



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

NICKSON RAMON TOMÉ DE SOUSA

**ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE
ÓLEO COMBUSTÍVEL EM UMA USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO DURANTE O
PROCESSO DE PARTIDA DAS UNIDADES GERADORAS**

FORTALEZA

2022

NICKSON RAMON TOMÉ DE SOUSA

ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE ÓLEO
COMBUSTÍVEL EM UMA USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO DURANTE O
PROCESSO DE PARTIDA DAS UNIDADES GERADORAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Bismark Claire Torrico

Coorientador: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S697a Sousa, Nickson Ramon Tomé de.
Análise e Identificação Experimental do Sistema de Injeção de Óleo Combustível em uma Usina Termelétrica a Carvão Durante o Processo de Partida das Unidades Geradoras / Nickson Ramon Tomé de Sousa. – 2022.
72 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2022.
Orientação: Prof. Dr. Bismark Claire Torrico.
Coorientação: Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira.
1. Usina Termelétrica. 2. Carvão Mineral. 3. Óleo combustível. 4. Identificação de sistema. 5. Sistema LPV. I. Título.
-

NICKSON RAMON TOMÉ DE SOUSA

ANÁLISE E IDENTIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE INJEÇÃO DE ÓLEO
COMBUSTÍVEL EM UMA USINA TERMELÉTRICA A CARVÃO DURANTE O
PROCESSO DE PARTIDA DAS UNIDADES GERADORAS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Engenharia Elétrica

Aprovada em: 26 de Julho de 2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Bismark Claire Torrico (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Fabrício Gonzalez Nogueira (Coorientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Peixoto Praça
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Guilherme de Alencar Barreto
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus,
aos meus pais, Valder e Conceição,
à minha amada, Mênime,
à minha filha, Melisse,
eu dedido este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Os últimos anos não foram fáceis, muitos foram os desafios e os obstáculos. Chegar até aqui foi, sem dúvidas, uma enorme conquista, que não teria sido possível se eu não tivesse ao meu lado pessoas especiais. Dessa forma, eu gostaria de agradecer:

A Deus, pelo amor incondicional, pelo dom da vida, por tudo que tenho e quem sou.

Aos meus pais, Valder e Conceição, por todo amor e carinho, por sempre estarem ao meu lado, me incentivando e me apoiando. Por terem priorizado os meus estudos, abrindo mão, muitas vezes, de seus próprios sonhos para que eu pudesse realizar os meus. Eles são, com certeza, os responsáveis pelo homem que me tornei. Tenho muito orgulho de ser seu filho.

Ao meu querido irmão Nadson, por me incentivar, por sempre me desafiar a superar a mim mesmo e por provar que os sonhos existem para serem realizados.

À minha bela e amada esposa, Mênime, por todo incentivo, suporte e amor. Por permanecer sempre ao meu lado, por ser a minha rocha e o meu porto seguro nos momentos de angústia e por não me deixar desistir dos meus objetivos. Pelo carinho e paciência, principalmente durante essa jornada, entendendo que a falta de tempo não significava a falta de amor. Sua resiliência nas dificuldades é fonte de inspiração para mim. Nada disso faria sentido sem sua doce presença, essa conquista também é sua!

À minha pequena princesa, Melisse, por tornar os meus dias mais alegres, por ser a minha fonte de inspiração e por me fazer querer ser uma pessoa melhor a cada dia para que eu seja sempre o seu maior exemplo.

Aos meus orientadores Prof. Dr. Fabrício Nogueira e Prof. Dr. Bismark Torrico, pela oportunidade, pelos ensinamentos, pela atenção, pela paciência, por acreditarem que eu poderia ir muito além do que eu mesmo imaginava. Por toda ajuda, serei eternamente grato.

Ao meu amigo Adriano, cuja a amizade foi construída durante essa árdua caminhada acadêmica, por toda parceria, disponibilidade, paciência e incentivo. Sem a sua generosa oferta de conhecimento e tempo, sem dúvidas, não teria sido possível chegar até aqui.

Aos meus amigos, Abner e Júlio, por todo companheirismo e torcida.

Aos meus amigos mais próximos, com quem pude compartilhar meus planos e desafios durante esse processo, pela paciência em razão da minha ausência e por terem sido, muitas vezes, minha válvula de escape.

