada por Barton e Pantelides (1994).Estes autores utilizaram da teoria da equação diferencial algébrica (DAEs), junto a um conjunto de indexações, para descrever um modelo discreto de um sistema.

Na literatura as estruturas mais utilizadas são autômatos temporizados (SILVA et al., 2001), e Autômatos Híbridos (*Hybrid Automata* - HA) (ALUR et al., 1993). Nos últimos anos, uma seleção de subclasses de sistemas híbridos se destacaram neste nicho literário, sendo estas: Sistemas Afins por Partes (*PieceWise Affine systems* - PWA)(SONTAG, 1981), Sistemas Dinâmicos Lógicos Mistos (*Mixed Logical Dynamical*)(BEMPORAD; MORARI, 1999), Sistemas Lineares complementares (LC) (HEEMELS; SCHUMACHER; WEILAND, 2000), Sistemas Lineares Complementares Estendidos(ELC), (SCHUTTER; MOOR, 1999) e os sistemas *Max-Min-plus-Scaling* (SCHUTTER; BOOM, 2006). Cada subclasse de sistema híbrido apresentada, possui características de análise e projeto específicas para cada tipo de problema. Entretanto, um sistema descrito por qualquer subclasse supra especificada por ser transformado de forma equivalente entre todos os formalismos citados, com exceção do Automato Híbrido, como mostra Heemels, Schutter e Bemporad (2001).

Dos modelos citados, o automato híbrido (HA) é muito utilizado para descrever de forma intuitiva os sistemas. Na literatura de controle automático é comum descrever sistemas por formulações contínuas no tempo, para em seguida torná-lo discreto no tempo, por meio de técnicas adequadas. Pela natureza discreta, inerente a sistemas controlados por equipamentos e microcontroladores, sistemas híbridos são melhores modelados diretamente como discretos. Adicionalmente, um autômato discreto híbrido (DHA) não permite transições instantâneas, pois cada transição está vinculada a um tempo de amostragem, tal como ocorre em sistemas microprocessados.

A seguir será feito um levantamento das formulações matemáticas, de acordo com (LUNZE; LAMNABHI-LAGARRIGUE, 2009) e (BORRELLI; BEMPORAD; MORARI, 2011) de um modelo DHA e MLD e breve resumo sobre a conversão de um sistema DHA para MLD.

2.1.1 Automato Híbrido Discreto

O modelo DHA generaliza muitos modelos orientados a ferramentas computacionais para sistemas híbridos. Portanto, este representa o ponto de partida para solução de análises complexas e problemas de síntese de sistemas híbridos.

Os modelos DHA são uma abstração matemática das características fornecidas por outras subclasses de sistemas híbridos(tais como MLD, PWA e etc). O DHA resulta da conexão de um sistema comutado por partes (SAS - Switched Affine System) no qual fornece a parte contínua e uma máquina de estados finitos (FSM - Finite State Machine), incorporando os estados discretos conforme **Figura 5**. A interação entre ambos é realizada por dois elementos de conexão, o gerador de eventos (EG - Event Generator) e o seletor de modos (MS - Mode Selector). O gerador de eventos extrai sinais lógicos da parte contínua e estes eventos disparam a transição de estados no FSM. O seletor de modos (MS) combina todas as variáveis logicas (estados, entradas e eventos) para selecionar o modo de dinâmicas contínuas do SAS. No funcionamento do MS não é exclusivo a existência de um FSM, operando apenas com as entradas e eventos gerados.

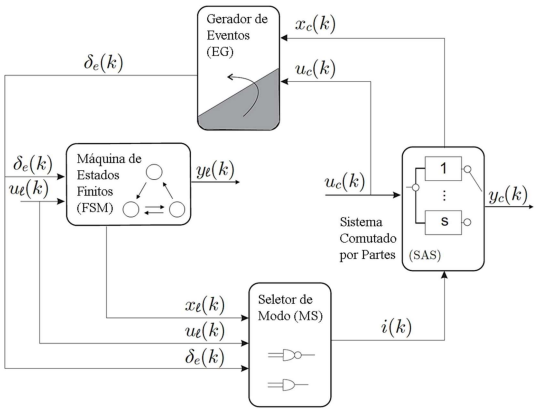


Figura 5 – Autômato Híbrido Discreto, DHA - Discrete Hybrid Automata.

Fonte: TORRISI; BEMPORAD (2004)

Por convenção, nas próximas páginas , qualquer variável binária (0-1) será tratada como um número (sujeito a operações aritméticas) e também como uma variável Booleana (sujeita funções Booleanas).

2.1.1.1 Sistema Comutado por Partes (SAS)

Um sistema comutado por partes é uma coleção de equações diferencias:

$$x_c(k+1) = A^i(k)x_c(k) + B^i(k)u_c(k) + f^i(k), \tag{2.1a}$$

$$y_c(k) = C^i(k)x_c(k) + D^i(k)u_c(k) + g^i(k), \tag{2.1b}$$

sendo $k \in \mathbb{K}$ o indicador de tempo, $x_c \in \mathbb{R}_c^n$ é o vetor em espaço de estado, $u_c \in \mathbb{R}_c^m$, é o vetor de entradas contínuas exógenas, $y_c \in \mathbb{R}_c^p$, é o vetor de saída continua,

$\{A^i, B^i, C^i, D^i, g^i, f^i\}_i \in \mho$ é a coleção de matrizes de dimensões correspondentes ao sistema e o modo $i(k) \in \mho \triangleq \{1, \ldots, s\}$ é o sinal de entrada que seleciona a dinâmica linear atual para o tempo k.

2.1.1.2 Gerador de Evento (EG)

Um gerador de eventos é um objeto matemático que gera um vetor binário $\delta_e(k) \in 0, 1_e^n$, dado ao acontecimento de eventos que obedecem condições de fronteira (*Threshold*).

$$\delta_e(k) = f_H(x_c(k), u_c(k), k0), \tag{2.2}$$

sendo $f_H : \mathbb{R}_c^n \; X \; \mathbb{R}_c^n \; X \; \mathbb{K}_{Z_{\geq 0}} \longrightarrow \mathbb{D} \subseteq \{0,1\}^{n_e}$ um vetor de funções que descrevem um hiperplano e $Z_{\geq 0} \triangleq 0, 1, \ldots$ é um conjunto de inteiros não negativos. Há dois tipos de eventos possíveis de serem formulados pelo EG,

$$[\delta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{i}}(k) = 1] \longleftrightarrow [kT_s \geq \tau_0], \tag{2.3a}$$

$$[\delta_{\mathrm{e}}^{\mathrm{i}}(k) = 1] \longleftrightarrow [a^T x_c(k) + b^T u_c(k) \leq c], \tag{2.3b}$$

A equação (eq.) 2.3a descreve eventos baseados em condições de fronteira no tempo τ_0. Estas condições de fronteira são verificadas com um estado contínuo adicional $\tau(k+1) = \tau(k) + T_s$, sendo T_s o tempo de amostragem. Desta maneira, é possível descrever um sistema variante no tempo com um conjunto de equações lineares, para cada intervalo de tempo. A segunda eq. 2.3b representa os eventos causados por uma condição de fronteira. Esta é dependente dos estados do SAS e as entradas exógenas contínuas. O índice ^{i} denota o ith componente do vetor

2.1.1.3 Máquina de Estado Finita (FSM)

Maquinas de estados finitas são processos dinâmicos e discretos, que evoluem no tempo, de acordo com a função de atualização dado por 2.4 , composta por regras booleanas. A dinâmica de transição de uma FSM pode ser definida por duas principais classes, maquinas de estados finitas síncronas e assíncronas. As maquinas de estados utilizadas em um modelo DHA são do tipo síncrona pois as transições (atualização do estado atual) ocorrem somente nos tempos de amostragem.

$$x_l(k+1) = f_l(x_l(k), u_l(k), (\delta_e(k))), \tag{2.4}$$

sendo $x_l \in \{0,1\}^{n_l}$ o estado binário, $u_l \in \{0,1\}$ é a entrada exógena binaria , δ_e é a entrada exógena binária proveniente de EG, também define-se $f_l = \{0,1\}^{n_l} \; X \; \{0,1\}^{m_l} \; X \; \{0,1\}^{n_e} \longrightarrow \{0,1\}^{n_l}$ como uma função determinista booleana. Uma FSM pode ter saídas que integram o sistema híbrido definido por:

$$y_l(k) = g_l(x_l(k), u_l(k), \delta_e(k)) \tag{2.5}$$

em que $y_l \in \{0,1\}^{p_l}$ e $y_l : \{0,1\}^{n_l}\ X\ \{0,1\}^{m_l}\ X\ \{0,1\}^{n_e} \mapsto \{0,1\}^{p_l}$ Um exemplo rápido de uma máquina de estado está mostrado na figura 6. Trata-se de um aquecedor elétrico, com interruptor bimetálico, comum a eletrodomésticos. Neste sistema há uma entrada $U_{início}$, que indica se o aquecedor está com chave geral ligada ($U_{início} = 1$), ou chave geral desligada($U_{início} = 0$) . Com a chave geral ligada e, simultaneamente, a temperatura não está na faixa desejada, ($Temp_D$), a placa metálica não estará flexionada, logo, $\delta_1 = 1$. Estando o aquecedor acima ou na faixa de temperatura desejada, $\delta_1 = 0$.

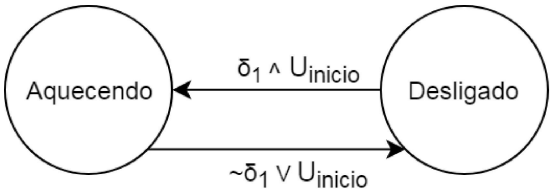


Figura 6 – Maquina de estado de um aquecedor com interruptor bimetálico. Fonte:Própria

$$EG : \Big\{ [\delta_1 = 1] \leftrightarrow [Temperatura <= Temp_D]$$

$$FSM : x_l(k+1) = \begin{cases} Aquecendo & \text{se } \delta_1 \wedge U_{inicio} \\ Desligado & \text{se } \sim \delta_1 \vee U_{inicio} \end{cases}$$

2.1.1.4 Seletor de modo (MS)

Em um DHA, o modo dinâmico $i(k) \in \mho \triangleq \{1, \ldots, s\}$ do SAS é uma função que depende do estado binário $x_l(k)$, a entrada binária $u_l(k)$ e os eventos $\delta_e(k)$. Sendo $i(k)$ uma codificação binária e $i(k) \in \{0,1\}^{n_s}$ tal que $n_s = [\log_2 s]$[1]. Tendo que o seletor de modo é uma função booleana $fM : \{0,1\}^{n_l}\ X\ \{0,1\}^{m_l}\ X\ \{0,1\}^{n_e} \mapsto \{0,1\}^{n_s}$, logo:

$$i(k) = \vartheta(x_l(k), u_l(k), \delta_e(k)) \tag{2.6}$$

2.1.2 Lógica e Programação Inteira Linear

O modelo DHA apresenta uma estrutura interessante, do ponto de vista intuitivo e de projeto de um sistema híbrido. Entretanto, para o emprego de técnicas de otimização, como controle preditivo, estes modelos não são apropriados pois são construídos por um misto de funções discretas e continuas (BORRELLI; BEMPORAD; MORARI, 2011). Uma forma de contornar este problema é transformar as lógicas proposicionais em um conjunto de inequações inteiras, para assim compor as restrições de um sistema de otimização.

[1] Qualquer vetor de variáveis discretas pode ser descrita em uma codificação booleana $a \in \{0,1\}^d(j)$, sendo $d(j)$ o número de bits usado para representar $a_1, \ldots, a_j$.Por exemplo $0, 1, 2$ por ser representado por $a \in \{0,1\}^2$, sendo $[0\ 0] \longrightarrow 0, [0\ 1] \longrightarrow 1, [1\ 0] \longrightarrow 2$

Métodos e peculiaridades destas transformações foram abordados por Mignone (2002a), Cavalier, Pardalos e Soyster (1990) e Williams (2013) e um resumo destes estudos será apresentado como revisão bibliográfica no assunto. Para iniciar a discussão da relação entre logicas proposicionais e inequações inteiras, cabe inicialmente apresentar algumas convenções e conceitos relacionadas a álgebra booleana. Os conectivos apresentados a seguir são utilizados para descrever as afirmações lógicas de forma estrutural.

Conectivos	Significado
$[\wedge]$	'E' lógico
$[\vee]$	'OU' lógico
$[\bar{\cdot}]$	Negação lógica
$[\longrightarrow]$	Implicação lógica
$[\longleftrightarrow]$	Equivalência lógica (se somente se)
$[\oplus]$	OU exclusivo lógico

Tabela 1 – Conectivos Lógicos.

Fonte: Mignone (2002)

Christiansen e Alexander (1997) apresentam em livro um tratamento didático sobre cálculo booleano, propriedades dos conectivos, equivalências e técnicas de simplificação de expressões booleanas. Os subsistemas, EG, MS e SAS, pertencentes ao DHA , definem em conjunto um grupo de proposições lógicas, como mencionado em 2.1.1.

Com o uso dos conectivos mostrados na **Tabela** 1 uma variável lógica X_1 pode ser descrita por uma combinação de declarações literais $X_2, \ldots, X_n$. Tomando-se X_1 para uma combinação de declarações literais $X_2, \ldots, X_n$, esta pode ser resolvida por técnicas de programação linear inteira, traduzindo as combinações declarações em inequações lineares contento variáveis binárias δ_i Mignone (2002a). Cavalier, Pardalos e Soyster (1990) discutem e reúnem técnicas para transformar relações lógicas simples entre variáveis em inequações e Mignone (2002c) apresenta uma coleção extensa de transformações que são mostradas resumidamente na **Tabela** 2 e 3. A **Tabela** 2 trata da transformação de lógicas combinacionais para proposições lógicas com variáveis inteiras e cada subsequente sistemas de inequações; a **Tabela** 3 reúne algumas transformações importantes entre relações de variáveis lógicas-continuas para proposições lógicas com variáveis inteiras seguido dos conjuntos de inequações. Considerando que para cada X_n existe uma função onde,

$$X_n = f(X_\alpha, \ldots, X_{\alpha_{n-1}})$$

, sendo α_i todos os outros literais diferentes de X_n. Desenvolvendo cada relação de X_n com os outro literais, tem-se uma relação geral entre variáveis booleanas:

$$F(X_1, \ldots, X_n) = \top, \tag{2.7}$$

em que F é uma eq. booleana.

Mignone (2002a) demostra que para transformações de relações puramente lógicas (lógicas combinacionais) não há necessidade explicita de criar novas variáveis para descrever uma relação lógica como a eq. 2.7, desde que seja executado algum pré-processamento destas relações em uma forma conjuntiva normal (CNF-*Conjuctive Normal Form*) ou pelo método geométrico (tabela verdade). Entretanto, para relações mistas lógicas-continuas, mesmo que se utilize de um pré-processamento CNF, é necessário introduzir novas variáveis para certas relações, como observa-se na **Tabela** 3 a inserção da variável z.

Relação lógica	**Proposições Lógicas**	**Equações/Inequações Inteiras mistas**
$E\ (\wedge)$ $X_1 \wedge X_2$	$[\delta_1 = 1] \vee [\delta_2 = 1]$	$\delta_1 = 1$ $\delta_2 = 1$
$X_3 \longleftrightarrow (X_1 \wedge X_2)$	$[\delta_3 = 1] \longleftrightarrow$ $[\delta_1 = 1] \vee [\delta_2 = 1]$	$-\delta_1 + \delta_3 \leq 0$ $-\delta_1 + \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 1$
$OU\ (\vee)$ $X_1 \vee X_2$	$[\delta_1 = 1] \wedge [\delta_2 = 1]$	$\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \geq 1$
$X_3 \longleftrightarrow (X_1 \vee X_2)$	$[\delta_3 = 1] \longleftrightarrow$ $[\delta_1 = 1] \wedge [\delta_2 = 1]$	$\delta_1 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 - \delta_3 \leq 0$ $-\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 \leq 0$
NÃO $(\neg)$ $\overline{X_1}$	$\overline{\delta_1 = 1}$	$\delta_1 = 0$
NOR $(\oplus)$ $X_1 \oplus X_2$	$[\delta_1 = 1] \oplus [\delta_2 = 1]$	$-\delta_1 + \delta_2 = 1$
$X_3 \longleftrightarrow (X_1 \oplus X_2)$	$[\delta_3 = 1] \longleftrightarrow$ $[\delta_1 = 1] \oplus [\delta_2 = 1]$	$-\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 \leq 0$ $-\delta_1 + \delta_2 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 - \delta_2 - \delta_3 \leq 0$ $\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 \leq 2$
CONDICIONAL $(\longrightarrow)$ $(X_1 \longrightarrow X_2)$	$[\delta_1 = 1] \longrightarrow [\delta_2 = 1]$	$\delta_1 - \delta_2 \leq 0$
BICONDICIONAL $(\longleftrightarrow)$ $(X_1 \longleftrightarrow X_2)$	$[\delta_1 = 1] \longleftrightarrow [\delta_2 = 1]$	$\delta_1 - \delta_2 = 0$

Tabela 2 – Conversão entre relações lógicas básicas e inequações inteiras.

Fonte: Mignone (2002)

Nesta tabela observa-se que a função $f(x)$ é utilizada para gerar condições lógicas baseado em fronteiras. Tem-se que:

$$X \triangleq f(x) \leq 0 \tag{2.8}$$

Relação lógica	**Proposições Lógicas**	**Inequações Inteiras mistas**
Implicação ($\longrightarrow$) $[f(x) \leq 0] \longrightarrow X$	$[f(x) \leq 0] \longrightarrow [\delta = 1]$	$f(x) \geq \epsilon(m - \epsilon)\delta$
$X \longrightarrow [f(x) \leq 0]$	$[\delta = 1] \longrightarrow [f(x) \leq 0]$	$f(x) \leq M - M\delta$
Se somente Se ($\longleftrightarrow$) $[f(x) \leq 0] \longleftrightarrow X$	$[f(x) \leq 0] \longleftrightarrow [\delta = 1]$	$f(x) \leq M - M\delta$ $f(x) \geq \epsilon(m - \epsilon)\delta$
Product Se X então $z = f(x)$ senão $z = 0$	$z = \delta.f(x)$	$z \leq M\delta$ $-z \leq -m\delta$ $z \leq f(x) - m(1 - \delta)$ $-z \leq -f(x) + M(1 - \delta)$

Tabela 3 – Conversão entre relações lógicas-contínuas básicas e inequações inteiras.

Fonte: Mignone (2002)

para $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ e assumindo que $x \in \mathbb{X}$ onde $\mathbb{X}$ é uma conjunto limitado definido por:

$$M \triangleq \max_{x \in \mathbb{X}} f(x) \tag{2.9}$$

$$m \triangleq \min_{x \in \mathbb{X}} f(x) \tag{2.10}$$

$$\tag{2.11}$$

Teoricamente superestimar o limite máximo M de $f(x)$ e subestimar o valor mínimo m de $f(x)$ é suficiente para caracterizar a eq. 2.8 . Entretanto, convém determinar valores mínimos zelando pela precisão de máquina do sistema micro controlado que irá executar estas operações matemáticas. Garantindo assim que a função objetivo tenha uma solução viável. Transformando os literais X em variáveis binárias δ obtém-se as seguintes inequações inteiras mistas:

$$f(x) \leq M - M\delta f(x) \geq \epsilon + (m - \epsilon)\delta \tag{2.12}$$

em que $\epsilon \geq 0$ é a tolerância e tipicamente tem o valor de precisão de máquina.

2.1.3 Sistema Híbrido MLD

O modelo MLD destaca-se pela generalidade de incluir restrições de operação, conhecimentos heurísticos sobre os processos. A forma geral do MLD é apresenta a seguir.

$$x(t+1) = Ax(t) + B_1u(t) + B_2\delta(t) + B_3z(t) \tag{2.13a}$$

$$y(t) = Cx(t) + D_1u(t) + D_2\delta(t) + D_3z(t) \tag{2.13b}$$

$$E_2\delta(t) + E_3z(t) \leq E_1u(t) + E_4x(t) + E_5 \tag{2.13c}$$

onde $x \in R^{n_c} \times \{0,1\}^{n_l}$ são estados reais e binários, u $\in R^{m_c} \times \{0,1\}^{m_l}$ são entradas reais e binárias, $y \in R^{p_c} \times \{0,1\}^{p_l}$ são saídas reais e binárias, $\delta \in \{0,1\}^{r_l}$ e $z \in R^{r_c}$ representam, respectivamente, variáveis auxiliares binárias e reais que definem os modos de operação. A transformação da máquina de estados e equações dinâmicas dos sistemas híbridos na forma MLD requer a aplicação de um conjunto de regras, descritos em (BEMPORAD; MORARI, 1999) utilizando-se dos meios discutidos na seção 2.1.2. . Bemporad (BEMPORAD; FERRARI-TRECATE; MORARI, 2000) apresenta como transformar o modelo abstrato DHA para a série de desigualdades dadas pela eq. 2.13c. O processo de conversão de processos híbridos é meticuloso e dispendioso, se feito manualmente, pois geralmente requer múltiplas substituições, simplificações e algebrismos. Dado este fato, os autores(MIGNONE; BEMPORAD; MORARI, 1999) desenvolveram uma ferramenta computacional para auxiliar nesta tarefa. Trata-se de um compilador que produz um sistema MLD com as matrizes A, B_i, C, D_i e E_i das equações (2.13a), (2.13b) e (2.13c) sendo estas adequadas para otimizar, controlar e simular sistemas dinâmicos. A linguagem utilizada para especificação do problema no compilador é chamada de HYSDEL (*HYbrid System DEscription Language*) (MIGNONE, 2002b). Um sistema híbrido é programado na linguagem HYSDEL particionando o sistema entre os conceitos estruturais de um DHA. O compilador HYSDEL foi construído com intuito de fornecer um modelo MLD, porém pela equivalência entre sistemas como discutido em Heemels, Schutter e Bemporad (2001) é possível transforma-lo em outros modelos mais apropriados ao cenários de utilização, como mostrado na **Tabela** 4. Logo, compor um modelo de sistema híbrido no HYSDEL apresenta vantagens práticas, pois a programação utiliza conceitos abstratos facilitando a apresentação, revisão e correção do modelo também pela flexibilidade do modelo final produzido (MLD).

2.1.4 Caracterização do MLD no HYSDEL

Primeiramente, um modelo híbrido descrito pela linguagem HYSDEL caracteriza-se primordialmente de nove blocos interdependentes, que representam figurativamente um sistema DHA. (TORRISI; BEMPORAD, 2004)

Cenário	**Modelagem**
Modelagem	DHA
Simulação	DHA
Controle	MLD,PWA,MMPS
Estabilidade	PWA
Verificação	PWA
Identificação	PWA
Detecção de falhas	MLD
Estimação	MLD

Tabela 4 – Recomendação de modelos para cada cenário de utilização

Fonte:Torrisi e Bemporad (2004)

Em resumo, estes blocos da linguagem HYSDEL podem ser listados da seguinte forma:

- **AUX** - Declaração das variáveis auxiliares que se tornarão δ e z no modelo MLD;
- **AD** - Define variáveis booleanas a partir de variáveis continuas, definidas por regiões limítrofes representando o EG;
- **LOGIC** - Realiza lógica combinacional com variáveis booleanas;
- **DA** - Define variáveis continuas de acordo com condições SE-ENTÃO-LOGO, representando parte do SAS e MS;
- **CONTINUOUS** - Define as equações a diferença, definindo parte do SAS;
- **LINEAR** - Define relações e equações lineares entre variáveis continuas;
- **AUTOMATA** - Define as máquinas de estado finito do sistema híbrido;
- **OUTPUT** - Define as saídas do sistema híbrido;
- **MUST** - Define restrições, baseado nos estados do FSM, entradas e saídas;

Quando formulado o problema na linguagem HYSDEL, compila-se o sistema para gerar as matrizes da eq. 2.13. O HYSDEL, fornece estas matrizes em uma organização especial, que facilita a divisão entre variáveis binárias e reais. Na eq. 2.14 os termos subscritos r e b, representam variáveis reais e inteiras respectivamente, como exemplo, a matriz $A_r r$ representa a relação entre os estados reais com as variáveis e entradas reais.

$$\begin{bmatrix} x_r(t+1) \\ x_b(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{rr} & A_{rb} \\ A_{br} & A_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r(t+1) \\ x_b(t+1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{1rr} & B_{1rb} \\ B_{1br} & B_{1bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{2rb} \\ B_{2bb} \end{bmatrix} d(t) + \begin{bmatrix} B_{3rr} \\ B_{3br} \end{bmatrix} z(t), \tag{2.14a}$$

$$\begin{bmatrix} y_r(t+1) \\ y_b(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{rr} & C_{rb} \\ C_{br} & C_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{1rr} & D_{1rb} \\ D_{1br} & D_{1bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_r(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{2rb} \\ D_{2bb} \end{bmatrix} d(t) + \begin{bmatrix} D_{3rr} \\ D_{2br} \end{bmatrix} z(k|t), \tag{2.14b}$$

$$E_2\delta(t) + E_3 z(t) \leq E_1 \begin{bmatrix} u_r(t) \\ u_b(t) \end{bmatrix} + E_4 \begin{bmatrix} x_r(t) \\ x_b(t) \end{bmatrix} + E_5 \tag{2.14c}$$

2.2 MPC de sistemas híbridos

O controle de sistemas complexos multivariáveis com diversas restrições operacionais integradas, mudanças de dinâmicas de resposta e lógicas de intertravamento, são alguns desafios para engenheiros de controle. A abordagem tradicional deste tipo de problema consiste em seccionar o sistema em partes lineares, integrados aos sistemas lógicos, projetando e sintonizando um controlador PID para cada cenário. Esta estratégia, apesar de robusta e muito utilizada, requer inúmeros testes e simulações. Logo, estes sistemas geralmente são menos eficientes e possuem complexidade maior na manutenção e mudança de parâmetros.

Uma outra abordagem é a utilização de controlador preditivo baseado em modelos (MPC), aplicado a um sistema composto por restrições, lógicas sequenciais e combinacionais, como exemplo um sistema de dinâmica lógica mista (MLD). Outros modelos como: PWA, redes petri, Sistema Lineares Complemetares (LCS), sistemas *max-min-plus*(MMPS); também são possíveis de serem utilizados para controle preditivo (SCHUTTER; BOOM, 2003). Entretanto, o formalismo MLD possui algumas vantagens para controle *on-line* e uma estrutura voltada para sistemas com características discretas (FERRARI-TRECATE et al., 2002).

Há três principais métodos de MPC disponíveis, focados em sistemas MLD: Otimização via programação inteira mista *on-line*; Realimentação de estados linearizada por partes, para sistemas MLD convertido em sistemas PWA, utilizando otimização de matrizes de inequações; MPC explícito utilizando técnicas de otimização multiparamétrica, que transforma um sistema de otimização *on-line* em um *off-line* retirando o custo computacional do MPC (MIGNONE, 2002a).

Devido a presença de variáveis inteiras, restrições e sistema lineares, as otimizações são feitas utilizando os procedimentos de programação inteira mista. Caso seja de interesse do leitor, Newman e Weiss (2013) apresenta, uma pesquisa sobre a história e aplicações de programação inteira mista.

Os primeiros esforços para controlar sistemas dinâmicos, utilizando programação

inteira mista foram feitas por Slupphaug, J.Vada e Foss (1997), Slupphaug e Foss (1997) e Mignone (2002b). A seguir, será descrito uma aplicação de um MPC genérico aplicado a um modelo MLD e as técnicas propostas neste trabalho.

2.2.1 Problema de controle genérico

Os problemas de controle preditivo para sistemas MLD podem ser tratados de formas variadas. Pode-se, por exemplo, projetar um MPC para controle orientado ao tempo mínimo, ou por meio de uma previsão em janela de horizonte móvel. A primeira abordagem utiliza ações de controle que levam sistema do estado inicial, ao estado de referência, em um menor tempo possível (BAKO; CHEN; LECOEUCHE, 2011). A determinação da sequência das ações de controle estáveis, para o tempo mínimo, pode ser calculado via otimização *on-line* ou malha aberta. Outras técnicas heurísticas para determinação de restrições e regras criadas pelo projetista do sistema de controle podem ser construídas internamente a um sistema MLD. É oportuno citar que tais estratégias de controle ótimo são computacionalmente custosas e as garantias de controle ótimo e operação nos limites físicos do sistema podem não ser atingidos (BORRELLI; BEMPORAD; MORARI, 2011).

A segunda técnica, largamente utilizada no projeto de um MPC é a previsão em janela de horizonte móvel (Receding Horizon Control - RHC). Os primeiros conceitos de um RHC datam do início dos anos 90, iniciado por Michalska e Mayne (1992). Essencialmente, o RHC é uma técnica que utiliza-se da otimização malha aberta a partir do modelo do sistema e seu estado atual em t. A partir desta otimização calcula-se o número finito de variáveis manipuladas até $t + Nm$ e a previsão da resposta do sistema até $t + Np$ de acordo o primeiro gráfico da **Figura 7**. A função objetivo que rege as penalidades, quanto a trajetória do sinal de resposta e a característica do sinal de controle, (variáveis manipuladas), são determinadas caso a caso e podem ter diversas normas. Apesar do cálculo dos sinais de controle serem calculados até $t + Np$, utiliza-se somente o sinal para $u(t)$ no período $[t, t + 1]$. Quando o sistema tiver a resposta em $t + 1$ do sinal aplicado em t, será então efetuado uma nova otimização com o novo estado do sistema em $t + 1$ até $t + 1 + Np$. Logo, novos sinais de controle e previsão serão calculados, deslizando a janela de previsão e otimização. No trabalho de Bemporad e Morari (1999) apresenta-se, um rico resumo sobre sistema híbridos e propõe-se um controle ótimo para sistema MLD usando a técnica RHC *on-line*. O autor considera que o sistema atinge o estado de equilíbrio x_e, com uma entrada u_e e variáveis auxiliares de estado estacionário δ_e e z_e. O problema de otimização a seguir é o controle preditivo utilizando uma função custo com norma ℓ_2

$$\begin{aligned}\min_{u_0^{Nm-1}} \quad & J(u_0^{Nm-1}, x(t)) \triangleq \sum_{k=0}^{Nm-1} \|u(k) - u_e\|_{Q_1}^2 + \|\delta(k|t) - \delta_e\|_{Q_2}^2 \\ & + \|z(k|t) - z_e\|_{Q_3}^2 + \|x(k|t) - x_e\|_{Q_4}^2 + \|y(k|t) - y_e\|_{Q_5}^2\end{aligned} \tag{2.15}$$

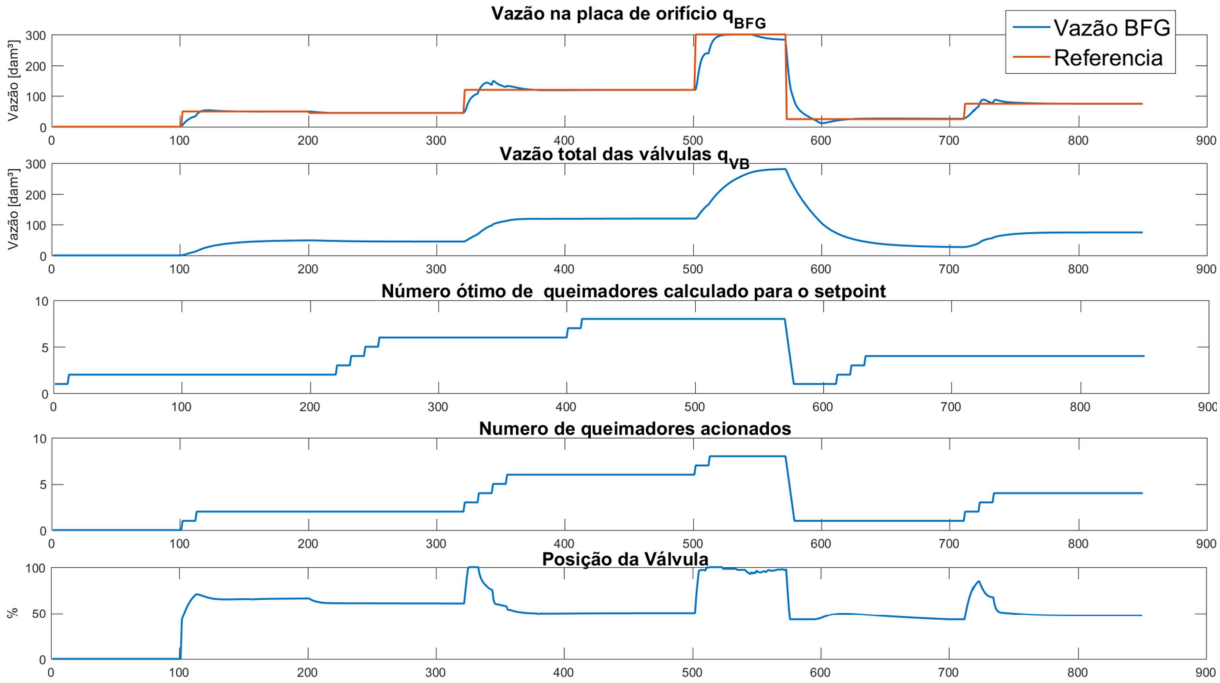


Figura 7 – Conceito do horizonte de de previsão móvel

Fonte: Borrelli;Bemporad;Morari (2011)

$$\text{sujeito à} \begin{cases} x(Nm|t) = x_e, \\ x(k+1|t) = Ax(k|t) + B_1u(k) + B_2\delta(k|t) + B_3z(k|t), \\ y(k|t) = Cx(k|t) + D_1u(k) + D_2\delta(k|t) + D_3z(k|t), \\ E_2\delta(k|t) + E_3z(k|t) \leq E_1u(k) + E_4x(k|t) + E_5 \end{cases} \tag{2.16}$$

dado que $u(k) \in \mathbb{R}^{nu\times 1}$,$\delta(k) \in \mathbb{R}^{nd\times 1}$,$z(k) \in \mathbb{R}^{nz\times 1}$,$x(k) \in \mathbb{R}^{nx\times 1}$,$y(k) \in \mathbb{R}^{ny\times 1}$. Define-se também que $Q_1 \in \mathbb{R}^{nu\times nu}$ uma matriz positiva diagonal definida, $Q_2 \in \mathbb{R}^{nd\times nd}$, $Q_3 \in \mathbb{R}^{nz\times nz}$, $Q_4 \in \mathbb{R}^{nx\times nx}$, $Q_5 \in \mathbb{R}^{ny\times ny}$, matrizes diagonais positivas semi-definidas. Considera-se que a sequência $u(0), u(1)..., u(Nm-1) = u_0^{Nm-1}$. Os valores ótimos para o sinal de controle $\{u^*(k)\}_k = 0, \ldots, Nm-1$ são calculados para minimizar a função custo da eq. 2.15. Logo, para a eq. 2.15, assumindo que a partir de x_0 exista uma solução factível, a sequência de ações baseadas na técnica RHC deve estabilizar assintoticamente o sistema MLD, ou seja, os seguintes limites devem ser satisfeitos (SCHUTTER; BOOM, 2003):

$$\lim_{k\to\infty} x(k) = x_e \qquad \lim_{k\to\infty} \|y(k) - y_e\|_{Q_5} = 0 \tag{2.17}$$

$$\lim_{k\to\infty} u(k) = u_e \qquad \lim_{k\to\infty} \|\delta(k) - \delta_e\|_{Q_2} = 0 \tag{2.18}$$

$$\lim_{k\to\infty} \|z(k) - z_e\|_{Q_3} = 0 \tag{2.19}$$

O problema de otimização do MPC híbrido pode ser formulado usando a norma ℓ_1 ou norma infinita ℓ_∞, entretanto, a formulação em norma ℓ_2 gera um controlador preditivo mais suave e os efeitos das mudanças dos pesos no processo de sintonia são mais intuitivos (HOVD, 2004). Além disto, para normas lineares, deve-se gerar novas restrições para acomodar esta técnica. Caso o leitor se interesse por estas abordagens poderá encontrar um bom resumo no trabalho de Caetano (2011). É comum, em controladores preditivos de sistemas puramente contínuos, associar diferentes horizontes de previsão (Np ou Nm) e controle (Nc), sendo que geralmente $Nc \ll Np$; desta forma é reduzido drasticamente o esforço computacional (WANG, 2009). Entretanto, para sistemas mistos inteiro-contínuo o ganho computacional é somente parcial, pois as variáveis δ e z continuam presentes no cálculo da otimização (BEMPORAD; MORARI, 1999). Logo, neste trabalho o horizonte de previsão será o mesmo do horizonte de controle, $Nc = Np = N$. Para solução do problema 2.15, pode-se utilizar técnicas como, corte de planos, métodos de decomposição, métodos baseado em lógicas e *branch-and-bound* (ramificação e corte) (BEMPORAD; MORARI, 1999). Bemporad e Mignone (2001), descreve uma função utilizada para solucionar problemas de otimização quadráticos mistos inteiros, presente no Hybrid Toolbox. Apesar do Hybrid Toolbox apresentar uma interface didática, a solução de problemas quadráticos inteiro-misto não possui técnicas mais atuais, a exemplo, heurísticas de pré-solução e corte de planos (NEWMAN; WEISS, 2013). Outras opções de algorítimos de otimização estão disponíveis em softwares comerciais de otimização, como técnicas de seleção de variáveis para o nó selecionado para ramificação, a exemplo, pseudo-custo e infactibilidade mínima; há também opções de algorítimos concorrentes, barreira ou simplex (primal e dual)(IBM Corp., 2000).

2.2.2 MPC Híbrido com integrador

Para que o problema de controle ótimo proposto em 2.15 calcule $\{\nu^*(k)\}_{k=0,\dots,T-1}$, segundo as condições dadas pela eq. 2.19, é necessário garantir que o estado final x_e seja estável. Entretanto, como citado por Mignone (2002a), o estado estacionário estável pode não ser atingível, devido a fenômenos como multiplicidade de estados estacionários e limites cíclicos, levando o sistema para um estado oscilatório em torno de x_e. Villa et al. (2005) discute duas abordagens para mitigar este problema das oscilações. Uma técnica adiciona integradores nos erros de sinal de saída e outra adiciona integradores no sinal de controle. Segundo Villa et al. (2005) a técnica de adição de integrador no sinal de controle resulta em esforço de controle mais suave e um sistema mais estável. É proposto então aplicar o MPC híbrido (HMPC) com integrador no sinal de controle para resolver o problema de controle do sistema de queimadores da caldeira. Basicamente, esta técnica consiste em adicionar aos estados do sistema, novos estados contínuos referentes às entradas contínuas,

substituindo-as por suas variações entre k e $k-1$:

$$\delta u = u(k) - u(k-1).$$

Admitindo que:

$$x^*(k|t) = \begin{bmatrix} x(k|t) \\ u(k|t) \end{bmatrix} \quad \mathbf{e} \quad u(k|t) = \begin{bmatrix} u_b(k|t) \\ u_r(k|t) \end{bmatrix},$$

tem-se o novo problema de otimização:

$$\begin{aligned} \min_{\delta u_0^{N-1}} \quad & J(\delta u^{N-1}, x^*(t)) \triangleq \sum_{k=0}^{N-1} \|\delta u\|_{Q_1}^2 + \|\delta(k|t) - \delta_e\|_{Q_2}^2 \\ & + \|z(k|t) - z_e\|_{Q_3}^2 + \|x^*(k|t) - x_e\|_{Q_4}^2 + \|y(k|t) - y_e\|_{Q_5}^2 \end{aligned} \tag{2.20}$$

$$\text{sujeito à} \begin{cases} x^*(N|t) = x_e, \\ \begin{bmatrix} x(k+1|t) \\ u(k+1|t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k|t) \\ u(k|t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix} \delta u(k|t) + \begin{bmatrix} B_2 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \delta(k|t) + \begin{bmatrix} B_3 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} z(k|t), \\ y(k|t) = Cx^*(k|t) + D_1 \delta u(k|t) + D_2 \delta(k|t) + D_3 z(k|t), \\ E_2 \delta(k|t) + E_3 z(k|t) \leq E_1 \delta u(k|t) + E_4 x^*(k|t) + E_5 \end{cases} \tag{2.21}$$

Os sub-índices das matrizes na eq. 2.21, correspondem aos já determinados nas equações 2.14a,b,c.

Baseado nesta técnica descrita, na seção 3.3 será descrito o sistema DHA aplicado ao código HYSDEL para gerar o MLD completo dos sistemas de queimadores da fornalha, já considerando um sistema com integrador no sinal de controle.

2.3 Procedimentos para resolução do problema de controle

Para resolução do problema de otimização será utilizado ferramentas computacionais padrões para determinação das soluções. Em sua maioria, os programas e *Toolboxes* requerem a forma padrão descrita na eq. 2.22 e 2.23

$$\min_X \frac{1}{2} X'QX + fX + r \tag{2.22}$$

$$\text{sujeito à} \begin{cases} \Psi X = \Omega \\ \Phi X \leq \lambda \end{cases} \tag{2.23}$$

Para isto deve-se manipular o problema de otimização da eq. 2.15 para a forma descrita na eq. 2.22 expandindo o problema para N horizontes de controle/previsão. Para

gerar matrizes e equações que resolvem qualquer problema de controle MLD é proposto que as variáveis de decisão seja o vetor X. Considerando que $u(k'|k)_0^{N-1}$ representa o vetor $\{u(k|k)^T, u(k+1|k)^T, ...u(k+N-1|k)^T\}$, tendo em mente que $u(k|k)$ é um vetor coluna. Logo X é:

$$X = \left[\delta u(k'|k)_0^{N-1}, \delta(k'|k)_0^{N-1}, z(k'|k)_0^{N-1}, x(k'|k)_0^{N-1}, y(k'|k)_0^{N-1}\right]^T, \tag{2.24}$$

dado que X é um vetor coluna.Define-se que todas as variáveis disponíveis no modelo (X) serão utilizadas como variáveis de decisão do problema. Desta forma, associa-se pesos diferentes de zero para variáveis de interesse. O restante das variáveis, em que não se deseja monitorar seus percursos, associa-se peso nulo as mesmas.

A eq. 2.16 deve ser criada a partir da evolução dos estados previstos segundo a ordem descrita pelas variáveis de decisão X. Baseado no trabalho de Caetano (2011) apresenta-se no Apêndice A os procedimentos para gerar as equações 2.23 a partir da eq. 2.16. Basicamente, o processo considera a recursividade da saída da previsão para N=1 para calcular a previsão de N=2 e assim por diante. Este método é conhecido como solução por batelada, em que todos os estados futuros estão representados pelo estado atual $x(k)$ e pelas entradas futuras $\{\delta u(k|k)^T, \delta u(k+1|k)^T, ...\delta u(k+N-1|k)^T\}$.

Para aplicar este procedimento de construção das matrizes, foram criadas 2 funções *MRH_eq4()* e *MRH_ineq3()* que calculam as matrizes referentes as equações de igualdade e inequações das eq. 2.23, respectivamente. Outra função, também foi criada, *Q_matrix()*, que calcula a matriz Q da eq. 2.22. Na seção A.4, do apêndice, estão descritos os cabeçalhos destas funções criadas no MATLAB, e na seção B.1 há uma breve descrição nos itens 8, 9 e 10 da **Tabela** 22. As sub-matrizes, geradas pelas funções, são agregadas da seguinte forma:

$$\begin{aligned} f &= -X_{ref}Q, \\ \Psi &= \begin{bmatrix} \alpha \\ \psi \end{bmatrix}, \\ \Omega &= \begin{bmatrix} A_0 \\ C_0 \end{bmatrix} x(k), \end{aligned} \tag{2.25}$$

$$\begin{aligned} \lambda &= \hat{\mathrm{E}}_5 + \hat{\mathrm{E}}_4 x(k), \\ \Phi &= \Phi, \end{aligned} \tag{2.26}$$

sendo que X_{ref} é a referência ou valor em estado estacionário, dado pelo vetor coluna a seguir:

$$X_{ref} = \left[u_{e0}^{\ N}, \delta_{e0}^{\ N}, z_{e0}^{\ N}, x_{e0}^{\ N}, y_{e0}^{\ N}\right]^T$$

A seguir são revisadas algumas bibliografias que tratam da estimativa de estados contínuos não mensurados, utilizando a técnica de estimador de estado, também conhecido como observador de estados.

2.4 Filtro de Kalman com modelo de ruído com *offset* (média diferente de zero)

Na seção anterior relatou-se a problemática, métodos e motivações na construção de MPC. Entretanto, no projeto do MPC relatado considera-se duas premissas: todos os estados contínuos do sistema são mensuráveis, não há erros de modelagem e/ou distúrbios com média diferente de zero.

Na impossibilidade de mensurar cada estado do sistema é comum estimar os estados não medidos, via observadores de estado a partir das saídas mensuradas. Estes observadores podem ser construídos utilizando estimadores de estado do tipo Luenberger ou Kalman. O primeiro estimador contém uma matriz de ganhos calculada a partir do posicionamento deliberado dos polos. O segundo estimador assume que adicionado aos estados e a saída do sistema há ruídos brancos gaussianos, com média zero. Desta forma a matriz de ganho do estimador é calculado a partir das matrizes de covariância do erro dos estados e das saídas, sendo que a estabilidade e convergência está no domínio de processos estocásticos (vide Anderson et al. (1979), para mais detalhes).

O cálculo dos estados não mensurados é solucionado via observadores, determinísticos ou estocásticos, sendo que o último tipo de observador filtra ruídos com covariância prevista em projeto (TATJEWSKI, 2014). Entretanto, para os casos em que ocorrem distúrbios arbitrários e assintoticamente constantes, como por exemplo, erros de modelagem devido a linearizações ou outras pertubações constantes nas saídas/estados, estes observadores convergem para valores deslocados (*off-set*) das variáveis de estado.

Diversos estudos abordam este tema relacionado a estimadores de estado capazes de filtrar ruídos com tendências e média diferente de zero. Rawlings, Meadows e Muske (1994) foram os primeiros a abordarem aplicação de um MPC com resposta livre de *offset*, voltado à sistemas quadráticos, ou seja, em que a quantidade de entradas é igual ao de saídas. Pannocchia e Rawlings (2003) revisam o trabalho de Rawlings, Meadows e Muske (1994), abordando sistemas não quadráticos, sendo estes estáveis, instáveis ou com integradores, reunindo lemas e teoremas para o observador que em conjunto com MPC fornece um sistema com zero offset na saída.