Aos gestores e aos demais colegas de trabalho que tive durante minha jornada profissional, por propiciarem um ambiente favorável para meu desenvolvimento, possibilitando

que eu adquirisse o conhecimento que foi fundamental para o desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização desse trabalho.

"Ou escreva algo que valha a pena ser lido, ou
faça algo sobre o qual valha a pena ser escrito."

(Benjamin Franklin)

RESUMO

Dentro do novo contexto de crescimento de oferta de energia de fontes renováveis, as unidades geradoras convencionais tiveram que se adaptar para se tornarem mais flexíveis, ou seja, partir e parar com mais frequência. Isso trouxe um grande desafio para as usinas termelétricas a carvão mineral, que foram originalmente projetadas para operação constante em carga base. Apesar de existirem muitos estudos sobre os processos térmicos em geral, existem poucas publicações que abordam modelagens e simulações de partidas de plantas deste tipo. Este trabalho apresenta uma análise de partidas das unidades geradores de uma usina termelétrica a carvão e, por meio de uma abordagem de sistemas lineares com parâmetros variantes (do inglês, *linear parameter varying-systems* – LPV), foi desenvolvido um estudo de identificação experimental do sistema de injeção de óleo combustível nos queimadores, utilizando dados reais coletados dos sistemas de controle da planta. A modelagem deste sistema é fundamental para se obter uma operação mais econômica e mais sustentável, principalmente durante os regimes transitórios de operação.

Palavras-chave: Usina Termelétrica. Carvão Mineral. Flexibilização. Óleo combustível. Partidas. Identificação de sistema. Sistema LPV.

ABSTRACT

Within the new context of growth in the supply of energy from renewable sources, conventional generating units had to adapt to become more flexible, that is, to start and stop more frequently. This brought a great challenge for coal-fired thermoelectric plants, that were originally designed for constant base load operation. Although there are many studies on thermal processes in general, there are few publications that approach modeling and simulation of startups of this kind of power plant. This work presents an analysis of the start-ups of the generating units of a coal-fired power plant and, through an approach of linear parameter varying-systems (LPV), a study of experimental identification of the fuel oil supply system to the burners was developed using real data collected from the power plant's control systems. The modeling of this system is essential to obtain a more economical and more sustainable operation, especially during transitory operating regimes.

Keywords: Power plant. Coal. Flexibilization. Fuel oil. Start-ups. System identification. LPV system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama geral do processo de fornecimento de óleo combustível.	25
Figura 2 – Válvula de controle e transmissor de pressão.	26
Figura 3 – Malha de controle de pressão de óleo combustível.	27
Figura 4 – Comportamento da válvula de controle e variáveis relacionadas durante uma partida.	28
Figura 5 – Ilustração simplificada de um queimador.	29
Figura 6 – Variáveis importantes para análise de uma partida.	38
Figura 7 – Partida fria 1.	40
Figura 8 – Partida fria 2.	40
Figura 9 – Partida morna 1.	41
Figura 10 – Partida morna 2.	41
Figura 11 – Partida quente 1.	42
Figura 12 – Partida quente 2.	43
Figura 13 – Partida muito quente 1.	43
Figura 14 – Partida muito quente 2.	44
Figura 15 – Partida fria 1 com dados de pressão de óleo combustível.	45
Figura 16 – Partida morna 2 com dados de pressão de óleo combustível.	46
Figura 17 – Degraus aplicados na válvula de controle de óleo combustível.	53
Figura 18 – Sistema de controle de pressão de óleo combustível em malha aberta.	54
Figura 19 – Validação do modelo LPV em malha aberta.	56
Figura 20 – Validação do modelo LTI em malha aberta.	58
Figura 21 – Partida fria utilizada para modelagem do sistema.	59
Figura 22 – Janela de treinamento da partida fria usada no algoritmo de identificação LPV SISO.	60
Figura 23 – Validação do modelo LPV SISO na própria partida fria.	61
Figura 24 – Partida quente utilizada para validação do modelo LPV SISO.	62
Figura 25 – Validação do modelo LPV SISO na partida quente.	63
Figura 26 – Partida muito quente utilizada para modelagem do sistema.	64
Figura 27 – Janelas de treinamento da partida muito quente utilizadas no algoritmo de identificação LPV MISO.	65
Figura 28 – Validação do modelo LPV MISO na própria partida muito quente.	66

Figura 29 – Partida morna utilizada para validação do modelo LPV MISO.	66
Figura 30 – Validação do modelo LPV MISO na partida morna.	67
Figura 31 – Validação do modelo LPV MISO na partida fria.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de partidas entre os diferentes modos	44
Tabela 2 – Comparação entre as partidas Fria 1 e Morna 2	45
Tabela 3 – Comparação entre as partidas Quente 2 e Muito Quente 1	46
Tabela 4 – Parâmetros da topologia do modelo em malha aberta	55
Tabela 5 – Parâmetros da topologia do modelo LPV SISO	60
Tabela 6 – Parâmetros da topologia do modelo LPV MISO	64
Tabela 7 – Índices de performance dos modelos LPV apresentados	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Nomenclaturas utilizadas na figura 1.	26
----------------------------------------------------------	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARX	<i>Auto-regressive with exogenous variable</i>
BFR	<i>Best Fit Rate</i>
BMS	<i>Burner Management System</i>
E/S	Entradas e Saídas
LPV	<i>Linear Parameter-varying</i>
LTI	<i>Linear Time Invariant</i>
MFT	<i>Master Fuel Trip</i>
MISO	<i>Multiple-input Single-output</i>
NFPA	<i>National Fire Protection Association</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RMSE	<i>Root Mean Squared Error</i>
SISO	<i>Single-input Single-output</i>
TRM	<i>Triple Modular Redundancy</i>
UG	Unidade Geradora

LISTA DE SÍMBOLOS

$*$	Blocos simétricos na expressão de uma matriz.
\mathbb{Z}	Conjunto de números inteiros.
\mathbb{N}	Conjunto de números naturais.
\mathbb{R}	Conjunto de números reais.
k	Amostra em tempo discreto.
t	Tempo contínuo.
v	Sinal de controle calculado.
u	Entrada de um sistema.
y	Saída de um sistema.
p	Variável de ajuste.
A'	Transposta da matriz A .
A^{-1}	Inversa da matriz A .
$A > 0$	Significa que a matriz A é definida positiva.
$A \geq 0$	Significa que a matriz A é semidefinida positiva.
$A < 0$	Significa que a matriz A é definida negativa.
$A \leq 0$	Significa que a matriz A é semidefinida negativa.
$diag(A_1, A_2, \dots, A_m)$	Denota a matriz diagonal de bloco formada com matrizes $A_i, i = 1, \dots, m$.
$col\{x_1, x_2\}$	Denota o vetor coluna $\begin{bmatrix} x_1 & x_2 \end{bmatrix}$.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Motivação	20
1.2	Objetivo Geral	22
1.3	Organização do trabalho	22
2	DESCRIÇÃO DO PROCESSO	23
2.1	Óleo Combustível	23
2.2	Controle de Pressão do Óleo Combustível	26
2.3	Sistema de Gerenciamento de Queimadores (BMS)	28
2.4	Sequencia de Acendimento e Purga de um Queimador de Óleo Combustível	31
2.4.1	<i>Acendimento</i>	32
2.4.2	<i>Purga</i>	32
2.5	Processo de partida de uma unidade geradora	33
2.5.1	<i>Modos de partida</i>	33
2.5.2	<i>Preparação da partida</i>	34
2.5.3	<i>Acendimento da Caldeira</i>	35
2.5.4	<i>Rolagem da turbina e sincronização</i>	36
2.5.5	<i>Subida de carga</i>	36
3	ANÁLISE DE PARTIDAS	37
3.1	Análise do Processo	37
3.2	Análise do Consumo de Óleo Combustível	39
3.2.1	<i>Partida Fria</i>	39
3.2.2	<i>Partida Morna</i>	39
3.2.3	<i>Partida Quente</i>	42
3.2.4	<i>Partida Muito Quente</i>	42
3.3	Comparação entre as partidas	44
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS LPV	47
4.1	Modelo LPV-ARX caso SISO	47
4.1.1	<i>Representação matricial do modelo LPV-ARX caso SISO</i>	48
4.1.2	<i>Algoritmo de Identificação LPV-ARX caso SISO</i>	49