Caso o sistema controlado pelo MPC não obedeça a estas premissas, a resposta apresentará deslocamentos (*off-set*) no valor em relação a referência que deseja-se seguir. Tatjewski (2014) apresenta uma alternativa a rejeição de distúrbio via observador de

estado aumentado, com menos restrições para realização do mesmo. Há reproduções deste projeto combinado para rejeição de ruído dado por Pannocchia e Rawlings (2003), como por exemplo para controle de motores a diesel (YU; OGAI; DENG, 2019), motores de indução (WANG et al., 2019) e sistemas de controle climático de ambientes fechados (Vega Lara et al., 2016).

Além disto, outra questão presente em áreas industriais são as histereses nos elementos finais de controle. Geralmente, elementos finais de controle não possuem sensoriamento para indicar a real posição ou abertura destes atuadores. Desta forma, estimadores não aumentados com modelo de ruído irão estimar estados internos deslocados, enviesados pelos distúrbios implícitos nas saídas.

Neste trabalho serão utilizadas as técnicas demonstradas por Pannocchia e Rawlings (2003) para construir o filtro de Kalman apropriado para rejeição de ruído branco e distúrbios com média diferente de zero. Desta forma será desenvolvido um MPC robusto, alimentando o MPC com estimativa de estados corretas, sendo capaz de rejeitar ruídos estocásticos comuns a variabilidade na medição.

Neste sentido, é pertinente revisar o trabalho de Pannocchia e Rawlings (2003), apresentando as condições, teoremas e lemas que compõem o estudo sobre o Filtro de Kalman com zero *offset*.

Primeiramente, apresenta-se a seguir, um sistema linear e invariante no tempo, a ser utilizado como base para próximas discussões:

$$x(k+1) = \mathbf{A}x(k) + \mathbf{B}u(k) + w'(k), \tag{2.27a}$$

$$y(k) = \mathbf{C}x(k) + \nu(k), \tag{2.27b}$$

sendo $w'(k) \in \mathbb{R}^{nx}$ e $\nu(k) \in \mathbb{R}^{ny}$ ruídos brancos provenientes dos estados e das saídas, respectivamente. Considera-se que $x \in \mathbb{R}^{nx}$, $u \in \mathbb{R}^{nu}$ e $y \in \mathbb{R}^{ny}$.

A primeira condição apresentada por Pannocchia e Rawlings (2003) requer que (A, B) seja estabilizável e (C, A) detectável. Logo, se $p \leq m$, ou seja, o número medições (p) é menor ou igual ao de variáveis manipuladas (m), será possivel controlar os sistema sem *offset*, em todas as variáveis mensuradas. A seguir apresenta-se a relação matemática que suporta esta condição:

$$posto \begin{bmatrix} \mathbf{I} - \mathbf{A} & -\mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix} = nx + m \tag{2.28}$$

Com objetivo de projetar um observador que promova um sistema controlado com zero *offset* é necessário adicionar um vetor adicional de distúrbios integradores. Este conceito é base do trabalho de Press, Britain e Honk (1971) que provam e discutem a rejeição de distúrbios assintoticamente estáveis e com média diferente de zero, utilizando-se de

sistemas aumentados. Em resumo, estes estados adicionais, de distúrbios integradores, deslocam os estados originais do sistema à um espaço topológico de n-variedades que cancela o efeito do distúrbio presente nas variáveis controladas. Logo, tem-se o sistema aumentado com modelo do distúrbio:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ d(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(k) + w(k), \tag{2.29a}$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ d(k) \end{bmatrix} + \nu(k), \tag{2.29b}$$

sendo $B_d \in \mathbb{R}^{nx \times n_d}$, $C_d \in \mathbb{R}^{p \times n_d}$ adicionado às equações 2.27, $w(k) \in \mathbb{R}^{nx+n_d}$ o ruído branco do novo estado aumentado $d(k) \in \mathbb{R}^{n_d}$ que representa os distúrbios integradores, ou seja, possui uma tendência.

Além da condição de detectabilidade e estabilidade, é necessário que a quantidade de distúrbios integradores n_d seja igual ao número de saídas que se deseja manter com *off-set* zero. Além disto, a condição seguinte deve ser atendida:

$$posto \begin{bmatrix} I - \mathbf{A} & -\mathbf{B}_d \\ \mathbf{C} & \mathbf{D}_d \end{bmatrix} = nx + nd, \tag{2.30}$$

Assim sendo, pode-se resumir que o sistema a ser estimado pelo preditor segue as equações a seguir:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{d}(k+1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}(k|k-1) \\ \hat{d}(k|k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_x \\ L_d \end{bmatrix} (y(k) - C\hat{x}(k|k-1) - C_d\hat{d}(k|k-1)), \tag{2.31}$$

em que $L_x \in \mathbb{R}^{nx \times p}$ e $L_d \in \mathbb{R}^{n_d \times p}$ são as matrizes de ganho do filtro de kalman para os estados e distúrbio, respectivamente. A predição futura do estado aumentado segue:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{d}(k+1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k|k) \\ \hat{d}(k|k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(k) \tag{2.32}$$

Os estados previstos futuros podem ser descritos pela eq. compacta do preditor de Kalman:

$$\begin{bmatrix} \hat{x}(k+1|k) \\ \hat{d}(k+1|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x}(k) \\ \hat{d}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} (y(k) - C\hat{x}(k|k-1) - C_d\hat{d}(k|k-1)), \tag{2.33}$$

em que $L_1 \in \mathbb{R}^{nx \times p}$ e $L_2 \in \mathbb{R}^{n_d \times p}$ são as matrizes de ganho do preditor para os estados e distúrbio, respectivamente, logo:

$$\tilde{L} = \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_x \\ L_d \end{bmatrix}. \tag{2.34}$$

Sendo:

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_d \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \tilde{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{C}_d \end{bmatrix}, \tag{2.35}$$

logo a matriz de ganho do preditor é calculada da forma,

$$\tilde{L} = \tilde{A}S_k\tilde{C}(\tilde{C}S_k\tilde{C}^T + R_v)^{-1}, \tag{2.36}$$

sendo $R_v \in \mathbb{R}^{p\times p}$ a matriz de covariância relacionada ao ruído $v(k)$, S_k é uma matriz simétrica e positiva semi-definida, a qual é a solução única da eq. de Riccati:

$$S_k = \tilde{A}S_{k-1}\tilde{A}^T + Q_w - \tilde{A}S_{k-1}\tilde{C}^T[\tilde{C}S_{k-1}\tilde{A}^T\tilde{C}^T + R_v]^{-1}\tilde{C}S_{k-1}\tilde{A}^T \tag{2.37}$$

sendo $Q_w \in \mathbb{R}^{(nx+n_d)\times(nx+n_d)}$ a matriz de covariância do ruido $w(k)$.

2.5 Caldeiras: Tipos e sistemas

Antes de iniciar a modelagem dos queimadores da fornalha é necessário compreender melhor o sistema em torno da mesma, como a caldeira e suprimento de vapor. É também necessário simplificar alguns sistemas e realizar algumas generalizações/considerações. Tendo isto, nesta seção é feito um resumo sobre os sistemas que compõem uma caldeira para servir como base teórica para modelagem do sistema completo da seção 3.3.

De modo geral há dois tipos principais de caldeiras, a Pirotubulares e Aquotubulares. No primeiro tipo, os gases de combustão percorrem o interior de um tubo imerso em água dentro de um vaso de pressão. Este tipo de caldeira foi comum no século XIX e ainda é utilizada para produção de vapor em pequena escala. O segundo tipo consiste de tubos com água posicionados estrategicamente em uma fornalha, para uma troca eficiente de calor. Este tipo de caldeira é extensivamente utilizado no ambiente industrial devido a capacidade de gerar vapores de alta pressão e manter a segurança intrínseca do processo. (KITTO; STULTZ, 2005; LORA; NASCIMENTO, 2004)

Neste trabalho, a caldeira estudada é do tipo aquatubular, sendo que suas características e subsistemas são revisados nas subseções seguintes.

2.5.1 Caldeiras Aquatubulares

Há uma diversidade de caldeiras aquatubulares, com fontes combustíveis e características construtivas diferenciadas. As fontes combustíveis podem ser biocombustíveis, sólidos pulverizados, óleo combustível e gases combustíveis (gás natural e gases subprodutos de processos industriais). As características construtivas são definidas de acordo com o combustível a ser utilizado, disponibilidade espacial no local e requerimentos técnicos específicos na produção de vapor de cada indústria. Nos itens seguintes, são apresentados os tipos de tecnologia que envolvem o sistema de combustão da caldeira.

2.5.1.1 Tecnologia de combustão e suprimento de ar

Para cada tipo de combustível existe uma característica construtiva da fornalha, conforme **Figura 8**. Para combustíveis sólidos e densos, utiliza-se grelhas fixas ou rotativas. Para combustíveis gasosos, óleo aspergido e alguns sólidos em pó de baixa granulosidade são utilizados queimadores em suspensão nos cantos da fornalha ou pré-fornalha ciclônica. Nos combustíveis sólidos de baixa densidade é possível ser utilizado leito fluidizado do tipo borbulhante e circulante.(LORA; NASCIMENTO, 2004)

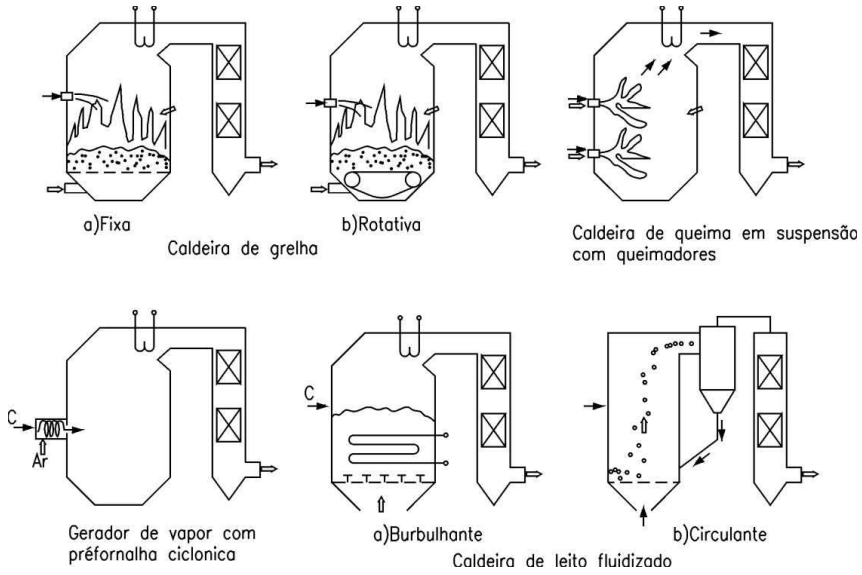


Figura 8 – Tecnologias de combustão para caldeiras. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004)

A alimentação de ar no interior da fornalha é fator essencial de projeto para garantir a melhor troca de calor e queima completa do combustível. Os tipos do processo de tiragem de ar e gases de combustão são divididos em quatro classes. Tiragem natural criado pela convecção natural dos gases devido a diferença de temperatura dos gases na entrada de ar e saída da chaminé, vide **Figura 9 a)**. Na tiragem forçada, o ar é impelido por sopradores na entrada de ar facilitando a mistura do combustível com o ar e remoção dos gases de combustão, vide **Figura 9 b)**. Na tiragem induzida os gases de combustão geram uma pressão negativa no interior da fornalha, forçando a circulação de ar e expulsão dos gases, vide **Figura 9 c)**. Na tiragem balanceada os sopradores estão na entrada de ar e chaminé, produzindo uma diferença de pressão balanceada no caminho da fornalha, como mostra **Figura 9 d)**.

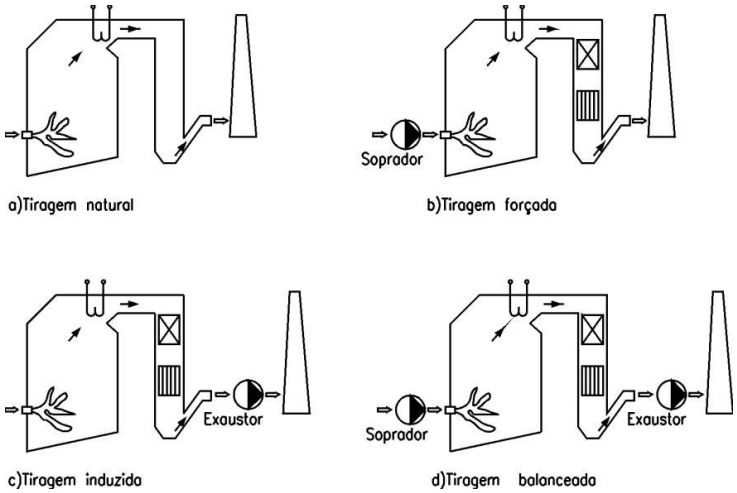


Figura 9 – Processos de fluxo de ar e gases de combustão. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004)

2.5.1.2 Caracteristicas usuais de uma caldeira aquatubular

Caldeiras aquatubulares possuem elementos básicos que se repetem em diversas configurações construtivas. Na **Figura 10** observa-se estes elementos legendados com sua funções. LORA e NASCIMENTO (2004) e Leite e Militão (2008) explicam o processo de produção de vapor. Em resumo, a água é aquecida nas paredes de água e enviada ao tubulão (reservatório de água); do tubulão, o vapor saturado é enviado para os superaquecedores convectivos. Nos processos que utilizam vapor de alta temperatura, há o superaquecedor radiante. O economizador e preaquecedor de ar preaquecem a água de alimentação da caldeira e o ar de combustão, respectivamente, utilizando o calor de refugo dos gases de combustão.

2.5.2 Histórico das modelagens dinâmicas

Uma caldeira é composta de múltiplos sistemas interligados, formando um sistema complexo. Isto exige dos pesquisadores a simplificação e setorização prévia dos processos, para enfim estudá-los. Uma forma comum de tratar este sistema, consiste em dividi-lo em duas partes. A primeira parte estuda a dinâmica de queima do combustível dentro da fornalha ou câmara de combustão. A segunda parte trata da modelagem da produção de vapor propriamente dito, incluindo reservatório de água, parede d'água e superaquecedores. Pela **Figura 10**, observa-se que o sistema de combustão possui dois elementos principais: controle da chama/circulação dos gases de combustão e fluxo de combustível/ar. Em cascata destes sistemas, estão sistemas de controle de temperatura do ar, controle do fluxo, pressão interna da fornalha, ignitores, estabilizadores, controladores de sequenciamento de inicio e mantenimento da chama. (ASSOCIATION, 2007)

Igualmente, o sistema de produção de vapor possui instrumentos para medição de temperatura/pressão transmissores do fluxo de vapor/água e elementos de controle como

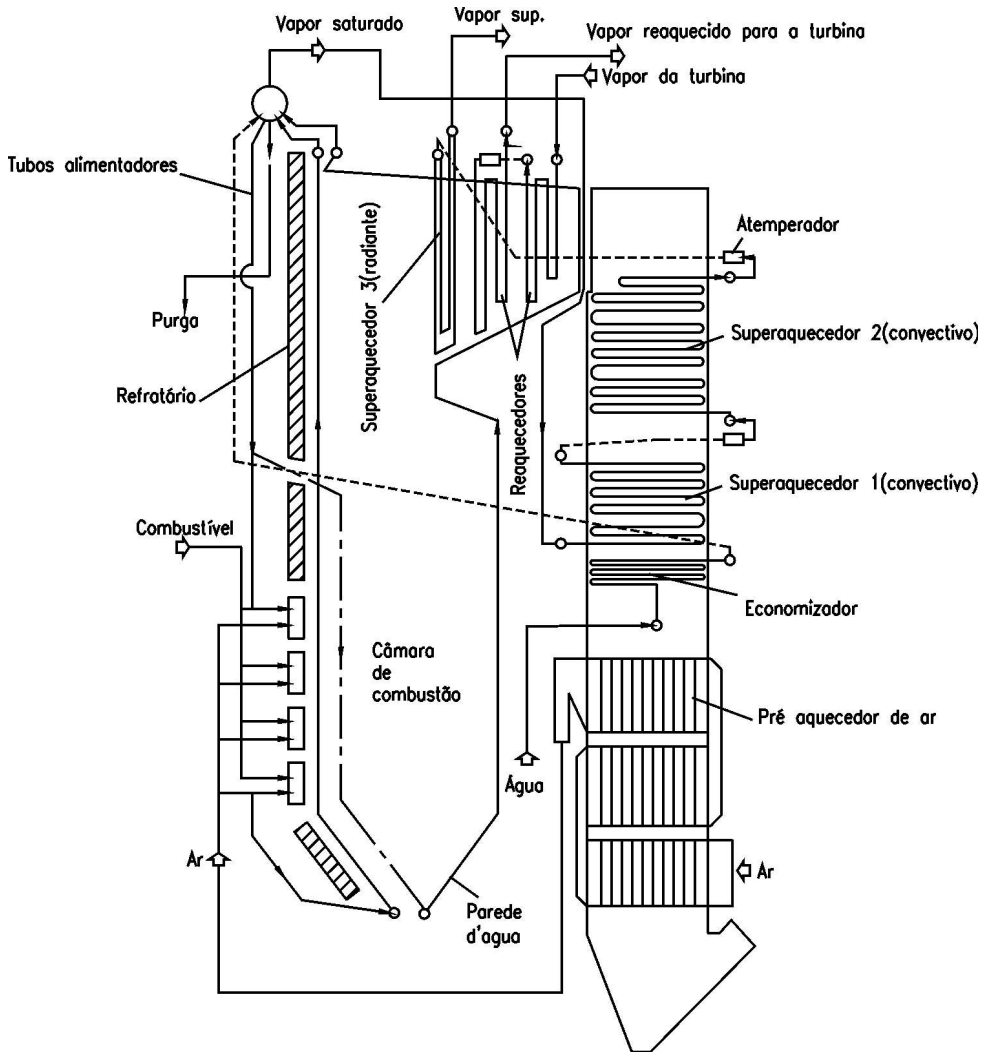


Figura 10 – Elementos comuns presente em caldeiras. Fonte:(LORA; NASCIMENTO, 2004)

válvulas e bombas para manipular estes fluxos.

Na literatura modelos dinâmicos de fornalha são frequentemente construídos considerando os processos químicos e físicos que envolvem a queima do combustível e características termodinâmicas e aerodinâmicas do gases de combustão. Vondál e Hájek (2015) estudam o processo termodinâmico de perda de calor pelas paredes da fornalha; estudos fazem também análise e controle de emissão de gases nocivos como NO_x e CO_2 e material particulado (ZHAO et al., 2015; DONGFENG; YINGBAO, 2018); outros autores modelam características termodinâmicas no fluxo dos gases de combustão (GIL et al., 2016; TALU; ONAT; DASKIN, 2017); há também estudos sobre tipos de combustíveis e a dinâmica na mistura com ar (TALU; ONAT; DASKIN, 2017; KERMES et al., 2008; KOUPRIANOV, 2001).

Um problema típico para controle do consumo de combustível em uma fornalha é a rangeabilidade que os queimadores possuem. Uma rangeabilidade comum é de 6:1 a 3:1, o que caracteriza uma baixa rangeabilidade para um caldeira de grande porte (KITTO;

STULTZ, 2005). Esta baixa rangeabilidade pode forçar o sistema de controle executar um controle *on/off* quando a produção de vapor estiver a níveis baixos. Para solucionar este problema utiliza-se múltiplos queimadores na fornalha para aumentar a rangeabilidade do sistema da fornalha (HESELTON, 2005). Entretanto, sistemas com múltiplos queimadores introduzem descontinuidades na vazão de combustível, devido ao comportamento discreto de acionamento individual dos queimadores. A influência deste fenômeno não-linear do fluxo de combustível foi estudada somente por (Oliveira Jr., 2016) e carece de mais estudos.

Para os modelos dinâmicos do sistema produtor de vapor, encontra-se na literatura estudos que abordam a qualidade do vapor produzido, estabilidade e segurança operacional da caldeira. Abrial (1996), Liu Changliang et al. (2001), Tawfeic (2013), Aziz e Nazaruddin (2014) apresentam modelos que envolvem dinâmicas importantes para controle de nível da água no tubulão, pressão no sistema, fluxo e temperatura do vapor.

2.6 Caldeira utilizada no estudo : especificações e detalhamento

Na seções 2.1 e 2.5, realizaram-se estudos, em um espectro mais amplo, sobre sistema híbridos e sistemas que compõe as caldeiras e suas fornalhas. Nesta seção será descrito, com maior detalhe, o sistema da específica caldeira da Arcelor Mittal, foco deste trabalho. O interesse primário deste trabalho é a modelagem e composição de um controle preditivo, para uma fornalha de caldeira. Como dito, este controle estará inserido no contexto de otimização em alto nível que gerencia a distribuição de sub-produtos combustíveis da usina siderúrgica. Logo, a meta é controlar precisamente o consumo de combustível, na fornalha, seguindo os requerimentos do otimizador mestre. Para sistemas baseados em eventos e sequências discretas em conjunto com dinâmicas contínuas, como é o caso da fornalha, modelos MLD/DHA são uma opção viável e fiel ao sistema real, como revisado na seção 2.1.

2.6.1 Descrição do sistema de vazão de gás da fornalha

A fornalha utilizada nesta modelagem é do tipo ciclônica, como mostra a **Figura 11**, com oito queimadores dispostos em pares nos quatro cantos da fornalha. A fornalha possui tiragem balanceada e a disposição dos ventiladores nas entradas de ar induz, dentro da fornalha, um movimento vorticoso que garante a queima completa do gás e troca de calor mais eficiente. A partir destas caracteristicas básicas, considera-se tais simplificações:

- A pressão interna da fornalha é constante devido ao sistema de controle que atua no ventilador de tiragem induzida.
- Todo o vapor produzido é imediatamente consumido pela turbina geradora;

- A pressão e temperatura do vapor, dentro da caldeira, é mantido constante por meio dos controladores desacoplados do sistema de controle da queima de combustível (existem somente intertravamentos de segurança para eventos emergenciais)
- A razão de combustível-ar nos queimadores é controlada por um sistema de controle em cascata. Estes controladores são suficientemente rápidos para não interferirem na dinâmica do sistema externo.
- O controle de temperatura da fornalha é realizado pelo fluxo de vapor produzido; todo o vapor produzido é consumido pelas turbinas da central termelétrica, desta forma é possível manter a temperatura do interior da fornalha constante com este controlador em cascata; logo a temperatura é considerada constante e com dinâmicas rápidas.
- A pressão de alimentação dos gases combustíveis e a pressão do interior da fornalha são consideradas constantes, mantidos pelo controle interno dos gasômetros e pelo controle dos *dampers*; as dinâmicas são rápidas e não interferem neste estudo.
- Esta modelagem será realizada somente para os queimadores de gás de alto forno (BFG)

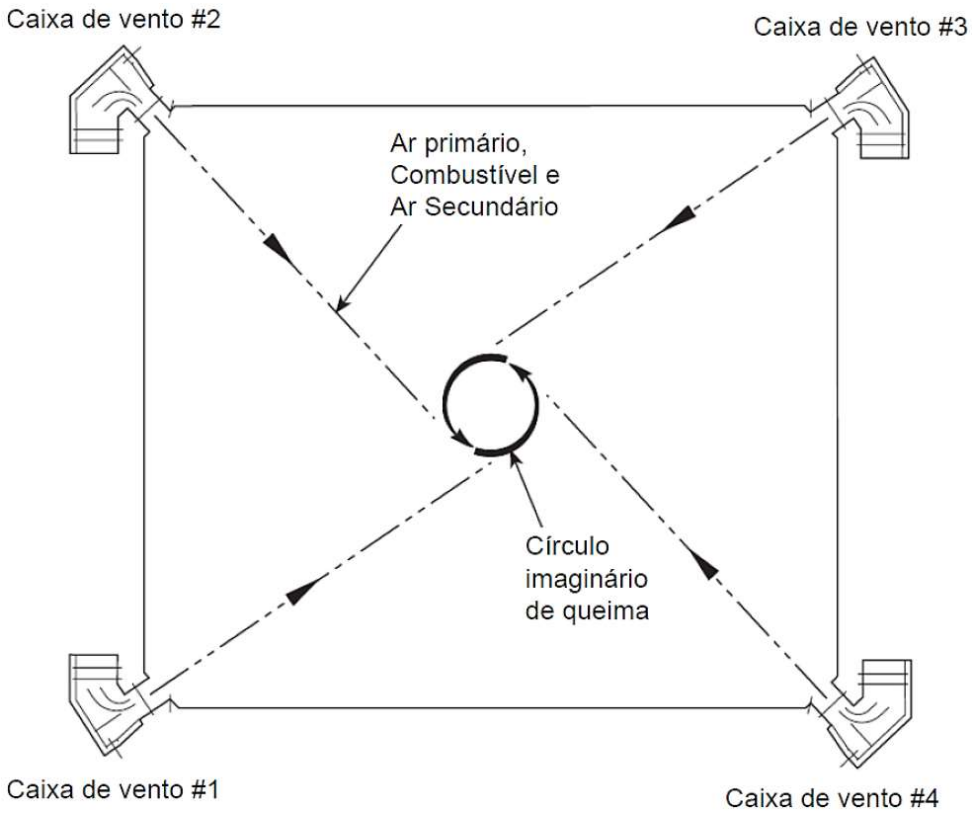


Figura 11 – Fornalha Ciclônica

Fonte:Kitto e Stultz (2005)

Na **Figura 12** está apresentado o diagrama da tubulação e instrumentação para cada queimador da fornalha estudada. Estão dispostos ao longo da tubulação diversos aparelhos utilizados para fins de segurança operacional e controle das variáveis de processo. No exemplo da **Figura 12** observa-se 3 válvulas em série para cada queimador. Seguindo o diagrama da **Figura 12**, da esquerda para direita, observa-se uma válvula de controle proporcional atuando no regulação da vazão do gás combustível. Em seguida, há mais duas válvulas de bloqueio em série, a primeira com abertura lenta e fechamento rápido, e segunda com abertura e fechamento rápido. De acordo com Day, Ratcliffe e Shepherd (2008) esta configuração confere ao sistema uma abertura gradual e segura, bem como o fechamento imediato em casos de falha na chama ou outro evento emergencial. Os sensores de pressão atuam no intertravamento do sistema, impedindo que o queimador opere fora da faixa de pressão do gás combustível permitida. Os pontos de teste e válvulas manuais são utilizados nos procedimentos de manutenção e diagnóstico.

Os ignitores, ou chamas piloto, são utilizados para manter a chama principal acesa. O controle dos ignitores é feito da mesma maneira que a dos queimadores, porém, como Kitto e Stultz (2005) relatam, os ignitores são divididos nas classes I, II e III, sendo que a contribuição máxima do calor gerado, por estes ignitores, é de 10% do calor total produzido pelo queimador. Nesta fornalha são utilizados dois ignitores por queimador; um ignitor do tipo I, também chamado estabilizador e um ignitor do tipo II que atua como chama piloto. Devido a baixa taxa da geração de calor dos ignitores, e como na caldeira estudada neste trabalho, os gases utilizados nos ignitores são de outras fontes como COG e Gás natural, as dinâmicas de gases combustíveis dos ignitores/estabilizadores é desconsiderada na modelagem. Para simplificação do sistema completo da fornalha, deve-se notar que o

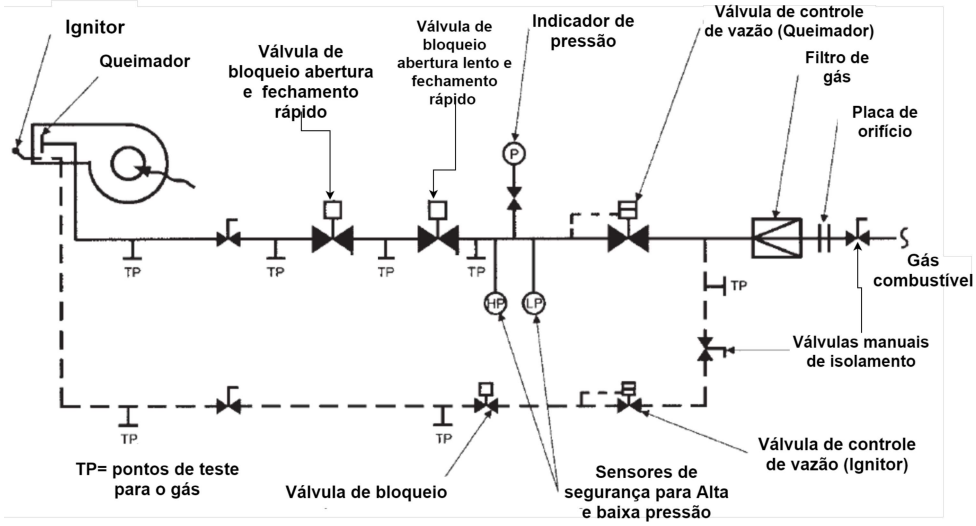


Figura 12 – Circuito típico de um queimador a gás

Fonte:Day, Ratcliffe e Shepherd (2008)

arranjo descrito na **Figura 12** consiste de um único queimador, entretanto há algumas

caracteristicas que diferem o circuito típico do sistema estudado neste trabalho, como mostra a **Figura 13**. Não há na fornalha uma placa de orifício para cada queimador, existindo somente uma instrumento de medição (FT 01) na entrada de gás geral do sistema. Os aparelhos de segurança e válvulas manuais foram removidos para simplificar o diagrama. As válvulas de bloqueio em série, que garantem abertura lenta e fechamento rápido, são substituídas por uma válvula teórica que possui os dois comportamentos concentrados no mesmo componente. O perfil de abertura e fechamento desta válvula composta está apresentada na **Figura 14**.

Concentrando os efeitos do restante dos aparelhos que compõem o circuito típico, são realizadas outras simplificações e adaptações. Avançando da esquerda para a direita na **Figura 13** identifica-se a tubulação de gás BFG que passa por uma placa de orifício e um transmissor de vazão $FT01$. A seguir a tubulação principal de BFG é dividida em 4 tubulações menores. Estas tubulações possuem uma válvula de controle de vazão FVj instalada em seu percurso e seus respectivos controladores FCj , sendo $j = 1, 2, 3, 4$. As tubulações vinda das válvulas são novamente derivadas em um par de tubulações. Estas ultimas tubulações estão ligadas em série, com uma válvula de bloqueio VBi, que permite ou não a passagem do gás, sendo $i = 1, 2, ...8$.

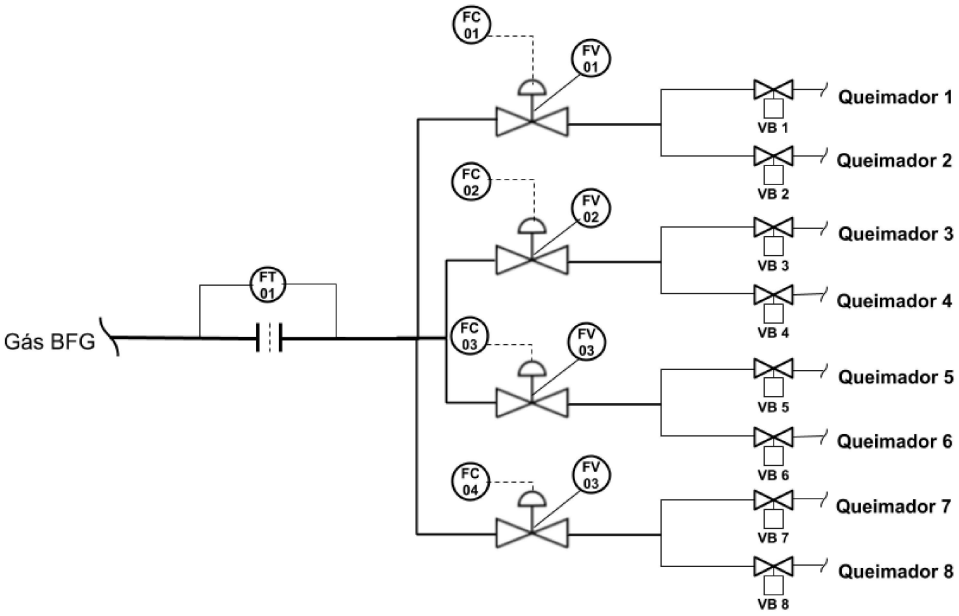


Figura 13 – Circuito do queimador

Fonte: Própria

A seguir é retratado um resumo das normas e boas práticas para operação segura de uma fornalha, pois as sequencias e intertravamentos requeridos por estas práticas são incluídas no modelo híbrido final deste trabalho.

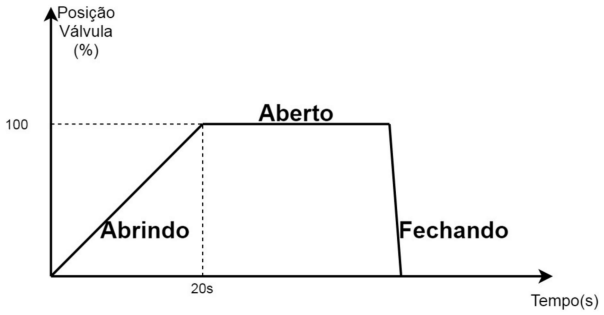


Figura 14 – Perfil de abertura e fechamento da válvula de bloqueio

Fonte: Própria

2.6.2 Operação segura de uma fornalha

A operação de uma fornalha apresenta-se como um desafio para os responsáveis pela monitoração e controle de uma caldeira. O processo de acionamento total de uma caldeira é regulado pela NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION e definido a partir da norma NFPA 85 (ASSOCIATION, 2007), para prevenção de acidentes em caldeiras e sistemas de combustão. No que tange a operação das câmaras de combustão, as normas técnicas definem regras para acionamento de caldeiras, com objetivo principal na prevenção de sinistros; os principais são: retrocesso de chama pela tubulação de alimentação e explosão da câmara de combustão por acumulo de gás no recinto.

A permissão de abertura e fechamento das válvulas de bloqueio (VBi), na **Figura 13**, são determinadas via regras lógicas de sequenciamento das ações que recebem sinais discretos, como, condições de segurança, condições de operação e comandos dos operadores (comandos de partida, detecção de chama, pressão de combustível nos limites desejados, etc.). A fornalha deste trabalho possui 3 sistemas concentrados de gerenciamento:

1- Sistema de controle de combustão (*Combustion Control System - CCS*): compõe-se de todos os controles regulatórios para variáveis de processo com natureza contínua, como pressão, vazão de combustível, temperatura, nível de água e concentração de subprodutos da queima nos gases de emissão.

2- Sistema de gerenciamento de queimadores (*Burner Management System -BMS*): consiste no controle das sequencias de acendimento dos ignitores, estabilizadores e queimadores. Este sistema também é responsável pela verificação das condições de segurança, temporizadores e estabilidade do sistema.

3- Sistema de intertravamento de segurança (SIS): é encarregado das ações emergenciais de intertravamento, parada de emergência, verificação de condições de criticas segurança, como pré-requisitos de permissões de operação e condições anormais de funcionamento.

Estes sistemas são implementados em controladores lógicos programáveis (CLP) e podem ter uma topologia centralizada ou descentralizada, vinculado aos requerimentos internos de segurança e redundância do sistema. As **Figuras 15** e **16** mostram os diagramas resumidos da instrumentação e equipamentos dos sistemas CCS e BMS, respectivamente.

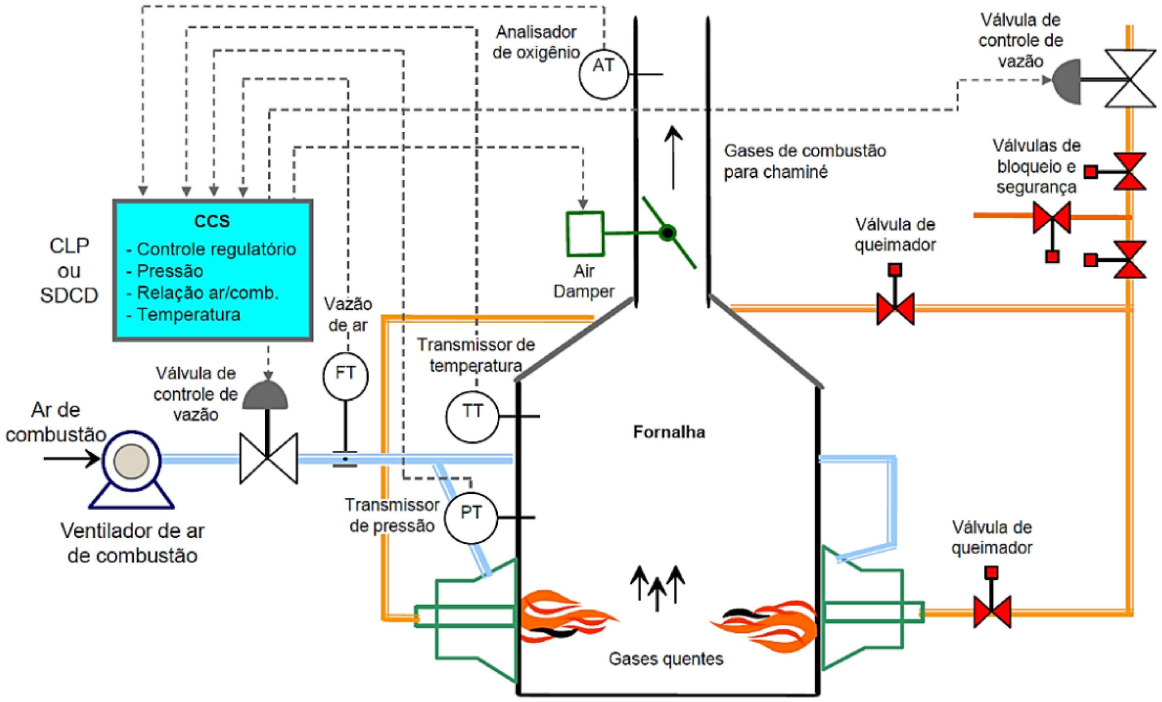


Figura 15 – Sistema de controle de combustão - Combustion control system (CCS)

Fonte: Smith (2000)

Apesar da separação de implementação dos sistemas BMS e CCS, estes ainda são sistemas acoplados e interdependentes entre si. A exemplo, o sistema BMS atua nos centelhadores, válvulas de bloqueio e chaves de pressão para garantir acendimento e manutenção da chama dos queimadores. Ao acionar os queimadores, o BMS repassa sincronicamente a informação sobre a quantidade de queimadores acionados, para o sistema CCS. Desta forma o CCS seleciona a sintonia correspondente aos controladores e atualiza a nova restrição de vazão mínima, de modo a manter a pressão antes das válvulas de bloqueio VBi (vide **Figura 13**) maior que a pressão da câmara de combustão. Resumidamente, quando o número de queimadores aumenta, a capacidade de vazão de combustível também se eleva. Uma vazão maior intensifica a perda de carga nas válvulas FVj; logo a posição das válvulas não devem ser atuadas abaixo de um limite pré-determinado. Caso estes limites mínimos de vazão não sejam obedecidos, o sistema SIS assume controle da planta e executa uma parada segura de emergência, fechando todas as válvulas VBi.

Na próxima seção é explanado o sistema de gerenciamento dos queimadores (BMS), de modo introduzir as principais premissas de regem as sequências e permissões, para os procedimentos de inicialização e parada.

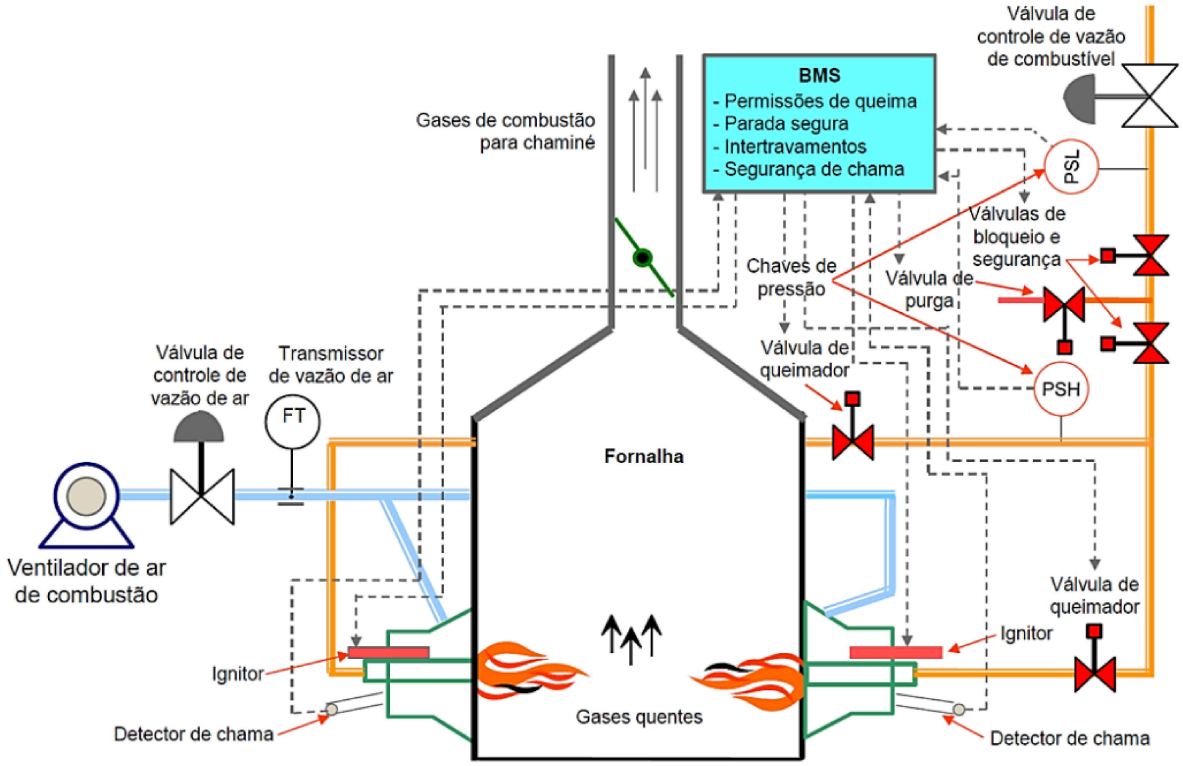


Figura 16 – Sistema de gerenciamento de queimadores - Burner management system (BMS)

Fonte: Smith (2000)

2.7 Modelagem dos ciclos de acendimento governado pelo BMS

Da mesma forma que são determinados, pela NFPA 85, os intertravamentos e procedimentos de manutenção e prevenção de acidentes, esta norma também define as sequencias referente ao BMS. A um nível de hierarquia alto, a gerência deste processo é dividido em 4 principais etapas:

1- Realizar e confirmar a purga da fornalha

2- Realizar o procedimento de acendimento do ignitor

3- Realizar o procedimento de acendimento do estabilizador

4- Realizar o procedimento de acendimento dos queimadores

Estas etapas estão mostradas nas **Figuras 17 e 18**. Na **Figura 17** o estágio **1** inicia-se com verificação de válvulas de combustível fechadas, ventilador ligado e o *damper* de ar garantindo um fluxo mínimo de ar em 70% da capacidade máxima. Depois de realizada e confirmada a purga de no mínimo oito volumes da câmara de combustão, inicia-se o estágio **2**. O *damper* é então posicionado a 20% da abertura máxima, a válvula do gás natural é aberta e o centelhador acionado. Assim que a chama do ignitor é confirmada

inicia-se o estágio **3** (**Figura** 18) de acendimento do estabilizador . Para isto, a válvula do gás COG é aberta e o estabilizador é aceso. Assim que a chama do estabilizador é confirmada, o estágio **4** é iniciado, abrindo a válvula de BFG e acendendo do queimador. Assim que a chama do queimador é confirmada, o fluxo de ar e fluxo de gás passa a ser controlado pelo CCS.

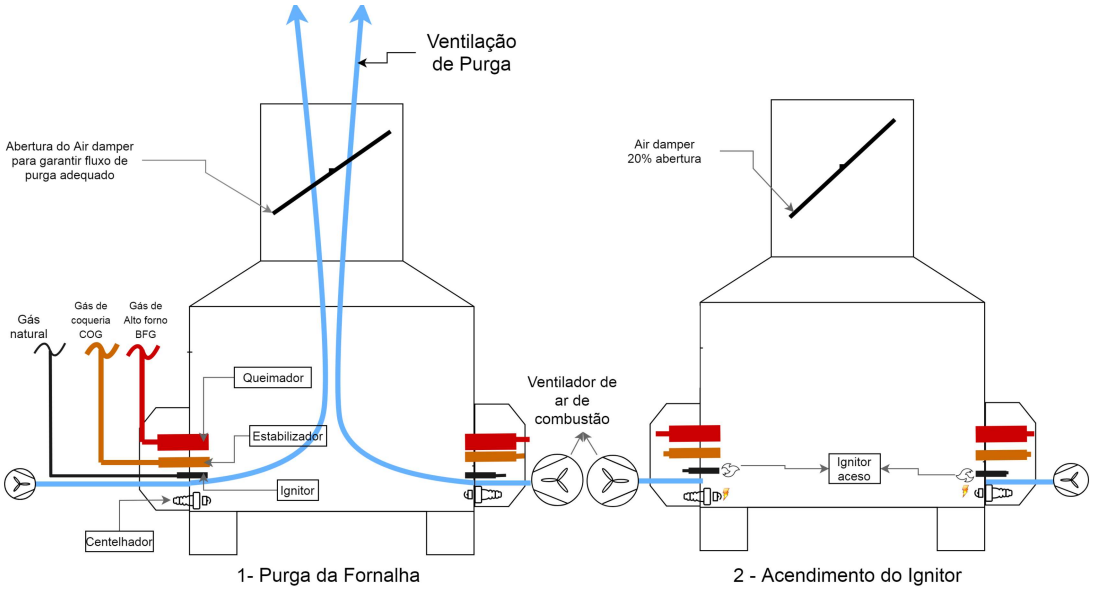


Figura 17 – DESCRIÇÃO

Fonte: Autor

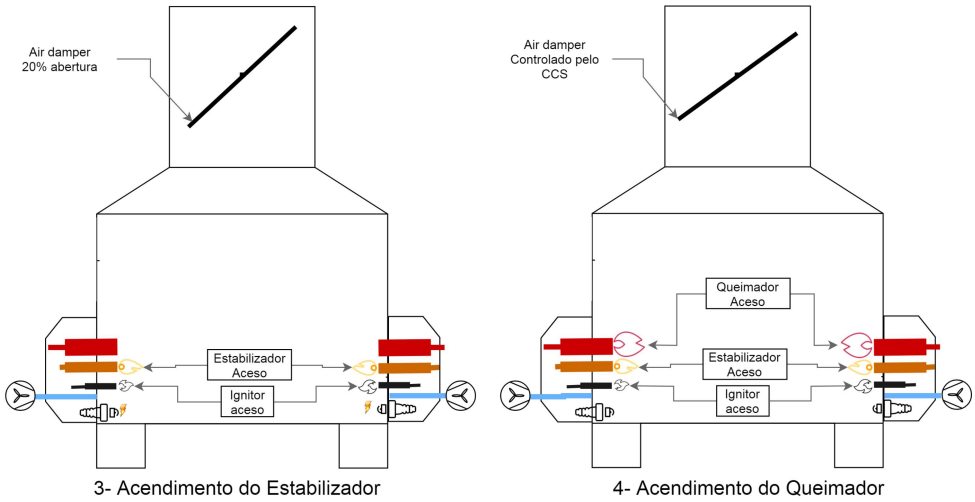


Figura 18 – DESCRIÇÃO

Fonte: Autor

Todo o sistema de acionamento e monitoramento (BMS) é semi-automatizado.

[2] *Supervisory Control and Data Acquisition*, são sistemas que utilizam software para monitorar e supervisionar as variáveis e os dispositivos de sistemas de controle - geralmente controladores lógicos pro-gramáveis (CLP) - conectados através de drivers de comunicação específicos.

Processos como, inter-travamento, paradas de segurança/emergência e controle de variáveis contínuas são automatizados. Entretanto permissões e comandos de acendimento, procedimentos de purga e restabelecimento de operação após uma parada de segurança são operados manualmente, via SCADA[2]. Desta forma, os sistemas BMS e SIS são responsáveis pelos eventos e estados discretos e o sistema CCS é encarregado das dinâmicas continuas do processo.

Nas próximas seções é proposto o modelo completo do sistema de combustão de uma fornalha em termos de um sistema DHA, seguindo a seguinte ordem:

- Modelagem e simplificação do sistema dinâmico a um sistema comutado por partes (SAS);
- Modelagem das maquinas de estados do Ignitores, Estabilizadores e Queimadores (FSM) e os geradores de eventos (EG);
- Especificação do seletor de modo que integra todo o sistema;

3 Modelagem do sistema comutado por partes (SAS) da vazão de combustíveis da fornalha

De acordo com Garcia (1997), para produzir um modelo consistente, simplificado, mas suficientemente complexo é preciso tomar três medidas principais: ignorar pequenos efeitos, substituir parâmetros distribuídos por concentrados, e assumir que há relações lineares. Dado este conceito, propõe-se como objetivo deste capitulo desenvolver o modelo com parâmetros concentrados do sistema de vazão de gás BFG, da fornalha, apresentado na **Figura 13** na seção 2.5.

Partindo destas premissas, descreve-se na **Figura 19** o sistema concentrado do sistema da **Figura 13**. Considera-se primeiramente que todas as perdas de cargas distribuídas (perda na tubulação, válvula e placa de orifício), de cada trecho, é concentrado e possui uma resistência fluídica R_{ori}, R_{tub} e R_{VB}. Os efeitos relacionados ao volume da tubulação e corpo das válvulas estão concentrados em V_{ori} e V_{tub}.

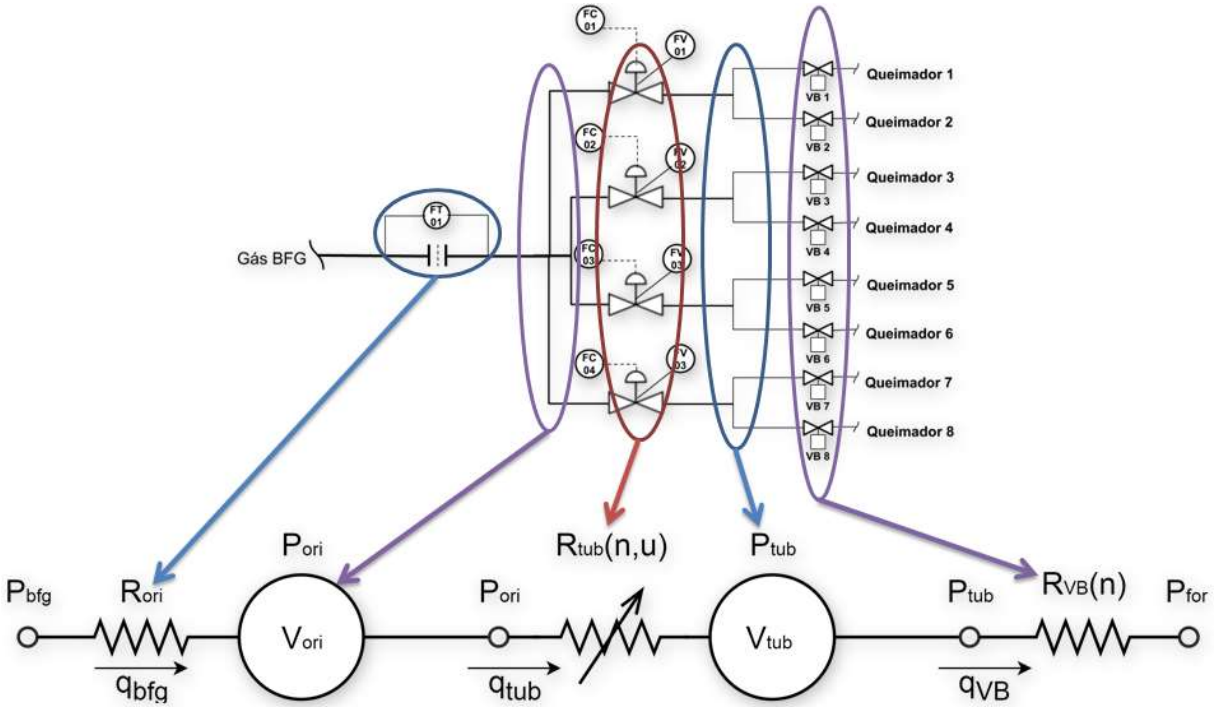


Figura 19 – Sistema com perdas concentradas

Fonte: Própria

Antes de descrever a equação que define a simplificação concentrada da **Figura 19** e suas variáveis, é necessário desenvolver algumas formulações e considerações sobre a

resistência e volume genéricos R_c e V_c, respectivamente. Considerando um sistema sem perda de carga , com o efeito de compressão no volume V_c tem-se o sistema da **Figura 20**.

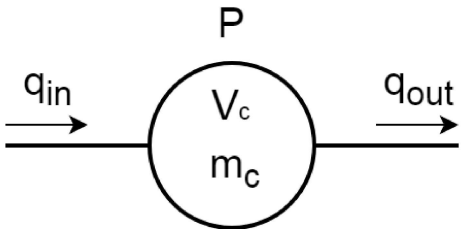


Figura 20 – Efeito isolado do volume V_c

Fonte: Própria

Sendo ρ (kg/m^3) a densidade do gás que passa por V_c (m^3), com fluxos de entrada e saída q_{in} e q_{out}, respectivamente, P a pressão em V_c e m_c a massa do gás contida em V_c:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{d[\rho(t)V_c(t)]}{dt}$$

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{d\rho(t)}{dt}V_c(t) + \frac{dV_c(t)}{dt}\rho(t) \tag{3.1}$$

Considerando que a variação de volume interno das tubulações $\Big(V_c(t)\Big)$ é desprezível e não altera com o tempo, admite-se que:

$$V_c(t) = V_c$$

$$\frac{dV_c(t)}{dt} = 0$$

Assim de 3.1:

$$\dot{m}_c = \frac{d\rho(t)}{dt}V_c \tag{3.2}$$

Considerando que o gás combustível se comporta como um gás ideal e todo o processo termodinâmico que ocorre é isotérmico, n é a quantidade de mols de gás contido em V_c, M é a massa molecular do gás, R é a constante universal dos gases e T é a temperatura do gás. Pela equação de *Clayperon* dos gases perfeitos :

$$PV_c = nRT$$

$$n = m_c/M$$

$$PV_c = \frac{m}{M}RT$$

$$P = \rho\frac{RT}{M} \tag{3.3}$$

Derivando a eq. 3.3:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{d\rho(t)}{dt}\frac{RT}{M}$$

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = \frac{M}{RT}\frac{dP}{dt} \tag{3.4}$$

Inserindo a eq. 3.4 na eq. 3.2:

$$\frac{dm_c}{dt} = \frac{M}{RT}V_c\frac{dP}{dt} \tag{3.5}$$

Como MV_c/RT é constante dado as considerações feitas, pode-se atribuí-lo a K, logo:

$$\frac{dm_c}{dt} = K\frac{dP}{dt} \tag{3.6}$$

Dado que a densidade do gás BFG, $\rho_{sistema}$, é igual e constante, para q_{in} e q_{out}:

$$(q_{in} - q_{out})\rho_{sistema} = \dot{m}_c,$$

e sendo K_e a constante equivalente do efeito de vazão, conclui-se que

$$K_e = \frac{K}{\rho_{sistema}},$$

e

$$q_{in} - q_{out} = K_e\frac{dP}{dt}. \tag{3.7}$$

A **Figura 21** mostra o modelo com as perdas de carga concentradas, sendo representado por uma resistência fluídica R_c e uma diferença de pressão $\Delta P = P_1 - P_2$. Segundo Coelho e Pinho (2007) o fluxo volumétrico, $q_{vol}(m^3/s)$ em um trecho é determinado por:

$$q_{vol} = C\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_r}}, \tag{3.8}$$

onde, C =constante de resistência fluídica e ρ_r =Densidade relativa.

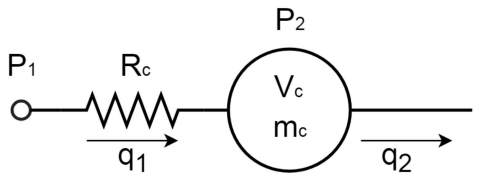


Figura 21 – Efeito isolado da resistência fluídica

Fonte: Própria

A vazão volumétrica, q_1 (m^3/s), a densidade em temperatura e pressão padrão, $\rho_{padrão}$, e a densidade no interior do tubo, $\rho_{sistema}$, são calculados através das seguintes expressões:

$$q_1 = C\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_r}}, \tag{3.9}$$

onde,

$$\rho_r = \frac{\rho_{sistema}}{\rho_{padrão}}.$$

Portanto:

$$\Delta P = \frac{\rho_{sistema}}{C^2 \rho_{padrão}} q_1^2, \tag{3.10}$$

Considerando que no caso da queima do BFG a densidade do sistema, $\rho_{sistema}$, é constante por todo o processo, pois todo efeito de variação de densidade está concentrado na dentro do Volume V_c, é possível considerar que há uma resistência equivalente R_c:

$$\frac{\rho_{sistema}}{C^2 \rho_{padrão}} = R_c \tag{3.11}$$

Substituindo a eq. 3.11 na eq. 3.10:

$$P_2 - P_1 = R_c q_1^2 \tag{3.12}$$

O sistema da **Figura 21** é uma representação do sistema simplificado da **Figura 13**. Cada trecho correspondente a uma resistência fluídica equivalente e um efeito de volume equivalente. Os símbolos P_{bfg} e P_{for} são respectivamente as pressões de alimentação do combustível e pressão interna da fornalha, sendo estes mantidos constantes durante a queima. As pressões depois da placa de orifício P_{ori} e P_{tub} variam de acordo com o fluxo de gás na entrada q_{bfg}, na tubulação q_{tub} e nas válvulas de bloqueio q_{VB}. As resistências fluídicas equivalentes, no tubo, $R_{tub}(n, u)$, e das válvulas, $R_{VB}(n)$, variam de acordo com a quantidade n de queimadores acesos, para $n = 1, 2, 3...8$. Somente $R_{tub}(n, u)$ depende da abertura da válvula de controle do gás.

Usando a eq. 3.12 aplicada ao sistema da **Figura 13** tem-se:

$$P_{bfg} - P_{ori} = R_{ori} q_{bfg}^2 \tag{3.13}$$

$$P_{ori} - P_{tub} = R_{tub}(n, u) q_{tub}^2 \tag{3.14}$$

$$P_{tub} - P_{for} = R_{VB}(n) q_{VB}^2 \tag{3.15}$$

Derivando as equações 3.13 e 3.15, obtêm-se, respectivamente:

$$\frac{dP_{bfg}}{dt} - \frac{dP_{ori}}{dt} = 2R_{ori} q_{bfg} \frac{dq_{bfg}}{dt}$$

$$\frac{dP_{tub}}{dt} - \frac{dP_{for}}{dt} = 2R_{VB} q_{VB} \frac{dq_{VB}}{dt}$$

Como P_{bfg} e P_{for} são constantes, suas derivadas são nulas. Logo:

$$-\frac{dP_{ori}}{dt} = 2R_{ori} q_{bfg} \frac{dq_{bfg}}{dt} \tag{3.16}$$

$$\frac{dP_{tub}}{dt} = 2R_{VB}q_{VB}\frac{dq_{VB}}{dt} \tag{3.17}$$

Para os efeitos dos volumes V_{ori} e V_{tub} considerando cada efeito gerado pela constante K_{ori} e K_{tub} calcula-se a partir da eq. 3.7

$$q_{bfg} - q_{tub} = K_{ori}\frac{dP_{ori}}{dt}$$

$$\frac{dP_{ori}}{dt} = \frac{q_{bfg} - q_{tub}}{K_{ori}} \tag{3.18}$$

$$q_{tub} - q_{VB} = K_{tub}\frac{dP_{tub}}{dt}$$

$$\frac{dP_{tub}}{dt} = \frac{q_{tub} - q_{VB}}{K_{tub}} \tag{3.19}$$

Substituindo a eq. 3.18 e eq. 3.19 nas equações 3.16 e 3.17:

$$\frac{dq_{bfg}}{dt} = -(2R_{ori}K_{ori})^{-1} + \frac{q_{tub}}{q_{bfg}}(2R_{ori}K_{ori})^{-1} \tag{3.20}$$

$$\frac{dq_{VB}}{dt} = \frac{q_{tub}}{q_{VB}}(2R_{VB}K_{tub})^{-1} - (2R_{VB}K_{tub})^{-1} \tag{3.21}$$

As equações 3.20 e 3.21 são não lineares. O procedimento de linearização utiliza a expansão da série de Taylor, em torno do ponto de operação $\overline{q_{bfg}}$, $\overline{q_{tub}}$, $\overline{q_{VB}}$, truncada em primeira ordem.

$$\frac{dq_{bfg}}{dt} = F(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}) + \left.\frac{\partial F}{\partial q_{bfg}}\right|_{(\overline{q_{bfg}},\overline{q_{tub}})}.(q_{bfg} - \overline{q_{bfg}}) + \left.\frac{\partial F}{\partial q_{tub}}\right|_{(\overline{q_{bfg}},\overline{q_{tub}})}.(q_{tub} - \overline{q_{tub}}) \tag{3.22}$$

$$\frac{dq_{VB}}{dt} = G(\overline{q_{VB}}, \overline{q_{tub}}) + \left.\frac{\partial G}{\partial q_{VB}}\right|_{(\overline{q_{VB}},\overline{q_{tub}})}.(q_{VB} - \overline{q_{VB}}) + \left.\frac{\partial G}{\partial q_{tub}}\right|_{(\overline{q_{bfg}},\overline{q_{tub}})}.(q_{tub} - \overline{q_{tub}}) \tag{3.23}$$

Considerando:

$$\frac{dq_{bfg}}{dt} = F(q_{bfg}, q_{tub})$$

$$\frac{dq_{VB}}{dt} = G(q_{tub}, q_{VB})$$

e

$$\Delta q_{bfg} = q_{bfg} - \overline{q_{bfg}}$$

$$\Delta q_{VB} = q_{VB} - \overline{q_{VB}}$$

Como:

$$\frac{d\Delta q_{bfg}}{dt} = \frac{dq_{bfg}}{dt} - \frac{d\overline{q_{bfg}}}{dt} \tag{3.24}$$

$$\frac{d\Delta q_{VB}}{dt} = \frac{dq_{VB}}{dt} - \frac{d\overline{q_{VB}}}{dt} \tag{3.25}$$

A linearização é feita para um ponto de operação, em que os fluxos são constantes, logo, $\frac{d\overline{q_{bfg}}}{dt}$, $\frac{d\overline{q_{tub}}}{dt}$ e $\frac{d\overline{q_{VB}}}{dt}$ são iguais a zero. Desta forma:

$$F(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}) = 0$$

$$G(\overline{q_{tub}}, \overline{q_{VB}}) = 0$$

Logo da eq. 3.24 e eq. 3.25:

$$\frac{d\Delta q_{bfg}}{dt} = \frac{dq_{bfg}}{dt}$$

$$\frac{d\Delta q_{VB}}{dt} = \frac{dq_{VB}}{dt}$$

Desenvolvendo a eq. 3.22 :

$$\frac{d\Delta q_{bfg}}{dt} = -\alpha_1 \frac{\overline{q_{tub}}}{\overline{q_{bfg}}^2} \Delta q_{bfg} + \alpha_1 \frac{1}{\overline{q_{bfg}}} \Delta q_{tub} \tag{3.26}$$

considerando,

$$\alpha_1 = (2R_{ori}K_{ori})^{-1}$$

Desenvolvendo a eq. 3.23:

$$\frac{d\Delta q_{VB}}{dt} = \frac{\alpha_2}{\overline{q_{VB}}} \Delta q_{tub} - \frac{\alpha_2 \overline{q_{tub}}}{\overline{q_{VB}}^2} \Delta q_{VB} \tag{3.27}$$

considerando,

$$\alpha_2 = (2R_{VB}K_{tub})^{-1}$$

Como $\overline{q_{tub}} = \overline{q_{bfg}} = \overline{q_{VB}}$, para o ponto de operação, a partir das equações 3.26 e 3.27:

$$\frac{d\Delta q_{bfg}}{dt} = \frac{\alpha_1}{\overline{q_{bfg}}} \Delta q_{tub} - \frac{\alpha_1}{\overline{q_{bfg}}} \Delta q_{bfg} \tag{3.28}$$

$$\frac{d\Delta q_{VB}}{dt} = \frac{\alpha_2}{\overline{q_{bfg}}} \Delta q_{tub} - \frac{\alpha_2}{\overline{q_{bfg}}} \Delta q_{VB} \tag{3.29}$$

Sendo $x_1 = \Delta q_{bfg}$, $w = \Delta q_{tub}$, $x_2 = \Delta q_{VB}$ da eq. 3.28:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{\tau_1(n)}(w - x_1) \tag{3.30}$$

considerando,

$$\frac{1}{\tau_1(n)} = \frac{\alpha_1}{\overline{q_{bfg}}}$$

Da eq. 3.29:

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{\tau_2(n)}(w - x_2) \tag{3.31}$$

considerando,

$$\frac{1}{\tau_2(n)} = \frac{\alpha_2}{\overline{q_{bfg}}}$$

O fluxo q_{tub} possui duas não linearidades associadas. Além da não linearidade referente a resistência fluídica dependente do número de queimadores n, há a não linearidade que relaciona a abertura da válvula x (%) a resistência fluídica equivalente. Dado que q_{tub}:

$$q_{tub}^2 = \frac{P_{ori} - P_{tub}}{R_{tub}(n,u)} \tag{3.32}$$

Logo:

$$P_{ori} = q_{tub}^2 R_{tub}(n,u) + P_{tub} \tag{3.33}$$

Voltando as equações 3.13 e 3.15, tem-se que P_{ori} e P_{tub} são:

$$P_{ori} = P_{bfg} - R_{ori} q_{bfg}^2 \tag{3.34}$$

$$P_{tub} = R_{VB}(n) q_{VB}^2 - P_{for} \tag{3.35}$$

Substituindo 3.35 em 3.33:

$$P_{ori} = q_{tub}^2 R_{tub}(n,x) + R_{VB}(n) q_{VB}^2 - P_{for} \tag{3.36}$$

A seguir tem-se as linearizações das equações 3.34 e 3.36 com uma série de expansão de Taylor, em torno do ponto de operação $\overline{q_{bfg}}$, $\overline{q_{tub}}$, $\overline{q_{VB}}$, e $\bar{u}$ truncada em primeira ordem. Da eq. 3.36:

$$\begin{aligned} P_{ori}(q_{bfg}, q_{tub}, u) = H(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}, \bar{u}) + \left.\frac{\partial H}{\partial q_{bfg}}\right|_{(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}, \bar{u})} .(q_{bfg} - \overline{q_{bfg}}) \\ + \left.\frac{\partial H}{\partial q_{tub}}\right|_{(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}, \bar{u})} .(q_{tub} - \overline{q_{tub}}) + \left.\frac{\partial H}{\partial u}\right|_{(\overline{q_{bfg}}, \overline{q_{tub}}, \bar{u})} .(u - \bar{u}) \end{aligned} \tag{3.37}$$

Da eq. 3.34:

$$P_{ori}(q_{bfg}) = I(\overline{q_{bfg}}) + \left.\frac{\partial I}{\partial q_{bfg}}\right|_{(\overline{q_{bfg}})} .(q_{bfg} - \overline{q_{bfg}}) \tag{3.38}$$

Considerando:

$$P_{ori}(q_{bfg}, q_{tub}, u) = H(q_{bfg}, q_{tub}, u)$$

$$P_{ori}(q_{bfg}) = I(q_{bfg})$$

$$\Delta u = u - \overline{u}$$

Desenvolvendo a eq. 3.37:

$$\Delta P_{ori}(q_{bfg}, q_{tub}, u) = 2\overline{q_{tub}}R_{tub}(n, \overline{u})\Delta q_{tub} + 2\overline{q_{VB}}R_{VB}(n)\Delta q_{VB} + \overline{q_{tub}}^2 \frac{\partial R_{tub}}{\partial u}\bigg|_{\overline{u}} \Delta u$$

Logo:

$$\Delta P_{ori}(q_{bfg}, q_{tub}, u) = 2\overline{q_{tub}}R_{tub}(n, \overline{u})w + 2R_{VB}\overline{q_{VB}}(n)x_2 + \overline{q_{tub}}^2 \frac{\partial R_{tub}}{\partial u}\bigg|_{\overline{u}} \Delta u \tag{3.39}$$

Desenvolvendo a eq. 3.38:

$$\Delta P_{ori} = -2R_{ori}\overline{q_{bfg}}\Delta q_{bfg}$$

Logo:

$$\Delta P_{ori} = -2R_{ori}\overline{q_{bfg}}x_1 \tag{3.40}$$

Substituindo a eq. 3.40 na eq. 3.39:

$$w = \frac{-2R_{ori}\overline{q_{bfg}}(n)x_1 - 2R_{VB}\overline{q_{VB}}(n)x_2 - \overline{q_{tub}^2}(n)\frac{\partial Rtub}{\partial u}\Big|_{\overline{u}} \Delta u}{2\overline{q_{tub}}(n)R_{tub}(n, \overline{u})} \tag{3.41}$$

Considerando $\frac{\partial Rtub}{\partial u}\Big|_{\overline{u}} = R'_{tub}(n, \overline{u})$ e como $\overline{q_{tub}}(n) = \overline{q_{bfg}}(n) = \overline{q_{VB}}(n)$:

$$K_1(n) = \frac{-2R_{ori}}{2R_{tub}(n, \overline{u})}$$

$$K_2(n) = \frac{-2R_{VB}}{2R_{tub}(n, \overline{u})}$$

$$K_3(n) = \frac{\overline{q_{bfg}(n)}R'_{tub}(n, \overline{u})}{2R_{tub}(n, \overline{u})}$$

A eq. 3.41 resume-se em:

$$w = K_1(n)x_1 + K_2(n)x_2 + K_3(n)\Delta u \tag{3.42}$$

Substituindo a eq. 3.42 nas eq. 3.30 e eq. 3.31, obtêm-se o espaço de estado a seguir, para $n = 1, 2, ..., 8$:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1(n)-1}{\tau_1(n)} & \frac{K_2(n)}{\tau_1} \\ \frac{K_1(n)}{\tau_2} & \frac{K_2(n)-1}{\tau_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_3(n)}{\tau_1} \\ \frac{K_3(n)}{\tau_2} \end{bmatrix} \Delta u(t) \tag{3.43}$$

3.1 Determinação dos parâmetros do sistema

3.1.1 Cálculo da resistência R_{ori}

Oliveira Jr. (2016) mostra que a relação entre a vazão de gás q_{bfg} e a diferença de pressão Δp é descrita completamente pela eq.:

$$q_{bfg} = C_{FE}\ \varepsilon_{FE} \frac{1}{\sqrt{1-\beta_{FE}^4}} \pi \frac{d^2}{4} \sqrt{2\rho_{FE}\Delta p} \tag{3.44}$$

Dado que:

- C_{FE} é o coeficiente de descarga da placa de orifício;
- ε_{FE} é o coeficiente de expansão do fluido;
- $\beta_{FE} = \frac{d}{D}$ é a relação do furo da placa (d) e o diâmetro da tubulação (D);
- ρ_{FE} é a massa específica do fluido;
- Δp é a pressão diferencial gerada pela placa de orifício.

É assumido que não há variação significativa na massa específica do fluido quando passa pela placa de orifício, logo a eq. 3.44 pode ser simplificada em:

$$q_{bfg} = K_{FE}\sqrt{\Delta p} \tag{3.45}$$

Oliveira Jr. (2016) fornece algumas informações da folha de dados da placa de orifício. É informado que, para vazão máxima de $q_{bfg_{max}} = 300 dam^3/h$, a placa de orifício provoca uma diferença de pressão, $\Delta p_{max} = 120 mmH_2O$. Logo:

$$K_{FE} = \frac{q_{bfg_{max}}}{\sqrt{\Delta p_{max}}} = \frac{300}{\sqrt{120}} = 27,386 dam^3 h^{-1}/(mmH_2O^{1/2})$$

Comparando a eq. 3.34 com a eq. 3.45, tem-se que:

$$R_{ori} = \frac{1}{K_{FE}^2} = \frac{1}{27,386^2} = 1,3333X10^{-3}$$

3.1.2 Cálculo da resistência $R_{tub}(n, \bar{u})$ e sua derivada $R'_{tub}(n, \bar{u})$

Oliveira Jr. (2016), em seu trabalho formulou o conjunto de equações que definem $R_{tub}(n, u)$. O autor utilizou uma técnica de ajuste de curvas as resistências calculadas, por meio de um algorítimo de otimização para minimizar o erro quadrático médio. Desta forma, foi possível ajustar uma equação de 2ª ordem, de acordo com a eq. 3.46:

$$R_{tub}(n, u) = a_2(n)u^2 + a_1(n)u + a_0(n) \tag{3.46}$$

Queimadores acesos (n)	$a_2(n)$	$a_1(n)$	$a_0(n)$
1	1,62059375	-3,74368125	2,12295625
2	0,8711	-2,0356	1,1645
3	0,42073125	-0,99189375	0,57119375
4	0,1961	-0,4534	0,2573
5	0,12381875	-0,26095625	0,13708125
6	0,1305	-0,2554	0,1248
7	0,14275625	-0,27756875	0,13471875
8	0.0872	-0,1683	0,0811

Tabela 5 – Tabela parâmetros R_{tub}

Fonte: Própria

Os valores dos parâmetros da eq. 3.46, estão mostrados na **Tabela** 5:

Sendo:

$$R'_{tub}(n,u) = 2a_2(n)u + a_1(n) \tag{3.47}$$

A válvula atua em torno do ponto de operação $\bar{u} = 60\%$. Logo substituindo $\bar{u}$ na eq. 3.46 e eq. 3.47, tem-se a **Tabela** 6:

Queimadores acesos (n)	$R_{tub}(n, 60\%)$	$R'_{tub}(n, 60\%)$
1	0,4582824	-1,802092
2	0,256736	-0,99028
3	0,127523	-0,4870125
4	0,055856	-0,21808
5	0,02508225	-0,11237375
6	0,01854	-0,0988
7	0,016912	-0,09486
8	0,011512	-0,06366

Tabela 6 – Tabela parâmetros $R_{tub}(n, \bar{u})$ e $R'_{tub}(n, \bar{u})$

Fonte: Própria

3.1.3 Cálculo da resistência fluídica $R_{VB}(n)$

Os ensaios gerados na caldeira da ArcellorMittal forneciam os seguintes dados com tempo de amostragem $T_s = 1s$, e sendo $t = kT_s$, para $k \in \mathbb{Z}$:

- Pressão de alimentação do gás $Pbfg(k)$;
- O fluxo de gás BFG $q_{bfg}(k)$ que passa pela placa de orifício;
- Posição da válvula $u(k)$;
- A diferença de pressão nos queimadores $\Delta p = P_{tub}(k) - P_{for}(k)$;

- Pressão interna da fornalha $P_{for} = -20mmH_2O$;
- A quantidade de queimadores ligados no instante k $n(k)$;

Voltando as equações 3.30 e 3.31:

$$\frac{d(q_{bfg}(t) - \overline{q_{bfg}}(t))}{dt} = \frac{1}{\tau_1(n)}\Big[(q_{tub}(t) - \overline{q_{tub}}(t)) - (q_{bfg}(t) - \overline{q_{bfg}}(t))\Big] \tag{3.48}$$

$$\frac{d(q_{VB}(t) - \overline{q_{VB}}(t))}{dt} = \frac{1}{\tau_2(n)}\Big[(q_{tub}(t) - \overline{q_{tub}}(t)) - (q_{VB}(t) - \overline{q_{VB}}(t))\Big] \tag{3.49}$$

Como $\overline{q_{tub}} = \overline{q_{bfg}} = \overline{q_{VB}}$, para o ponto de operação e $\frac{d\overline{q_{bfg}}}{dt} = 0$, as equações 3.48 e 3.49 são equivalentes à:

$$\frac{dq_{bfg}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_1(n)}\Big[q_{tub}(t) - q_{bfg}(t)\Big] \tag{3.50}$$

$$\frac{dq_{VB}(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_2(n)}\Big[q_{tub}(t) - q_{VB}(t)\Big] \tag{3.51}$$

Aproximando a derivada no tempo, a uma equação diferença, pelo método de Euler avançado:

$$\frac{dR(t)}{dt} \approx \frac{R\Big(T_s(k+1)\Big) - R\Big(kT_s\Big)}{T_s}$$

Como T_s é constante durante todo o modelo, pode-se simplificar os índices, tornando-os dependentes somente de k, como $R(T_s(k+1) = R(k+1)$ e $R(kT_s) = R(k)$. Logo as equações 3.50 e 3.51 serão:

$$q_{bfg}(k+1) = \frac{Ts\Big[q_{tub}(k) - q_{bfg}(k)\Big]}{\tau_1(n)} + q_{bfg}(k) \tag{3.52}$$

$$q_{VB}(k+1) = \frac{Ts\Big[q_{tub}(k) - q_{VB}(k)\Big]}{\tau_2(n)} + q_{VB}(k) \tag{3.53}$$

Utilizando o conjunto de equações e o algorítimo 1, calcula-se interativamente o valor de $R_{VB}(k, n(k))$, para cada instante k, sendo $k = 1, 2, 3...k_{max}$:

Algoritmo 1: Calculo iterativo do valor de $R_{VB}(k, n(k))$

Entrada: $q_{bfg}(k), u(k), \Delta p(k), P_{bfg}(k), n(k)$
Saída: $R_{VB}(k, n(k))$
início
  repita
    $P_{ori}(k) = -R_{ori} \times q_{bfg}(k)^2 + P_{bfg}(k)$
    $P_{tub}(k) = \Delta p(k) - Pfor$
    $q_{tub}(k) = \sqrt{\frac{P_{ori}(k) - P_{tub}(k)}{Rtub(n(k), u(k))}}$
    $Rvb(k, n(k)) = \frac{DeltaP(i)}{q_{VB}(k)^2}/$
    $q_{VB}(k+1) = \frac{Ts\left(q_{tub}(k) - q_{VB}(k)\right)}{\tau_2(n(k))} + q_{VB}(k)$
    $k = k + 1$
  até $k = k_{max}$;
fim

Número de queimadores	1	2	3	4	5	6	7	8
$R_{VB}[\times 10^{-3}]$	20,880	15,589	10,298	5,007	3,988	3,103	2,218	1,775

Tabela 7 – Resistência fluídica das válvulas de bloqueio combinadas

3.1.4 Limite superior de vazão (Q_{max})

Cada queimador listado na **Figura 13** tem um limite superior de vazão especificado pelo fabricante. Assim na **Tabela 8** está listado $Q_{max}(n)$.

Número de queimadores acesos	1	2	3	4	5	6	7	8
Vazão máxima de BFG $[dam^3/h]$	37.5	75	112.5	150	187.5	225	262.5	300

Tabela 8 – Valores de vazão máxima (Q_{max}) por número de queimadores

Fonte: Autor

3.1.5 Limite inferior de abertura da válvula de controle (U_{min})

Considerando que a pressão interna da fornalha P_{for} é mantida sempre a $-20mmH_2O$, uma pressão positiva em $P_{tub} > 10mmH_2O$ é capaz de manter a operação segura dos queimadores. Logo foi realizado um teste variando a abertura da válvula de 10% até 100% para cada queimador, e registrado a abertura em que $P_{tub}(i) = 10$. O algorítimo 2 representa o teste, e a **Tabela 9** reúne os valores de $Umin$.

Algoritmo 2: Determinação da abertura mínima de válvula para n queimadores

Entrada: $n = 0, u = 0$
Saída: $U_{min}(n)$
início
  repita
    repita
      Simula sistema fornecendo $P_{tub}(i)$
      $i = i + 1$
      $u = u + 0,01$
    até $u = 100\%$;
    $U_{min}(n)$=achar$(P_{tub}(i) = 10mmH_2O)$
    $u = 0$
    $n = n + 1$
    $k = k + 1$
  até $n = 8$;
fim

Número de queimadores acesos	1	2	3	4	5	6	7	8
Abertura mínima da válvula U_{min} [%]	43	32	21	18	2	6	13	17

Tabela 9 – Valores de $U_{min}(n)$ calculados

Fonte: Autor

3.1.6 Cálculo da pressão de fornecimento $P_{bfg}(n)$

No desenvolvimento da eq. 3.43 considerou-se que a pressão de fornecimento do gás é constante para qualquer número (n) de queimadores acesos. Entretanto, esta pressão de fornecimento do gás varia de acordo com o número de queimadores acesos. Para realizar o cálculo mais preciso dos pontos de operação $\overline{q_{bfg}}(n)$ é interessante estimar a pressão de fornecimento do gás BFG, para cada número n de queimadores acesos, $P_{bfg}(n)$. A partir dos dados de pressão $(P_{bfg}raw)$ obtidos em ensaios na caldeira da ArcellorMittal e utilizando o **Algorítimo 3**, calcula-se $P_{bfg}(n)$:

Algoritmo 3: Calculo dos patamares $P_{bfg}(n)$

(h) **Entrada:** $P_{bfg}raw(k), n(k)$
Saída: $P_{bfg}(n)$
início
  Cria vetores isolados com as pressões $P_{bfg}(k)$ e $n(k)$ medidas por número de queimadores acesos $P_{bfg}raw(n, i)$ com i_{max} medições
  repita
    $Std = DesvioPadrão\big(P_{bfg}raw(n, :)\big)$
    $M = Média\big(P_{bfg}raw(n, :)\big)$
    Em seguida retira-se os *outliers* dos dados medidos
    se $P_{bfg}raw(n) > 3 \times Std + M$ *ou* $P_{bfg}raw(n) < -3 \times Std + M$ **então**
      $P_{bfg}raw(n, i) = Média(P_{bfg}raw(n, i))$
    fim
    $P_{bfg}(n) = Média\big(P_{bfg}raw(n, :)\big)$
  $i = i_{max}$;

Queimadores (n)	1	2	3	4	5	6	7	8
$\overline{P_{bfg}}(n)[mmH_2O]$	581,35	566,73	552,12	541,85	531,59	525,90	520,20	492,45

Tabela 10 – Pressão de alimentação para cada número de queimadores acesos $\overline{P_{bfg}}(n)[mmH_2O]$

Fonte: Autor

A **Figura 22** mostra o exemplo de um dos conjuntos de dados utilizados para calcular $P_{bfg}(n)$, e na **Tabela 10** estão apresentados todos valores de $P_{bfg}(n)$.

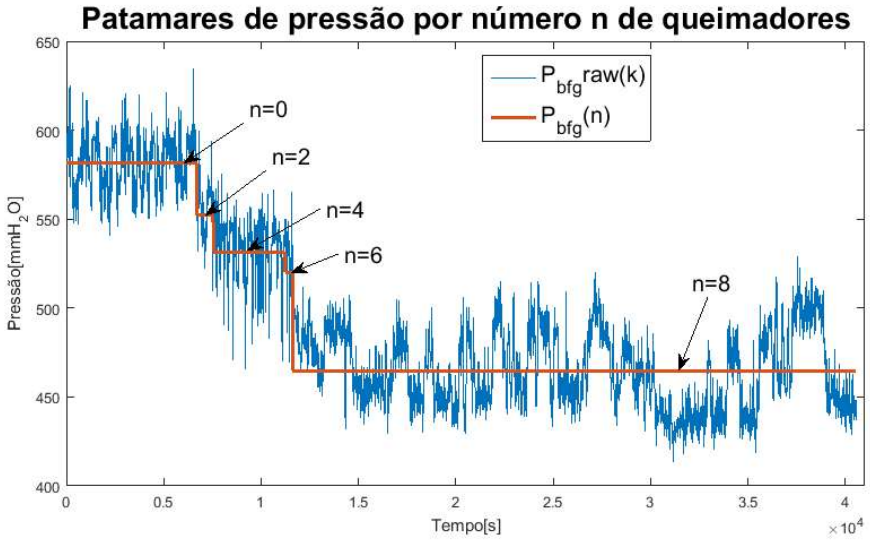


Figura 22 – Comparação entre $\overline{P_{bfg}}(n)$ e medições *in-locu*

Fonte: Autor

3.1.7 Cálculo do dos pontos de operação $\overline{q_{bfg}}(n)$

Para calcular os pontos de operação,$\overline{q_{bfg}}(n)$ o sistema é simulado pelo **Algorítimo 4** em $k = 1, 2, 3...k_{max}$. Com os patamares de $q_{bfg}(k)$ adquire-se os valores de $\overline{q_{bfg}(n)}$ descritos pela **Tabela 11**, e mostrados pela **Figura 23**.

Algoritmo 4: Calculo dos pontos de operação $q_{bfg}(n)$

Entrada: $P_{bfg}(n), n(k)u = 60\%$
Saída: $q_{bfg}(k : kmax)$
início
  Inicialização
  $P_{ori}(0) = P_{tub}(0) = q_{tub}(0) = q_{VB}(0) = q_{bfg}(0) = 0$
  repita
    $P_{ori}(k) = -R_{ori} * q_{bfg}(k)^2 + P_{bfg}(n(k))$
    se *n(k)=0* **então**
      $q_{tub}(k+1) = 0$
      $q_{VB}(k+1) = \frac{Ts\left(q_{tub}(k) - q_{VB}(k)\right)}{\tau_2(n(k))} + q_{VB}(k)$
      $q_{bfg}(k+1) = \frac{Ts\left(q_{tub}(k) - q_{bfg}(k)\right)}{\tau_1(n(k))} + q_{bfg}(k)$
    senão
      $P_{tub}(k) = Rvb(n(k)) \times q_{VB}(k)^2 + P_{for}$
      $q_{tub}(k+1) = \sqrt{\frac{P_{ori}(k) - P_{tub}(k)}{Rtub(n(k),u)}}$
      $q_{VB}(k+1) = \frac{Ts\left(q_{tub}(k) - q_{VB}(k)\right)}{\tau_2(n(k))} + q_{VB}(k)$
      $q_{bfg}(k+1) = \frac{Ts\left(q_{tub}(k) - q_{bfg}(k)\right)}{\tau_1(n(k))} + q_{bfg}(k)$
      $k = k + 1$
    fim
  até $k = k_{max}$;
fim

Queimadores(n)	1	2	3	4	5	6	7	8
$\overline{q_{bfg}}(n)$	34,18	44,49	61,16	90,16	125,06	142,84	162,67	170,75

Tabela 11 – Vazão em ponto de operação $\overline{q_{bfg}}(n)[dam^3/h]$

Fonte: Autor

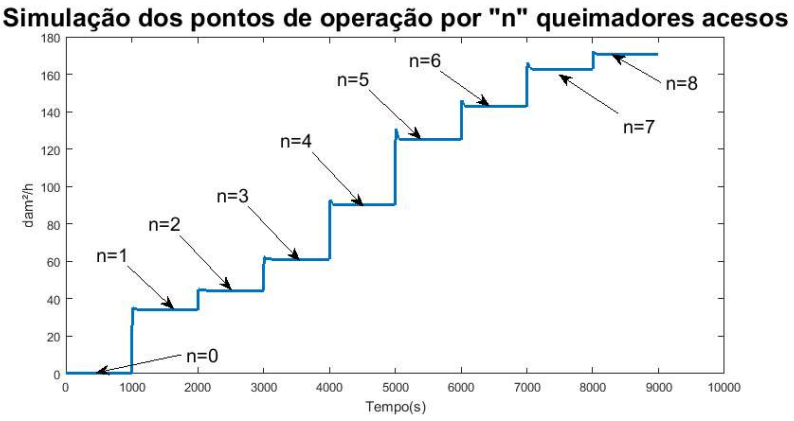


Figura 23 – Demonstração dos valores de $q_{bfg}(n)$ calculados

Fonte: Autor

3.2 Modelagem das máquinas de estado da fornalha (FSM)

Para desenvolver o modelo completo da fornalha, Oliveira Jr. (2016) propôs a criação de máquinas de estado isoladas, dos ignitores, estabilizadores e queimadores. As máquinas de estado dos ignitores/estabilizadores foram revisadas e estão reproduzidas no **Anexo B**. Estas FSM's foram criadas baseadas nos fluxogramas procedimentais reproduzidos e comentados no **Anexo A**.

O modelo de queimador único é também uma reprodução do trabalho feito por Oliveira Jr. (2016), entretanto, há mudanças neste modelo utilizando parte do FSM desenvolvido Oliveira Jr. (2016), para o modelo completo. Por esta razão, previamente à descrição do sistema completo da fornalha na seção 3.3, será especificado a FSM relativo ao queimador único para futuras referências e contextualizações.

Os tempos e procedimentos especificados estão todos de acordo com o a norma NFPA 85. Antes de seguir para as descrições dos processos de acendimento do queimador vale lembrar que a NFPA 85 delimita somente como deve ser realizada uma parada segura e uma parada normal. A definição dos problemas que definem uma parada segura total (desligar todas as chamas da câmara de combustão) e uma parada segura de um único queimador/estabilizador/ignitor são definidas pelo fabricante e por este motivo não foram introduzidas nos fluxogramas do **Anexo B** e na descrição da FSM do queimador da subseção a seguir. [1]

Por questões de apresentação foi adotado uma legenda na construção das tabelas com as variáveis das máquinas de estado. Estas são: **V** (Verdadeiro), **F**(Falso) **D** (Detectada), **ND** (Não Detectada), **TA** (Totalmente Aberta), **FEC** (Fechada), **FIN** (Finalizado), **CTD** (Contando). É importante notar que diversas entradas reais do sistema serão concentradas em uma única variável, simplificando o sistema, facilitando identificação de erros e estudos posteriores.

3.2.1 Máquina de estado do Queimador único

Esta FSM pode assumir quatro estados discretos: 1-apagado; 2-acendimento ignitor e estabilizador; 3-abertura de válvula do queimador; e 4-aceso. As mudanças de estado do queimador dependem das entradas externas e condições lógicas a serem satisfeitas, conforme mostra a máquina de estados da **Figura 25**.

Para um comparativo com a **Figura 45** contida no anexo, reproduzida repetidamente na **Figura 24**, por facilitar a leitura, o queimador estará 1-apagado quando nenhuma das condições na parte azul foi atingida. Quando todas as condições são atingidas,

[1] Exemplos: Uma parada total desliga todas as chamas e realiza uma ultima purga antes de desligar os ventiladores; Uma parada parcial fecha as válvulas de bloqueio e o funcionamento da caldeira não é interrompido.

o sistema passa para o estado 2-acendimento do ignitor/estabilizador (área vermelha da fig.24). Quando a chama é detectada inicia-se a verificação da válvula e a chama do queimador (área verde da fig.24). Quando válvula é aberta e a chama foi detectada, o sistema passa para o estado 4-aceso(área amarela da fig.24).

A máquina de estados do queimador simula internamente as máquinas de estado do ignitor e estabilizador. Para isto, foram introduzidos uma entrada de permissão de partida após acendimento do ignitor e estabilizadores e uma variável auxiliar de tempo de estabilização de chama do conjunto estabilizador-ignitor. A concentração de variáveis de permissão/segurança na área azul figura 24 em uma única variável de permissão segue a mesma lógica do ignitor e estabilizador. Todas estas variáveis estão ligadas por conectivos tipo 'E. Logo a substituição simplifica e não prejudica a representação do sistema.