4.2	Modelo LPV-ARX caso MISO	49
4.2.1	<i>Representação matricial do modelo LPV-ARX caso MISO</i>	50
4.2.2	<i>Algoritmo de identificação LPV-ARX caso MISO</i>	52
5	EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS	53
5.1	Experimentação em Malha Aberta	53
5.1.1	<i>Modelo LPV</i>	54
5.1.2	<i>Modelo LTI</i>	57
5.2	Experimentação em Malha Fechada	58
5.2.1	<i>Modelo LPV SISO</i>	58
5.2.1.1	<i>Identificação LPV SISO</i>	58
5.2.1.2	<i>Validação 1 LPV SISO</i>	61
5.2.1.3	<i>Validação 2 LPV SISO</i>	62
5.2.2	<i>Modelo LPV MISO</i>	63
5.2.2.1	<i>Identificação LPV MISO</i>	63
5.2.2.2	<i>Validação 1 LPV MISO</i>	65
5.2.2.3	<i>Validação 2 LPV MISO</i>	65
5.2.2.4	<i>Validação 3 LPV MISO</i>	67
5.2.3	<i>Comparação entre os resultados</i>	68
6	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS	71

1 INTRODUÇÃO

A mudança climática é uma das grandes preocupações atuais da humanidade. O aquecimento global pode trazer danos irreversíveis ao nosso planeta, como: degelo das calotas polares, elevação do nível dos oceanos, ondas de calor intensas, mudanças na flora, extinção de espécies animais etc. Além do impacto ambiental, as consequências se estendem à economia e ao comportamento social. Por isso, o tema tem sido amplamente discutido nas últimas décadas e tem reunido praticamente todos os países em fóruns específicos.

A Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e o Desenvolvimento, que aconteceu em 1992 no Rio de Janeiro, impulsionou o engajamento mundial pela busca da diminuição das emissões de gases que aumentam o efeito estufa e trouxe uma maior conscientização sobre a necessidade dos países agirem conjuntamente para alcançar tal objetivo.

Para complementar o acordo da conferência de 92, o Protocolo de Quioto foi firmado em 1997 para definir metas de redução de emissões para os países desenvolvidos e os que apresentavam economia em transição, considerados os principais responsáveis pela mudança do clima.

Em 2015, o Acordo de Paris estabeleceu metas para reduzir os impactos e riscos potenciais das mudanças climáticas. O principal objetivo do acordo é reduzir as emissões de CO_2 e outros gases de efeito estufa para limitar o aumento médio de temperatura global a 2 °C, quando comparado a níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015).

A queima de combustíveis fósseis é um dos fatores que aumenta a concentração de CO_2 na atmosfera, colaborando para a potencialização do efeito estufa natural e para o aquecimento do planeta. A redução, então, da queima desse tipo de combustível é fundamental para a mitigação de tais problemas ambientais. Entretanto, essa não é uma tarefa fácil, pois ainda há uma enorme dependência do petróleo, do gás e do carvão. Atualmente, mais de 75% da demanda de energia utilizada para aquecimento ou resfriamento é baseada em combustíveis fósseis (REN21, 2020). Estima-se que os combustíveis fósseis continuem a dominar a demanda global no curto e médio prazo (GONZALEZ-SALAZAR *et al.*, 2018). Eles continuam a ser as principais fontes de energia do mundo. A produção e o uso desse tipo de combustível, até esse momento, é essencial para o planejamento e segurança energética em muitos países (IEA, 2021).

A busca pelo crescimento econômico sustentável e pela transição da matriz energética para fontes renováveis tem sido prioridade para diversas nações. De acordo com a Agência Internacional de Energia, as fontes de energia eólica e solar foram as renováveis que mais

criaram e receberam investimentos nos últimos anos (IEA, 2021). Embora existam diversas vantagens na utilização destas fontes, principalmente ambientais, essa transição acelerada traz diversos desafios a serem superados, principalmente para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), pois a oferta de energia aos sistemas elétricos depende diretamente da disponibilidade de suas fontes primárias: vento e sol, complicando o balanceamento, em tempo real, entre geração de energia e consumo.

É esperado que o armazenamento de energia seja a melhor solução para este problema (MAI *et al.*, 2012). Atualmente existem diversos tipos de tecnologias para armazenamento de energia (LUO *et al.*, 2015), mas a maioria delas ainda são imaturas e não permitem produção em grande escala com custos aceitáveis.