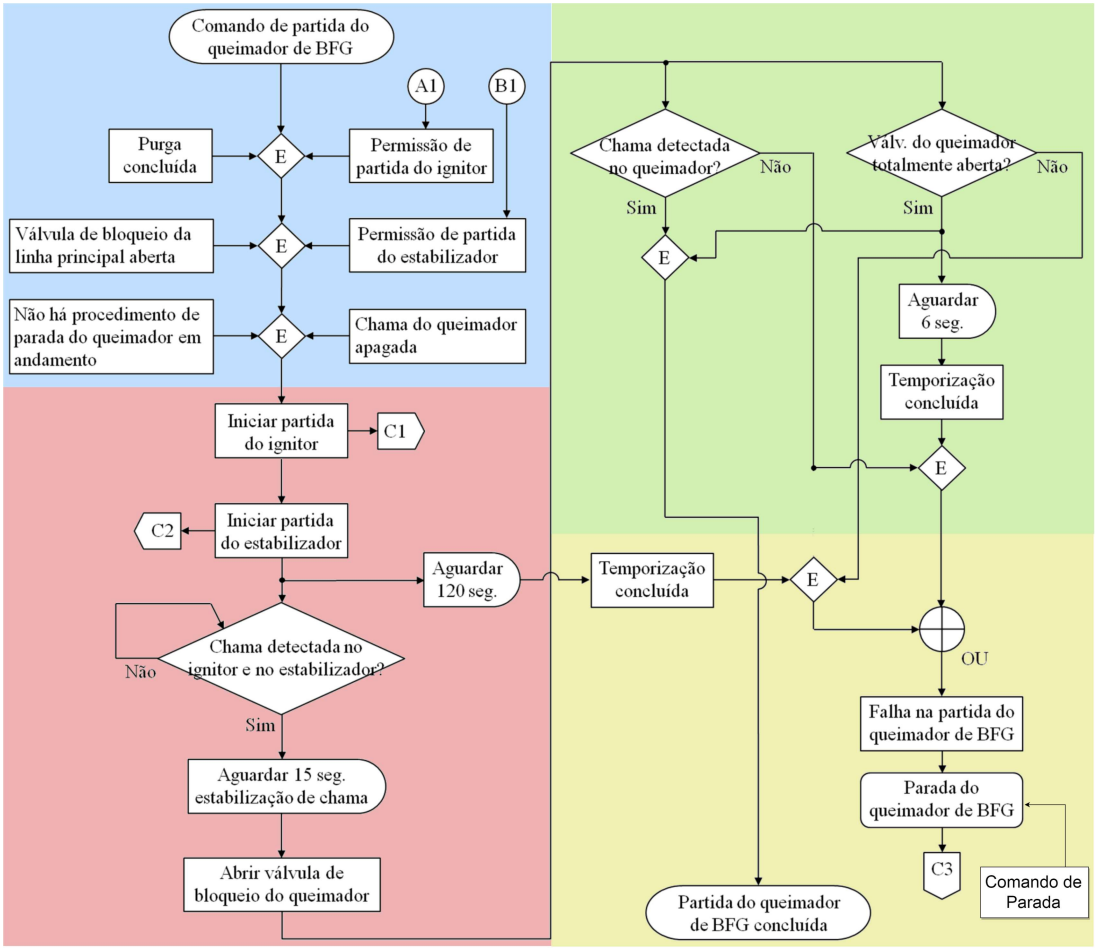


Figura 24 – Fluxograma da sequência de acendimento de um queimador de BFG

Fonte: Oliveira (2016)

O funcionamento desta máquina de estados ocorre em função das variáveis de entradas $u_Q = [u_{Q1}\ u_{Q2}\ u_{Q3}\ u_{Q4}\ u_{Q5}]$, dos estados discretos da máquina de estados $x_Q = [x_{Q1}\ x_{Q2}\ x_{Q3}\ x_{Q4}]$, dos estados contínuo auxiliares $x_{Qc} = [x_{Qc1}\ x_{Qc2}\ x_{Qc3}]$ e estados contínuos da planta x_{Qbfg} e x_{QV} e de variáveis auxiliares discretas $d_Q = [d_{Q1}\ d_{Q2}\ d_{Q3}\ d_{Q4}]$,

com as definições destas variáveis exibidas na **Tabela 12**. A variável d_{Q4} é resultado da seguinte lógica combinacional:

$$d_{Q4}{}^{2} = x_{Q3} \wedge [(d_{Q2} \wedge \sim u_{Q6} \wedge \sim u_{Q4}) \vee (d_{Q3} \wedge \sim u_{Q6} \wedge u_{Q4})] \vee x_{Q4} \wedge (\sim u_{Q6} \vee \sim u_{Q4}) \vee [d_{Q2} \wedge (\sim u_{Q4} \vee \sim u_{Q5})]$$

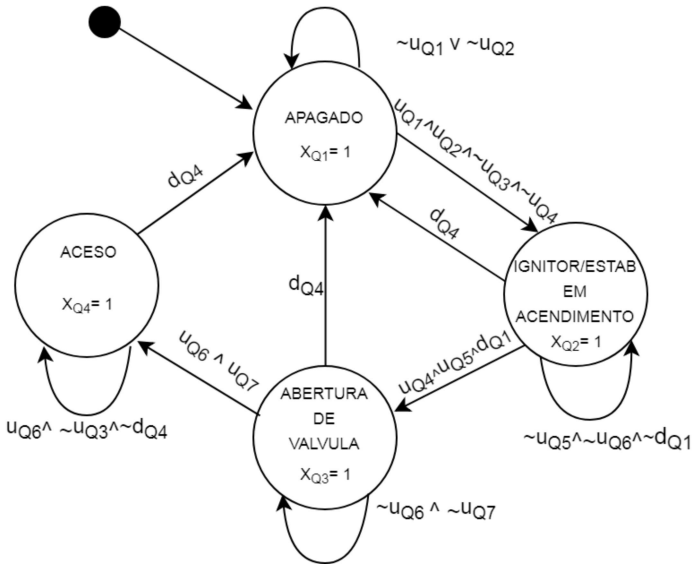


Figura 25 – Máquina de estados a elementos finitos do queimador

Fonte: Autor

Variável	Descrição	1	0	Valor limite
u_{Q1}	Comando Partida	V	F	-
u_{Q2}	Permissão de Partida	V	F	-
u_{Q3}	Comando de Parada	V	F	-
u_{Q4}	Chama Ignitor	D	ND	-
u_{Q5}	Chama Estabilizador	D	ND	-
u_{Q6}	Chama Queimador	D	ND	-
u_{Q7}	Válvula de bloqueio Queimador	TA	FEC	-
x_{Q1}	Queimador Apagado	V	F	-
x_{Q2}	Acendimento do Ignitor/Estabilizador	V	F	-
x_{Q3}	Queimador em acendimento	V	F	-
x_{Q4}	Queimador Aceso	V	F	-
x_{Qc1}	Contador: estabilização do ignitor/estabilizador (s)	-	-	15 s
x_{Qc2}	Contador: abertura completa da Válvula do Queimador (s)	-	-	75 s
x_{Qc3}	Contador: confirmar chama acesa do queimador (s)	-	-	6 s
x_{Qbfg}	Vazão de gás BFG (q_{BFG})	-	-	$34dam^3$
x_{QV}	Posição da Válvula de bloqueio (X_B)	-	-	100%
d_{Q1}	Temporizador: estabilização do Ignitor/Estabilizador	FIN	CTD	-
d_{Q2}	Temporizador: verificar abertura completa da válvula de bloqueio do Queimador	FIN	CTD	-
d_{Q3}	Temporizador: estabilização do Queimador	FIN	CTD	-
d_{Q4}	Condição de parada	V	F	-

Tabela 12 – Variáveis do Queimador

Fonte: Autor

O objetivo deste trabalho é atualizar as equações lineares por parte da vazão de gás

[2] d_{Q4} pode ser interpretada por: d_{Q4}=(Falha no acendimento)∨(Chama apagada ou válvula estabilizador fechada)∨(Comando de parada)∨(Falha no acendimento ignitor/estabilizador).

de BFG, da fornalha, e aplicar um controle preditivo quadrático usando CPLEX. Desta forma, a explicação sobre os códigos HYSDEL do estabilizador e ignitor e caracteristicas de simulação estão além do escopo aqui definido. Caso seja interesse do leitor conhecer em detalhe os códigos utilizados para simular e criar os modelos MLD, favor referenciar-se a Oliveira Jr. (2016, p. 164). No anexo B.3.3 há também uma simulação da FSM que compõe o modelo do queimador, simulando a sequência de entradas encontradas, dadas as análises heurísticas do processo.

3.3 Modelo MLD Completo da Fornalha

Com base no modelo de um queimador isolado, procede-se para construção do modelo completo. A modelagem compõe-se de oito queimadores, com suas lógicas individuais de *start-up* e *shut-down*, reconstruindo o modelo de Oliveira Jr. (2016), inserindo neste, a nova linearização por partes, desenvolvida no capítulo 3. Como referência para esta seção, o leitor deve direcionar-se ao capítulo 3 que contém o sistema modelado e parâmetros determinados, e à seção anterior, 3.2 que contém explicações sobre o sistema de acendimento de um queimador e as variáveis utilizadas.

3.3.1 Considerações gerais e modificações no FSM da Fornalha

O modelo completo com todos os oito queimadores da fornalha segue a estrutura descrita na **Tabela 12** e **Figura 25**. Entretanto, para um funcionamento automático, é necessário alterar algumas entradas e adicionar alguns estados ao SAS e FSM. Para facilitar o entendimento do leitor, a estrutura apresentada na **Tabela** 12 será mantida para representar as entradas e estados. Contudo, para manter a ordenação que caracteriza o DHA deve-se representar EG, FSM e SAS separadamente, detalhados na subseção 3.3.2.

Na **Tabela** 13 estão representados todos os estados internos ao sistema completo da fornalha. Comparado a **Tabela** 12, os índices das variáveis foram substituídos por $\#n_{BF\#}$, sendo os índices n representando o queimador individual e BF uma sigla para ***B**urner **F**ull model*

Para representação do FSM, eliminou-se as entradas de comando de partida u_{Q1} e permissão de partida, u_{Q2}. Estas entradas foram substituídas por um evento de auto-início d_{BF5}, gerado a partir da condição do estado br_{BF} (*number of **b**urners **b**equired*) que contém o número de queimadores requisitados para acendimento. O comando de parada u_{Q3} foi substituído pelo evento de auto-parada d_{BF6}, e adicionado lógica combinatória d_{Q4} tornando-a em d_{BF4}. Para este novo sistema considera-se somente duas entradas, δbr_{BF}, que representa a variação da quantidade de queimadores requeridos entre o instante $k-1$ e k; δu_{BF}, que representa a variação de abertura da válvula u entre o instante $k-1$ e k,

logo :

$$\delta u(k) = u(k) - u(k-1),$$

e

$$\delta br(k) = br(k) - br(k-1).$$

Estas novas entradas foram criadas para atender ao requerimento de sistema aumentado, no projeto do MPC híbrido com integrador no sinal de controle, como revisado na subseção 2.2.2. Estas entradas estão demarcadas em cinza, nas duas primeiras linhas da **Tabela** 13. Deve-se alertar ao leitor a sutil diferença entre a entrada δu e a distancia da posição atual da válvula a seu ponto de operação $\Delta u(k) = u(k) - \bar{u}$. O primeiro indica o incremento da posição da válvula em relação ao instante anterior e o segundo está atrelado as linearizações desenvolvidas no capítulo 3. As variáveis x_1 e x_2 das eq. 3.43 foram mantidas e discretizadas pelo método de Euler atrasado.

Para cada número de queimadores ligados, há diferentes limites de vazão máxima para fluxo de gás, abertura mínima da válvula u e equações lineares correspondentes. No projeto original de Oliveira Jr. (2016) estas restrições eram calculadas por meio de interpolações e cálculos custosos computacionalmente. O desenvolvimento do sistema linearizado facilitou a implementação e estudo, porém as características não lineares como abertura mínima da válvula u (U_{min}), vazão máxima (Q_{max}) para cada quantidade de queimadores acesos tiveram que ser incluídas no DHA, representados pelos seletores de modo m_{s2} e m_{s3}, respectivamente.

Para evitar redundância nas descrições, considera-se que cada queimador tem um número único $n = 1, 2, ...8$, e cada queimador tem seu procedimento de *start-up* e *shut-down* executando todo o FSM e obedecendo todas as inequações de EG. As dinâmicas do SAS descritas são selecionadas pelo número de queimadores acesos. À exemplo: estando a fornalha com cinco queimadores acesos ($br_{BF} = 5 = bo_{BF}$), e, em um instante k, $\delta br_{BF} = 1$, logo todo o FSM que representa o sexto queimador é iniciado ($br_{BF} = 6$). Assim que este queimador torna-se aceso ($bo_{BF} = 6$), altera-se a dinâmica do SAS correspondente para seis queimadores.

3.3.2 Equações do SAS, MS e EG da Fornalha

Nesta seção estão apresentadas as equações que definem o restante do modelo, acrescentado ao FSM desenvolvido por Oliveira Jr. (2016). As equações 3.54 definem as dinâmicas dos gases de combustão e a condição atual de acendimento dos queimadores. Tais equações são dependentes da quantidade de queimadores acesos, dos geradores de evento (EG) das equações 3.55 à 3.56 e dos seletores de modo (MS) das equações 3.57 à 3.59.

O gerador de evento em 3.56 e o seletor de modo em 3.58 estabelecem as regras

Variável	Descrição	1	0	Valor limite
δbr_{BF}	Variação no número de queimadores requeridos para acionamento	-	-	[-1,1]
δu_{BF}	Variação de abertura da válvula	-	-	[-10%,10%]
br_{BF}	Número de Queimadores requeridos para acendimento (br=***b**urners **r**equired*)	-	-	[0,8]
bo_{BF}	Número de Queimadores Acesos (bo=***b**urners **o**n*)	-	-	[0,8]
u	Posição da válvula de controle de vazão do gás	-	-	$[U_{min}(n),\ 1]$
Δu	Distancia do ponto de operação da válvula	-	-	[-1,1]
x_1	Vazão linearizada referente à $q_{BFG} - \overline{q_{BFG}}$	-	-	$[-Q_{max}(n),Q_{max}(n)]$
x_2	Vazão linearizada referente à $q_{VB} - \overline{q_{BFG}}$	-	-	$[-Q_{max}(n),Q_{max}(n)]$
q_{BFG}	Vazão de gás BFG na placa de orifício	-	-	$[0, Q_{max}(n)]$
q_{VB}	Vazão de gás BFG nas válvulas de bloqueio	-	-	$[0, Q_{max}(n)]$
xn_{BF1}	Queimador Apagado	V	F	-
xn_{BF2}	Acendimento do Ignitor/Estabilizador	V	F	-
xn_{BF3}	Queimador em acendimento	V	F	-
xn_{BF4}	Queimador Aceso	V	F	-
xn_{BFc1}	Contador: estabilização do ignitor/estabilizador (s)	-	-	15 s
xn_{BFc2}	Contador: abertura completa da Válvula do Queimador (s)	-	-	75 s
xn_{BFc3}	Contador: confirmar chama acesa do queimador (s)	-	-	6 s
xn_{BFc3}	Contador: simula acendimento da chama do ignitor (s)	-	-	2 s
xn_{BFc4}	Contador: simula acendimento da chama do estabilizador (s)	-	-	3 s
xn_{BFc5}	Contador: simula acendimento da chama do queimador (s)	-	-	2 s
xn_{BFc6}	Contador: simula abertura da válvula	-	-	20 s
dn_{BF1}	Temporizador: estabilização do Ignitor/Estabilizador	FIN	CTD	-
dn_{BF2}	Temporizador: verificar abertura completa da válvula de bloqueio do Queimador	FIN	CTD	-
dn_{BF3}	Temporizador: estabilização do Queimador	FIN	CTD	-
dn_{BF4}	Condição de parada	V	F	-
dn_{BF5}	Evento Auto-início	V	F	-
dn_{BF6}	Evento Auto-parada	V	F	-
dn_{BF7}	Chama Ignitor	D	ND	-
dn_{BF8}	Chama Estabilizador	D	ND	-
dn_{BF9}	Chama Queimador	D	ND	-
zn_{BF10}	Válvula de bloqueio Queimador	TA	FEC	-

Tabela 13 – Variáveis do FSM do queimador individual

Fonte: Autor

lógicas para selecionar o limite mínimo de abertura da válvula (U_{min}) para cada número de queimadores acesos, dado um instante k. A saturação no fluxo máximo de gás BFG (Q_{max}), para cada número de queimadores acesos, são definidas pelas relações lógicas dadas pelo gerador de evento em 3.56a e pelo seletor de modo em 3.59, dado o instante k.

As equações 3.54c e 3.54d são provenientes da eq. 3.43 a partir de uma discretização utilizando a técnica de Euler atrasado com um tempo de amostragem $Ts = 1\ s$. Logo, o SAS é definido pelas seguintes equações:

$$u(k) = \begin{cases} u(k-1) + \delta u_{BF} & \text{se } m_{s2}(k) = 0 \\ U_{min}(m_{s2}(k)) & \text{se } m_{s2}(k) = 1, 2, ..., 8 \\ 1 & \text{se } m_{s2}(k) = 9 \end{cases} \tag{3.54a}$$

$$\Delta u(k) = \begin{cases} u(k) - \bar{u} & \text{se } m_{s1}(k) = 1, 2, ...8 \\ 0 & \text{se } m_{s1}(k) = 0 \end{cases} \tag{3.54b}$$

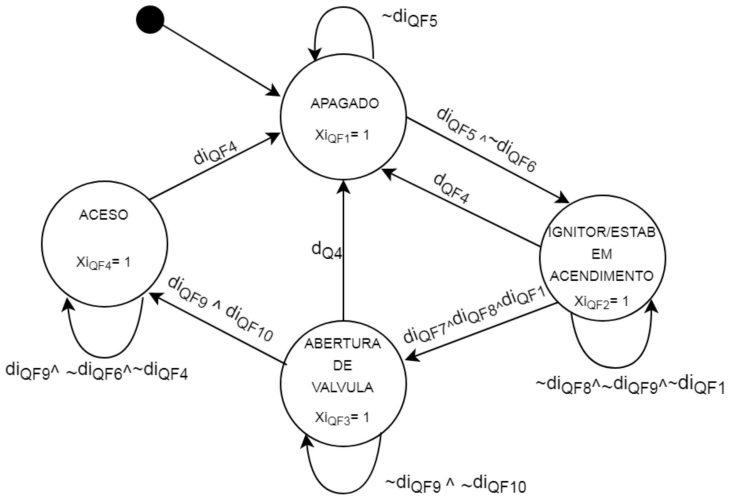


Figura 26 – Máquina de estados a elementos finitos do queimador

Fonte: Autor

$$x_1(k) = \begin{cases} \frac{(K_1[m_{s1}(k)]-1)Ts}{\tau_1[m_{s1}(k)]Ts}x_1(k-1) + \frac{K_2[m_{s1}(k)]Ts}{\tau_1}x_2(k-1) + & \text{se } m_{s1}(k) = 1,2,...8 \\ \frac{K_3[m_{s1}(k)]Ts}{\tau_1}\Delta u(k) + x_1(k-1) & \\ 0 & \text{se } m_{s1}(k) = 0 \end{cases} \tag{3.54c}$$

$$x_2(k) = \begin{cases} \frac{K_1[m_{s1}(k)]Ts}{\tau_2}x_1(k-1) + \frac{(K_2[m_{s1}(k)]-1)Ts}{\tau_2}x_2(k-1) + & \text{se } m_{s1}(k) = 1,2,...8 \\ \frac{K_3[m_{s1}(k)]Ts}{\tau_2}\Delta u(k) + x_2(k-1) & \\ 0 & \text{se } m_{s1}(k) = 0 \end{cases} \tag{3.54d}$$

$$q_{BFG} = \begin{cases} x_1(k) + \overline{q_{BFG}}[m_{s1}(\mathrm{k})] & \text{se } m_{s1}(k) = 1,2,...8 \text{ e } m_{s3}(k) = 0 \\ Q_{max}(m_{s1}(\mathrm{k})) & \text{se } m_{s3}(k) = 1,2,...8 \\ 0 & \text{se } m_{s1}(k) = 0 \end{cases} \tag{3.54e}$$

$$q_{VB} = \begin{cases} x_2(k) + \overline{q_{VB}}[m_{s1}(\mathrm{k})] & \text{se } m_{s1}(k) = 1,2,...8 \text{ e } m_{s3}(k) = 0 \\ Q_{max}(m_{s1}(k)) & \text{se } m_{s3}(k) = 1,2,...8 \\ 0 & \text{se } m_{s1}(k) = 0 \end{cases} \tag{3.54f}$$

$$bo_{BF}(k) = \sum_{0}^{n} zn_{BF10} \tag{3.54g}$$

$$br_{BF}(k) = br_{BF}(k-1) + \delta br_{BF} \tag{3.54h}$$

A seguir tem-se as gerador de eventos nas equações 3.55 , sendo as variáveis $d_0, d_1 ... d_8$ indicativas de quantos queimadores estão acesos.

$$
EG_1 = \begin{cases}
[dn_{BF1} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc1} \geq 15] \\
[dn_{BF2} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc2} \geq 75] \\
[dn_{BF3} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc3} \geq 6] \\
[dn_{BF4} = 1]^{3} \leftrightarrow xn_{BF5} \\
\quad \wedge[(dn_{BF2} \wedge \sim dn_{BF9} \wedge \sim dn_{BF8}) \vee (dn_{BF3} \wedge \sim dn_{BF9} \ \wedge \ dn_{BF7})] \\
\quad \vee xn_{BF4} \wedge (\sim dn_{BF9} \vee \sim dn_{BF8}) \vee [dn_{BF3} \wedge (\sim un_{Q4} \vee \sim un_{Q5})] \\
[dn_{BF4} = 1] \leftrightarrow [br_{BF} \geq n] \\
[dn_{BF5} = 1] \leftrightarrow [-br_{BF} > -n] \\
[dn_{BF6} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc3} \geq 2] \\
[dn_{BF7} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc4} \geq 3] \\
[dn_{BF8} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc5} \geq 2] \\
[dn_{BF9} = 1] \leftrightarrow [dn_{BFc6} \geq 20] \\
[d_0 = 1] \leftrightarrow [-bo_{BF}(k) \geq 0] \\
[d_1 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 1] \\
[d_2 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 2] \\
[d_3 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 3] \\
[d_4 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 4] \\
[d_5 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 5] \\
[d_6 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 6] \\
[d_7 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 7] \\
[d_8 = 1] \leftrightarrow [bo_{BF}(k) \geq 8]
\end{cases} \tag{3.55}
$$

$$
EG_2 = \begin{cases}
[dq_{max1} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 37,5] \\
[dq_{max2} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 75] \\
[dq_{max3} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 112,5] \\
[dq_{max4} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 150] \\
[dq_{max5} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 187,5] \\
[dq_{max6} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 225] \\
[dq_{max7} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 262,5] \\
[dq_{max8} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG}(k-1) \geq 300]
\end{cases} \tag{3.56a}
$$

$$EG_3 = \begin{cases} [du_{min1} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,43] \\ [du_{min2} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,32] \\ [du_{min3} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,21] \\ [du_{min4} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,18] \\ [du_{min5} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,02] \\ [du_{min6} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,06] \\ [du_{min7} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,13] \\ [du_{min8} = 1] \leftrightarrow [-u(k-1) \geq -0,17] \\ [du_{max} = 1] \leftrightarrow [u(k-1) \geq 1] \end{cases} \tag{3.56b}$$

Com base nos indicadores $d_{\#}$ o seletor de modo da eq. 3.57 realiza o chaveamento das dinâmicas em x_1 e x_2.

$$MS : m_{s1}(k) = \begin{cases} 0 \text{ se } d_0 \\ 1 \text{ se } d_1 \\ 2 \text{ se } d_2 \\ 3 \text{ se } d_3 \\ 4 \text{ se } d_4 \\ 5 \text{ se } d_5 \\ 6 \text{ se } d_6 \\ 7 \text{ se } d_7 \\ 8 \text{ se } d_8 \end{cases} \tag{3.57}$$

$$MS : m_{s2}(k) = \begin{cases} 0 \text{ se } \sim du_{min1} \wedge \sim du_{min2} \wedge \sim du_{min3} \wedge \sim du_{min4} \\ \quad \wedge \sim du_{min5} \wedge \sim du_{min6} \wedge \sim du_{min7} \wedge \sim du_{min8} \wedge \sim du_{max} \\ 1 \text{ se } du_{min1} \wedge d_1 \\ 2 \text{ se } du_{min2} \wedge d_2 \\ 3 \text{ se } du_{min3} \wedge d_3 \\ 4 \text{ se } du_{min4} \wedge d_4 \\ 5 \text{ se } du_{min5} \wedge d_5 \\ 6 \text{ se } du_{min6} \wedge d_6 \\ 7 \text{ se } du_{min7} \wedge d_7 \\ 8 \text{ se } du_{min8} \wedge d_8 \\ 9 \text{ se } du_{max} \end{cases} \tag{3.58}$$

$$MS : m_{s3}(k) = \begin{cases} 0 \text{ se } \sim dq_{max1} \wedge \sim dq_{max2} \wedge \sim dq_{max3} \wedge \sim dq_{max4} \\ \quad \wedge \sim dq_{max5} \wedge \sim dq_{max6} \wedge \sim dq_{max7} \wedge \sim dq_{max8} \\ 1 \text{ se } dq_{max1} \wedge d_1 \\ 2 \text{ se } dq_{max2} \wedge d_2 \\ 3 \text{ se } dq_{max3} \wedge d_3 \\ 4 \text{ se } dq_{max4} \wedge d_4 \\ 5 \text{ se } dq_{max5} \wedge d_5 \\ 6 \text{ se } dq_{max6} \wedge d_6 \\ 7 \text{ se } dq_{max7} \wedge d_7 \\ 8 \text{ se } dq_{max8} \wedge d_8 \end{cases} \tag{3.59}$$

O DHA descrito para o modelo completo reflete conceitualmente o código HYSDEL atualizado neste trabalho. Após executar o comando "mld"para compilar o código *Hysdel* do *Hybrid Toolbox*, no MATLAB, é fornecido por este todas as matrizes que compõem o sistema MLD. Um resumo do modelo é fornecido pelo *Toolbox*:

Devido a repetição de variáveis para os oito queimadores e as inúmeras lógicas condicionais foi gerado um total de 3422 inequações inteiras mistas e 239 variáveis de estado. Devido ao extensão deste modelo, o mesmo não será descrito formalmente, contendo todas as inequações e equações. A dimensão de cada matriz é dada pelas equações 3.60:

$$\begin{aligned} x(t+1) = A_{239\times239}x(t) + B1_{239\times2}u(t) \\ + B2_{27\times554}d(t) + B3_{239\times268}z(t), \end{aligned} \tag{3.60a}$$

MLD generated from the HYSDEL file: <bfg_system_q_max_deltaU2.hys>	
239 states	(111 continuous, 128 binary)
2 inputs	(2 continuous, 0 binary)
27 outputs	(11 continuous, 16 binary)
268	continuous auxiliary variables
554	binary auxiliary variables
3422	mixed-integer linear inequalities
sampling time: 1	MILP solver: 'glpk'

Tabela 14 – Resumo do modelo fornecido pelo *Toolbox*

Fonte: Autor

$$y(t+1) = C_{27\times 239}x(t) + D1_{27\times 2}u(t) + D2_{27\times 554}d(t) + D3_{27\times 268}z(t), \tag{3.60b}$$

$$E2_{3422\times 554}\delta(t) + E3_{3422\times 268}z(t) \leq E1_{3422\times 2}u(t) + E4_{3422\times 239}x(t) + E5_{3422\times 1} \tag{3.60c}$$

As matrizes do modelo MLD, descritas nas eq. 3.60, foram armazenadas no arquivo mld_V2_6_q_max_DU_DN_full.mat, referenciado no glossário de códigos do Apêndice B.1.

Simulação do Sistema MLD completo da Fornalha em Malha Aberta

Para avaliar o modelo MLD, executou-se uma simulação utilizando a função *S_burner_V2_6_DU_DN_full.m* (vide Apêndice B.1), criado a partir da função "mld"do *Hybrid Toolbox*. Esta função simula todos os componentes referentes ao MLD.

Inicia-se a simulação de acordo com a **Figura 27** com o requerimento de acendimento de 6 queimadores acesos e posição da válvula em 60%. No instante $t = 100s$ os 6 queimadores terminam o processo de acendimento . No instante $t = 189s$ é requerido o desligamento de dois queimadores e válvula muda para posição de 100%. Como o processo de desligamento é feito em 1 segundo, a quantidade de queimadores acesos cai para 4 em $t = 191$. Nota-se que o sistema atinge a saturação de vazão com a vazão de $150dm^3$ em $t = 252$ Em $t = 250s$ a válvula passa para posição de 80% e mantem-se os queimadores acesos. Em $t = 325s$ a válvula principal é restringida a 70% e a quantidade de queimadores requeridos para acionamento passa para 5. Em $t = 425s$ os 5º queimador acende. Em $t = 505$, válvula é restringida a uma posição de 40%, porém, devido a existência de somente 4 queimadores totalmente acesos o valor mínimo para posição da válvula é de

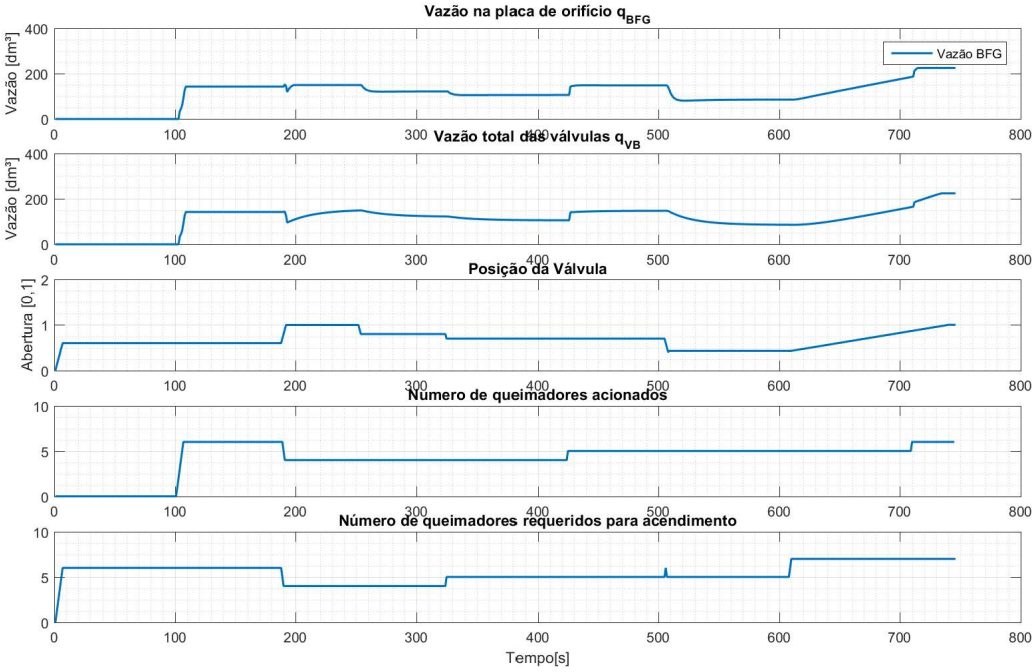


Figura 27 – Simulação do sistema MLD em malha aberta : Entradas e vazões

Fonte: Autor

43%. Em $t = 608$ aplica-se uma rampa na abertura da válvula para avaliar a resposta, e o 7º queimador é requerido acendimento. Por último o 7º é aceso.

Na **Figura 28** estão a evolução dos estados dos ignitores, estabilizadores e queimadores. As caixas vermelhas indicam desligamento e as verdes acendimento. Cada linha representa um dispositivo, e a legenda segue o seguinte padrão: Ii,Ei e Bi indicam ignitor, estabilizador e queimador, respectivamente, sendo $i = 1, 2..., 8$.

Na **Figura 29** segue a comparação do sistema linear por partes MLD e o sistema não-linear. Percebe-se que nas transições das dinâmicas do SAS em $t = [190, 420, 720]$ há saltos em degrau da vazão das válvulas de bloqueio (segundo gráfico de cima para baixo), para o modelo MLD e mudanças bruscas na Vazão de BFG na placa de orifício. Isto ocorre pois os estados $x_1(k)$ e $x_2(k)$, que são as variações de vazão em relação a vazão em ponto de operação $\overline{q_{bfg}}(n)$. Logo quando n muda de valor, o ponto de operação se altera, e como $x_1(k)$ e $x_2(k)$ não alteram as vazões instantaneamente, devido a dinâmica característica do sistema observa-se variações transientes quando se altera o número de queimadores acesos. Entretanto, para o sistema não linearizado, esta variação não ocorre pois somente a dinâmica é alterada, não provocando mudanças descontínuas nas vazões.

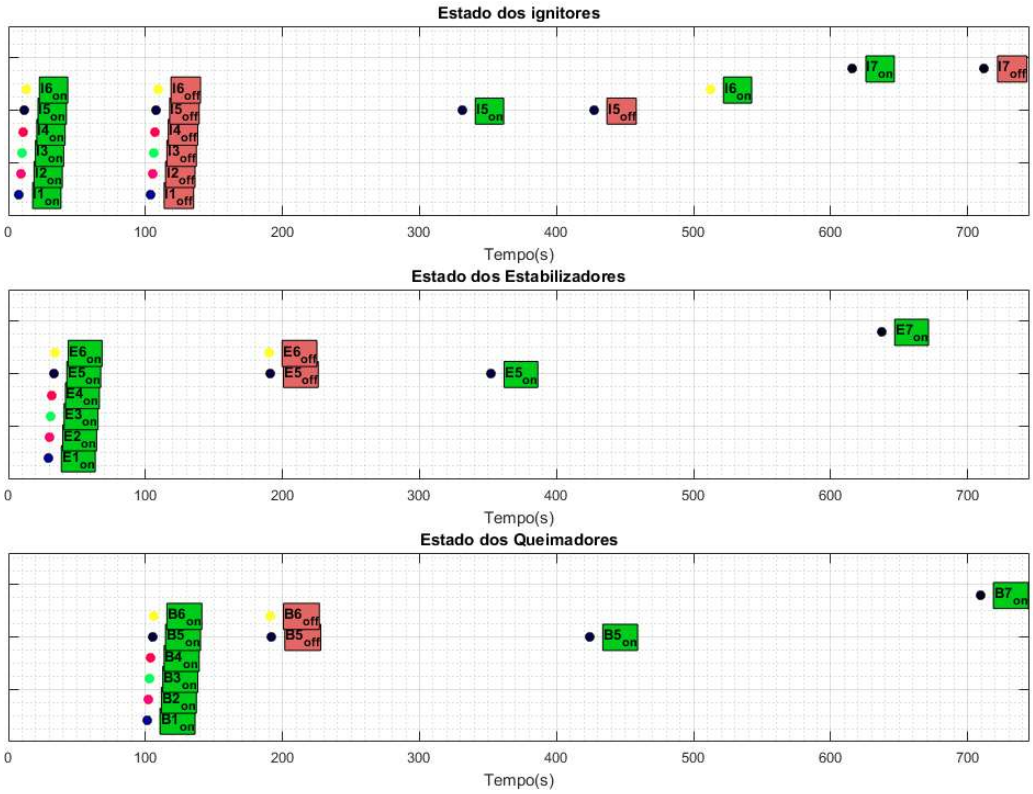


Figura 28 – Simulação do sistema MLD em malha aberta: Evolução dos estados do FSM

Fonte: Autor

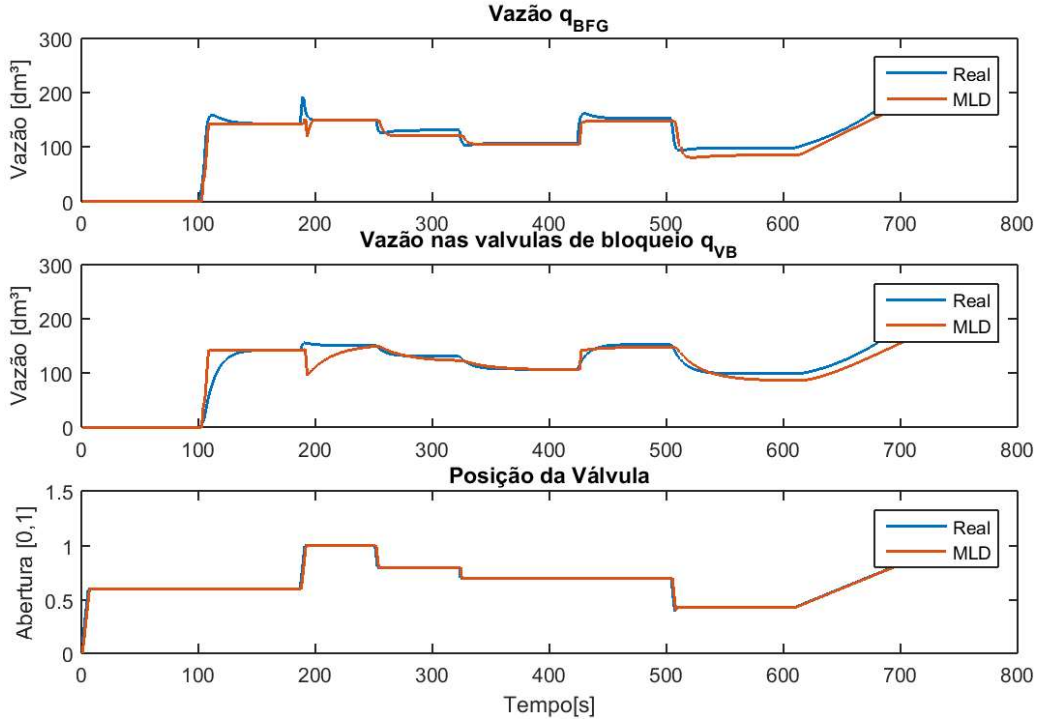


Figura 29 – Simulação do sistema MLD em malha aberta: Comparação com resposta não-linear

Fonte: Autor

4 Implementação do Simulador

Este capítulo está dividido em sete seções. Na primeira seção 4.1, desenvolve-se o método de controle preditivo utilizando o modelo completo MLD e as razões que inviabilizam a aplicação desta solução. Na seção 4.2, determina-se a abordagem proposta para contornar o problema onde retira-se o modelo de acendimento dos ignitores/estabilizadores do modelo utilizado para controle preditivo de vazão dos queimadores. Isto se deve ao fato de que a lógica para acender/apagar os ignitores/estabilizadores, insere somente atrasos na dinâmica do sistema de controle de vazão, nesta seção desenvolve-se o modelo, otimizador para número ótimo de queimadores e descreve-se o algorítimo de simulação. As seguintes seções descrevem o otimizador do número de queimadores, determinação do sistema usado pelo filtro de Kalman, detalhamento do simulador, sintonia do HMPC e cálculo das matrizes de covariância do Filtro de Kalman. Foi utilizado para estas simulações um computador de mesa com Processador AMD 6 núcleos 3.5Ghz 8Gb de RAM, Windows 7 64bits e a plataforma MATLAB.

4.1 Controle Preditivo com modelo completo

O cenário ideal para definição da trajetória de acendimento e manutenção das chamas de uma fornalha consiste na utilização do sistema completo da fornalha. Desta forma o controlador preditivo, baseado neste modelo irá calcular a melhor série de entradas para seguir a referência de vazão do gás BFG (q_{BFG}). Antes disto é necessário definir prioridades dentre as variáveis do sistema para incluir no controle preditivo.

Escolha das variáveis de decisão

Para definir as variáveis de decisão que deseja-se incluir na função objetivo do controle preditivo é preciso avaliar o modelo MLD Completo da fornalha descrito na seção 3.3, em especial as equações em 3.54. Propõe-se que o sistema siga a trajetória de referência da vazão do gás BFG ($Ref_{BFG}(k)$), com menor alternância do número de queimadores acesos e tenha uma variação mínima na abertura da válvula no horizonte de previsão, desta forma é garantido o menor ciclo de uso das válvulas de bloqueio, ignitores/ estabilizador e ainda assim conservando ao máximo a vida útil da válvula de controle u. O restante das variáveis, auxiliares do FSM, MS e EG não sofrem penalizações por suas trajetórias necessitando somente de obedecer as restrições já definidas internamente ao modelo. Logo, define-se os pesos: W_{bfg},$W_{\delta u}$ e $W_{\delta n}$, referentes a penalidade do erro de *setpoint* ($SP(k)$) do gás BFG, fornecido pelo otimizador, penalidade pelo movimento da válvula e penalidade por alternância de estados do queimador, representados na eq. 4.1.

$$\min_{[\delta u_{BF},\delta br_{BF}]_0^{N-1}} J([\delta u_{BF},\delta br_{BF}]_0^{N-1},x'(t)) \triangleq \sum_{k=0}^{N-1} \|\delta u_{BF}(k)\|^2_{W_{\delta u}} + \|\delta br_{BF}(k)\|^2_{W_{\delta n}} + \|q_{BFG} - SP(k)\|^2_{W_{bfg}} \quad (4.1)$$

A proposta inicial é de construir um controlador ótimo para sistema MLD completo, configurando pesos W_{bfg},$W_{\delta u}$ e $W_{\delta n}$. Para isto, montou-se o sistema de simulação de acordo com **Figura 30**, que consiste em um HMPC, resolvido por uma função objetiva quadrática. Primeiramente o sistema é inicializado a partir de um estado $x(k)$ para $k = 0$, em seguida o controlador calcula com base em $x(0)$ os valores ótimos de $u(k|t = 0), u(k + 1|t = 0)...u(k + N - 1|t = 0)$. Em seguida é simulado o sistema para somente um tempo de amostragem aplicando $u(k|t = 0)$ e as outras entradas calculadas são descartadas. Assume-se para testes iniciais que todos os estados do sistema são acessíveis e diretamente atualizados para o otimizador calcular $u(k|t = 1)$.

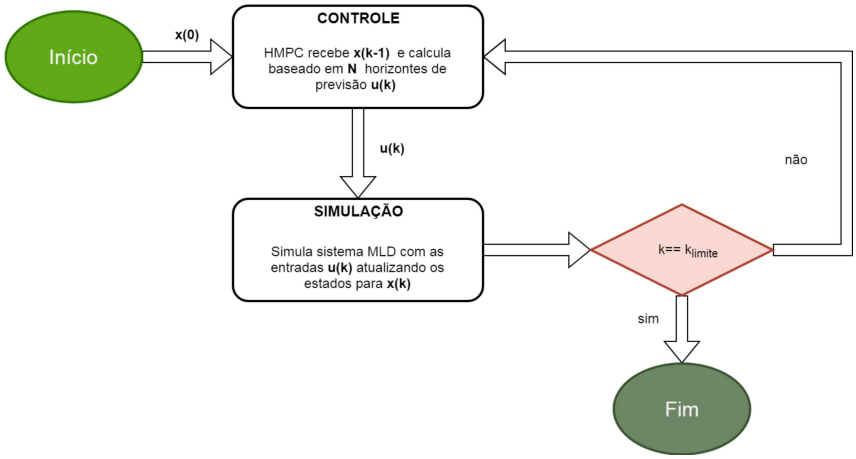


Figura 30 – Fluxograma da simulação do controle do modelo completo

Fonte: Autor

Como discutido em 2.3, os pesos considerados importantes para o controle suave e robusto do sistema são W_{bfg},$W_{\delta u}$ e $W_{\delta n}$. Estes 3 pesos foram combinados em dezenas de configurações, em conjunto com diferentes horizontes de controle, sendo $N \leq 8$. Apesar das tentativas, o *solver* CPLEX acusava frequentemente infactibilidade na solução, ou gerava um controlador inativo. Analisando o sistema simulado em malha aberta na **Figura 27**, percebe-se que o tempo de acendimento de um queimador é de 100s. Logo, para o cálculo de $u(k)$, seria necessário um horizonte de previsão $N > 101$. Logo, este problema de otimização seria construído em grande dimensão, por exemplo, a matriz $E2_{3422\times554}$, geraria uma matriz ϕ com 342200 linhas. Esta quantidade de variáveis de decisão contidas nas inequações, em conjunto com todas as outras variáveis ocasiona um *overflow* na memória dinâmica do computador utilizado. Na seção seguinte detalha-se o método e estruturação da simulação

para produzir um sistema computacionalmente viável, simplificando o controlador completo por dois controladores operando conjuntamente.

4.2 Controle Preditivo com modelos simplificados

Da avaliação feita na seção anterior, sobre o controlador preditivo para o sistema completo, percebe-se que o problema de otimização torna-se inviável computacionalmente devido aos atrasos e contadores do FSM. Dado isto, propõe-se a subdivisão do sistema em duas partes: o primeiro controlador calcula o número ótimo de queimadores utilizando um MLD simplificado, sem a parte lógica de acionamento dos queimadores (FSM - vide **Figura 26**), mantendo somente a parte do sistema SAS e suas restrições, porém removendo todas as FSM's (vide B.2 para mais detalhes); no segundo controlador, utilizando o mesmo sistema desprovido das FSM's, calcula-se $\delta u_{BF}(k)$ para seguir a referência de vazão requerida do gás BFG (Ref_{BFG}). O modelo simplificado é gerado a partir do código HYSDEL, baseado no modelo completo da seção 3.3. Desta forma não há atrasos no comando de acendimento, e o sistema simulado tem uma resposta imediata ao sinal de acendimento δn_{BF} e δu_{BF} tornando factível a otimização utilizando a eq. 2.22

A principal diferença deste método simplificado para o exemplificado na seção anterior, 4.1, está na abrangência de variáveis de decisão atribuídas ao controle preditivo. Na seção 4.1, projetou-se o sistema para prever e controlar todas as variáveis do sistema, calculando com base nos FSM's a melhor sequência de acendimento para a vazão requerida. Porém, devido ao custo computacional, admitiu-se o seguinte cenário: a quantidade de queimadores será fornecido pelo otimizador de gerenciamento de combustíveis do trabalho de Oliveira Jr. (2016), e o controle preditivo deste trabalho será responsável por calcular a posição da válvula de admissão de gás BFG para seguimento da referência dado por este mesmo otimizador.

Entretanto, o trabalho de Oliveira Jr. (2016) está em outro formato de simulação e precisava ser completamente refeito para integrar aos algorítimos criados para execução das simulações. Como, neste trabalho, o objetivo é controlar a vazão do gás de forma precisa, o cálculo do número de queimadores para um determinada vazão não apresenta criticidade para as avaliações seguintes; sob condição de que para um dado número de queimadores, a abertura da válvula de controle esteja dentro dos limites propostos ($[U_{min}, 1]$) e a vazão de referência não ultrapasse o limite máximo de vazão(Q_{max})

Logo, foi proposto criar um segundo otimizador, que fornece o número ótimo de queimadores para uma dada vazão requerida. Como será descrito na subseção 4.3, este cálculo da quantidade ótima de queimadores ($N_{ótimo}$) não será feito com todos os pesos e considerações feitas por Oliveira Jr. (2016), entretanto, ponderando o número de queimadores para que, em estado estacionário, o sistema tenha $\Delta u \simeq 0$, $q_{BFG} \simeq Ref_{BFG}$ e

respeitando as restrições (U_{min} e Q_{max}). Além disto a divisão do sistema em duas partes é compatível ao trabalho iniciado por Oliveira Jr. (2016), em que o número de queimadores é determinado com base em penalidades operacionais. Sendo assim, este modelo de divisão do sistema de controle avançado pode ser integrado ao otimizador proposto por Oliveira Jr. (2016) sem demasiada dificuldade.

4.3 Otimizador e modelo para cálculo do número de queimadores

Inicialmente, é necessário definir o problema de otimização, as técnicas e modelo utilizado, descrever o problema e o método de resolução do mesmo.

Existem vários valores de n para o mesmo *setpoint* de vazão, porém a melhor escolha do número de queimadores para um determinado *setpoint*, é aquele em que a posição da válvula de controle tenha maior liberdade para variar entre os limites $[U_{min}(n), 1]$.

Primeiro, dado Ref_{BFG}, $N_{ótimo}$ deve ser escolhido de modo que, em regime permanente, os limites de posição de válvula $[U_{min}(n), 1]$ e vazão máxima $[0, Q_{max}(n)]$ não sejam atingidos. Entretanto, estas restrições de saturação de variáveis manipuladas e controladas não é suficiente para um controle de vazão responsivo. A exemplo, mesmo que $N_{ótimo}$ seja calculado respeitando os limites físicos de vazão e curso da válvula (em regime permanente), a posição da válvula para dado Ref_{BFG} pode ser próximo dos limites $[U_{min}(n), 1]$. Com o curso limitado de atuação, em algum sentido de movimento da válvula, o sistema pode tornar-se incapaz de absorver condições de pertubação. No pior cenário, nestas condições limítrofes de posicionamento da válvula, pequenas variações em Ref_{BFG} provocam sucessivos acendimentos e apagamentos de queimadores para que o sistema seja capaz de seguir referência.

Logo, em um cenário ideal, o otimizador deverá calcular $N_{ótimo}$ de modo a manter a posição da válvula no centro de curso permitido $[U_{min}(N_{ótimo}), 1]$ e que $\Delta u \simeq 0$. Desta forma a vazão em regime estacionário estará próximo da posição de operação determinado na **Tabela** 11 e a válvula terá amplitude de movimento suficiente para absorver distúrbios e pequenas mudanças no *setpoint* de vazão. Logo, o número ótimo de queimadores deve proporcionar $\Delta u \simeq 0$, $q_{BFG} \simeq Ref_{BFG}$, ainda mantendo a posição da válvula no ponto intermediários de $[U_{min}, 1]$.

Para criar o modelo a ser otimizado, devido a grande quantidade de restrições e requerimentos do problema, utilizou-se as equações de um modelo MLD criado a partir de um DHA compilado em HYSDEL. Para simplificar o processo de calculo deste número de queimadores, calcula-se o ganho em estado estacionário ($K_{ss}(n)$), em malha aberta, da eq. 3.43, para cada número de queimadores n. Estes ganhos representados na **Tabela** 15 são utilizados para calcular x_1 em regime de operação $x_{1_{ss}} = K_{ss} \times \Delta u$, que consequentemente também define x_2 em estado estacionário. Logo, é possível calcular a vazão em regime

$q_{BFG_{ss}}$. No modelo a seguir estão definidos o método de cálculo para determinação da variação de u em relação ao ponto médio do intervalo $[U_{min}, 1]$, definida como R_u (eq. 4.2c) e as restrições de posição da válvula $[U_{min}(n), 1]$ (eq. 4.3c), vazão máxima $[0, Q_{max}(n)]$ (eq. 4.3b). Também são determinadas na eq. 4.7 as combinações impeditivas de funcionamento.

Número de queimadores acesos	1	2	3	4	5	6	7	8
Ganho estado estacionário K_{ss}	64.10	80.49	107.03	158.07	231.10	307.10	457.50	371.73

Tabela 15 – Ganhos em regime

Fonte: Autor

Logo o SAS compreende-se:

$$u(k) = \begin{cases} u & \text{se } m_{su} = 0 \\ U_{min}(m_{su}) & \text{se } m_{su} = 1, 2, ..., 8 \\ 1 & \text{se } m_{su}(k) = 9 \end{cases} \tag{4.2a}$$

$$x_{1_{ss}} = \begin{cases} K_{ss}(m_{sb})\Delta u_{BF} & \text{se } m_{sb} = 1, 2, ..., 8 \\ 0 & \text{se } m_{sb} = 0 \end{cases} \tag{4.2b}$$

$$R_u = \begin{cases} \frac{1-U_{min}(m_{sb})}{2} + U_{min}(m_{sb}) - u & \text{se } m_{su} = 1, 2, ..., 8 \\ 0 & \text{se } m_{su} = 0 \end{cases} \tag{4.2c}$$

$$\Delta u = u - 0.6 \tag{4.2d}$$

$$q_{BFG_{ss}} = x_{1_{ss}} + \overline{q_{BFG}}(m_{sb}) \tag{4.2e}$$

Os gerador de evento da eq. 4.3a indica com base em $d_{\#}$ a quantidade de queimadores. As equações 4.3b e 4.3c indicam a condição de vazão máxima para cada número de

queimadores $dq_{max\#}$ e posição mínima da válvula $du_{min\#}$ respectivamente.

$$EG_1 = \begin{cases} [d_0 = 1] \leftrightarrow [-n \geq 0] \wedge [n \geq 0] \\ [d_1 = 1] \leftrightarrow [n \geq 1] \wedge [-n \geq 1] \\ [d_2 = 1] \leftrightarrow [n \geq 2] \wedge [-n \geq 2] \\ [d_3 = 1] \leftrightarrow [n \geq 3] \wedge [-n \geq 3] \\ [d_4 = 1] \leftrightarrow [n \geq 4] \wedge [-n \geq 4] \\ [d_5 = 1] \leftrightarrow [n \geq 5] \wedge [-n \geq 5] \\ [d_6 = 1] \leftrightarrow [n \geq 6] \wedge [-n \geq 6] \\ [d_7 = 1] \leftrightarrow [n \geq 7] \wedge [-n \geq 7] \\ [d_8 = 1] \leftrightarrow [n \geq 8] \wedge [-n \geq 8] \end{cases} \tag{4.3a}$$

$$EG_2 = \begin{cases} [dq_{max1} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 37,5] \\ [dq_{max2} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 75] \\ [dq_{max3} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 112,5] \\ [dq_{max4} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 150] \\ [dq_{max5} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 187,5] \\ [dq_{max6} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 225] \\ [dq_{max7} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 262,5] \\ [dq_{max8} = 1] \leftrightarrow [q_{BFG_{ss}} \geq 300] \end{cases} \tag{4.3b}$$

$$EG_3 = \begin{cases} [du_{min1} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,43] \\ [du_{min2} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,32] \\ [du_{min3} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,21] \\ [du_{min4} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,18] \\ [du_{min5} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,02] \\ [du_{min6} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,06] \\ [du_{min7} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,13] \\ [du_{min8} = 1] \leftrightarrow [-u \geq -0,17] \\ [du_{max} = 1] \leftrightarrow [u \geq 1] \end{cases} \tag{4.3c}$$

Os seletores de modo são utilizados para selecionar as equações 4.2 do SAS, sendo as variáveis $d_0, d_1 ... d_8$ indicativas do número de queimadores escolhidos.

$$MS : m_{sb} = \begin{cases} 0 \text{ se } d_0 \\ 1 \text{ se } d_1 \\ 2 \text{ se } d_2 \\ 3 \text{ se } d_3 \\ 4 \text{ se } d_4 \\ 5 \text{ se } d_5 \\ 6 \text{ se } d_6 \\ 7 \text{ se } d_7 \\ 8 \text{ se } d_8 \end{cases} \tag{4.4}$$

$$MS : m_{su} = \begin{cases} 0 \text{ se } \sim du_{min1} \wedge \sim du_{min2} \wedge \sim du_{min3} \wedge \sim du_{min4} \\ \quad \wedge \sim du_{min5} \wedge \sim du_{min6} \wedge \sim du_{min7} \wedge \sim du_{min8} \wedge \sim du_{max} \\ 1 \text{ se } du_{min1} \wedge d_1 \\ 2 \text{ se } du_{min2} \wedge d_2 \\ 3 \text{ se } du_{min3} \wedge d_3 \\ 4 \text{ se } du_{min4} \wedge d_4 \\ 5 \text{ se } du_{min5} \wedge d_5 \\ 6 \text{ se } du_{min6} \wedge d_6 \\ 7 \text{ se } du_{min7} \wedge d_7 \\ 8 \text{ se } du_{min8} \wedge d_8 \\ 9 \text{ se } du_{max} \end{cases} \tag{4.5}$$

$$MS : m_{s3} = \begin{cases} 0 \text{ se } \sim dq_{max1} \wedge \sim dq_{max2} \wedge \sim dq_{max3} \wedge \sim dq_{max4} \\ \quad \wedge \sim dq_{max5} \wedge \sim dq_{max6} \wedge \sim dq_{max7} \wedge \sim dq_{max8} \\ 1 \text{ se } dq_{max1} \wedge d_1 \\ 2 \text{ se } dq_{max2} \wedge d_2 \\ 3 \text{ se } dq_{max3} \wedge d_3 \\ 4 \text{ se } dq_{max4} \wedge d_4 \\ 5 \text{ se } dq_{max5} \wedge d_5 \\ 6 \text{ se } dq_{max6} \wedge d_6 \\ 7 \text{ se } dq_{max7} \wedge d_7 \\ 8 \text{ se } dq_{max8} \wedge d_8 \end{cases} \tag{4.6}$$

Além das equações de EG, MS e SAS neste modelo há duas condições lógicas de funcionamento para impedir que o otimizador calcule um número de queimadores que sature a vazão de gás ou atinge os limites de operação da válvula, logo:

$$Restrição: R_1 = \begin{cases} [1] \leftrightarrow \sim \Big[(dq_{max1} \wedge d_1)|(dq_{max2} \wedge d_2)|(dq_{max3} \wedge d_3)| \\ (dq_{max4} \wedge d_4)|(dq_{max5} \wedge d_5)|(dq_{max6} \wedge d_7)|(dq_{max8} \wedge d_8)\Big] \\ \\ [1] \leftrightarrow \sim \Big[(du_{min1} \wedge d_1)|(du_{min2} \wedge d_2)|(du_{min3} \wedge d_3)| \\ (du_{min4} \wedge d_4)|(du_{min5} \wedge d_5)|(du_{min6} \wedge d_7)|(du_{min8} \wedge d_8)\Big] \end{cases} \tag{4.7}$$

O DHA descrito para o modelo completo reflete conceitualmente o código HYSDEL projetado e listado na **Tabela** 22. Após executar o comando "mld"para compilar o código *Hysdel* do *Hybrid Toolbox*, no MATLAB, é fornecido por este todas as matrizes que compõem o sistema MLD. Um resumo do modelo é fornecido pelo *Toolbox*:

MLD generated from the HYSDEL	file: <nOtimo.hys>
3 states	(3 continuous, 0 binary)
2 inputs	(2 continuous, 0 binary)
0 outputs	(0 continuous, 0 binary)
25	continuous auxiliary variables
56	binary auxiliary variables
248	mixed-integer linear inequalities

Tabela 16 – Resumo do modelo fornecido pelo *HYSDEL Toolbox* para o otimizador de n

Fonte: Autor

Devido a repetição de variáveis para os oito queimadores e as inúmeras lógicas condicionais foi gerado um total de 3422 inequações inteiras mistas e 239 variáveis de estado. Devido ao extensão deste modelo, o mesmo não será descrito formalmente, contendo todas as inequações e equações. A dimensão de cada matriz é dada pelas equações 4.8:

$$\begin{aligned} x(t+1) = A_{3\times3}x(t) + B1_{3\times2}u(t) \\ + B2_{3\times56}\delta(t) + B3_{3\times25}z(t), \end{aligned} \tag{4.8a}$$

$$E2_{248\times56}\delta(t) + E3_{248\times25}z(t) \leq E1_{248\times2}u(t) + E4_{248\times3}x(t) + E5_{248\times1} \tag{4.8b}$$

Função objetivo do otimizador

Como já mencionado, o número ótimo de queimadores deve proporcionar $\Delta u \simeq 0$, $q_{BFG} \simeq Ref_{BFG}$, $R_u \simeq 0$, minimizando o número n de queimadores fornecendo $N_{ótimo}$. A função objetivo deste problema foi formulada como MIQP sujeito as equações 4.10 fornecidas pelo MLD calculado a partir do modelo DHA da seção anterior.

$$\min_{n} \quad J(n,x) \triangleq \|n\|^2_{Q_1} + \|\Delta u\|^2_{Q_2} + \|q_{BFG_{ss}} - Ref_{BFG}\|^2_{Q_3} + \|R_u\|^2_{Q_4} \tag{4.9}$$

$$\text{sujeito à} \begin{cases} x = Ax + B_1 u + B_2 \delta + B_3 z, \\ E_2\delta + E_3 z \leq E_1 u + E_4 x + E_5 \end{cases} \tag{4.10}$$

Para determinação das penalidades Q_1, Q_2, Q_3, Q_4 utilizou-se um processo de tentativa e erro considerando as prioridades de minimização da função custo. Para ordenar as prioridades decidiu-se que um dos fatores mais importantes seria a minimização do número de queimadores, logo foi atribuído $Q_1 = 1000$. Para uma boa liberdade de variação ao sinal de controle deve-se manter R_u próximo à 0, de forma que, em estado estacionário, o controlador tenha pleno curso de ação para absorver distúrbios e pequenas mudanças de *setpoint*. É necessário também que a vazão em estado estacionário $q_{BFG_{ss}} \simeq Ref_{BFG}$.

Como:

$$0 < n < 10,$$

e,

$$-0.1 < R_u < 0.1,$$

poderia-se dizer que para $Q_4 = 1000$, a prioridade na função objetivo é equivalente ao número de queimadores. Entretanto, a ordem de grandeza de R_u é 10 vezes menor que n. Assim, o número de queimadores continuará prevalecendo sobre R_u. Por último determina-se Q_3 que deve penalizar $(q_{BFG_{ss}} - Ref_{BFG})$. Como este fator tem uma ordem de grandeza de 100, e é o menos importante na função objetiva que prioriza capacidade de rejeição de distúrbios em contraste com seguimento de trajetória, logo, configurou-se com $Q_3 = Q_4/100$. Esta configuração foi atingida por tentativa e erro, variando os pesos em torno destes valores, principalmente em Q_3 de forma a reduzir o erro $(q_{BFG_{ss}} - Ref_{BFG})$. Entretanto, observou-se que o número de queimadores aumenta com o incremento da penalidade Q_3. Sendo assim, para as penalidades acima determinadas, apresenta-se na **Tabela** 17 os valores das variáveis de decisão para posições de regime em cada *setpoint* de vazão.

Observa-se que a partir de 200 dam^3/h, $N_{ótimo}$ mantém-se em 8. Isto deve-se principalmente ao fato de que, a maior vazão em ponto de operação é 170 dam^3/h, logo o otimizador penaliza as outras variáveis para manter o U_{ss} e Δu próximos de 0. Os valores

Setpoint de vazão	N_{otimo}	U_{ss}	Δu	R_u	$q_{BFG_{ss}}$
25 dam³/h	1	0.45683	-0.14317	0.51634	25.2728
50 dam³/h	1	0.64758	0.047582	0.13484	37.5
75 dam³/h	2	0.66	0.06	0	49.32
100 dam³/h	4	0.59	-0.01	0	88.5882
125 dam³/h	4	0.59	-0.01	0	88.5882
150 dam³/h	6	0.53	-0.07	0	121.3433
175 dam³/h	6	0.53	-0.07	0	121.3433
200 dam³/h	8	0.585	-0.015	0	165.1822
225 dam³/h	8	0.585	-0.015	0	165.1822
250 dam³/h	8	0.585	-0.015	0	165.1822
275 dam³/h	8	0.585	-0.015	0	165.1822
300 dam³/h	8	0.585	-0.015	0	165.1822

Tabela 17 – Exemplos de resultados do otimizador ($N_{ótimo}$)

de $q_{BFG_{ss}}$ fora do valor de *setpoint*, não comprometem as simulações seguintes pois o principal interesse deste trabalho é que o controlador preditivo tenha amplo curso da válvula para controlar a vazão.

4.4 Filtro de Kalman

De todo SAS descrito nas equações 3.54, as únicas variáveis linearmente independentes são $x_1(k)$, $x_2(k)$ e $u(k)$. O restante das variáveis, $br_{BF}(k)$,$\Delta u(k)$,q_{BFG} e q_{VB} são linearmente dependentes das supra-citadas e as variáveis $bo_{br_{BF}}(k)$ e $bo_{BF}(k)$ são sempre mensuradas e conhecidas. Tendo em conta que somente uma destas variáveis é realmente mensurada (q_{BFG}), logo, o observador a ser projetado deve estimar $x_2(k)$ e $u(k)$ e atualizar $x_1(k)$, o que consequentemente leva a estimativa de q_{VB} e $u(k)$, dado relação de dependência linear. Devido ao processo de linearização dado nas equações 3.43 e também pelo advento de ruídos dos medição, a estimativa das variáveis $u(k)$ e q_{VB} podem diferir da realidade. Para isto propõem-se estimar as variáveis $x_1(k)$, $x_2(k)$ e $u(k)$ via filtro de Kalman aumentado com um integrador de distúrbio fictício, para rejeitar distúrbios assintoticamente estáveis e média diferente de zero, como por exemplo um agarramento de válvula, ou erros de modelagem. Este filtro foi criado com base nos artigos Pannocchia e Rawlings (2003), Sui, Feng e Hovd (2009) e Pannocchia e Bemporad (2007).

Primeiramente, é necessário modificar 3.43 representando Δu em função de δu. Sendo que:

$$\Delta u = u - \bar{u}, \tag{4.11}$$

é necessário transformar u e $\bar{u}$ em estados $\dot{x}_u(n)$ e $\dot{\bar{u}}$ adicionando-os as equações 3.43. Desta forma:

$$\dot{u}(n) = \delta u_{BF} \tag{4.12}$$

$$\dot{\bar{u}} = \delta\bar{u} \tag{4.13}$$

Logo o sistema 3.43 transforma-se em 4.14, sendo que A_a, B_a e C_a são as novas matrizes do sistema:

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1}(n,t) \\ \dot{x_2}(n,t) \\ \dot{u}(n,t) \\ \dot{\bar{u}}(n) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{K_1(n)-1}{\tau_1(n)} & \frac{K_2(n)}{\tau_1(n)} & \frac{K_3(n)}{\tau_1(n)} & \frac{-K_3(n)}{\tau_1(n)} \\ \frac{K_1(n)}{\tau_2(n)} & \frac{K_2(n)-1}{\tau_2(n)} & \frac{K_3(n)}{\tau_2(n)} & \frac{-K_3(n)}{\tau_2(n)} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{A_c} \begin{bmatrix} x_1(n,t) \\ x_2(n,t) \\ u(n,t) \\ \bar{u}(n) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{B_c} \begin{bmatrix} \delta u \\ \delta\bar{u} \end{bmatrix} \tag{4.14a}$$

$$y_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}}_{C_c} \begin{bmatrix} x_1(n,t) \\ x_2(n,t) \\ u(n,t) \\ \bar{u}(n) \end{bmatrix} \tag{4.14b}$$

Resta agora introduzir um estado integrador de distúrbio para cada estado mensurado, para rejeitar distúrbios com média diferente de zero. Logo, deve-se adicionar somente um estado integrador, pois apenas a variável q_{BFG} é medida no ponto de queda da pressão produzida pela introdução da placa de orifício. Além disto, todos os requerimentos para um controle com zero *off-set* de vazão são satisfeitos pois há uma variável de controle e uma variável manipulada, e o sistema 4.14 é controlável e observável. Sendo $\dot{d}_i$ o estado fictício integrador, o novo espaço de estado aumentado do observador é:

$$\begin{bmatrix} \dot{x_1}(n,t) \\ \dot{x_2}(n,t) \\ \dot{u}(n,t) \\ \dot{\bar{u}}(n) \\ \dot{d}_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_1(n)-1}{\tau_1(n)} & \frac{K_2(n)}{\tau_1(n)} & \frac{K_3(n)}{\tau_1(n)} & \frac{-K_3(n)}{\tau_1(n)} & 0 \\ \frac{K_1(n)}{\tau_2(n)} & \frac{K_2(n)-1}{\tau_2(n)} & \frac{K_3(n)}{\tau_2(n)} & \frac{-K_3(n)}{\tau_2(n)} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(n,t) \\ x_2(n,t) \\ u(n,t) \\ \bar{u}(n) \\ \delta d_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta u(t) \\ \delta\bar{u}(t) \end{bmatrix} \tag{4.15}$$

Aproximando a derivada no tempo, a uma eq. à diferenças, pelo método de Euler avançado:

$$\overbrace{\begin{bmatrix} x_1(n,k+1) \\ x_2(n,k+1) \\ u(n,k+1) \\ \bar{u}(n,k+1) \\ d_i(k+1) \end{bmatrix}}^{x_a} = \overbrace{\begin{bmatrix} \frac{[K_1(n)-1]Ts+\tau_1(n)}{\tau_1(n)} & \frac{K_2(n)Ts}{\tau_1(n)} & \frac{K_3(n)Ts}{\tau_1(n)} & \frac{-K_3(n)Ts}{\tau_1(n)} & 0 \\ \frac{K_1(n)Ts}{\tau_2(n)} & \frac{[K_2(n)-1]Ts+\tau_2(n)}{\tau_2(n)} & \frac{K_3(n)Ts}{\tau_2(n)} & \frac{-K_3(n)Ts}{\tau_2(n)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}^{A_a} \begin{bmatrix} x_1(n,k) \\ x_2(n,k) \\ u(n,k) \\ \bar{u}(n,k) \\ d_i(k) \end{bmatrix}$$

$$+ \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ Ts & 0 \\ 0 & Ts \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_{B_a} \underbrace{\begin{bmatrix} \delta u(k) \\ \delta \bar{u}(k) \end{bmatrix}}_{u_a(k)} + w(k) \tag{4.16a}$$

$$y_k = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{C_a} \begin{bmatrix} x_1(n,k) \\ x_2(n,k) \\ u(n,k) \\ \bar{u}(n) \\ d_i(k) \end{bmatrix} + v(k) \tag{4.16b}$$

Nas equações de 4.16, $w(k)$ e $v(k)$ são um vetores de ruído branco com média zero, que representam respectivamente as incertezas no calculo da estimativa dos estados e da medição da saída. Sendo $\hat{x}_a(k|k-1)$ a estimativa a priori de k para na iteração $k-1$ e L a matriz de ganho do do preditor de Kalman, a estimativa de $\hat{x}_a$ para instante $k+1$ no instante $k-1$, $x_a(k+1|k-1)$:

$$\hat{x}_a(k+1|k-1) = A_a\hat{x}_a(k|k-1) + B_a u_a(k), \tag{4.17}$$

em seguida atualiza-se $x_a(k+1|k-1)$ com o preditor de Kalman

$$\hat{x}_a(k+1|k) = \hat{x}_a(k+1|k-1) + L[y(k) - C_a\hat{x}_a(k+1|k-1)], \tag{4.18}$$

tendo-se então a estimativa a posteriori $x_a(k+1|k)$

A atualização do ganho L ocorre antes da execução do preditor de Kalman pela eq.:

$$L = A_a S_k C_a (C_a S_k {C_a}^T + R_v)^{-1} \tag{4.19}$$

$R_v(5X2)$ é uma matriz de covariância relacionada ao ruído $v(k)$. A matriz de covariância do erro de predição, S_{k-1}, é atualizada para S_k, anteriormente da eq. 4.19, pela solução da eq. de Riccati:

$$S_k = A_a S_{k-1} A_a^T + Q_w - A_a S_{k-1} {C_a}^T [C_a S_{k-1} A_a^T {C_a}^T + R_v]^{-1} C_a S_{k-1} A_a^T \tag{4.20}$$

$Q_w(5X5)$ é a matriz de covariância do ruido $w(k)$. É importante notar que esta aplicação do preditor de Kalman aumentado não é padrão, pois a cada mudança da dinâmica pelo modo seletor dado na eq. 3.57, as matrizes A_a e B_a se alteram, reiniciando a atualização de S_k e provocando uma pertubação no processo de predição. Entretanto, em virtude do estado adicional integrador, os efeitos destas pertubações de alteração das dinâmicas tendem a se anular assintoticamente, levando o controle a *off-set* zero. Os estados estimados são atualizados no SAS das equações 3.54 acordo com a seguinte relação:

$$\begin{bmatrix} x_1(n,k) \\ x_2(n,k) \\ u(n,k) \\ \bar{u}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_1(n,k) \\ \hat{x}_2(n,k) \\ \hat{u}(n,k) \\ \hat{\bar{u}}(n,k) \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

Antes de explanar os métodos de sintonia e parametrização do controlador preditivo, e filtro de Kalman, é preciso pormenorizar o algorítimo de simulação, utilizado para simular o sistema não linear e integrar todos estes subsistemas. Na subseção seguinte está descrito todos os passos e algorítimos que constituem o simulador do sistema controlado, incluindo adaptações e considerações para viabilidade de execução.

4.5 Algoritmo do Simulador

Primeiramente, deve-se entender que o sistema simulado constitui-se de 9 etapas, sendo que após a nona etapa o algorítimo retorna à etapa 2. A simulação ocorre à passos k, sendo $k = 0, 1, 2..., k_{fim}$, sendo que cada passo compreende ao tempo equivalente de um período de amostragem $Ts = 1\ s$.

Etapas para um passo (k) de simulação

E.1 Entradas

O sistema deverá seguir uma trajetória de referência de vazão $Ref_{BFG}(k)$, previamente fornecida para todo o período de simulação $k = 0, 1, 2..., k_{fim}$.

É também utilizado nesta simulação o sistema MLD da fornalha completa, o modelo não linear da fornalha, parâmetros de sintonia do otimizador, controle preditivo e as matrizes de covariância do filtro de Kalman.

Os estados iniciais do sistema completo são dados para uma fornalha em condição desligada. Não há vazão de gás, as válvulas de bloqueio e controle de vazão estão fechadas e nenhum procedimento de partida ou desligamento dos queimadores está em curso.

$N_{ótimo}(0)$ é inicializado com 0 e matriz de covariância do erro de predição S é

inicializada por uma matriz diagonal com valores iguais a 1000. As entradas $\delta br_{BF}(0)$ e $\delta u_{BF}(0)$ são também inicializadas com 0.

E.2 Cálculo do $N_{ótimo}$

Como não é fornecido o número de queimadores ideais para dado $Ref_{BFG}(k)$, utiliza-se um otimizador que calcula o número de queimadores ($N_{ótimo}$), em modo de regime do sistema linearizado em malha aberta (vide eq. 3.43). O otimizador pondera os seguintes objetivos: $\Delta u \simeq 0$, $q_{BFG} \simeq Ref_{BFG}$ e mantém a posição da válvula e vazão nos pontos intermediários de $[U_{min}, 1]$ e $[0, Q_{max}]$.

E.3 Incremento gradual de $br_{BF}(k)$

Quando é requerido o acionamento de algum queimador, estes, normalmente são acionados individualmente por questões de segurança operacional. Logo, foi proposto que os acendimentos consecutivos, no caso de $N_{ótimo} > 1$, tivessem um atraso mínimo de 10s entre acendimentos. Desta forma, $N_{ótimo}$ não pode ser repassado imediatamente para a variável que indica o número de queimadores requeridos para acionamento $br_{BF}(k)$. Logo, $br_{BF}(k)$ é incrementado/decrementado em 1 queimador a cada múltiplo de 10 passos de simulação, até que $br_{BF}(k) = N_{ótimo}$ (vide algorítimo 5).

Este procedimento incremental é utilizado para simular um cenário condizente com o observado na Caldeira.

E.4 Simulação da fornalha completa com dinâmica linear

Dado $br_{BF}(k)$, fornecido pela etapa anterior, simula-se o modelo MLD completo da fornalha gerado a partir do sistema DHA das matrizes, desenvolvido na seção 3.3 em especial a máquina de estado da **Figura 26** e equações de 3.54 até 3.59. As entradas desta etapa são $\delta br_{BF}(k) = br_{BF}(k) - br_{BF}(k-1)$ e $\delta u_{BF}(k) = \delta u_{BF}(k+1|k-1)$, sendo a última entrada fornecida pelo HMPC do passo anterior.

Após execução desta etapa, obtêm-se os dois principais resultados: o número de queimadores acesos, $bo_{BF}(k)$ e a abertura atual da válvula $u(k)$. É importante recapitular que $bo_{BF}(k) \neq br_{BF}(k)$, enquanto todos os procedimentos de acendimento/desligamento, estão sendo executados.

E.5 Simulação da dinâmica não-linear por um período de amostragem $Ts = 1\ s$

Apesar da simulação do MLD na etapa anterior fornecer todos os estados da **Tabela** 13, os estados da dinâmica de vazão do gás BFG (q_{BFG}, q_{VB}) são calculados linearmente e não contam com introdução de ruídos de medição e distúrbios com tendências.

Logo, a partir das equações 3.16, 3.17 ,3.32 e 3.46 simula-se o sistema não linear para o número de queimadores acesos e a abertura atual da válvula. São adicionados, sob

demanda do usuário, ruídos de medição e agarramento na abertura da válvula $u(k)$. Estes ruídos/distúrbio são utilizados para criar os estudos de caso no capítulo 5.

E.6 Atualização dos estados ($x_1, x_2, q_{BFG}, q_{VB}$)

A partir dos pontos de operação da **Tabela** 11 e dos estados calculados na etapa anterior, determina-se as variações x_1 e x_2:

$$x_1 = q_{BFG}(k) - \overline{q_{BFG}}(bo_{BF}(k)),$$

e

$$x_2 = q_{VB}(k) - \overline{q_{BFG}}(bo_{BF}(k)),$$

para em seguida atualizá-los aos estados simulados na etapa **E.5**, junto com q_{BFG} e q_{VB}.

E.7 Estimativas ($\hat{x}_1(k), \hat{x}_2(k), \hat{u}(k)$)

Como já explanado, para o sistema dinâmico de vazão de gás BFG, somente a vazão na placa de orifício é mensurada. Logo, necessita-se estimar os estados $[x_1, x_2, u]$ a partir da vazão q_{BFG}, atualizada na etapa anterior. Após executar o filtro de Kalman, utiliza-se os estados estimados $(\hat{x}_1(k), \hat{x}_2(k))$ para calcular $\hat{q}_{BFG}$ e $\hat{q}_{VB}$. Então, é fornecido ao HMPC os estados da etapa **E.4** substituindo $[x_1, x_2, q_{BFG}, q_{VB}]$, pelos estados estimados $(\hat{x}_1(k), \hat{x}_2(k), \hat{u}(k))$. Para não ocorrer equívoco, o leitor deve-se recordar que a estimativa é feita somente para estados não mensurados, estados que representam lógicas discretas, estado de acionamento e quantidade de queimadores são monitorados e não necessitam de estimativas.

E.8 Referência de vazão HMPC

Como há um atraso no procedimento de acendimento dos queimadores, a referência Ref_{BFG} não deve ser repassada diretamente a $SP(k)$, pois até a finalização destes procedimentos não haverá um número de queimadores suficiente para seguir $SP(k)$. Logo, este *setpoint* é modificado para $Ref_{BFG}(k)$ somente quando ocorre alguma variação no número de queimadores acionado $bo_{BF}(k)$, ou quando $N_{ótimo} = bo_BF(k)$ (vide o algorítimo 6 para mais detalhes)

E.9 Controle Preditivo

Com o valor de referência da vazão de gás BFG ($SP(k)$) e os estados da etapa **E.4**, mesclados com as estimativas da etapa **E.7**, o controlador preditivo calcula, para um horizonte de controle, $N = 6$, o valor de $\delta u_{BF}(k+1|k)$. Este HMPC baseia-se no modelo MLD gerado a partir do DHA simplificado, sem as dinâmicas lógicas do FSM de acendimento dos queimadores. Após esta última etapa, o simulador retorna à etapa **E.2**, porém no passo $k+1$

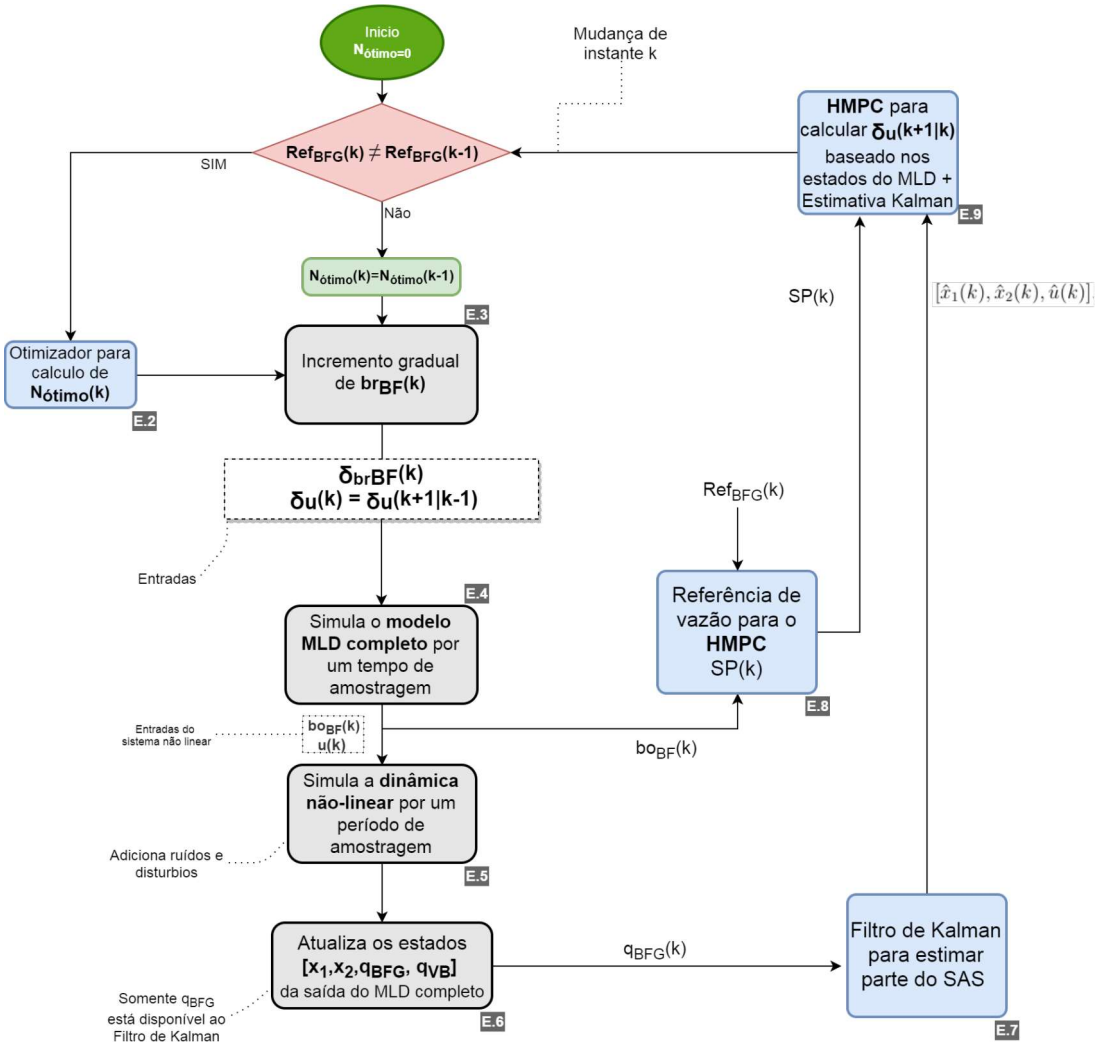


Figura 31 – Fluxograma da simulação e controle preditivo

Fonte: Autor

Nas seguintes subseções estão descritos os processos e razões das sintonias, testes de performance e simulações comparativas, avaliando robustez do sistema de controle.

Algoritmo 5: Incremento gradual de $N_{ótimo}$

Entrada: $N_{ótimo}(k), br_{BF}(k)$
Saída: $\delta br_{BF}(k)$
início
  se $N_{ótimo}(k) < br_{BF}(k)$ **então**
    $\delta br_{BF} = -1$
  senão
    se $N_{ótimo}(k) > br_{BF}(k)$ **então**
      se *contador=0* **então**
        $\delta br_{BF} = 1$
        contador=contador+1
      senão
        $\delta br_{BF} = 0$
        contador=contador+1
        se *contador*≥ 10 **então**
          contador=0
        fim
      fim
    fim
  fim
fim

Algoritmo 6: Referencia de vazão $SP(k)$ do HMPC

Entrada: $bo_{BF}(k), bo_{BF}(k-1), SP(k-1)$
Saída: $SP(k)$
início
  se $bo_{BF}(k) > 0$ **então**
    se $bo_{BF}(k) \neq bo_{BF}(k-1)$ *ou* $N_{otimo} = bo_{BF}(k)$ **então**
      $SP(k) = Ref_{BFG}(k)$
    senão
      $SP(k) = SP(k-1)$
    fim
  senão
    $SP(k) = 0$
  fim
fim

4.6 Sintonia do MPC Híbrido da fornalha

Nos testes realizados para manter $br_{BF}(k) = bo_{BF}(k)$, havia duas possibilidades: fazer $W_{\delta n} \gg W_{\delta u}$ e $W_{\delta n} \gg W_{bfg}$, de maneira que o peso na mudança do número de queimadores seja suficientemente alto para manter $u(k|t=0) = br_{BF}(k), u(k+1|t=0) = br_{BF}(k), ...u(k+N-1|t=0) = br_{BF}(k)$; outra opção seria configurar os limites inferiores e superiores para com valores próximos de 0. Fazendo isto, observou-se que mesmo que a solução obtida pelo controlador preditivo fornecesse $\delta_n \neq 0$, não seria suficiente para modificar x_{QFn} em um número inteiro de maneira que o seletor de modo $MS(k)$ mudasse sua dinâmica.

Seguindo a primeira opção, para manter $br_{BF} = bo_{BF}$ em todo horizonte de previsão, a cada otimização realizada, foi necessário elevar $W_{\delta n} > 1000$ a ponto dos efeitos de $W_{\delta u}$ e W_{bfg} se tornarem irrelevantes. Todavia, isto acaba por tornar o controlador instável e infactível para alguns cenários. De modo a não gerar nenhuma interação entre $W_{\delta n}$ e o restante dos pesos, escolheu-se então a segunda opção: configurar os limites inferiores e superiores para $[-1 \times 10^{-7}, 1 \times 10^{-7}]$, mantendo $W_{\delta n} = 0.001$.

Para sintonia completa do controlador preditivo é necessário determinar os efeitos de diferentes pesos e variados horizontes de previsão. Testes prévios feitos no desenvolvimento da simulação mostraram que horizontes de previsão $N < 4$, geravam controladores instáveis, e dependendo da trajetória do sistema, uma interrupção da simulação por infactibilidade. Para $N > 6$, o custo computacional aumenta exponencialmente e não há significativo aumento na performance.

Desta forma, foi proposto o método combinatório de variação dos pesos e horizonte de previsão, para determinar exaustivamente qual a melhor combinação baseado em métricas que avaliam a sensibilidade e estabilidade, dos pesos e horizontes de previsão. Configurou-se o peso fixo $W_{\delta n} = 0.001$, pois com as medidas tomadas no modelo MLD, este peso não interfere na solução do problema de otimização. Para os pesos W_{bfg} e $W_{\delta u}$, observou-se que, para uma resposta não oscilatória os pesos estavam ao redor dos seguintes limites: $W_{bfg} = [0.17, 0.29]$ e $W_{\delta u} = [3000, 13000]$

Durante o processo de sintonia dos pesos, não serão consideradas incertezas de modelagem ou ruídos, considera-se também que todos os estados são mensurados e disponíveis ao MPC não necessitando do filtro de Kalman da etapa **E.7** no algorítimo de simulação.

4.6.1 Sintonia dos pesos

Os teste de de varredura dos pesos funciona de acordo com o algorítimo 7. Os laços de repetição variam os pesos para o controlador preditivo com passos de 0.03, 1000 e 1 para W_{bfg}, $W_{\delta u}$ e N, respectivamente. Para cada combinação de pesos foi executado uma simulação completa com 975 segundos de duração. Para avaliar o comportamento dinâmico do sistema, foi proposto variações consecutivas nos valores de referência do gás BFG, para forçar os processos de desligamento e acendimento dos queimadores, listado na **Tabela** 18, e demonstrado na simulação da **Figura** 32

Na prática, operadores de caldeiras não submetem o sistema a uma resposta ao degrau na entrada de calor devido a procedimentos de segurança, desgaste dos equipamentos e custos operacionais. Porém, no teste de robustez do HMPC é valido simular estas situações pois, especialmente para este HMPC, os maiores efeitos devido a diferentes pesos ocorriam nas mudanças de *set-point*.

Degraus de teste	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Instante [s]	60	60	150	30	30	150	30	180	30	180	30	30
Set-point de vazão de BFG [dam^3]	100	200	300	45	50	130	25	75	20	150	50	65

Tabela 18 – Degraus para avaliação de desempenho

Fonte: Autor

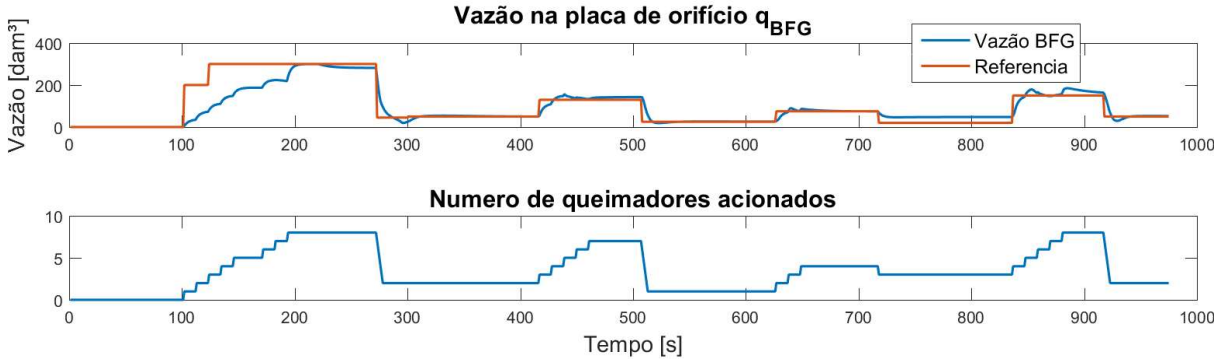


Figura 32 – Exemplo de simulação da sequência de degraus para avaliação de desempenho

Fonte: Autor

Em cada simulação foram registrados índices de desempenho comuns na avaliação de sistemas de controle, como: integral do modulo do erro (IAE); integral do tempo multiplicado pelo valor absoluto do erro (ITAE); valor eficaz do erro (RMS); índices relacionados a cada resposta degrau, utilizados para avaliar sistemas de segunda ordem (WESTPHAL, 2001).

Os índices de avaliação de resposta ao degrau foram: Tempo de subida (Tr); Tempo de Pico (Tp); Sobre-elevação Percentual (Mp%); Tempo de acomodação (Ts). Todos índices avaliam a dinâmica e erro do sistema seguir a trajetória de referência de vazão q_{bfg}. Um outro índice adicional foi utilizado para avaliar o esforço de controle na válvula principal, a integral da variação absoluta de posição da válvula I_{δ_u}:

$$I_{\delta_u} = \int_0^t |\delta_{u_{BF}}| dt$$

Com este último avaliador é possível ponderar as melhorias no tempo de resposta e erro com o esforço e oscilação do elemento final de controle.