A inconstância no fornecimento e a falta de previsibilidade das fontes renováveis impõem um alto grau de flexibilidade ao parque gerador de fontes convencionais, como hidrelétricas e termelétricas. Entretanto, nem todo tipo de usina convencional consegue adaptar, rapidamente, sua produção às necessidades do sistema, devido às restrições de ordem técnicas ou econômicas. As restrições operacionais estão relacionadas a taxas de rampa, tempos de partida e limites de carga mínima (NEETZOW, 2021). Sob essas restrições, as usinas podem ser classificadas como inflexíveis, flexíveis e altamente flexíveis (GONZALEZ-SALAZAR *et al.*, 2018).

- Geração inflexível: usinas projetadas para operar em carga base, onde partidas e paradas são raras e o tempo de rampa para mudança de carga é demorado. Exemplo: usinas nucleares, usinas termelétricas a carvão mineral, algumas usinas a gás de ciclo combinado, usinas geotérmicas, dentre outras;
- Geração flexível: usinas projetadas para permitir o ajuste de carga para suprir as variações de demanda do sistema elétrico e partir em curto prazo. Exemplo: usinas de biomassa, usinas de biogás, algumas usinas a gás de ciclo combinado e usinas solares concentradas, dentre outras;
- Geração altamente flexível: usinas projetadas para permitir variações rápidas de carga e com curtíssimo tempo de partida. Exemplo: usinas hidrelétricas com reservatórios, usinas com motores à combustão, usinas a gás com turbina aeroderivativa, usinas a gás de ciclo simples dentre outras.

A redução de fontes síncronas convencionais e o aumento de geradores não síncronos podem afetar a estabilidade do sistema se estes não puderem fornecer inércia sintética e controle primário de frequência (BIRD *et al.*, 2016). No sistema elétrico, a inércia vem de geradores

síncronos diretamente conectado à rede. Quando há alguma perturbação na frequência da rede, as máquinas rotativas dos geradores síncronos injetam energia cinética ou a absorvem para neutralizar o desvio e manter a estabilidade do sistema. Em contraste, fontes de energia eólica e solar, que possuem geradores não síncronos, geralmente são conectados a conversores eletrônicos de energia, que, em caso de distúrbios de frequência na rede, desacoplam o gerador e não contribuem para o controle (TIELENS; HERTEM, 2016). Portanto, as fontes de energia convencionais, pelo menos a curto e médio prazo, continuam a ser fundamentais para se manter a estabilidade do sistema elétrico e a segurança energética.

1.1 Motivação

Dentro deste novo contexto de crescimento de oferta de energia de fontes renováveis, as usinas termelétricas movidas a carvão mineral, originalmente projetadas para operação constante em carga base, precisarão, cada vez mais, operar em cargas reduzidas ou de forma cíclica. Isso significa que elas terão que se adaptar para ligar, desligar, aumentar e diminuir a carga com mais frequência, com mais rapidez e com melhor custo-benefício. Uma termelétrica a carvão pode necessitar de várias horas para concluir seu processo de partida e realizar o sincronismo do gerador. Este tempo depende do período em que a usina permaneceu desligada. Quanto mais quente a planta estiver, mais rápido será seu arranque. Apesar das características desfavoráveis deste tipo de planta para a operação de forma flexível, muitas delas são solicitadas a operar desta maneira (WANG *et al.*, 2017). Dessa forma, para uma melhor adaptação das usinas e diminuição dos custos desta nova dinâmica, devem ser tomadas medidas para otimizar os processos de geração.

Segundo Hübel *et al.* (2017), os critérios mais importantes para a otimização de uma partida de uma planta térmica a carvão são: o tempo, a demanda de combustível e o desgaste vitalício de componentes termicamente estressados. Ele também afirma que o desenvolvimento de modelos de simulação dinâmica é considerado uma alternativa eficiente aos testes de campo, proporcionando um ambiente virtual para desenvolver e testar estratégias de otimização.

Levar uma usina de grande porte de seu estado inicial para a condição de sincronismo e operação é um procedimento complexo e altamente automatizado por sistemas de controle robustos. Por exemplo, valores de pressões, temperaturas, vazões e propriedades químicas precisam atingir limites bem definidos para que se consiga avançar com o processo.

Apesar de existir uma grande quantidade de literatura que trata sobre os processos

térmicos em geral, existem poucas publicações que abordam modelagens e simulações de partidas de plantas termelétricas a carvão (MARX-SCHUBACH; SCHMITZ, 2019), principalmente sobre o tema “fornecimento de óleo combustível”, pois, como este tipo de usina não costumava partir e parar com frequência, o foco dos estudos de otimização sempre foi o regime permanente, com geração em carga base.