A partir dos algorítimo 7, obteve-se 110 resultados com todos os índices registrados em dado estruturado em células. Os índices relacionados a resposta degrau, para sistemas de segunda ordem, foram inconsistentes para cada simulação, não foi possível fornecer nenhum dos índices , Mp, Ts,Tp e nem Tr a todos os degraus pois alguns degraus não atingiam o set-point. Todavia, os índices de erro e esforço do elemento final de controle foram consistentes e adequados para avaliação do sistema. Devido ao total de 110 simulações realizadas e um total de 440 índices úteis após filtragem, selecionou-se os 5 melhores para

Algoritmo 7: Registro das índices de desempenho do controle preditivo para várias combinações de pesos

início
  repita
    repita
      repita
        $W_{\delta u} = W_{\delta u} + 1000$
        Simula o sistema com degraus consecutivos
        $Matriz_Performance(i) =$
        $[IAE, ITAE, RMS, W_{bfg}, W_{\delta u}, N, I_{\delta_u}, Tr, Tp, Mp\%, Ts]$
        $i = i + 1$
      até $W_{\delta u} = 13000$;
      $W_{bfg} = W_{bfg} + 0.03$
    até $W_{bfg} = 0.29$;
    $N = N + 1$
  até $N \leq 6$;
fim

cada índice baseado nas integrais dos erros (vide **Figura 33**). Dentre os 15 melhores, selecionou-se entre os pontos como menor valor de I_{δ_u}, o ponto intermediário nos limites superiores e inferiores de $W_{\delta u}$ e W_{bfg}. Logo, foram escolhidos, $W_{\delta u} = 11000$ e $W_{bfg} = 0.23$

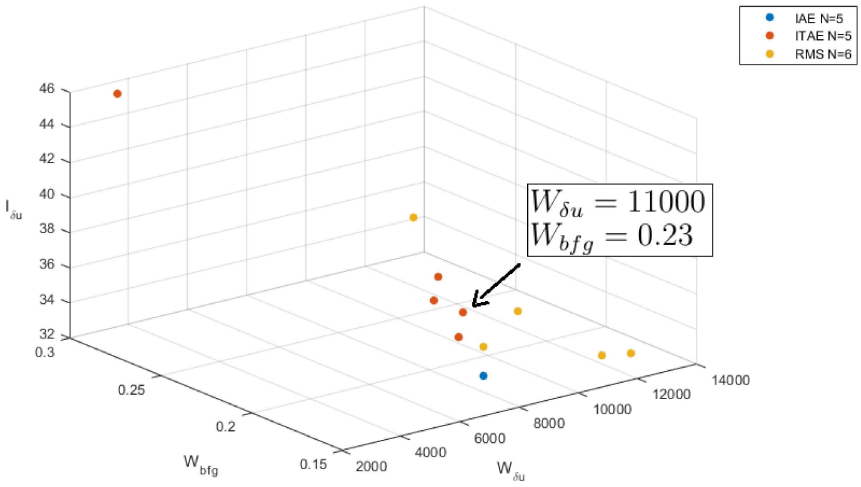


Figura 33 – Sintonia

Fonte: Autor

4.7 Cálculo das matrizes de covariância dos ruídos de processo e medição

As matrizes de covariância do filtro de Kalman são definidas por dois tipos distintos de ruido, incerteza interna ao modelo e a incerteza quanto aos sensores que realizam a medição.

Não há informação sobre a real incerteza do transmissor de pressão diferencial, utilizado para mensurar a vazão na placa de orifício. Desta forma, admite-se que o transmissor possui medição exata e sua precisão consiste de ±10% em relação a vazão máxima do sistema, $300dam^3$. Considera-se também que a distribuição probabilística deste erro segue à de um ruído branco com média 0 e curva normal. Então, como os limites inferiores e superiores são $[-30, 30]dam^3$, a variância do erro de medição da vazão q_{BFG} é $\sigma^2_{q_{BFG}} = 72$. Dado que a variável d_i representa o modelo integrador de distúrbio, logo não há incerteza na medição pois o mesmo é calculado iterativamente. Desta forma, a matriz de covariância do ruído de medição (R_v) é:

$$R_v = \begin{bmatrix} 72 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.22}$$

Para calcular a matriz de covariância do ruido de processo (Q_w), é preciso determinar a correlação da variabilidade (X_{erro}) entre os estados calculados linearmente (x_{1l}, x_{2l}, u_l) e os estados resultantes das equações não lineares (x_{nl}, x_{2nl}, u_{nl}). Para isto, utiliza-se o simulador da subseção 4.5, considerando que todos os estados atualizados na etapa **E.6** estão disponíveis ao controlador (para eliminar a necessidade de um Filtro de Kalman) e são salvos em um matriz temporal X_{NL}. Para calcular os estados lineares, executa-se, em paralelo à simulação linear da etapa **E.4**, uma segunda simulação. Utiliza-se o mesmo modelo completo, salvando os estados lineares (x_{1l}, x_{2l}, u_l) em um matriz temporal isolada X_L.

Nesta simulação, adiciona-se ao estado não linear x_1, um ruido de modelagem com metade da variabilidade do ruido de medição e mesmo modelo probabilístico, um ruido branco, média 0 e curva normal. Sendo assim, x_1 tem limites inferiores e superiores de $[-15, 15]dam^3$, resultando em uma variância $\sigma^2_{x_1} = 18,75$. Além disso adiciona-se ao estado u um ruido branco e normal com variabilidade de ±50% do curso total da válvula, levando a uma variância $\sigma^2_u = 0.02$. Dado estas configurações e executando o simulador obtêm-se as séries temporais supracitadas. Logo a variabilidade (X_{erro}) é:

$$X_{erro} = \begin{bmatrix} D_{x_1} \\ D_{x_2} \\ D_u \end{bmatrix} = X_{NL} - X_L,$$

sendo que X_L, X_{NL} e X_{erro} são matrizes $3 \times K_{FK}$ em que K_{FK} é o número de amostras salvas da simulação. Logo a matriz de covariância Q_w será:

$$Q_w = \begin{bmatrix} \mathrm{Cov}[D_{x_1}, D_{x_1}] & \mathrm{Cov}[D_{x_1}, D_{x_2}] & \mathrm{Cov}[D_{x_1}, D_u] & 0 & 0 \\ \mathrm{Cov}[D_{x_2}, D_{x_1}] & \mathrm{Cov}[D_{x_2}, D_{x_2}] & \mathrm{Cov}[D_{x_2}, D_{x_3}] & 0 & 0 \\ \mathrm{Cov}[D_{x_3}, D_{x_1}] & \mathrm{Cov}[D_{x_3}, D_{x_2}] & \mathrm{Cov}[D_{x_3}, D_{x_3}] & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.23}$$

Não há valores para as correlações com $\bar{u}$ pois ele é constante e não possui correlação temporal com nenhuma das variáveis. O mesmo ocorre para d_i, que é calculado interativamente. Desta forma a matriz resultante é:

$$Q_w = \begin{bmatrix} 433,10 & 470,86 & 0,7628 & 0 & 0 \\ 470,86 & 1677,27 & 0,2605 & 0 & 0 \\ 0,7628 & 0,2605 & 0,02123 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.24}$$

5 Estudos de Caso

Para testar e avaliar as sintonias de todo o sistema, simulou-se o HMPC utilizando os pesos $(W_{bfg}, W_{\delta u})$ calculados na seção anterior (4.6.1), no algorítimo descrito na subseção 4.5 utilizando uma sequência padronizada de degraus para Ref_{BFG}, de acordo com a **Tabela** 19.

Degraus de Ref_{BFG}	1	2	3	4	5	6
Instante [s]	1	200	210	390	420	450
Set-point de vazão de BFG $[dam^3]$	50	45	120	300	25	75

Tabela 19 – Degraus para avaliação de desempenho

Fonte: Autor

De certo, percebe-se que Ref_{BFG} sofre mudanças abruptas para os diferentes degraus listados na **Tabela** 19, com pequenos intervalos de tempo entre os mesmos. Apesar desta rápida variabilidade em Ref_{BFG} não ocorrer na operação real, para questões avaliativas de performance, requer-se somente que os degraus estejam afastados de acordo com o tempo de resposta do sistema. Por exemplo, como já discutido, o processo de acendimento de cada queimador leva por volta de 100 s e o processo de desligamento ocorre em 1 s. Logo, se o tempo entre cada degrau crescente for maior que 200 s e cada degrau decrescente for maior que 10 s o sistema terá tempo suficiente para estabilizar a vazão de gás BFG. Desta forma, estes degraus são realísticos para avaliação de comportamento HMPC à diversos cenários. Foi então proposto seccionar as simulações em cinco estudos de caso:

Caso 1: Simulação sem distúrbio de medição, sem agarramento ou falha de queimador;

Caso 2: Simulação com ruído branco na medição de q_{BFG};

Caso 3: Simulação com agarramento de $\pm 10\%$ na válvula de controle de gás;

Caso 4: Simulação com apagamento inesperado da chama de queimadores;

Caso 5: Simulação de sistema controlado com PI e comparado ao HMPC;

O padrão de apresentação das simulações consiste de duas figuras: as primeiras figuras são compostas de um aglomerado de 4 gráficos, sendo o primeiro representando a variável de maior interesse, a vazão de gás BFG na placa de orifício q_{BFG}, seguido da vazão total nas válvulas de bloqueio q_{VB} e posição da válvula de controle de fluxo total de gás. Os últimos dois gráficos demostram a diferença entre o número de queimadores ótimos e os que realmente estão acionados, para cada instante.

A última figura padrão, em todas as simulações apresenta os acionamentos e desligamentos ocorridos nos subsistemas modelados em 3.3. Há 3 gráficos traçados por caixas vermelhas e verdes. Estes representam os estados dos ignitores, estabilizadores e queimadores, respectivamente, partindo da parte superior da figura. O padrão é repetido entre todos os gráficos: cada linha pertence a um dispositivo e as caixas indicam em código de cores o estado do dispositivo situado na linha em questão, sendo *verde* $\leftrightarrow$ *ligado* e *vermelho* $\leftrightarrow$ *desligado*.

5.1 Caso 1: Simulação sem distúrbio de medição, sem agarramento ou falha de queimador

Este caso será utilizado como simulação padrão para ser comparado com os outros casos, pois admite-se que condições ideais de sensoriamento com ruido negligenciável, nenhum erro de modelagem ou agarramento da válvula e nenhuma falha de acendimento. Na **Figura 34** a simulação inicia em $t = 0$ com referência de vazão configurada para 50 dam^3, o número de queimadores ótimos calculados para esta vazão são 2. Entretanto, como mostrado na **Figura 35**, o processo de acendimento do primeiro queimador somente é finalizado em $t = 101s$. Após a mudança de estado dos queimadores, seguindo a lógica da **Figura 31**, a referência é passada para o sistema de controle da válvula. Em $t = 200$ a referência de vazão reduz para 45 dam^3, entretanto o número de queimadores requeridos não se modifica pela proximidade de *set-point*. Em $t = 210s$ a referência é reconfigurada para 120 dam^3 e $N_{ótimo}$ torna-se 6. Em $t = 321s$ os queimadores acendem e o *set-point* é repassado para o sistema de controle. Em $t = 400s$ a referência de vazão é requerida para 300 dam^3 e $N_{ótimo}$ torna-se 8.

Em $t = 501$ s a referência é repassada ao controlador e o sistema segue a vazão de 300 dam^3 até $t = 560$ s. Após $t = 550$ s é terminado o transiente do sistema e a vazão estabiliza com *off-set* pois o limite superior da válvula é atingido, ou seja abertura de 100%.

Em $t = 571$ s a referência passa para o valor de 25 dam^3, e como o desligamento de queimadores é feito em 1 segundo esta referência é repassada na próxima iteração.

Em $t = 610$ s a referência retorna a um valor superior a 75 dam^3 e $N_{ótimo}$ torna-se 4. Em $t = 711$ s os aquecedores adicionais são acionados e o *set-point* é repassado para o sistema de controle levando a fornalha seguir a referência da vazão de gás BFG.

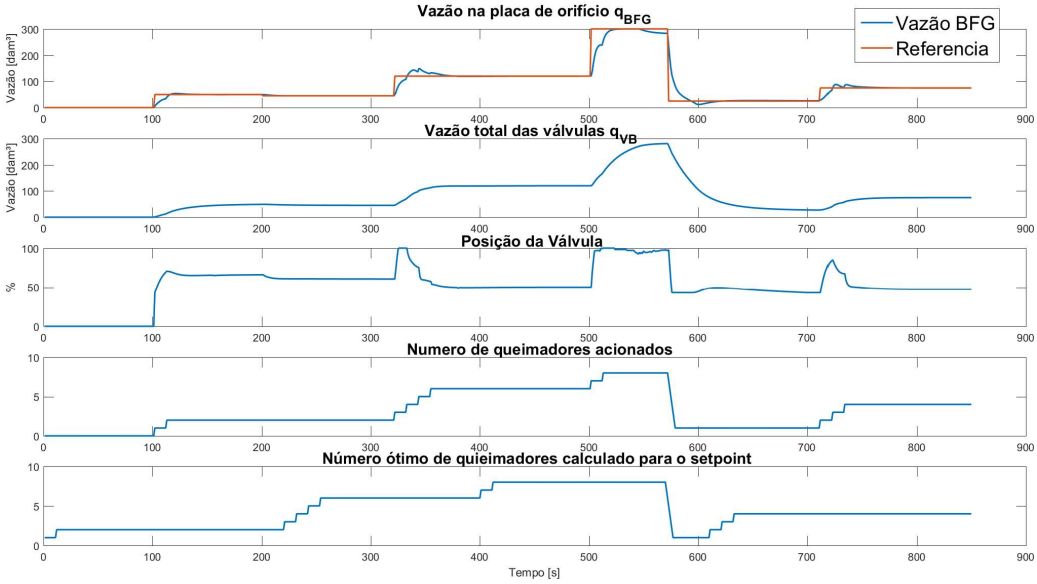


Figura 34 – Simulação do sistema sem distúrbio na medição ou falha

Fonte: Autor

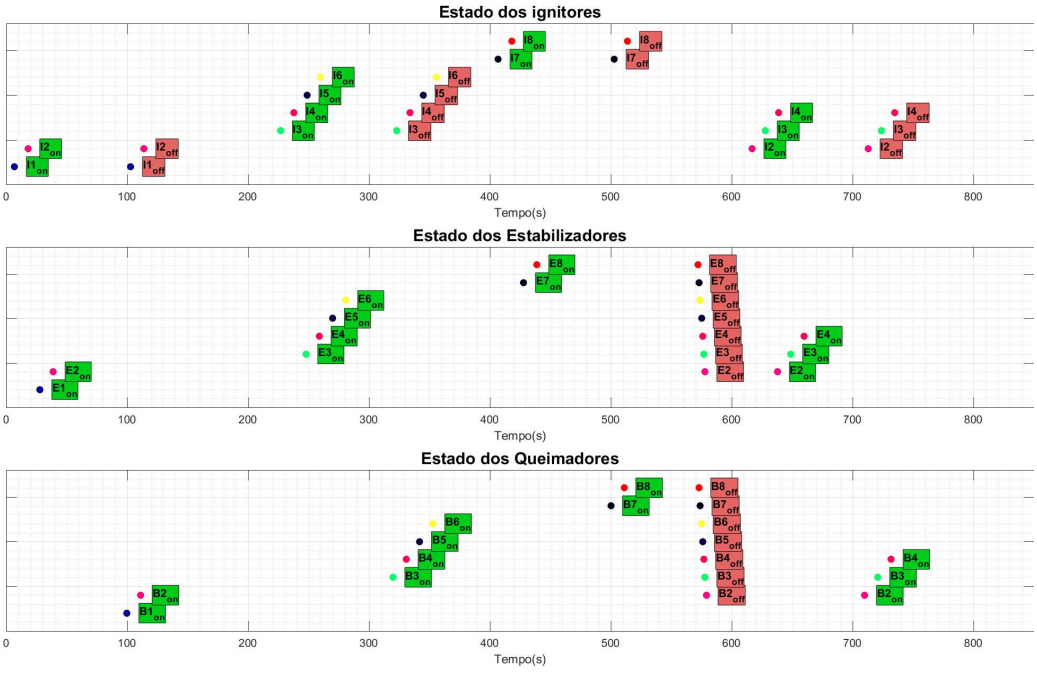


Figura 35 – Simulação do sistema sem distúrbio na medição ou falha (Evolução dos estados)

Fonte: Autor

5.2 Caso 2: Simulação com ruído branco na medição de q_{BFG}

Nesta simulação, trajetória da vazão de referência 19 é repetida, entretanto adicionando na medição de q_{BFG} um ruído branco, com variância $\sigma = 73$, média $\mu = 0$ e distribuição normal. O gráfico de evolução dos estados permanece o mesmo pois o ruído perturba somente o sistema a nível regulatório de vazão de gás. No teste apresentado na

Figura 36, o ruído é adicionado em $t = 400\ s$. Percebe-se que apesar do sinal medido de vazão (traço verde do 1º gráfico da **Figura 36**), o ruído não provoca deslocamentos e/ou distúrbios significativos no sinal de controle e vazão q_BFG real (traço azul do 1º gráfico da **Figura 36**). Para avaliar a eficácia do observador de estado criou-se o gráfico da **Figura**

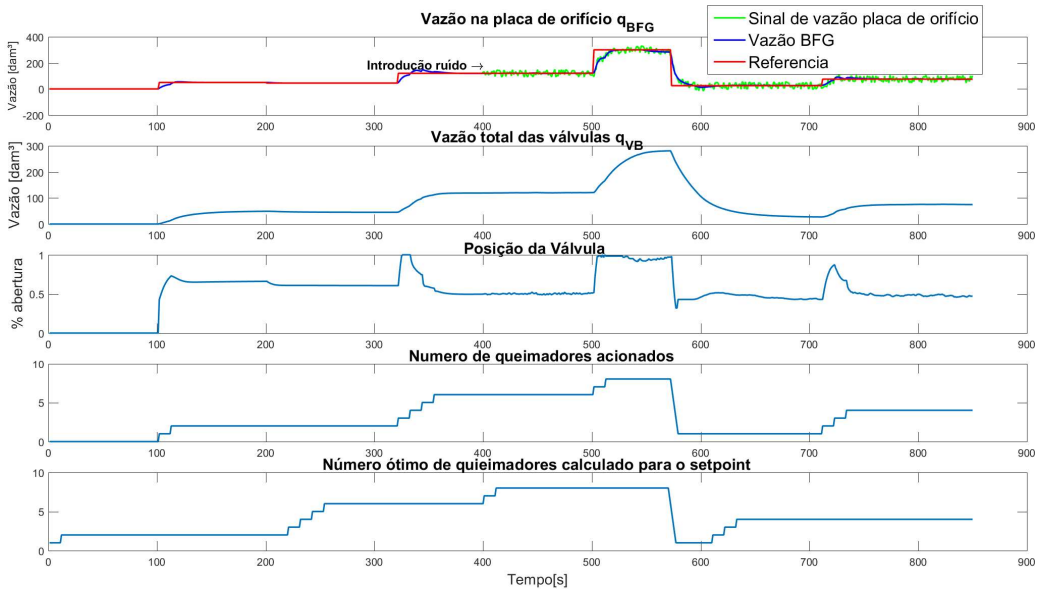


Figura 36 – Simulação do sistema com distúrbio na medição de vazão

Fonte: Autor

37. Observa-se que a vazão q_{BFG} está próximo da vazão estimada pelo filtro de Kalman e o sinal medido com ruido é filtrado, comprovando o funcionamento adequado do sistema de controle e observador de Kalman.

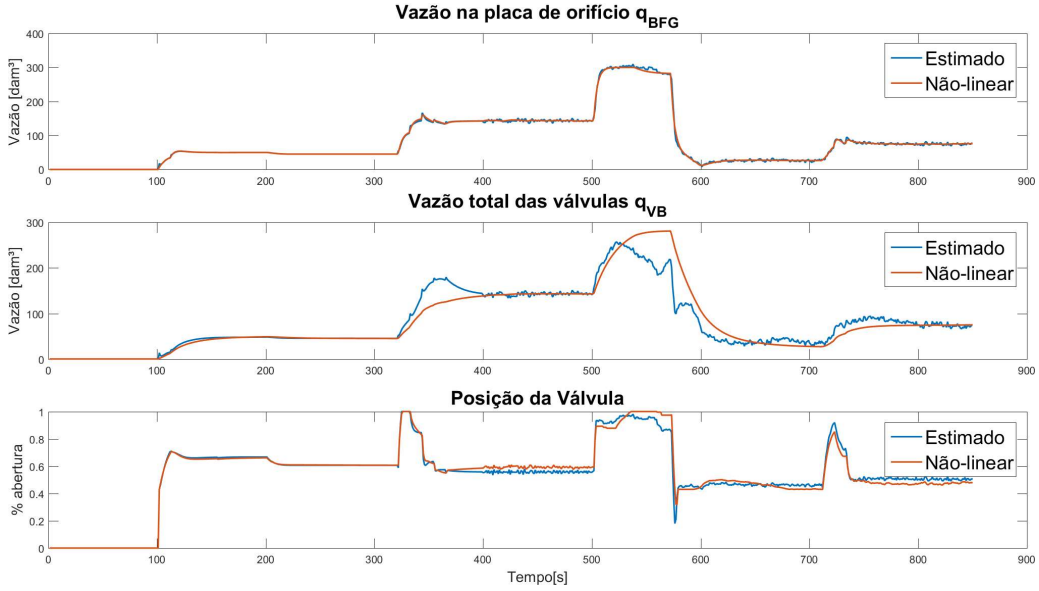


Figura 37 – Comparação entre estados reais e estimados

Fonte: Autor

5.3 Simulação com agarramento de ±10% na válvula de controle de gás

Para esta simulação, a trajetória da vazão de referência segue o padrão da **Tabela** 19. Porém neste caso, adiciona-se agarramentos de válvula, comuns a setores industriais pesados, no qual ocorrem naturalmente, pelas característica física das válvulas. Entretanto, quando desgastadas ou mal condicionadas os agarramentos ocorrem de modo mais proeminente (UEHARA, 2009). Para testar a robustez do conjunto controlador-observador foram adicionados agarramentos considerados altos, ±10% da posição da válvula. Em $t = 380$ ocorre um agarramento de -10% da posição atual na válvula, voltando a posição esperada em $t = 460$. Em $t = 750$ outro agarramento de $+10\%$ da posição atual na válvula em , retornando a posição esperada em $t = 830$. A partir do 3º gráfico da **Figura 39** é possível notar que no momento que ocorre o agarramento a posição da válvula sofre uma pertubação no sentido do agarramento. Este distúrbio constante é então integrado no Filtro de Kalman pelo estado d_i que compensa o agarramento resultando em uma estimativa coerente com a posição real da válvula. No 3º gráfico da **Figura 38**, no intervalo $t = [460, 750]$, a posição da válvula, calculada pela simulação do MLD, está acima da posição real da válvula. Isto é resultado da compensação do Filtro de Kalman que envia ao HMPC estados estimados deslocados, de modo que o controlador atue na válvula compensando o agarramento. Desta forma, o cálculo cego de u feito pelo MLD é deslocado no sentido contrário ao agarramento.

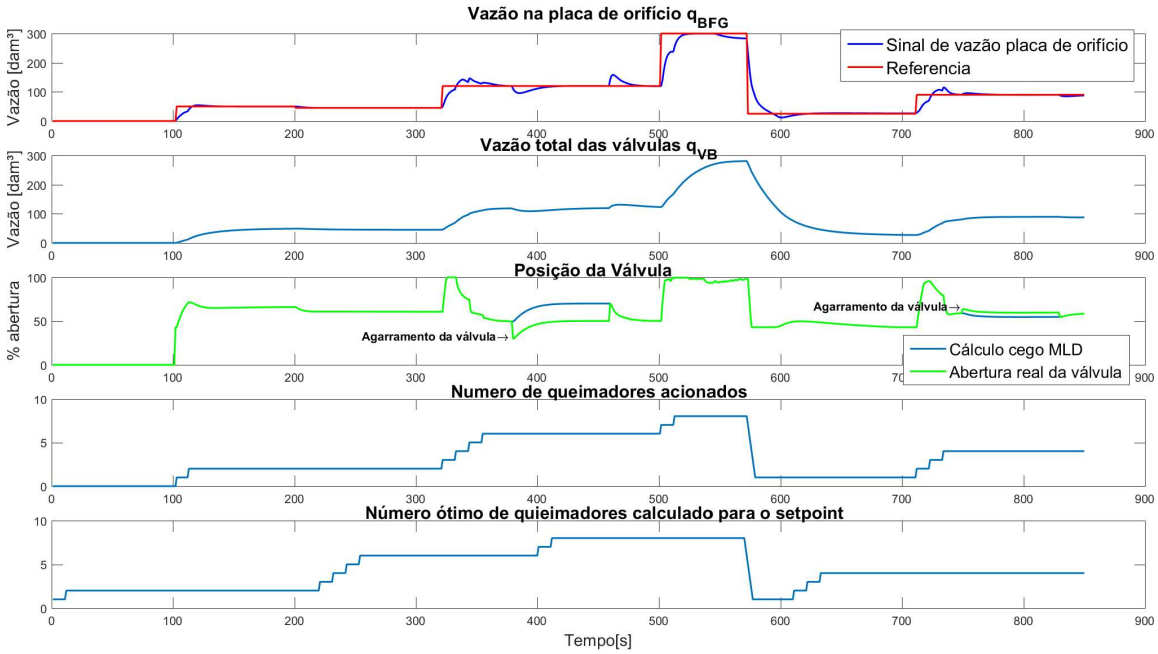


Figura 38 – Simulação do sistema com distúrbio na medição de vazão introduzido em $t = 550s$

Fonte: Autor

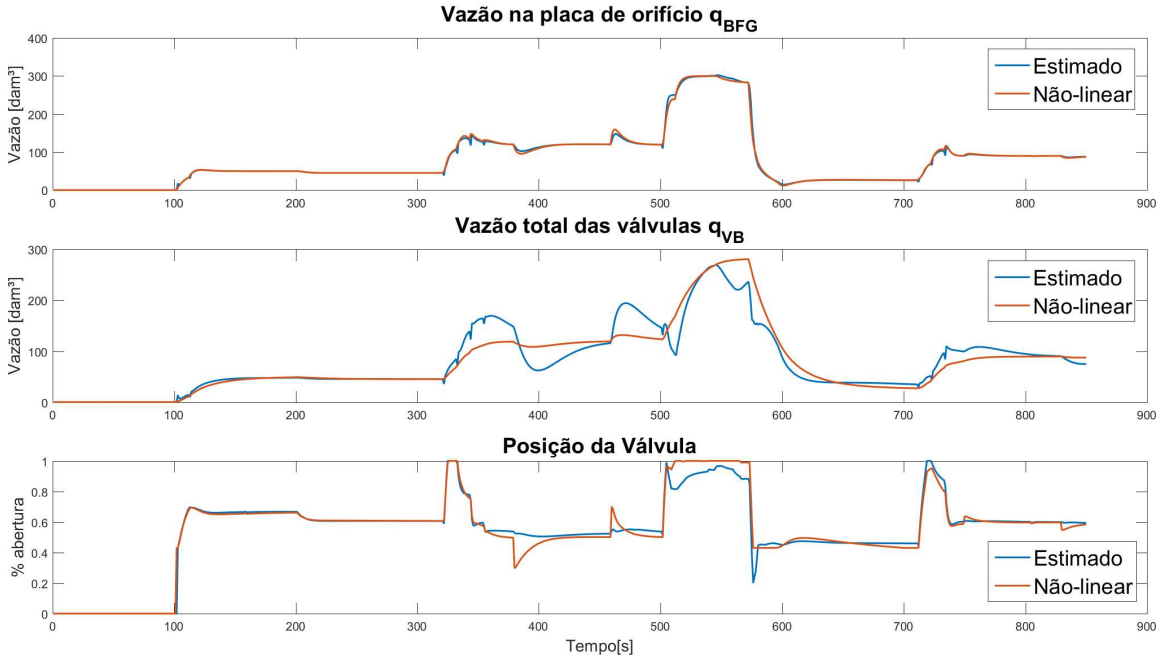


Figura 39 – Comparação entre estados reais e estimados

Fonte: Autor

5.4 Simulação com apagamento inesperado da chama de queimadores

Para esta simulação, a trajetória da vazão de referência segue o padrão da **Tabela** 19. Nesta ocasião porém, alguns queimadores se apagam em dois momentos diferentes. Para que possa ser observado a recuperação e comportamento do sistema durante a falha, o 3º e 5º degraus da **Tabela** 19 são substituídos pelos valores de referência $300dam^3$ e $75dam^3$, respectivamente, fazendo com que o sistema fique mais tempo nestes valores de referência.

Partindo para análise da simulação, observa-se que em $t = 400s$ duas chamas se apagam, de acordo com 3º gráfico da **Figura** 41 dado pelos quadros vermelhos dos queimadores B3 e B4. O cilo de acendimento dos queimadores B3 e B4, são imediatamente reiniciados sendo estes finalizados em $t = 500s$, demarcados pelos quadros verdes no 3º gráfico da **Figura** 41. No instante $t = 630s$ ocorre o último apagamento de chama, desta vez somente da chama B2. O ciclo de acendimento do queimador B2 é imediatamente reiniciado, retornado então ao estado aceso em $t = 730s$. Nos dois casos de apagamento da chama, o sistema é capaz de lidar com a falha recuperando-se durante a presença do mesmo.

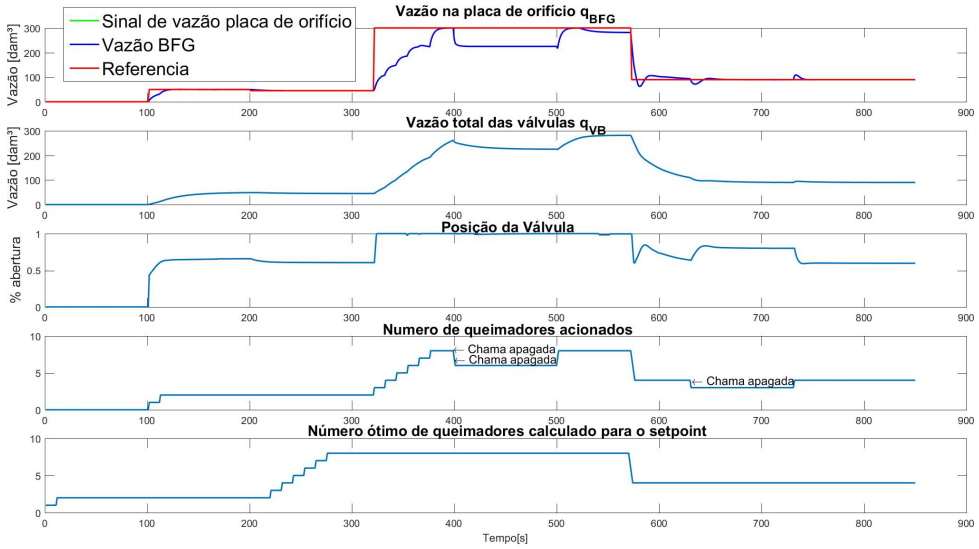


Figura 40 – Simulação do sistema com apagamento de chama em $t = 400s$ e $t = 630s$

Fonte: Autor

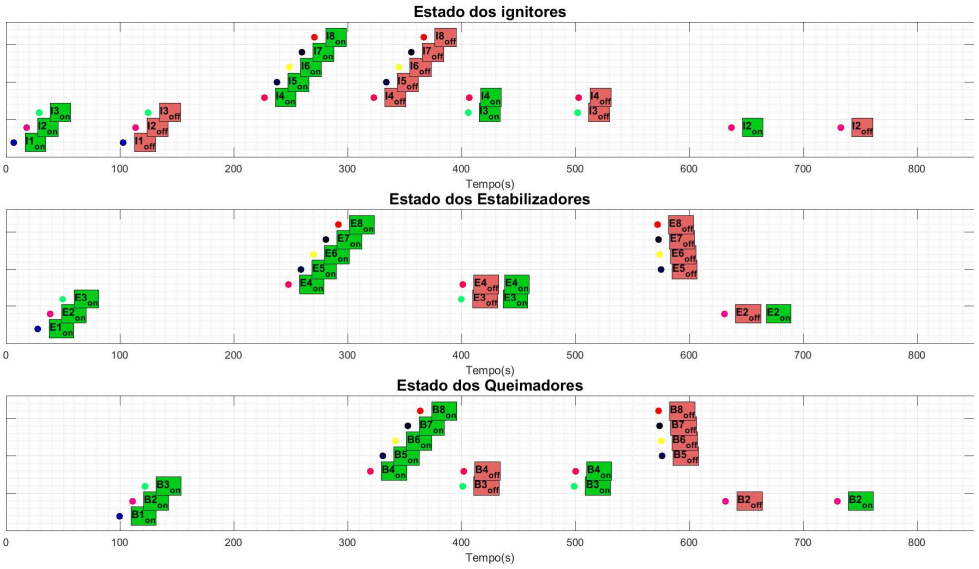


Figura 41 – Simulação do sistema com apagamento de chama em $t = 400s$ e $t = 630s$ (Evolução dos estados)

Fonte: Autor

5.5 Simulação de sistema controlado com PI e comparado ao HMPC

Para esta simulação, a trajetória da vazão de referência segue o padrão da **Tabela** 19. Porém, em paralelo ao simulador descrito na subseção 4.5, simula-se outro sistema considerando um controle regulatório da posição da válvula utilizando-se somente um controlador PI, substituindo o Filtro de Kalman e controle preditivo do algorítimo 4.5.

Além disto, controlador PI não possui nenhum tipo de limitação de δu, sendo limitado somente pelos limites de saturação físicos e de segurança como descrito na

Tabela 9. O controlador PI também não foi sintonizado por faixas, não alternando sintonia por número de queimadores, pois no modelo projetado por Oliveira Jr. (2016) havia somente uma sintonia para o PI em cascata com o controle preditivo. Os valores dos ganhos proporcionais e integrais foram retirados do trabalho de Oliveira Jr. (2016) e são respectivamente $P = 0.055$ e $I = 0.016$.

A primeira vista percebe-se que o controlador PI não é capaz de lidar com mudança de dinâmica, pois, em essência o projeto de um controlador PI é baseado em linearidade do sistema, logo para determinadas faixas de vazão em cada número de queimador deveria haver uma sintonia para P e I (NISE, 2011). Quando o ruido é adicionado em $t = 400\ s$ a oscilação no acionamento da válvula, já existente, aumenta, saturando a posição de válvula entre os valores mínimo e máximo. Durante toda a simulação o controlador PI segue a referência de vazão de gás, com variações de $\pm 20 dam^3$, porém com grande esforço de controle, o que pode levar a redução de vida útil da válvula reguladora de vazão de gás $u(k)$, devido ao percursos oscilatórios de alta frequência. O controle preditivo em contrapartida apresenta comportamento estável, robusto e com baixo desgaste da válvula.

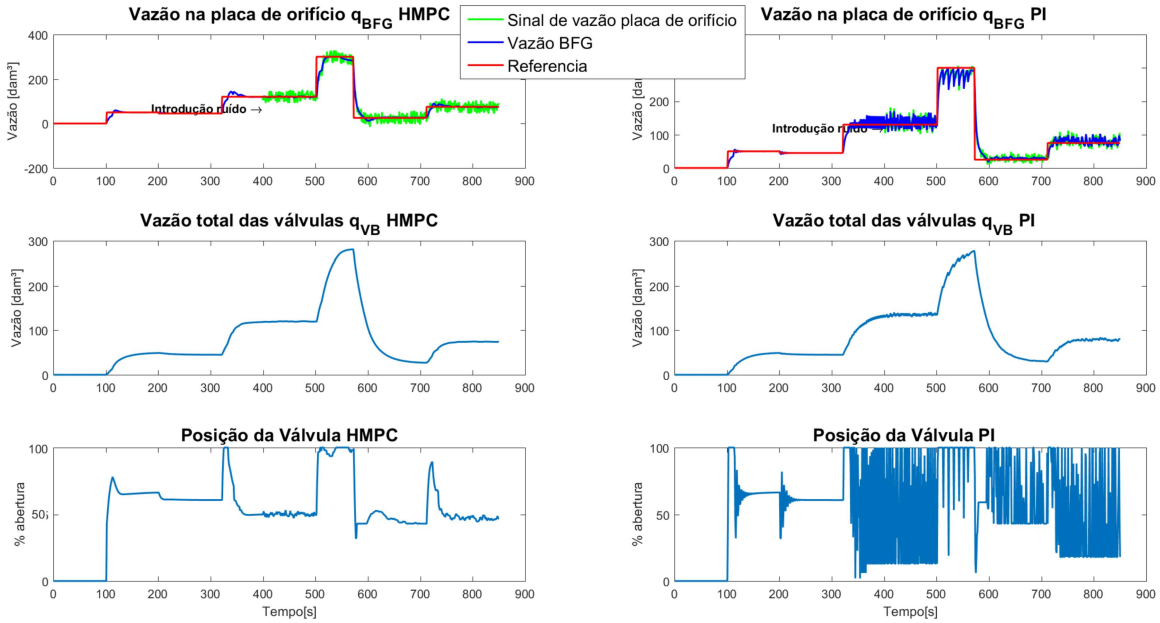


Figura 42 – Comparação entre comtrole via PI e HMPC

Fonte: Autor

6 Considerações Finais

Esta dissertação abordou o problema de controle preditivo de um sistema inteiro-misto, com dinâmica comutada por partes e rejeição de ruídos e distúrbios com tendência.

Apresentou-se uma nova modelagem da dinâmica de vazão de gás no sistema de abastecimento de uma fornalha típica de usinas termelétricas. Este modelo foi criado a partir de uma modelagem caixa branca, sendo assim completamente parametrizado e pode ser expandido e modificado para outras configurações.

Outra contribuição desta pesquisa foi a construção e estruturação de um método para converter qualquer modelo MLD para um conjunto de matrizes compatíveis com *solvers* de mercado. Este método permite uma implementação eficiente de controladores preditivos para sistemas híbridos, com funções de fácil utilização e baixo custo computacional, na solução dos passos iterativos do controle preditivo.

Foi desenvolvido também uma abordagem do Filtro de Kalman para sistemas híbridos, em que várias matrizes de ganho do preditor de Kalman são calculadas para cada dinâmica afim por partes referente ao MLD. Além disto, foi introduzido neste filtro de Kalman o estado fictício que representa o ruido integrativo, utilizado para rejeitar distúrbios com média diferente de zero. Este filtro foi capaz de estimar corretamente as vazões não mensuradas da fornalha mesmo na presença de um agarramento de válvula.

Devido a utilização de um *solver* moderno CPLEX e as simplificações feitas no modelo dinâmico e sistema híbrido da fornalha, o tempo médio para simular uma iteração do simulador foi de 100 milissegundos. O algorítimo que determina o número ótimo de queimadores executa esta otimização em um tempo médio de 80 milissegundos. A execução destes simuladores em 100 milissegundos por iteração apresenta-se como uma melhoria significativa. Isto se deve ao fato de que, no estudo anterior, o qual utilizava o Simulink, cada iteração demandava segundos, e o tempo de simulação completo chegava a 1 hora ou mais, em contraste com 80 segundos necessários para este novo simulador.

Na simulação e comparação entre o controle PI e o HMPC percebe-se uma notável diferença no perfil de atuação e controle do sistema. Entretanto, considerou-se a aplicação mais simples de um PI, com somente uma sintonia e nenhum tipo de lógica associada no CLP para aplicação de um controle adaptativo e filtro de Kalman. Dado que o sistema é lento e intrinsecamente estável, um controle PI com tais características seria economicamente viável e suplantaria os custos de implementação de um controle preditivo. Entretanto, caso o o sistema de controle de vazão da fornalha seja acrescido ao controle das variáveis operacionais da caldeira (controle do calor, da vazão de vapor, do nível de água e da pressão do tubulão da caldeira, etc), o controle preditivo teria vantagens na

implementação, performance e flexibilidade na manutenção do sistema.

As melhorias a serem feitas neste estudo consistem em duas partes: incluir em um único controlador preditivo a decisão de número de queimadores e controle da válvula; inclusão das dinâmicas de produção de vapor para que a trajetória de produção e monitoramento de vapor seja considerado no controle preditivo. A primeira melhoria irá necessitar da simplificação do sistema, de modo que o número de variáveis do sistema completo da fornalha não sejam demasiadamente numerosas e impossibilite o cálculo pelo otimizador em tempo hábil. A segunda melhoria requer uma integração com o modelo híbrido de produção de vapor e nova construção de um controle preditivo. Este novo modelo híbrido seria um sistema multivariável com acoplamentos internos e mais adequado para aplicação de um HMPC.

ANEXO A – Fluxogramas dos ciclos de acendimento de uma caldeira

A.1 Ciclo de acendimento do ignitor

Na **Figura 43** está retratado os inter-travamentos e lógicas de gerenciamento de acendimento do ignitor. Quando o controlador BMS está em posição de início de acendimento, os pré-requisitos para partida já estão atingidos; como, purga finalizada, a válvula de bloqueio do combustível do ignitor aberta, a válvula de bloqueio do queimador fechada e o *damper* na posição de vazão mínima (vide a parte superior à direita da figura 43); concedido assim a permissão de acendimento.

A permissão de acendimento libera o inter-travamento de comando de partida. Logo que o comando de partida é gerado, pelo operador, o centelhador é acionado e a válvula é aberta progressivamente, até a chama ser detectada. Se a chama não for detectada em um período de 10 segundos, inicia-se o processo de parada segura e o operador recebe um aviso de parada do ignitor. Caso a chama seja detectada, o BMS repassa o controle da vazão de combustível e ar para o CCS e informa aos outros processos e operador que o ignitor está aceso.

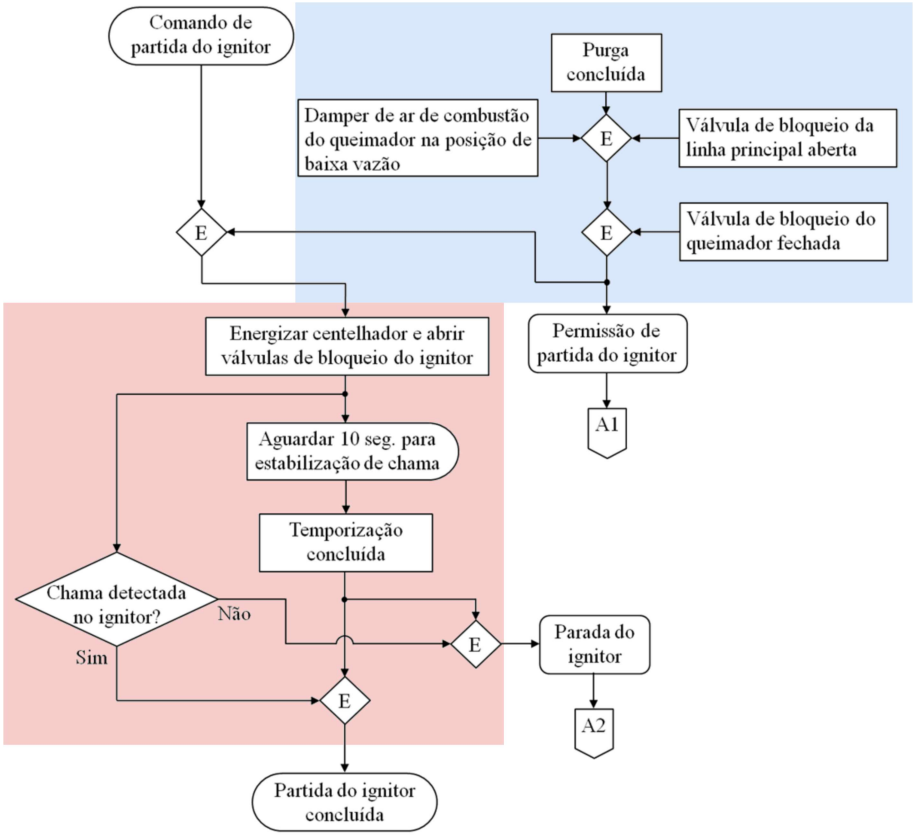


Figura 43 – Fluxograma da sequência de acendimento de um ignitor

Fonte: Oliveira (2016)

A.2 Ciclo de acendimento do estabilizador

Na **Figura 44** está retratado os inter-travamentos e lógicas de gerenciamento de acendimento do estabilizador. Para início de acendimento é necessário que o sistema atinja estado de pré-acendimento do estabilizador. Marcado em azul está o conectivo 'E' que indica estes pré-requisitos. Dentre eles estão: purga concluída; válvula de bloqueio da linha principal aberta; pressão do gás combustível, do estabilizador, nos limites de segurança; válvula de bloqueio do estabilizador fechada; nenhum comando de parada de queimador ou parada de segurança; ignitor aceso a menos de 15 segundos. Com todos os requisitos atendidos é enviado um aviso de permissão de acendimento do estabilizador (B1) ao operador. Em seguida, no momento que o operador executa o comando de partida, energiza-se a solenoide da válvula de bloqueio. Prontamente, a chama deve ser detectada em no máximo 10 segundos. Caso a chama não seja detectada neste período configura-se uma falha de partida e o estabilizador inicia parada de segurança. Para que todo o processo de acendimento esteja completo, um sistema adicional, com característica redundante, foi adicionado: averiguação de abertura total da válvula de bloqueio. Caso a válvula não esteja completamente aberta, dentro de um período de 75 segundos, determina-se então uma condição insegura. Assume-se que a válvula, nesta condição, de abertura incompleta, indica

travamento e portanto possível falha do sistema. Dado a condição de abertura incompleta da válvula, o sistema é então levado a parada de segurança e o sinal de parada é dado ao operador (B2). Caso a válvula esteja totalmente aberta e a chama detectada, dentro de seus períodos de segurança, o sistema BMS entrega o controle de vazão de combustível e ar para o sistema CCS, confirmando o estado de estabilizador aceso para o restante do sistema e envia um sinal de chama acesa ao operador.

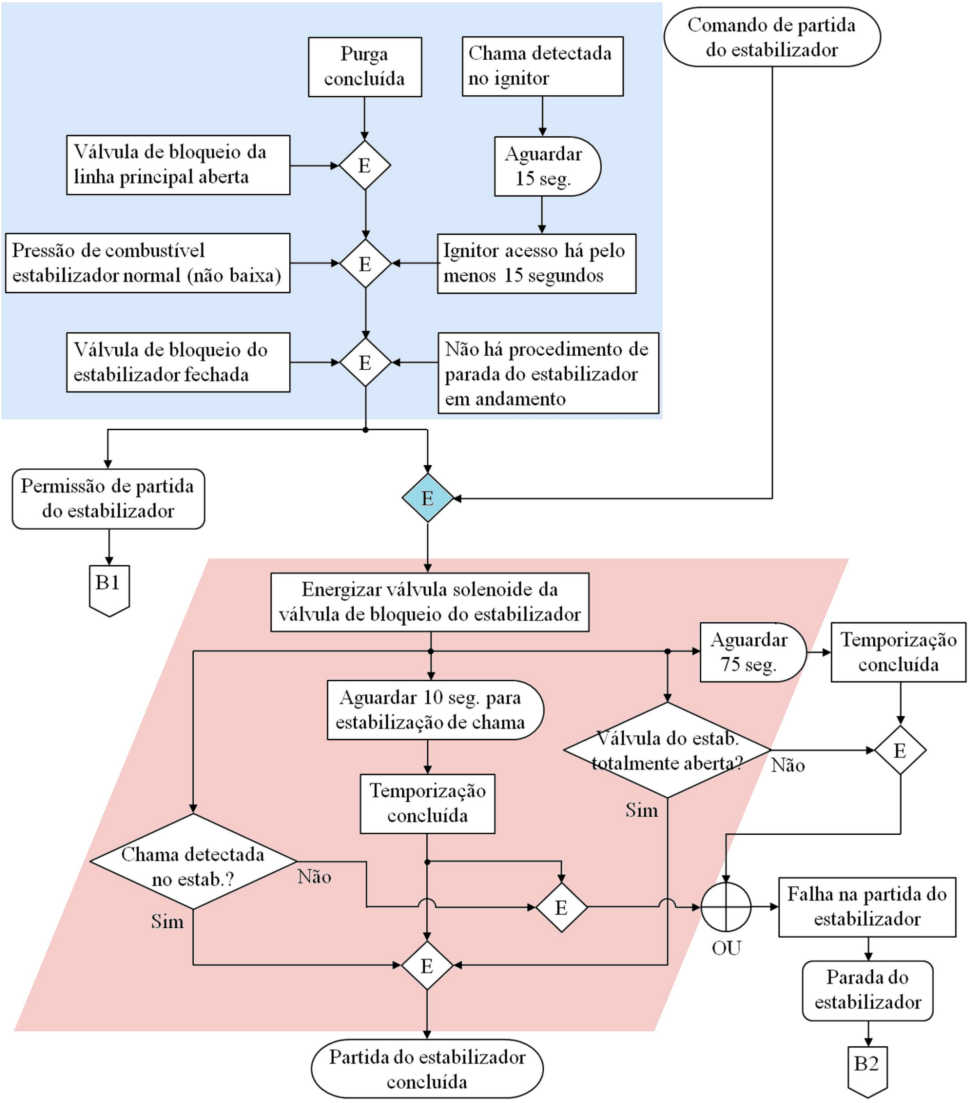


Figura 44 – Fluxograma da sequência de acendimento de um estabilizador de chama a gás

Fonte: Oliveira (2016)

A.3 Ciclo de acendimento do queimador

Na **Figura 45** retrata os inter-travamentos e lógicas de gerenciamento de acendimento do queimador.

No setor azul estão os requisitos de permissão de acendimento do queimador. Os primeiros requisitos estão condicionados as permissões de partida do ignitor/estabilizador e purga completa. Juntamente com os pré-requisitos externos, há exigências de pré-acendimento referente ao próprio queimador, como: Válvula de bloqueio da linha principal aberta, chama do queimador apagada, ausência de procedimento de parada e comando de parada, por fim é necessário que o operador aplique o comando de partida do queimador. Dadas as condições anteriores satisfeitas, a próxima etapa é o acendimento do ignitor/estabilizador na seção vermelha da figura. Então é enviado um comando de partida do ignitor (C1) e estabilizador (C2). O ciclo de acendimento do ignitor e subsequentemente o acendimento do estabilizador. O sistema espera a chama do estabilizador ser detectada, aguarda 15 segundos para garantir chama estável e energiza a solenoide da válvula do queimador. Caso o estabilizador não tenha chama detectada em período de 120 segundos, o acendimento do queimador é cancelado e o sistema admite falha e executa parada de segurança do queimador.

Seguindo para seção verde, verifica-se a chama do queimador e posição final da válvula do queimador. Caso a chama seja detectada e a válvula está aberta por completo, o controle da vazão de ar e combustível é passado para o CCS, o status de queimador aceso é enviado ao sistema e um aviso é enviado ao operador. As condições de parada de segurança são falha no acendimento do estabilizador; ou chama acesa com abertura incompleta da válvula por um período maior que 120 segundos; ou válvula totalmente aberta e chama do queimador não detectada em um período menor que 6 segundos. Quando um comando de parada é enviado pelo operador, o sistema também executa uma parada de segurança, com uma purga pós-desligamento.

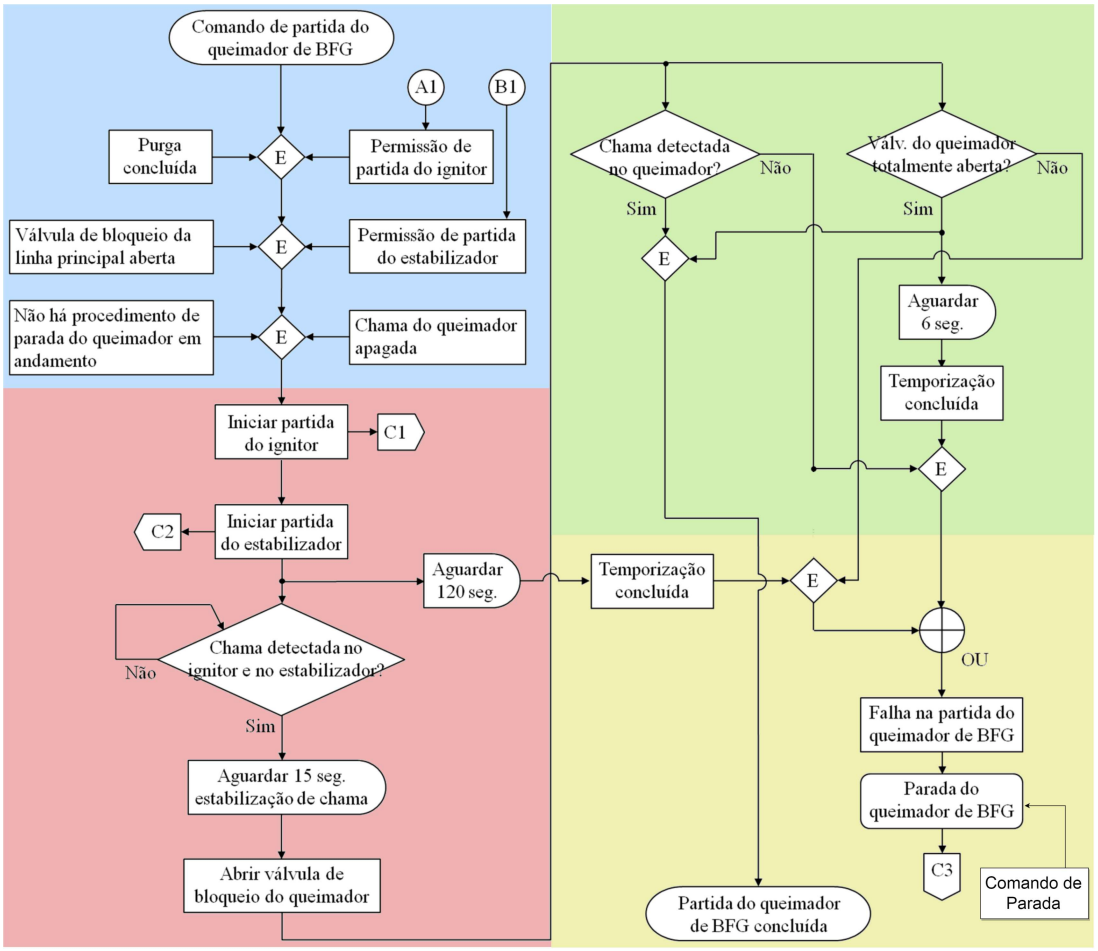


Figura 45 – Fluxograma da sequência de acendimento de um queimador de BFG

Fonte: Oliveira (2016)

ANEXO B – Máquinas Finita de estado Ignitor/Estabilizador

B.1 Máquinas Finita de estado Ignitor

Algumas variáveis, de entrada, para verificação de segurança, foram concentradas em uma única variável de permissão de acendimento. As variáveis demarcadas em azul na **Figura 43** estão ligadas por conectivos lógicos 'E', logo estas podem ser simplificadas em uma única variável de permissão. Na área vermelha da figura 43, apresenta-se os temporizadores para estabilização e condições de finalização. Estes foram substituídos por estados contínuos e variáveis auxiliares discretas. Em resumo, ignitor pode assumir três estados de funcionamento: 1-apagado; 2-em procedimento de acendimento ou partida; e 3-aceso. A mudança de estado depende de entradas externas discretas e entradas lógicas baseada em condições de fronteira, conforme mostra a **Figura 46**. O funcionamento desta máquina de estados ocorre em função das variáveis de entradas $u_I = [u_{I1}\ u_{I2}\ u_{l3}\ u_{I4}]$, dos estados lógicos dos ignitores ($x_I = [x_{I1}\ x_{I2}\ x_{I3}]$), do estado contínuo auxiliar (x_{Ic}) e de variáveis auxiliares discretas $d_I = [d_{I1}\ d_{I2}]$, sendo:

$$d_{I2} = (x_{I2}\ \wedge\ d_{I1} \wedge \sim u_{I4})\ \vee\ (x_{I3} \wedge\ \sim u_{I4})\ \vee\ u_{I3}$$

As definições destas variáveis estão exibidas na **Tabela 20**

Variável	Descrição	1	0	Valor Limite
u_{I1}	Comando Partida	V	F	-
u_{I2}	Permissão de Partida	V	F	-
u_{I3}	Comando de Parada	V	F	-
u_{I4}	Chama Ignitor	D	ND	-
x_{I1}	Ignitor Apagado	V	F	-
x_{I2}	Ignitor em Acendimento	V	F	-
x_{I3}	Ignitor Aceso	V	F	-
x_{Ic}	Contador para estabilização(s)	-	-	10 s
d_{I1}	Temporizador para estabilização do ignitor	FIN	CTD	-
d_{I2}	Condição de parada do ignitor	V	F	-

Tabela 20 – Variáveis do Subsistema do Ignitor

Fonte: Autor

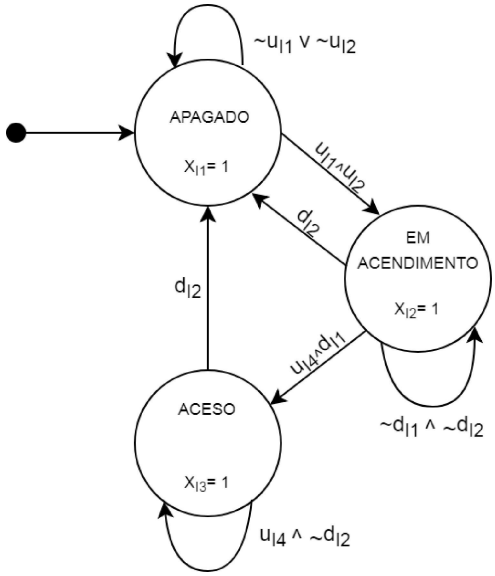


Figura 46 – Máquina de estados a elementos finitos do ignitor

Fonte: Autor

B.2 Máquinas Finita de estado Estabilizador

Similar ao ignitor, as variáveis do estabilizador estão demarcadas em azul na **Figura 44** e a mesma simplificação é feita para os conectivos tipo 'E'. Na área vermelha da figura 43, apresentam-se os temporizadores para estabilização e condições de finalização/segurança. Os temporizadores foram substituídos por estados contínuos e variáveis auxiliares discretas, na máquina de estados. O estabilizador, pode assumir três estados discretos de funcionamento: 1-apagado; 2-em procedimento de acendimento ou partida; e 3-aceso. A FSM do estabilizador, conforme **Figura 47**, simula internamente a FSM do ignitor. Esta simulação do FSM é realizada adicionando uma entrada discreta de permissão de partida e uma variável auxiliar de tempo de estabilização do ignitor. A mudança de estado também depende de entradas externas discretas (incluindo permissão de partida dada pelo ignitor) e entradas lógicas baseada em condições de fronteira.

O funcionamento desta máquina de estados ocorre em função das variáveis de entradas $u_E = [u_{E1}\ u_{E2}\ u_{E3}\ u_{E4}\ u_{E5}]$, dos estados discretos da máquina de estados ($x_E = [x_{E1}\ x_{E2}\ x_{E3}]$), do estado contínuo auxiliares $x_{Ec} = [x_{Ec1}\ x_{Ec2}\ x_{Ec3}]$ e de variáveis auxiliares discretas $d_E = [d_{E1}\ d_{E2}\ d_{E3}\ d_{E4}]$, com as definições destas variáveis exibidas na **Tabela 21** . A variável d_{E2} é resultado da seguinte lógica combinacional: d_{E2}[1]$= (x_{E2} \wedge d_{E1} \wedge \sim u_{E4}) \vee (x_{E3} \wedge \sim u_{E4}) \vee (d_{E4} \wedge \sim u_{E6}) \vee u_{E3} \vee (d_{E3} \wedge \sim u_{E5})$

[1] d_{E2} pode ser interpretada por: d_{E2}=(Falha no acendimento)∨(Chama apagada)∨(Válvula de bloqueio travada)∨(Comando de parada)∨(Ignitor apagado).

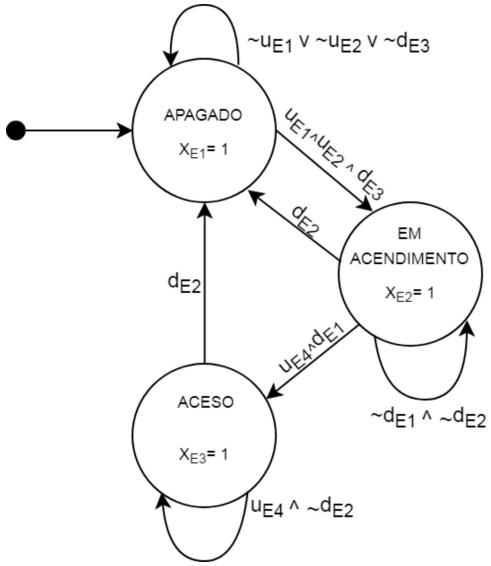


Figura 47 – Máquina de estados a elementos finitos do estabilizador

Fonte: Autor

Variável	Descrição	1	0	Valor Limite
u_{E1}	Comando Partida	V	F	-
u_{E2}	Permissão de Partida	V	F	-
u_{E3}	Comando de Parada	V	F	-
u_{E4}	Chama Estabilizador	D	ND	-
u_{E5}	Chama Ignitor	D	ND	-
u_{E6}	Válvula de bloqueio Estabilizador	TA	FEC	-
x_{E1}	Estabilizador Apagado	V	F	-
x_{E2}	Estabilizador em Acendimento	V	F	-
x_{E3}	Estabilizador Aceso	V	F	-
x_{Ec1}	Contador: estabilização chama Ignitor (s)	-	-	15 s
x_{Ec2}	Contador: estabilização chama Estabilizador (s)	-	-	10 s
x_{Ec3}	Contador: confirmar abertura completa da válvula do estabilizador (s)	-	-	75 s
d_{E1}	Temporizador: estabilização do Ignitor	FIN	CTD	-
d_{E2}	Condição de parada do ignitor	V	F	-
d_{E3}	Temporizador: estabilização chama do Estabilizador	FIN	CTD	-
d_{E4}	Temporizador : verificar abertura completa válvula do estabilizador	FIN	CTD	-

Tabela 21 – Variáveis do Subsistema do Estabilizador

Fonte: Autor

B.3 Simulação da máquina de estado de um único queimador

Nesta seção serão abordados as simulações do FSM do ignitor, estabilizador e queimador que compõem o ciclo de acendimento completo de um único queimador. Estas simulações e subdivisão do sistema tem objetivo principal de complementar didaticamente ao leitor, o entendimento dos fluxogramas e máquinas de estado.

Importante notar que não há distinção de comando de parada de emergência, segurança ou parada normal, nas máquinas de estado descritas anteriormente. Estas questões são tratadas no tempo gasto que o sistema para dar a permissão de acendimento depois de uma parada. Por exemplo: caso exista uma parada de segurança o sistema envia

um sinal de parada e executa todo ciclo de *reset*, purga e verificação do sistema. Quando uma falha de chama não dispara uma parada de segurança, basta o sistema executar o ciclo novamente, sem necessidade de esperar o sistema reiniciar.

B.3.1 Simulação do ignitor

Baseado na carta normativa NFPA 85, e em dados fornecidos por Oliveira Jr. (2016), derivou-se as sequencias de entradas que simulam um cenário comum no acendimento de um ignitor. Na **Figura 48** observa-se o sistema está no estado inicial $x_{I1} = 1$, **apagado**. No tempo $t = 5s$ há a permissão de comando (u_{I1}), que ocorre depois de todos os requisitos de segurança são atingidos. Em seguida, no instante $t = 10s$ é executado o comando de partida (u_{I2}). O ignitor passa para o estado **em acendimento**. Neste instante, a válvula inicia abertura e o centelhador é ligado. O estado contínuo x_{IC}, dedicado para contar tempo de detecção e estabilização da chama do ignitor também é iniciado em $t = 10s$. Apesar da chama ser detectada em $t = 19s$ o ignitor somente passa para o estado aceso quando com contador $x_{IC} = 10s$. Ocasionalmente pode ocorrer uma falha ou apagamento da chama, enviando o sistema para o estado apagado e fechando automaticamente a válvula de gás. Caso haja novas permissões e comando de acendimento e nenhum comando de desligamento (u_{I3}) for dado por questões de segurança, o ciclo de acendimento se repete. Em $t = 44s$ o segundo comando de partida é enviado e o ciclo se repete até que um comando de parada é enviado ($u_{I3} = 1$) em $t = 64s$ $u_{I3} = 1$, forçando o ignitor ao estado desligado, mesmo que a chama não tenha sido apagada por acidente.

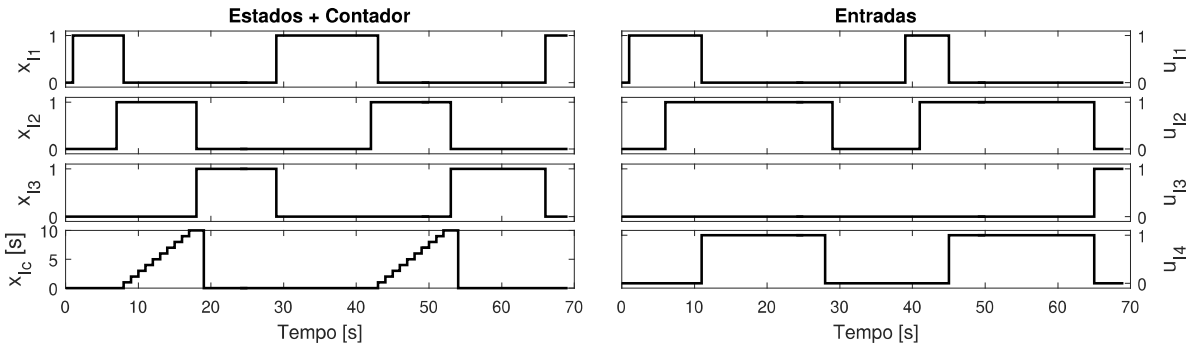


Figura 48 – Simulação do Ignitor

Fonte: Autor

B.3.2 Simulação do estabilizador

Similar à simulação do ignitor, derivou-se as sequencias de entradas que simulam um cenário comum no acendimento do estabilizador. Na **Figura 49** observa-se que o sistema está no estado $x_{E1} = 1$, **apagado**. No tempo $t = 10s$ ocorre a permissão de comando (u_{E2}), que acontece depois que todos os requisitos de segurança são atingidos.

Em seguida, no instante $t = 21s$ é executado o comando de partida (u_{I2}). O ignitor passa para o estado **em acendimento**. Neste instante, a válvula inicia abertura e o centelhador é ligado. O estado contínuo x_{EC1}, dedicado para contar tempo de estabilização da chama do ignitor também é iniciado em $t = 21s$. Com a chama do ignitor e o contador de estabilização do ignitor finalizado o FSM passa para o estado **em acendimento**. Neste momento, o sistema espera pela detecção da chama e abertura completa da válvula do estabilizador. A chama do estabilizador é detectada em $t = 41s$ e a válvula chega no fim de curso de abertura em $t = 71s$. O sensor de abertura da válvula sofre de oscilação na primeira detecção, mas não leva o sistema a uma parada segura pois o contador x_{EC3} não atinge 75 antes da abertura completa. Em $t = 91s$ ocorre um sinal de parada normal e o sistema é forçado ao estado desligado. Ocasionalmente pode ocorrer uma falha na abertura completa ou apagamento da chama, enviando o sistema para o estado apagado e fechando automaticamente a válvula de gás, como mostra respectivamente as **Figura s 50 e 51**. Depois de uma parada, caso haja novas permissões e comando de acendimento e nenhum comando de desligamento (u_{I3}) for dado, o ciclo de acendimento se repete.

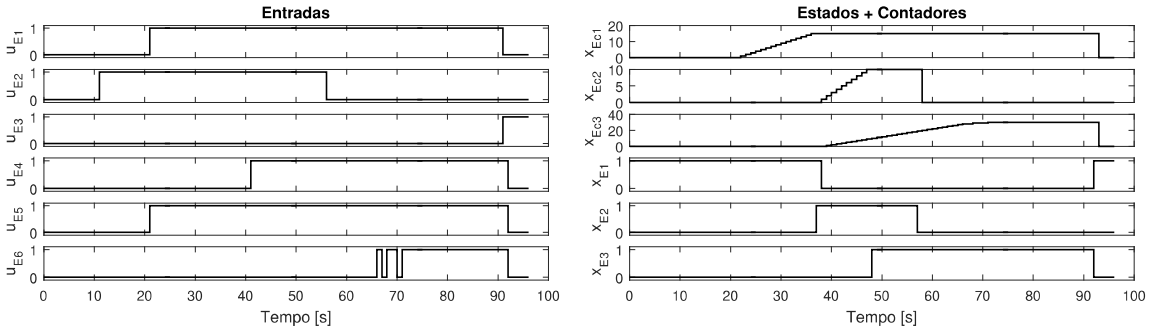


Figura 49 – Simulação do Estabilizador: operação normal

Fonte: Autor

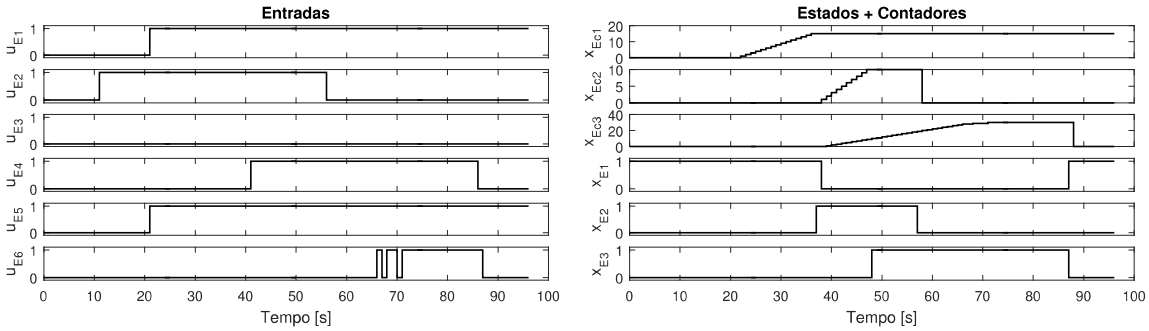


Figura 50 – Simulação do Estabilizador: falha de chama

Fonte: Autor

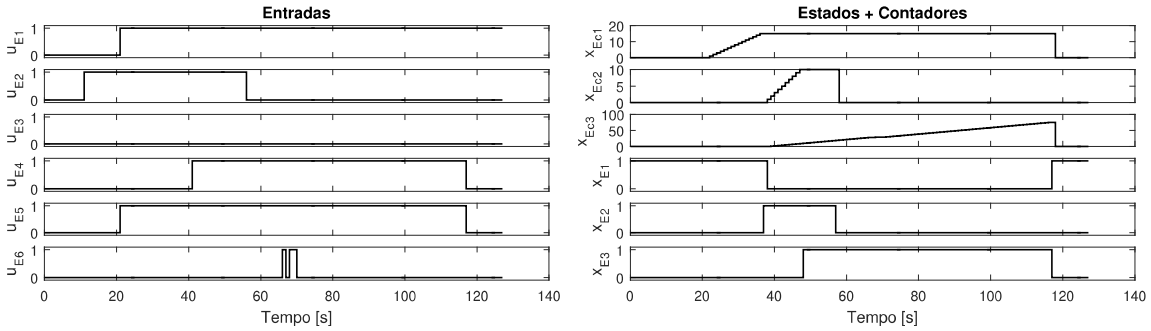


Figura 51 – Simulação do Estabilizador: falha de abertura total da válvula

Fonte: Autor

B.3.3 Simulação do queimador

O queimador tem funcionamento semelhante às simulações anteriores, porém com algumas particularidades quanto ao comportamento do ignitor e dinâmicas lineares. Seguindo as mesmas premissas dadas pela NFPA e representação heurística dos dados observados, simula-se o acendimento e falha do queimador na **Figura 52**.No instante $t = 7s$, o queimador está no estado **apagado** (x_{Q1}). Logo depois que as primeiras verificações de segurança são atendidas, o sistema BMS dá o sinal de permissão de acendimento u_{Q2}. Após a permissão, o comando de partida, u_{Q1}, é enviado. O sistema então passa para o estado **em acendimento ignitor/estabilizador** (x_{Q2}) e o contador de tempo máximo de acendimento total do queimador inicia x_{Q3} . Na prática, este comando de partida é duplicado ao ignitor e estabilizador, que iniciam os procedimentos de partida, de acordo com a **Figura 46** e **Figura 47**. No instante que a chama do ignitor é detectada, o estado contínuo x_{QC1} inicia a contagem para estabilização do ignitor. Em seguida a chama do estabilizador é detectada em $t = 42s$ o que leva sistema para o estado de **abertura de válvula** (x_{Q3}). Neste instante o contador x_{Q2} inicia a contagem para abertura completa da válvula de bloqueio do queimador. Com a válvula aberta em $t = 67$, o sistema passa para o estado aceso mesmo com a válvula oscilando em sua abertura total. A falha momentânea de abertura total não envia o sistema para estado apagado pois o contador X_{Q2}, não atinge 75s antes da válvula estabilizar.

Não é necessário que a chama do ignitor esteja acesa enquanto o queimador estiver aceso, logo, este é apagado em $t = 68s$. Em $t = 154s$ a ocorre uma falha de apagamento na chama do queimador, executando um *reset* em todo o sistema, levando-o para estado **apagado**. Como a chama de um queimador apagada gera um evento de parada segura, é necessário fazer a purga da fornalha e realizar a verificação de segurança. Após os procedimentos de segurança, a permissão de partida é enviada em $t = 172s$, e o ciclo de acendimento se repete normalmente sem falhas.

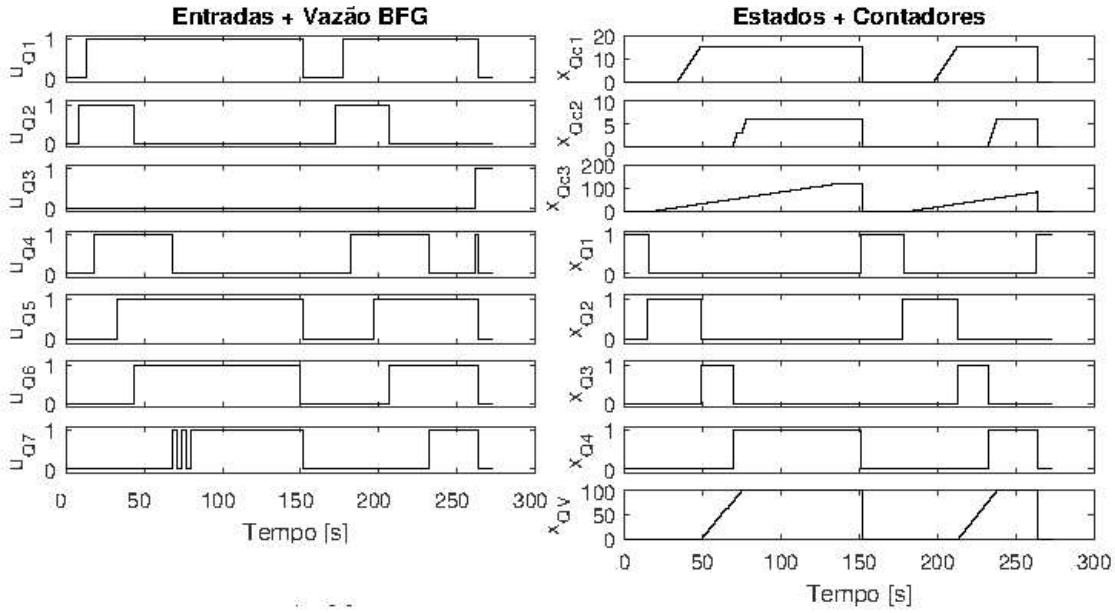


Figura 52 – Simulação do Queimador com falha em $t = 154s$

Fonte: Autor

Referências

ABRIAL, J.-R. Steam-boiler control specification problem. *Form. Methods Ind. Appl.*, v. 1165, p. 500–509, 1996. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/w407qj35404v2642/>. Citado na página 56.

ALUR, R. et al. Hybrid automata: An algorithmic approach to the specification and verification of hybrid systems. *Hybrid Syst. Lect. Notes Comput. Sci.*, v. 736, p. 209–229, 1993. Citado na página 34.

ANDERSON, B. D. O. et al. Optimal Filtering. Information and system science series. p. 9–35, 1979. Citado na página 49.

ASSOCIATION, N. F. P. *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code*. [S.l.]: National Fire Protection Association, 2007. 586 p. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 60.

AZIZ, A.; NAZARUDDIN, Y. Structured Mathematical Modeling of Industrial Boiler. *J. Eng. ...*, v. 46, n. 1, p. 102–122, 2014. ISSN 23375779. Disponível em: <http://journals.itb.ac.id/index.php/jets/article/view/713>. Citado na página 56.

BAKO, L.; CHEN, D.; LECOEUCHE, S. A numerical solution to the minimum-time control problem for linear discrete-time systems. *arXiv*, n. 1, p. 1–16, 2011. Citado na página 44.

BARTON, P. I.; PANTELIDES, C. C. Modeling of combined discrete/continuous processes. *AIChE J.*, 1994. ISSN 15475905. Citado na página 34.

BEMPORAD, A.; FERRARI-TRECATE, G.; MORARI, M. Observability and Controllability of Piecewise Affine and Hybrid Systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, v. 45, n. 10, 2000. Citado na página 41.

BEMPORAD, A.; MIGNONE, D. A Matlab function for solving Mixed Integer Quadratic Programs User Guide. p. 1–7, 2001. Citado na página 46.

BEMPORAD, A.; MORARI, M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, v. 35, n. 3, p. 407–427, 1999. ISSN 00051098. Citado 4 vezes nas páginas 34, 41, 44 e 46.

BORRELLI, F.; BEMPORAD, A.; MORARI, M. Predictive Control for linear and hybrid systems. 2011. Citado 3 vezes nas páginas 34, 37 e 44.

CAETANO, A. d. O. *Controle preditivo de sistemas híbridos_dissertação*. Tese (Doutorado), 2011. Citado 3 vezes nas páginas 46, 48 e 147.

CAVALIER, T. M.; PARDALOS, P. M.; SOYSTER, A. L. Modeling and integer programming techniques applied to propositional calculus. *Comput. Oper. Res.*, v. 17, n. 6, p. 561–570, 1990. ISSN 03050548. Citado na página 38.

CHRISTIANSEN, D.; ALEXANDER, C. *Standard Handbook of Electronic Engineering*. [S.l.]: IEEE Press/ Mc- Graw Hill, 1997. Citado na página 38.

COELHO, P. M.; PINHO, C. Considerations about equations for steady state flow in natural gas pipelines. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.*, v. 29, n. 3, p. 262–273, 2007. ISSN 1678-5878. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci{_}arttext{&}pid=S1678-58782007000300005{&}lng=en{&}nrm>. Citado na página 67.

DAY, A.; RATCLIFFE, M.; SHEPHERD, K. *Heating systems, plant and control*. [s.n.], 2008. ISBN 0632059370. Disponível em: <http://books.google.com/books?hl=en{&}lr={&}id=CmhMYo8cLn4C{&}oi=fnd{&}pg=PR5{&}dq=Heating+Systems+Plant+and+Control{&}ots=cOcxw6oEwU{&}sig=CzMql5>. Citado na página 58.

DONGFENG, W.; YINGBAO, L. Boiler combustion condition monitoring and optimization system based on LabVIEW. *ICEMI 2017 - Proc. IEEE 13th Int. Conf. Electron. Meas. Instruments*, v. 2018-Janua, p. 217–223, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 55.

DRGOňA, B. J. *Efficient Modeling of Hybrid Systems*. Tese (Doutorado), 2012. Citado na página 34.

FERRARI-TRECATE, G. et al. Modeling and control of co-generation power plants: A hybrid system approach. In: *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*. [S.l.: s.n.], 2002. ISBN 354043321X. ISSN 16113349. Citado na página 43.

GARCIA, C. *Modelagem e simulac\ ˜ao de processos industriais e Sistemas Eletromec\ ˆanicos*. [S.l.]: edUSP, 1997. 466 p. ISBN 8531404029. Citado na página 65.

GIL, A. V. et al. THE MODELING OF FURNACE NUMERICAL BURNING NON-STANDARD. v. 01031, p. 1–4, 2016. Citado na página 55.

HEEMELS, W.; SCHUTTER, B. D.; BEMPORAD, A. Equivalence of hybrid dynamical models. *Automatica*, v. 37, p. 1085–1091, 2001. ISSN 00051098. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 41.

HEEMELS, W. P. M. H.; SCHUMACHER, J. M.; WEILAND, S. Linear Complementarity Systems. *SIAM J. Appl. Math.*, v. 60, n. 4, p. 1234–1269, 2000. ISSN 0036-1399. Citado na página 34.

HESELTON, K. E. *Boiler Operator's Handbook*. [S.l.]: Fairmont Press, 2005. v. 0. 415 p. ISBN 0-88173-434-9. Citado na página 56.

HEYMANN, M.; LIN, F.; MEYER, G. Control Synthesis for a Class of Hybrid Systems Subject to Configuration-Based Safety Constraints Control Synthesis for a Class of Hybrid Systems Subject to Configuration-Based Safety Constraints CONTROL SYNTHESIS FOR A CLASS OF HYBRID SYSTEMS SUBJECT TO . 1997. Citado na página 30.

HOVD, M. A brief introduction to Model Predictive Control. *Eng. Cybern.*, n. March, 2004. Citado na página 46.

IBM Corp. *ILOG CPLEX 7.0 Optimization User's Manual*. 2000. Citado na página 46.

Kanto Filho, D. et al. *ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SEGMENTOS INDUSTRIAIS SELECIONADOS*. [S.l.], 2017. 187 p. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

KERMES, V. et al. Testing of gas and liquid fuel burners for power and process industries. *Energy*, v. 33, n. 10, p. 1551–1561, 2008. ISSN 03605442. Citado na página 55.

KESHAVARZ, M. et al. Mixed logic Dynamical Modeling and Control of Steam boiler. 2007. Citado na página 30.

KITTO, J. B.; STULTZ, S. C. *Steam: its generation and use*. [S.l.]: The Babcock & Wilcox Company, 2005. ISBN 0963457012. Citado 4 vezes nas páginas 52, 56, 57 e 58.

KOUPRIANOV, V. I. Modeling of thermal characteristics for a furnace of a 500 MW boiler fired with high-ash coal. *Energy*, v. 26, n. 9, p. 839–853, 2001. ISSN 03605442. Citado na página 55.

LEITE, N. R.; MILITÃO, R. A. Tipos e aplicações de caldeiras. *Esc. Politécnica - Dep. Eng. Mecânica*, p. 112, 2008. Disponível em: <http://joinville.ifsc.edu.br/{~}evandro.dario/M{á}quinasT{é}rmicasedeFluxo/Integrado/Materiais/Caldeiras/caldeir>. Citado na página 54.

Liu Changliang et al. Nonlinear boiler model of 300 MW power unit for system dynamic performance studies. *ISIE 2001. 2001 IEEE Int. Symp. Ind. Electron. Proc. (Cat. No.01TH8570)*, v. 2, p. 1296–1300, 2001. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/931667/>. Citado na página 56.

LORA, E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. D. *GERACAO TERMELETRICA: PLANEJAMENTO, PROJETO E OPERACAO*. Rio de Janeiro: Interci\^encia, 2004. ISBN 8571931054. Citado 5 vezes nas páginas 13, 52, 53, 54 e 55.

LUNZE, J.; LAMNABHI-LAGARRIGUE, F. *Handbook of Hybrid Systems Control: Theory, Tools, Applications*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2009. 583 p. ISBN 9780521765053. Citado na página 34.

MACHADO, M. L. P.; SOBRINHO, V. P. F. M.; ARRIVABENE, L. F. Siderurgia Para Não Siderurgistas. p. 129, 2003. Citado na página 25.

MICHALSKA, H.; MAYNE, D. Moving Horizon Observers. *IFAC Proc. Vol.*, Elsevier, v. 25, n. 13, p. 185–190, 1992. ISSN 14746670. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)52279-X>. Citado na página 44.

MIGNONE, D. *Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization*. 294 p. Tese (Doutorado), 2002. Citado 5 vezes nas páginas 33, 38, 39, 43 e 46.

MIGNONE, D. Control and Estimation of Hybrid Systems with Mathematical Optimization. n. 14520, p. 1–320, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 44.

MIGNONE, D. *The REALLY BIG Collection of Logic Propositions and Linear Inequalities*. [S.l.], 2002. Citado na página 38.

MIGNONE, D.; BEMPORAD, a.; MORARI, M. A framework for control, fault detection, state estimation, and\nverification of hybrid systems. *Proc. 1999 Am. Control Conf. (Cat. No. 99CH36251)*, v. 1, n. June, p. 134–138, 1999. ISSN 0743-1619. Citado na página 41.

NEWMAN, A. M.; WEISS, M. A Survey of Linear and Mixed-Integer Optimization Tutorials. *INFORMS Trans. Educ.*, v. 14, n. 1, p. 26–38, 2013. ISSN 1532-0545. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 46.

NISE, N. *CONTROL SYSTEMS ENGINEERING*. [S.l.: s.n.], 2011. 1001 p. ISBN 9780470547564. Citado na página 122.

Oliveira Jr., V. B. de. *Otimização e controle preditivo na distribuição de combustíveis siderúrgicos*. 222 p. Tese (Doutorado), 2016. Citado 13 vezes nas páginas 27, 28, 29, 30, 56, 73, 80, 83, 84, 95, 96, 122 e 134.

OZORIO, L. d. M. Opções Reais na Siderurgia : O caso Brasileiro Tese de Doutorado Luiz de Magalhães Ozorio Opções Reais na Siderurgia : O caso Brasileiro. 2010. Citado na página 25.

PANNOCCHIA, G.; BEMPORAD, A. Combined design of disturbance model and observer for offset-free model predictive control. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, v. 52, n. 6, p. 1048–1053, 2007. ISSN 00189286. Citado na página 102.

PANNOCCHIA, G.; RAWLINGS, J. B. Disturbance models for offset-free model-predictive control. *AIChE J.*, v. 49, n. 2, p. 426–437, 2003. ISSN 00011541. Citado 3 vezes nas páginas 49, 50 e 102.

PENA, J. G. C.; SALLES, J. L. F.; Oliveira Jr, V. B. D. *Setembro de 2013 Natal/RN*. [S.l.]. Citado na página 25.

PRESS, P.; BRITAIN, G.; HONK, H. Pole Assignment in Linear Time-Invariant Multivariable Systems with Constant Disturbances * Assignation des p61es dans les syst ˜ mes linraires / l variables multiples ,. v. 7, n. 3, 1971. Citado na página 50.

RAWLINGS, J.; MEADOWS, E.; MUSKE, K. Nonlinear Model Predictive Control: A Tutorial and Survey. *IFAC Proc. Vol.*, Elsevier, v. 27, n. 2, p. 185–197, 1994. ISSN 14746670. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/S1474-6670(17)48151-1>. Citado na página 49.

Rusinowski, H. and Szapajko, G. and Stanek, W. Hybrid Model of the conventional Power UNIT. *Mech. / AGH Univ. Sci. Technol.*, v. 27, n. 3, p. 120–130, 2008. Citado na página 31.

SARAILOO, M.; RAHMANI, Z.; REZAIE, B. Modeling of three-tank system with nonlinear valves based on hybrid system approach. v. 3, n. January, p. 20–23, 2012. Citado na página 31.

SCHUTTER, B. D.; BOOM, T. V. D. Model predictive control for discrete-event and hybrid systems. *... 42nd IEEE Conf. ...*, v. 19, 2003. Disponível em: <http://www.dcsc.tudelft.nl/{~}bdeschutter/pub/rep/03{_}01>. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 45.

SCHUTTER, B. D.; MOOR, B. D. Technical report 98-40 The extended linear complementarity problem and the modeling and analysis of hybrid systems. v. 09, p. 70–85, 1999. Citado na página 34.

SCHUTTER, B. de; BOOM, T. van den. Model predictive control for max-plus-linear discrete event systems. *Control Eng. Pract.*, v. 14, n. 10, p. 1199–1211, 2006. Citado na página 34.

SILVA, B. I. et al. An assessment of the current status of algorithmic approaches to the

verification of hybrid systems. *Proc. IEEE Conf. Decis. Control*, v. 3, n. December, p. 2867–2874, 2001. ISSN 01912216. Citado na página 34.

SLUPPHAUG, O.; FOSS, B. A. Model predictive control for a class of hybrid systems. *Eur. Control Conf.*, p. 3095–3100, 1997. Citado na página 44.

SLUPPHAUG, O.; J.VADA; FOSS, B. A. MPC in Systems with Continuous and Discrete Control Inputs. *Proc. Am. Control Conf.*, p. 2–6, 1997. Citado na página 44.

SMITH, C. COMPLETE AUTOMATION BURNER MANAGEMENT & TEAM PRESENTED BY. n. September, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 61 e 62.

SOLBERG, B. et al. *Hybrid model predictive control applied to switching control of burner load for a compact marine boi*. IFAC, 2008. v. 17. 10626–10633 p. ISSN 14746670. ISBN 9783902661005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3182/20080706-5-KR-1001.01801>. Citado na página 30.

SONTAG, E. D. Nonlinear regulator: the piecewise linear approach. n. 2, p. 346–358, 1981. Citado na página 34.

SUI, D.; FENG, L.; HOVD, M. Robust explicit moving horizon control and estimation: A batch polymerization case study. *Model. Identif. Control*, v. 30, n. 1, p. 17–27, 2009. ISSN 03327353. Citado na página 102.

TALU, M. F.; ONAT, C.; DASKIN, M. Prediction of Excess Air Factor in Automatic Feed Coal Burners by Processing of Flame Images. *Chinese J. Mech. Eng. (English Ed.*, Chinese Mechanical Engineering Society, v. 30, n. 3, p. 722–731, 2017. ISSN 21928258. Citado na página 55.

TATJEWSKI, P. Disturbance modeling and state estimation for offset-free predictive control with state-space process models. *Int. J. Appl. Math. Comput. Sci.*, v. 24, n. 2, p. 313–323, 2014. ISSN 1641876X. Citado na página 49.

TAWFEIC, S. R. Boiler Drum-Level Modeling. *Dep. Mech. Energy, Minia Univ.*, v. 41, n. 5, p. 1812–1829, 2013. Disponível em: <www.aun.edu.eg>. Citado na página 56.

TORRISI, F. D.; BEMPORAD, A. HYSDEL - A tool for generating computational hybrid models for analysis and synthesis problems. *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 2004. ISSN 10636536. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

TORRISI, F. D. et al. *HYSDEL 2.0.5 – User Manual*. 2002. Citado na página 28.

UEHARA, D. Deteccao e quantificacao de atrito em valvulas de controle. 2009. Citado na página 119.

Vega Lara, B. G. et al. Offset-free model predictive control for an energy efficient tropical island hotel. *Energy Build.*, Elsevier B.V., v. 119, p. 283–292, 2016. ISSN 03787788. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.040>. Citado na página 50.

VIANA, F. L. E. *INDÚSTRIA SIDERÚRGICA : INVESTIR EM EFICIÊNCIA*. [S.l.], 2018. 1–14 p. Citado na página 26.

VILLA, J. L. et al. Model predictive control of MLD models with integrators. *2005 Ieee Int. Conf. Control Appl. (Cca), Vols 1and 2*, IEEE, v. 2, p. 641–644, 2005. Citado na página 46.

VONDÁL, J.; HÁJEK, J. Wall heat transfer in gas-fired furnaces: Effect of radiation modelling. *Appl. Comput. Mech.*, v. 9, p. 67–78, 2015. Citado na página 55.

WANG, L. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB®*. London: Springer London, 2009. 43–84 p. (Advances in Industrial Control, 9781848823303). ISSN 1430-9491. ISBN 978-1-84882-330-3. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-331-0{_}2http://link.springer.com/10.1007/978-1-84882-33>. Citado na página 46.

WANG, Z. et al. An offset-free robust model predictive control with incremental model and improved current observer for induction motor. *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, n. May, p. 1–18, 2019. ISSN 2050-7038. Citado na página 50.

WESTPHAL, L. C. *HANDBOOK OF CONTROL SYSTEMS ENGINEERING*. 2. ed. [S.l.]: Springer, 2001. 1063 p. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 111.

WILLIAMS, H. P. *Model building in mathematical programming*. [s.n.], 2013. 411 p. ISSN 0160-5682. ISBN 978-1-118-44333-0. Disponível em: <http://eprints.lse.ac.uk/12737/>. Citado na página 38.

YU, G.; OGAI, H.; DENG, H. Offset-free model predictive control of diesel engine by combined design of disturbance model and observer. *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, v. 14, n. 1, p. 116–129, 2019. ISSN 19314981. Citado na página 50.

ZHAO, W. et al. Fuzzy optimization control for NOx emissions from power plant boilers based on nonlinear optimization. *J. Intell. Fuzzy Syst.*, v. 29, p. 2475–2481, 2015. Citado na página 55.

Apêndices

APÊNDICE A – Matrizes do Controle Preditivo genérico baseado no modelo MLD

Este anexo revisita os procedimentos e passos descritos do trabalho de Caetano (2011), para aquisição das matrizes que transformam o MLD em uma problema de otimização misto-inteiro quadrático (MIQP), seguindo o formato padrão encontrado em ferramentas de otimização, como descrito a seguir:

$$\min_X \frac{1}{2} X'QX + fX + r \tag{A.1}$$

$$sujeito\ \text{à} \begin{cases} \Psi X = \Omega & \text{(A.2)} \\ \Phi X \leq \lambda & \text{(A.3)} \end{cases}$$

Nas seções a seguir defini-se os procedimentos para cálculo de cada parâmetro das equações A.1 e A.3.

A.1 Cálculo e determinação dos parâmetros da função custo

Primeiramente, define-se o método para cálculo das matrizes, Q e f, da função custo definida na eq. A.1.

Na formulação de um MPC genérico, para modelos MLD, define-se que todas as variáveis disponíveis no modelo (X) serão utilizadas como variáveis de decisão do problema, ou seja variáveis controláveis. Desta forma, quando o usuário utilizar os *scripts* construídos neste trabalho poderá escolher qualquer umas das variáveis que considere importantes para o controle preditivo. O restante das variáveis, em que não se deseja monitorar seus percursos, associa-se peso nulo as mesmas. Considerando que $u(k'|k)_0^{N-1}$ representa o vetor $\{u(k|k)^T, u(k+1|k)^T, ...u(k+N-1|k)^T\}$ e tendo em mente que $u(k|k)$ é um vetor coluna, tem-se que:

$$X = \left[u(k'|k)_0^{N-1}, \delta(k'|k)_0^{N-1}, z(k'|k)_0^{N-1}, x(k'|k)_0^{N-1}, y(k'|k)_0^{N-1}\right]^T, \tag{A.4}$$

dado que X é um vetor coluna.

Para X, tem-se a função de custo generalizada para o problema de Programação Quadrática Inteira Mista, utilizando as variáveis de um modelo MLD:

$$min \sum_{h=k}^{k+N-1} \|u(h|k) - u_e\|^2_{Q_1} + \|\delta(h|k) - \delta_e\|^2_{Q_2} + \|z(h|k) - z_e\|^2_{Q_3} + \|x(h|k) - x_e\|^2_{Q_4} + \|y(h|k) - y_e\|^2_{Q_5} \quad \text{(A.5)}$$

$$sujeito\text{à} \begin{cases} x(N|k) = x_e, & \text{(A.6)} \\ x(k+1|k) = Ax(k|k) + B_1u(k) + B_2\delta(k|k) + B_3z(k|k), & \text{(A.7)} \\ y(k|k) = Cx(k|k) + D_1u(k) + D_2\delta(k|k) + D_3z(k|k), & \text{(A.8)} \\ E_2\delta(k|k) + E_3z(k|k) \leq E_1u(k) + E_4x(k|k) + E_5 & \text{(A.9)} \end{cases}$$

Pela definição da norma quadrática defini-se a relação para um dos vetores de X:

$$\begin{aligned} \sum_{h=k}^{k+N-1} \|u(h|k) - u_e\|^2_{Q_1} &= \sum_{0}^{N-1} (u(h|k) - u_e)^T Q_1 (u(h|k) - u_e) \\ &= \sum_{0}^{N-1} (u(h|k)^T - u_e^T) Q_1 (u(h|k) - u_e) \\ &= \sum_{0}^{N-1} [u(h|k)^T Q_1 u(h|k) - u(h|k)^T Q_1 u_e - u_e^T Q_1 u(h|k) + u_e^T Q_1 u_e] \end{aligned} \quad \text{(A.10)}$$

Como a eq. A.10 é um termo escalar, aplicando a propriedade de matrizes:

$$u(h|k)^T Q_1 u_e = u_e^T Q_1 u(h|k),$$

logo,

$$\sum_{0}^{N-1} \|u(h|k) - u_e\|^2_{Q_1} = \sum_{0}^{N-1} [u(h|k)^T Q_1 u(h|k) - 2u_e^T Q_1 u(h|k) + u_e^T Q_1 u_e] \quad \text{(A.11)}$$

Neste trabalho, considera-se que a referência é constante no horizonte de controle, logo o último fator da eq. A.11 é constante em relação a $u(h|k)$. Desta forma, $u_e^T Q_1 u_e$ pode ser retirado da eq. A.11 pois não altera o cálculo do ponto ótimo da função custo. Suprimindo o indicativo de operação no instante k, por questões visuais, e generalizando a eq. A.11

para N, tem-se que:

$$\sum_{h=k}^{k+N-1} \|u(h) - u_e\|_{Q_1}^2 =$$

$$\begin{bmatrix} u(k)^T & u(k+1)^T & \cdots & u(k+N-1)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix}$$

$$- 2 \begin{bmatrix} u_e^T & u_e^T & \cdots & u_e^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix}, \quad \text{(A.12)}$$

sendo,

$$Q_1^N = \begin{bmatrix} Q_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & Q_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & Q_1 \end{bmatrix},$$

e,

$$u_e^N = [\underbrace{u_e^T u_e^T \cdots u_e^T}_{N \ vezes}]$$

Repetindo este procedimento para os outros vetores que compõem X, gera-se $Q_2^N, Q_3^N, Q_4^N, Q_5^N$. Em seguida, concatenando estes resultados constrói-se a matriz Q:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_1^N & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_2^N & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_3^N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_4^N & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & Q_5^N \end{bmatrix} \quad \text{(A.13)}$$

A matriz Q é gerada automaticamente pela função Q_{matrix} utilizada nos algorítimos de simulação da fornalha. Com base na forma da eq. A.12 e generalizando para todos as variáveis de X, tem-se que:

$$X_e = \begin{bmatrix} u_e^N & \delta_e^N & z_e^N & x_e^N & y_e^N \end{bmatrix}^T.$$

Sendo assim, calcula-se f:

$$f = -2X_e^T Q$$

A.2 Restrições de Igualdade

A equações de igualdade descrito pela eq. A.2 é composta pelas igualdades das equações A.7 e A.8. Entretanto, para que seja possível representá-las no formato da eq.

A.2, deve-se manipular as previsões dos estados $x(k+1|k)$ e das saídas $y(k|k)$ de modo que os estados futuros estejam somente em função da sequência das variáveis de decisão e do estado inicial do MLD. Para demonstrar o cálculo recursivo utilizado no calculo das previsões de k até $k+N-1$, e ainda omitindo o índice $|k$ para simplificação visual:

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1u(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k) \tag{A.14}$$

$$x(k+2) = Ax(k+1) + B_1u(k+1) + B_2\delta(k+1) + B_3z(k+1) \tag{A.15}$$

$$x(k+3) = Ax(k+2) + B_1u(k+2) + B_2\delta(k+2) + B_3z(k+2) \tag{A.16}$$

Logo, substituindo a eq. A.14 na eq. A.15:

$$x(k+2) = A\Big[Ax(k) + B_1u(k) + B_2\delta(k) + B_3z(k)\Big] + B_1u(k+1) + B_2\delta(k+1) + B_3z(k+1), \tag{A.17}$$

e, substituindo a eq. A.17 na eq. A.16

$$x(k+3) = A\Big[A\Big[Ax(k)+B_1u(k)+B_2\delta(k)+B_3z(k)\Big]+B_1u(k+1)+B_2\delta(k+1)+B_3z(k+1)\Big] + B_1u(k+2) + B_2\delta(k+2) + B_3z(k+2). \tag{A.18}$$

Extrapolando as operações anteriores até $k+N-1$ e formatando as equações A.14, A.17 e A.18 em arranjo matricial tem-se que:

$$\begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \\ x(k+3) \\ \vdots \\ u(k+N) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^N \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB_1 & B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ A^2B_1 & AB_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B_1 & A^{N-2}B_1 & A^{N-3}B_1 & \cdots & B_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB_2 & B_2 & 0 & \cdots & 0 \\ A^2B_2 & AB_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B_2 & A^{N-2}B_2 & A^{N-3}B_2 & \cdots & B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(k) \\ \delta(k+1) \\ \delta(k+2) \\ \vdots \\ \delta(k+N-1) \end{bmatrix}$$
$$\begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ AB_3 & B_3 & 0 & \cdots & 0 \\ A^2B_3 & AB_3 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B_3 & A^{N-2}B_3 & A^{N-3}B_3 & \cdots & B_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(k) \\ z(k+1) \\ z(k+2) \\ \vdots \\ z(k+N-1) \end{bmatrix} \tag{A.19}$$

Retornando a definição da eq. 2.25, em que $\Psi = [\alpha, \psi]^T$ e $\Omega = [A_0, C_0]^T x(k)$, para a primeira igualdade, descrita na eq. A.19, tem-se:

$$\alpha X = A_0 x(k),$$

onde,

$$A_0 = \begin{bmatrix} A^1 \\ A^2 \\ A^3 \\ \vdots \\ A^{N-1} \end{bmatrix}; \qquad \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 & \alpha_5 \end{bmatrix}, \tag{A.20}$$

e,

$$\alpha_1 = \begin{bmatrix} -B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -AB_1 & -B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ -A^2B_1 & -AB_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A^{N-1}B_1 & -A^{N-2}B_1 & -A^{N-3}B_1 & \cdots & -B_1 \end{bmatrix} \tag{A.21}$$

$$\alpha_2 = \begin{bmatrix} -B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -AB_2 & B_2 & 0 & \cdots & 0 \\ -A^2B_2 & -AB_2 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A^{N-1}B_2 & -A^{N-2}B_2 & -A^{N-3}B_2 & \cdots & B_2 \end{bmatrix} \tag{A.22}$$

$$\alpha_3 = \begin{bmatrix} -B_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -AB_3 & B_3 & 0 & \cdots & 0 \\ -A^2B_3 & -AB_3 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -A^{N-1}B_3 & -A^{N-2}B_3 & -A^{N-3}B_3 & \cdots & B_3 \end{bmatrix} \tag{A.23}$$

$$\alpha_4 = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix}; \quad \alpha_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{A.24}$$

Executando o mesmo procedimento da igualdade na eq. A.7 eq. A.8, obtém-se eq. matricial para previsão das saídas $y(k|k)$ até $y(k+N-1|k)$, dado pela eq. A.25:

$$\phi X = C_0 x(k), \tag{A.25}$$

dado que,

$$C_0 = \begin{bmatrix} C \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}; \qquad \psi = \begin{bmatrix} \psi_1 & \psi_2 & \psi_3 & \psi_4 & \psi_5 \end{bmatrix}, \tag{A.26}$$

sendo que,

$$\psi_1 = \begin{bmatrix} -D_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -D_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -D_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -D_1 \end{bmatrix} \tag{A.27}$$

$$\psi_2 = \begin{bmatrix} -D_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -D_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -D_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -D_2 \end{bmatrix} \tag{A.28}$$

$$\psi_3 = \begin{bmatrix} -D_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -D_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -D_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -D_3 \end{bmatrix} \tag{A.29}$$

$$\psi_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -C & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -C & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -C & 0 \end{bmatrix}; \quad \psi_5 = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & I \end{bmatrix} \tag{A.30}$$

A.3 Inequações

As inequações que compõem o MLD são da forma:

$$E_2\delta(h|k) + E_3 z(h|k) \leq E_1 u(h|k) + E_4 x(h|k) + E_5 \tag{A.31}$$

sendo que $h = k, k+1..., k+N-1$.

Executando novamente um exemplo de progressão da previsão, como feito da eq. A.14 à A.18, porém agora aplicado as inequações, tem-se que para $N = 3$ e omitindo o índice $|k$:

$$E_2\delta(k) + E_3 z(k) \leq E_1 u(k) + E_4 x(k) + E_5 \tag{A.32a}$$

$$E_2\delta(k+1) + E_3 z(k+1) \leq E_1 u(k+1) + E_4 x(k+1) + E_5 \tag{A.32b}$$

$$E_2\delta(k+2) + E_3 z(k+2) \leq E_1 u(k+2) + E_4 x(k+2) + E_5 \tag{A.32c}$$

Extrapolando as operações anteriores até $k+N-1$ e formatando as equações A.32 em arranjo matricial tem-se que:

$$\begin{bmatrix} E_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & E_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta(k) \\ \delta(k+1) \\ \delta(k+2) \\ \vdots \\ \delta(k+N-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z(k) \\ z(k+1) \\ z(k+2) \\ \vdots \\ z(k+N-1) \end{bmatrix} -$$
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ E_4 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & E_4 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_4 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k+1) \\ x(k+2) \\ x(k+3) \\ \vdots \\ u(k+N) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} E_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & E_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ u(k+2) \\ \vdots \\ u(k+N-1) \end{bmatrix} +$$
$$\begin{bmatrix} E_5 + E_4 x(k) \\ E_5 \\ E_5 \\ \vdots \\ E_5 \end{bmatrix} \tag{A.33}$$

Retornando a eq. 2.26 tem-se que:

$$\begin{aligned} \lambda &= \hat{\mathrm{E}}_5 + \hat{\mathrm{E}}_4 x(k), \\ \Phi &= \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 & \phi_5 \end{bmatrix}, \end{aligned} \tag{A.34}$$

logo, a partir da inequação A.33,

$$\phi_1 = \begin{bmatrix} -E_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -E_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & -E_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -E_1 \end{bmatrix} \tag{A.35}$$

$$\phi_2 = \begin{bmatrix} E_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & E_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_2 \end{bmatrix} \tag{A.36}$$

$$\phi_3 = \begin{bmatrix} E_3 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & E_3 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & E_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & E_3 \end{bmatrix} \tag{A.37}$$

$$\phi_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -E_4 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -E_4 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & -E_4 & 0 \end{bmatrix} \tag{A.38}$$

$$\phi_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \tag{A.39}$$

$$\hat{\mathrm{E}}_5 = \begin{bmatrix} E_5 \\ E_5 \\ E_5 \\ \vdots \\ E_5 \end{bmatrix}; \quad \hat{\mathrm{E}}_4 = \begin{bmatrix} E_4 \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \tag{A.40}$$

A.4 *Scripts* geradores das matrizes para o HMPC

Todas as matrizes descritas neste apêndice são calculadas automaticamente pelas funções *MRH_ineq3*,*MRH_ineq34* e *Q_matrix*, referentes ao calculo das matrizes das inequações, equações de igualdade e matriz de pesos, respectivamente. As funções possuem os seguintes cabeçalhos:

$$[\phi, \hat{\mathrm{E}}_5, \hat{\mathrm{E}}_4] = MRH_ineq3(E_1, E_2, E_3, E_4, E_5, C, N)$$

$$[\alpha, A_0, \psi, C_0] = MRH_eq4(A, B_1, B_2, B_3, C, D_1, D_2, D_3, N)$$

$$[Q] = Q_matrix(Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, Q_5, N)$$

APÊNDICE B – CÓDIGOS

B.1 Glossário de códigos

Os códigos e arquivos que compõem o resultado do trabalho são composto das seguintes subclassificações:

GL.1 *Scripts* de inicialização da simulação;

GL.2 Arquivos para armazenamento de parâmetros constantes;

GL.3 Funções para cálculo de parâmetros dinâmicos;

GL.4 Funções para execução de etapas do simulador;

GL.5 *Script* principal do Simulador;

	Código	Descrição	Classificação	Dependências
1	mldFull2simple_Otim_N_simples.m	Inicializa os parâmetros do otimizador de número de queimadores requeridos.	**GL.1**	6,8,9, 10
2	mldFull2simple_DU_DN_V2.m	Inicializa os parâmetros do HMPC, que regula a válvula de vazão de gás BFG.	**GL.1**	4,8,9, 10
3	mld_V2_6_q_max_DU_DN_full.mat	Matrizes do modelo MLD da eq.3.60 que descreve o sistema completo da fornalha.	**GL.2**	-
4	mld_V2_6_q_max_DU_DN_control_valv.mat	Matrizes do modelo MLD que descreve o sistema parcial da fornalha. Excluindo da eq.3.60 a parte lógica de acionamento dos queimadores (FSM - vide **Figura 26**).	**GL.2**	-
5	SAS+L.mat	Matrizes que definem o Filtro de Kalman da seção 4.4 e as matrizes de covariância da seção 4.7.	**GL.2**	-
6	Notimo_simples.mat	Matrizes do modelo MLD da eq.4.3 que descreve o modelo a ser otimizado para cálculo do número de queimadores.	**GL.2**	-
7	Constantes_26-03.mat	Parâmetros, restrições e tabelas definidas na seção 3.1	**GL.2**	-
8	Q_matrix	Função que constrói a matriz de peso generalizada, a partir das matrizes de peso de cada tipo de variável do MLD	**GL.3**	-
9	MRH_ineq3	Constrói, a partir das matrizes de inequação do MLD, os parâmetros de 2.26	**GL.3**	-
10	MRH_eq4	Constrói, a partir das matrizes das equações de igualdade do MLD, os parâmetros de 2.25	**GL.3**	-
11	calc_Rtub	Calcula a resistência fluídica da válvula a partir das equações não lineares	**GL.3**	-
12	Simula_nao_linear_FSM_kalman_ruido	Simula para 1 tempo de amostragem o sistema não linear, com introdução de ruído branco de medição e estimativa dos estados via Filtro de Kalman	**GL.4**	13,7
4	Simula_nao_linear_FSM_kalman_agarramento	Simula para 1 tempo de amostragem o sistema não linear, com introdução de agarramento de válvula e estimativa dos estados via Filtro de Kalman	**GL.4**	14,7
14	Simula_nao_linear_FSM	Simula para 1 tempo de amostragem o sistema não linear, sem ruído ou agarramento e com estimativa dos estados via Filtro de Kalman	**GL.4**	5,7
15	S_burner_V2_6_DU_DN_full.m	Função gerada pelo HYSDEL que simula em 1 tempo de amostragem o modelo MLD da eq.3.60 referente ao sistema completo da fornalha.	**GL.4**	-
16	Caso1_MIQP_sem_falha.m	Simulação sem distúrbio de medição, sem agarramento ou falha de queimador	**GL.5**	1 à 16
17	Caso2_MIQP_com_disturbio_na_medicao	Simulação com ruído branco na medição de q_{BFG}	**GL.5**	1 à 16
18	Caso3_MIQP_com_disturbio_agarramento	Simulação com agarramento de $\pm 10\%$ na válvula de controle de gás	**GL.5**	1 à 16
19	Caso4_MIQP_com_falha_kalman.m	Simulação com apagamento inesperado da chama de queimadores	**GL.5**	1 à 16
20	Caso5_PID_com_disturbio_na_medicao.m	Simulação de sistema controlado com PI	**GL.5**	1 à 16

Tabela 22 – Glossário de funções e arquivos

B.2 Código HYSDEL fornalha simplificada

```
1   /* Modelagem de sistema hibrido parcial:
2    Sistema de queimadores de caldeira industrial
3    rev. 0: 03 de abril de 2016
4    rev. 1: 15 de maio de 2016 - configuracao de paramentros da caldeira #1
5    rev. 2: 21 de maio de 2016 - mundanca de metodo de calculo de vazao
6    por Valter B. de Oliveira Junior,
7    Versao 3 : Modificado por Guilherme Lima Barbarioli novembro 2018
8    Universidade Federal do Esp?rito Santo
9     - Substituido o SAS por um mais simples
10    - Limite de Saturacao do volume de combustivel queimador por numero de queimador
     aceso
11    - Adicionado limite para abertura baseado na pressao minima em Ptub
12    - Adicionado limite cumulativo de queiamdores ex: queimador 1, 2 ,3 ligados tem a
     mesma dinamica que queimador 1, 2, 4
13    - Alteracao de K1 K2 e K3 por ajuste feito em Rtub
14    - FSM retirado para utlizar no controle simplificado*/
15
16
17 SYSTEM bfg_system10 {
18
19 INTERFACE {
20   STATE {
21       REAL Q_bfg [0, 300]; /* damcubo/h, vazao de combustivel apos valvula de controle de
       vazao */
22            REAL Q_VB [0, 300]; /* vazao de queimadores */
23              REAL DeltaU;
24              REAL x1 [-1000, 1000]; /* Delta q_bfg */
25              REAL x2 [-1000, 1000]; /* Delta q_VB */
26              REAL Bsys_burner_qty_set_value [0, 8]; /* quantidade requerida de queimadores
       acesos */
27              REAL U [-5, 5]; /* %, variavel manipulada (MV) do controlador pid em modo
      manual */
28              REAL Int_disturb [-50000,50000];
29          }
30   INPUT {
31              REAL DeltaN [-0.0000001,0.0000001];/* para o otimizador do numero de
      queimadores usar [-1,1] */
32        REAL DU [-0.1, 0.1];
33     }
34   OUTPUT {
35       REAL Y_qbfg, Y_qvb,Y_N,Y_U;
36
37     }
38   PARAMETER {
39       REAL Ts=1; /* seg., tempo de amostragem */
40              /* ponto de operacao da valvula */
41              REAL U_op=0.6;
42              /* ponto de operacao do fluxo de gas */
43              REAL q_bfg_OP1=34.45;
44              REAL q_bfg_OP2=44.4902;
45              REAL q_bfg_OP3=61.1643;
46              REAL q_bfg_OP4=90.1690;
47              REAL q_bfg_OP5=125.0618;
48              REAL q_bfg_OP6=142.8404;
49              REAL q_bfg_OP7=149.3783;
50              REAL q_bfg_OP8=170.7582;
51              /* Parametros do sistema */
52              REAL K1_1=-0.002911;
```

```
53              REAL K1_2=-0.005196;
54              REAL K1_3=-0.010461;
55              REAL K1_4=-0.023883;
56              REAL K1_5=-0.053185;
57              REAL K1_6=-0.071953;
58              REAL K1_7=-0.100210;
59              REAL K1_8=-0.115879;
60              REAL K2_1=-0.045563;
61              REAL K2_2=-0.060722;
62              REAL K2_3=-0.080757;
63              REAL K2_4=-0.089645;
64              REAL K2_5=-0.159034;
65              REAL K2_6=-0.167377;
66              REAL K2_7=-0.166642;
67              REAL K2_8=-0.154213;
68              REAL K3_1=67.207717;
69              REAL K3_2=85.803548;
70              REAL K3_3=116.793732;
71              REAL K3_4=176.024588;
72              REAL K3_5=280.151552;
73              REAL K3_6=380.599446;
74              REAL K3_7=579.589443;
75              REAL K3_8=472.136026;
76              REAL Tal2_0 = 29.0; /* seg., constante de tempo para 0 queimadores */
77       REAL Tal2_1 = 27.0; /* seg., constante de tempo para 1 queimador */
78       REAL Tal2_2 = 26.3; /* seg., constante de tempo para 2 queimadores */
79         REAL Tal2_3 = 25.5; /* seg., constante de tempo para 3 queimadores */
80       REAL Tal2_4 = 25.0; /* seg., constante de tempo para 4 queimadores */
81       REAL Tal2_5 = 24.8;  /* seg., constante de tempo para 5 queimadores */
82       REAL Tal2_6 = 24.7;  /* seg., constante de tempo para 6 queimadores */
83       REAL Tal2_7 = 24.6;  /* seg., constante de tempo para 7 queimadores */
84       REAL Tal2_8 = 24.5;  /* seg., constante de tempo para 8 queimadores */
85       REAL Tal1_0 = 4.8; /* seg., constante de tempo para 0 queimadores */
86       REAL Tal1_1 = 4.5; /* seg., constante de tempo para 1 queimador */
87       REAL Tal1_2 = 4.3; /* seg., constante de tempo para 2 queimadores */
88         REAL Tal1_3 = 4.2; /* seg., constante de tempo para 3 queimadores */
89       REAL Tal1_4 = 4.0;  /* seg., constante de tempo para 4 queimadores */
90       REAL Tal1_5 = 3.9;  /* seg., constante de tempo para 5 queimadores */
91       REAL Tal1_6 = 3.8;  /* seg., constante de tempo para 6 queimadores */
92       REAL Tal1_7 = 3.7;  /* seg., constante de tempo para 7 queimadores */
93       REAL Tal1_8 = 3.6;  /* seg., constante de tempo para 8 queimadores */
94       /* Limites inferior da valvula*/
95              REAL U1min=0.430000;
96              REAL U2min=0.320000;
97              REAL U3min=0.210000;
98              REAL U4min=0.180000;
99              REAL U5min=0.020000;
100             REAL U6min=0.060000;
101             REAL U7min=0.130000;
102             REAL U8min=0.170000;
103    }
104  }
105 IMPLEMENTATION {
106    AUX {
107             /* Estado linearizado x1 */
108             REAL x1_DA,x1_DA1,x1_DA2,x1_DA3,x1_DA4,x1_DA5,x1_DA6,x1_DA7;
109             /* Estado linearizado x2 */
110             REAL x2_DA,x2_DA1,x2_DA2,x2_DA3,x2_DA4,x2_DA5,x2_DA6,x2_DA7;
111             /* Pontos de operacao DA*/
```

```
112             REAL Q_bfg_OP_DA1,Q_bfg_OP_DA2,Q_bfg_OP_DA3,Q_bfg_OP_DA4,Q_bfg_OP_DA5,
    Q_bfg_OP_DA6,Q_bfg_OP_DA7,Q_bfg_OP_DA;
113             /**/
114             REAL DeltaU_LINEAR [ -1, 1];
115             /* Estado auxiliar usado para limitar x1 em DA, usado para vazao maxima */
116             REAL x2_DA_constr1,x2_DA_constr2,x2_DA_constr3,x2_DA_constr4,x2_DA_constr5,
    x2_DA_constr6,x2_DA_constr7,x2_DA_constr8;
117             /* Indicador de condicao vazao maxima x2 */
118             BOOL x2_max1,x2_max2,x2_max3,x2_max4,x2_max5,x2_max6,x2_max7,x2_max8;
119             /* Estado auxiliar usado para limitar x1, usado para vazao maxima */
120             REAL x1_DA_constr1,x1_DA_constr2,x1_DA_constr3,x1_DA_constr4,x1_DA_constr5,
    x1_DA_constr6,x1_DA_constr7,x1_DA_constr8;
121             /* Indicador de condicao vazao maxima x1*/
122             BOOL x1_max1,x1_max2,x1_max3,x1_max4,x1_max5,x1_max6,x1_max7,x1_max8;
123             /* Indicador do logico para selecao do numero de queimadores total ligado Ex:
     se queimadores 1 2 5 estao ligados OnlyBnr3=1 e OnlyBnr4,OnlyBnr5...OnlyBnr8=0*/
124             BOOL OnlyBnr1,OnlyBnr2,OnlyBnr3,OnlyBnr4,OnlyBnr5,OnlyBnr6,OnlyBnr7,OnlyBnr8;
125             /* Indicadores logicos da condicao da valvual U estar no limite inferior*/
126             BOOL U1,U2,U3,U4,U5,U6,U7,U8;
127             /* Variaveis auxiliares para asseguar a posicao da valvula acima do limite
    inferior*/
128             REAL U_limit1,U_limit2,U_limit3,U_limit4,U_limit5,U_limit6,U_limit7,U_limit8;
129             /* Variaveis auxiliares e logicas para para asseguar a posicao da valvula
    esta dentro do limite fisico possivel*/
130             BOOL Bsys_Ucv_limit_LL, Bsys_Ucv_limit_HH;
131             REAL Bsys_Ucv_constr_case_1, Bsys_Ucv_constr;
132             /* Variaveis logicas para determinar a quantidade de queimadores requeridos
    para acendimeto*/
133               BOOL Bsys_req_qty1, Bsys_req_qty2, Bsys_req_qty3, Bsys_req_qty4, Bsys_req_qty5,
    Bsys_req_qty6, Bsys_req_qty7, Bsys_req_qty8; /* quantidade requerida de queimadores
    acessos */
134
135     }
136
137     /* Atualizacao dos estados discretos */
138     LINEAR {
139             DeltaU_LINEAR=Bsys_Ucv_constr-U_op;
140             }
141     AD  { /* verificacao da quantidade requerida de queimadores acesos para calculo de
    vazao: */
142             OnlyBnr1 = 1 >= Bsys_burner_qty_set_value;
143             OnlyBnr2 = 2 >= Bsys_burner_qty_set_value;
144             OnlyBnr3 = 3 >= Bsys_burner_qty_set_value;
145             OnlyBnr4 = 4 >= Bsys_burner_qty_set_value;
146             OnlyBnr5 = 5 >= Bsys_burner_qty_set_value;
147             OnlyBnr6 = 6 >= Bsys_burner_qty_set_value;
148             OnlyBnr7 = 7 >= Bsys_burner_qty_set_value;
149             OnlyBnr8 = 8 >= Bsys_burner_qty_set_value;
150             Bsys_req_qty1 = Bsys_burner_qty_set_value >= 1;
151             Bsys_req_qty2 = Bsys_burner_qty_set_value >= 2;
152             Bsys_req_qty3 = Bsys_burner_qty_set_value >= 3;
153             Bsys_req_qty4 = Bsys_burner_qty_set_value >= 4;
154             Bsys_req_qty5 = Bsys_burner_qty_set_value >= 5;
155             Bsys_req_qty6 = Bsys_burner_qty_set_value >= 6;
156             Bsys_req_qty7 = Bsys_burner_qty_set_value >= 7;
157             Bsys_req_qty8 = Bsys_burner_qty_set_value >= 8;
158             Bsys_Ucv_limit_LL      = 0 >= U+DU;
159             Bsys_Ucv_limit_HH      = U+DU >= 1;
160             x2_max1=x2_DA+q_bfg_OP1>=37.5;
161             x2_max2=x2_DA+q_bfg_OP2>=75;
```

```
162             x2_max3=x2_DA+q_bfg_OP3>=112.5;
163             x2_max4=x2_DA+q_bfg_OP4>=150;
164             x2_max5=x2_DA+q_bfg_OP5>=187.5;
165             x2_max6=x2_DA+q_bfg_OP6>=225;
166             x2_max7=x2_DA+q_bfg_OP7>=262.5;
167             x2_max8=x2_DA+q_bfg_OP8>=300;
168             x1_max1=x1_DA+q_bfg_OP1>=37.5;
169             x1_max2=x1_DA+q_bfg_OP2>=75;
170             x1_max3=x1_DA+q_bfg_OP3>=112.5;
171             x1_max4=x1_DA+q_bfg_OP4>=150;
172             x1_max5=x1_DA+q_bfg_OP5>=187.5;
173             x1_max6=x1_DA+q_bfg_OP6>=225;
174             x1_max7=x1_DA+q_bfg_OP7>=262.5;
175             x1_max8=x1_DA+q_bfg_OP8>=300;
176             U1=U1min>=U;
177             U2=U2min>=U;
178             U3=U3min>=U;
179             U4=U4min>=U;
180             U5=U5min>=U;
181             U6=U6min>=U;
182             U7=U7min>=U;
183             U8=U8min>=U;
184     }
185     DA  {
186             x1_DA1 ={IF (Bsys_req_qty1 ) THEN (Ts/Tal1_1)*((K1_1-1)*x1+K2_1*x2+K3_1*
    DeltaU)+x1 ELSE (Ts/Tal1_0)*(-x1)+x1};
187             x1_DA2 ={IF (Bsys_req_qty2 ) THEN (Ts/Tal1_2)*((K1_2-1)*x1+K2_2*x2+K3_2*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA1};
188             x1_DA3 ={IF (Bsys_req_qty3 ) THEN (Ts/Tal1_3)*((K1_3-1)*x1+K2_3*x2+K3_3*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA2};
189             x1_DA4 ={IF (Bsys_req_qty4 ) THEN (Ts/Tal1_4)*((K1_4-1)*x1+K2_4*x2+K3_4*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA3};
190             x1_DA5 ={IF (Bsys_req_qty5 ) THEN (Ts/Tal1_5)*((K1_5-1)*x1+K2_5*x2+K3_5*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA4};
191             x1_DA6 ={IF (Bsys_req_qty6 ) THEN (Ts/Tal1_6)*((K1_6-1)*x1+K2_6*x2+K3_6*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA5};
192             x1_DA7 ={IF (Bsys_req_qty7 ) THEN (Ts/Tal1_7)*((K1_7-1)*x1+K2_7*x2+K3_7*
    DeltaU)+x1 ELSE x1_DA6};
193             x1_DA ={IF (Bsys_req_qty8 ) THEN (Ts/Tal1_8)*((K2_8-1)*x2+K1_8*x1+K3_8*DeltaU
    )+x1 ELSE x1_DA7};
194             x2_DA1 ={IF (Bsys_req_qty1 ) THEN (Ts/Tal2_1)*((K2_1-1)*x2+K1_1*x1+K3_1*
    DeltaU)+x2 ELSE (Ts/Tal2_0)*(-x2)+x2};
195             x2_DA2 ={IF (Bsys_req_qty2 ) THEN (Ts/Tal2_2)*((K2_2-1)*x2+K1_2*x1+K3_2*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA1};
196             x2_DA3 ={IF (Bsys_req_qty3 ) THEN (Ts/Tal2_3)*((K2_3-1)*x2+K1_3*x1+K3_3*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA2};
197             x2_DA4 ={IF (Bsys_req_qty4 ) THEN (Ts/Tal2_4)*((K2_4-1)*x2+K1_4*x1+K3_4*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA3};
198             x2_DA5 ={IF (Bsys_req_qty5 ) THEN (Ts/Tal2_5)*((K2_5-1)*x2+K1_5*x1+K3_5*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA4};
199             x2_DA6 ={IF (Bsys_req_qty6 ) THEN (Ts/Tal2_6)*((K2_6-1)*x2+K1_6*x1+K3_6*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA5};
200             x2_DA7 ={IF (Bsys_req_qty7 ) THEN (Ts/Tal2_7)*((K2_7-1)*x2+K1_7*x1+K3_7*
    DeltaU)+x2 ELSE x2_DA6};
201             x2_DA ={IF (Bsys_req_qty8 ) THEN (Ts/Tal2_8)*((K2_8-1)*x2+K1_8*x1+K3_8*DeltaU
    )+x2 ELSE x2_DA7};
202             x2_DA_constr8 ={IF (x2_max1 & OnlyBnr1 & Bsys_req_qty1) THEN 37.5-q_bfg_OP1
    ELSE x2_DA };
203             x2_DA_constr7 ={IF (x2_max2 & OnlyBnr2 & Bsys_req_qty2) THEN 75-q_bfg_OP2
    ELSE x2_DA_constr8};
```

```
204             x2_DA_constr6 ={IF (x2_max3 & OnlyBnr3 & Bsys_req_qty3) THEN 112.5-q_bfg_OP3
    ELSE x2_DA_constr7};
205             x2_DA_constr5 ={IF (x2_max4 & OnlyBnr4 & Bsys_req_qty4) THEN 150-q_bfg_OP4
    ELSE x2_DA_constr6};
206             x2_DA_constr4 ={IF (x2_max5 & OnlyBnr5 & Bsys_req_qty5) THEN 187.5-q_bfg_OP5
    ELSE x2_DA_constr5};
207             x2_DA_constr3 ={IF (x2_max6 & OnlyBnr6 & Bsys_req_qty6) THEN 225-q_bfg_OP6
    ELSE x2_DA_constr4};
208             x2_DA_constr2 ={IF (x2_max7 & OnlyBnr7 & Bsys_req_qty7) THEN 262.5-q_bfg_OP7
    ELSE x2_DA_constr3};
209             x2_DA_constr1 ={IF (x2_max8 & OnlyBnr8 & Bsys_req_qty8) THEN 300-q_bfg_OP8
    ELSE x2_DA_constr2};
210             x1_DA_constr8 ={IF (x1_max1 & OnlyBnr1 & Bsys_req_qty1) THEN 37.5-q_bfg_OP1
    ELSE x1_DA};
211             x1_DA_constr7 ={IF (x1_max2 & OnlyBnr2 & Bsys_req_qty2) THEN 75-q_bfg_OP2
    ELSE x1_DA_constr8};
212             x1_DA_constr6 ={IF (x1_max3 & OnlyBnr3 & Bsys_req_qty3) THEN 112.5-q_bfg_OP3
    ELSE x1_DA_constr7};
213             x1_DA_constr5 ={IF (x1_max4 & OnlyBnr4 & Bsys_req_qty4) THEN 150-q_bfg_OP4
    ELSE x1_DA_constr6};
214             x1_DA_constr4 ={IF (x1_max5 & OnlyBnr5 & Bsys_req_qty5) THEN 187.5-q_bfg_OP5
    ELSE x1_DA_constr5};
215             x1_DA_constr3 ={IF (x1_max6 & OnlyBnr6 & Bsys_req_qty6) THEN 225-q_bfg_OP6
    ELSE x1_DA_constr4};
216             x1_DA_constr2 ={IF (x1_max7 & OnlyBnr7 & Bsys_req_qty7) THEN 262.5-q_bfg_OP7
    ELSE x1_DA_constr3};
217             x1_DA_constr1 ={IF (x1_max8 & OnlyBnr8 & Bsys_req_qty8) THEN 300-q_bfg_OP8
    ELSE x1_DA_constr2};
218             Q_bfg_OP_DA1={IF (Bsys_req_qty1 ) THEN q_bfg_OP1 ELSE 0};
219             Q_bfg_OP_DA2={IF (Bsys_req_qty2 ) THEN q_bfg_OP2 ELSE Q_bfg_OP_DA1};
220             Q_bfg_OP_DA3={IF (Bsys_req_qty3 ) THEN q_bfg_OP3 ELSE Q_bfg_OP_DA2};
221             Q_bfg_OP_DA4={IF (Bsys_req_qty4 ) THEN q_bfg_OP4 ELSE Q_bfg_OP_DA3};
222             Q_bfg_OP_DA5={IF (Bsys_req_qty5 ) THEN q_bfg_OP5 ELSE Q_bfg_OP_DA4};
223             Q_bfg_OP_DA6={IF (Bsys_req_qty6 ) THEN q_bfg_OP6 ELSE Q_bfg_OP_DA5};
224             Q_bfg_OP_DA7={IF (Bsys_req_qty7 ) THEN q_bfg_OP7 ELSE Q_bfg_OP_DA6};
225             Q_bfg_OP_DA={IF (Bsys_req_qty8 ) THEN q_bfg_OP8 ELSE Q_bfg_OP_DA7};
226             U_limit1 ={IF (U1 & OnlyBnr1 & Bsys_req_qty1) THEN U1min ELSE U};
227             U_limit2 ={IF (U2 & OnlyBnr2 & Bsys_req_qty2) THEN U2min ELSE U_limit1};
228             U_limit3 ={IF (U3 & OnlyBnr3 & Bsys_req_qty3) THEN U3min ELSE U_limit2};
229             U_limit4 ={IF (U4 & OnlyBnr4 & Bsys_req_qty4) THEN U4min ELSE U_limit3};
230             U_limit5 ={IF (U5 & OnlyBnr5 & Bsys_req_qty5) THEN U5min ELSE U_limit4};
231             U_limit6 ={IF (U6 & OnlyBnr6 & Bsys_req_qty6) THEN U6min ELSE U_limit5};
232             U_limit7 ={IF (U7 & OnlyBnr7 & Bsys_req_qty7) THEN U7min ELSE U_limit6};
233             U_limit8 ={IF (U8 & OnlyBnr8 & Bsys_req_qty8) THEN U8min ELSE U_limit7};
234             /* Timer 4: */
235             Bsys_Ucv_constr_case_1  = {IF Bsys_Ucv_limit_LL THEN 0   ELSE U_limit8};
236             Bsys_Ucv_constr     = {IF Bsys_Ucv_limit_HH THEN 1 ELSE
    Bsys_Ucv_constr_case_1};
237
238     }
239       CONTINUOUS {
240             DeltaU=DeltaU_LINEAR;
241             Bsys_burner_qty_set_value=Bsys_burner_qty_set_value+DeltaN;
242             U=U+DU;
243             Q_bfg = x1_DA_constr1+Q_bfg_OP_DA;
244             Q_VB  = x2_DA_constr1+Q_bfg_OP_DA;
245             x1=x1_DA_constr1;
246             x2=x2_DA_constr1;
247             Int_disturb=Int_disturb;
248       }
```

```
249
250       OUTPUT {Y_qbfg =Q_bfg+Int_disturb; Y_qvb =Q_VB; Y_N=Bsys_burner_qty_set_value;Y_U=U
      ;
251       }
252   }
253 }
```

Listagem B.1 – Código comentado HYSDEL do queimadore único.

B.3 Código do simulador não linear e cálculo do Filtro de Kalman

```
1  function [ x_out, x0,Ptub,S,x_,L] = Simula_nao_linear_FSM_kalman( x0,DU,disturbio,
       tipo_disturbio,x_out,S,x_ )
2  %Simulacao nao linear disturbio em U + estimacao dos estados pelo filtro de kalman
3
4      %Inicializacao mais configuracao de constantes
5      load SAS+L %constantes e matriz relativa ao Observador
6      load Constantes_26-03 % constantes do sistema
7      Umin=[0 0.43 0.32 0.21 0.18 0.02 0.06 0.13 0.17];%limite U
8      Ptub=0;L=[];
9      Rori=0.001334;
10     Tal2=[-29 -27 -26.3 -25.5 -25 -24.8 -24.7 -24.6 -24.5];
11     Tal1=[4.8 4.5 4.3 4.2 4.0 3.9 3.8 3.7 3.6]; Pfor=-20;
12     qbfg_op=[0 qbfg_op];
13     Pbfg=[581.35516 568.90955 556.46387 544.02899 531.59412 525.90137 520.20862 492.45697
        464.70535];
14     Rvb_calc=[0.0945248565487572 0.0705723548722890 0.0466198531958208 0.0226673515193525
        0.0150575987557232 0.0140478459920938 0.0100422583901667 0.0080366707882397 4];
15     Rvb_calc=Rvb_calc.*.47;
16     qbfg_lim=[37.5 75 112.5 150 187.5 225 262.5 300];
17     qbfg=x0(105);
18     qvb=x0(106);
19     [x0,~,z,~]=S_burner_V2_6_DU_DN_full(x0,DU');%simulacao do MLD linear
20     n=sum(x0(187:5:222)); %numero de queimadores acesos
21     for tempo=0:Ts:1
22         x0(111)=min(max(x0(111),Umin(n+1)),1);%limitacao da valvula
23         if strcmp(tipo_disturbio,'ruido')
24             Rtub=calc_Rtub(x0(111),n);%calculo nao linear da resistencia fluidica da
       valvula sem agarramento
25         elseif strcmp(tipo_disturbio,'agarramento')
26             Rtub=calc_Rtub(x0(111)+disturbio,n);%calculo nao linear da resistencia
       fluidica da valvula com agarramento
27         elseif strcmp(tipo_disturbio,'agarramento_ruido')
28             Rtub=calc_Rtub(x0(111)+disturbio,n);%calculo nao linear da resistencia
       fluidica da valvula com agarramento
29         else
30             Rtub=calc_Rtub(x0(111),n);
31         end
32         if(Rtub<=0.001)
33             Rtub=0.001;
34         end
35         %Simulacao nao lienar
36         Pori=-Rori*(qbfg).^2+Pbfg(n+1);
37         if n==0 || x0(111)==0
38             qtub=0;
39             Ptub=Pbfg(n+1);
40         else
```

```
41              Ptub=Rvb_calc(n)*qvb^2+Pfor;
42              if (Pori>=Ptub)
43                  qtub=((Pori-Ptub)/Rtub)^.5;
44                  if n~=0
45                      if qtub>=qbfg_lim(n)
46                          qtub=qbfg_lim(n);
47                      end
48                  end
49
50              else
51                  qtub=((Ptub-Pori)/Rtub)^.5;
52                  if n~=0
53                      if qtub>=qbfg_lim(n)
54                          qtub=qbfg_lim(n);
55                      end
56                  end
57
58              end
59          end
60
61          qvb=(Ts/Tal2(n+1))*(qvb-qtub)+qvb;
62          qbfg=(Ts/Tal1(n+1))*(qtub-qbfg)+qbfg;
63          if qbfg>=300
64            qbfg=300;
65          end
66          if qvb>=300
67            qvb=300;
68          end
69          %Estimar estados
70          if isreal(qbfg)&&isreal(qvb) && n>0
71              x_out(6,1)=n;
72              if n>0
73                  %Observador kalman+integrador disturbio
74                  x_(4)=0.6;
75                  x_=(Aa{n}*x_+Ba{n}*[DU(2);0]).*Ts+x_;
76                  S=Aad{n}*S*Aad{n}'+Qw-Aad{n}*S*Ca{n}'*inv(Ca{n}*S*Ca{n}'+Rv_)*Ca{n}*S*Aad
    {n}';
77                  L=Aad{n}*S*Ca{n}'*inv(Ca{n}*S*Ca{n}'+Rv_);
78                  if strcmp(tipo_disturbio,'ruido')
79                      x_=x_ +L*([qbfg-qbfg_op(n+1)+(rand(1)-0.5)*disturbio;x_(4)]-Ca{n}*x_)
    ;%ruido na medicao da vazao
80                  elseif strcmp(tipo_disturbio,'agarramento')
81                      x_=x_ +L*([qbfg-qbfg_op(n+1);x_(4)]-Ca{n}*x_);
82                  elseif strcmp(tipo_disturbio,'agarramento_ruido')
83                      x_=x_ +L*([qbfg-qbfg_op(n+1)+(rand(1)-0.5)*disturbio;x_(4)]-Ca{n}*x_)
    ;%ruido na medicao da vazao
84                  end
85                  x_(1)=min(max(x_(1),-300),300);
86                  x_(2)=min(max(x_(2),-300),300);
87                  x_(3)=min(max(x_(3),Umin(n+1)),1);
88              else
89                  x_=zeros(size(x_));
90              end
91              %Atualizacao dos estados estimados pelo filtro otimo de kalman
92              x_out(1:2,1)=x_(1:2)+qbfg_op(n+1);%[qbfg;qvb]
93              x_out(3,1)=x_(3)-x_(4);%DeltaU
94              x_out(4:5,1)=x_(1:2);%[x1;x2]
95              x_out(6,1)=n;%n
96              x_out(7)=x_(3);%U
97              x_out(8)=x_(5);%d
```

```
98          else
99              return
100         end
101     end
102     %Substiuicao dos estados lineares pelos nao lineares
103     x0(105:111)=[qbfg;qvb;x0(107); qbfg-z(232);qvb-z(232);x0(110);x0(111)];
104 end
```

Listagem B.2 – Função simula sistema não linear e estima estados contínuos.