Embora o carvão mineral seja o principal combustível destas usinas, o óleo pesado e/ou óleo diesel são utilizados para ignição e aquecimento inicial da caldeira, além de fornecer condições de ignição para a chama de carvão (BASU; DEBNATH, 2019).

O controle de pressão de fornecimento de óleo combustível para a fachada de queimadores é de extrema importância tanto por questões de segurança operacional, quanto por diminuição do consumo de óleo diesel, que tem como consequência direta a redução de impactos ambientais e a economia financeira. Em outras palavras, ele atua, principalmente, durante a partida e desligamento da unidade geradora, sendo utilizando também durante a troca de operação dos moinhos.

Neste contexto, durante a partida, dentre outras diversas atribuições, o operador comanda manualmente, pela sala de controle, dois sinais de referência, sendo eles, o de pressão de óleo e o de número de queimadores acesos. Cabe ao operador a busca pelo equilíbrio entre a economia de combustível e a manutenção da pressão para se manter a caldeira acesa com segurança. Contudo, com a definição manual dessas variáveis, obter uma combinação ótima que resulte em uma minimização de consumo e tempo não é fácil de se alcançar.

O desenvolvimento de uma lógica de controle para definição automática do valor ótimo de referência de pressão traria ganhos consideráveis ao processo reduzindo o consumo de óleo combustível. Para viabilizar a implementação, é necessário o levantamento de modelos matemáticos que representem a dinâmica do sistema. Dada a grande complexidade do processo para levantamento de equações fenomenológicas e valores de parâmetros, a abordagem adotada foi a de identificação experimental de sistemas (LJUNG, 1999).

Grande parte dos processos industriais são de natureza não linear. Apesar disso, a maioria dos trabalhos existentes sobre simulação de processos é baseada em modelos de sistemas lineares invariantes no tempo (LTI, do inglês *Linear Time Invariant*), que são satisfatórios para muitos sistemas. No entanto, realizar uma identificação com base no modelo LTI traz resultados limitados quando as condições de operação da planta variam significativamente (SANKARAN *et al.*, 2013). Dentro desse contexto, identificações através de modelos de sistemas lineares com

parâmetros variantes (LPV, do inglês *Linear Parameter Varying-systems*) são eficazes para lidar com essa situação, pois são capazes de representar o comportamento não linear do processo durante a transição entre as regiões de operação (TÓTH, 2010).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é realizar a análise e identificação experimental do sistema de injeção de óleo combustível em uma usina termelétrica a carvão durante o processo de partida das unidades geradoras. A abordagem de modelagem adotada é a de sistemas lineares com parâmetros variantes (LPV).

1.3 Organização do trabalho

- Capítulo 1 – Introdução: inicialmente é apresentada a motivação para este estudo, justificando quão importante é para a sociedade o aprofundamento do conhecimento neste tema. Logo após, é apresentado o objetivo para conscientizar o leitor sobre o que esperar como resultado dessa dissertação. Por fim, é apresentado um resumo com a descrição dos capítulos para melhor orientar o leitor;
- Capítulo 2 – Descrição do Processo: esse capítulo traz informações relevantes sobre os processos relacionados ao sistema de fornecimento de óleo combustível de uma usina termelétrica a carvão, permitindo que o leitor entenda melhor seu princípio de funcionamento;
- Capítulo 3 – Análise de Partidas: neste capítulo são feitas análises de partidas das unidades geradoras em diferentes modos, trazendo dados comparativos entre elas. Em seguida é demonstrado a influencia da pressão de óleo combustível sobre o consumo durante a partida;
- Capítulo 4 – Fundamentação Teórica sobre Identificação de Sistemas LPV: onde são apresentadas as formulações matemáticas necessárias para reproduzir as abordagens teóricas deste trabalho;
- Capítulo 5 – Resultados: as modelagens dos sistemas utilizando dados coletados da usina são apresentadas neste capítulo, assim como suas validações;
- Capítulo 6 – Conclusão: resume o que este trabalho apresentou, como alcançou seus objetivos e quão satisfatórios foram os resultados obtidos.

2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO

A usina referência deste trabalho, localizada no estado do Ceará, possui tecnologias de controle ambiental, que promovem a queima limpa do carvão, reduzindo significativamente as emissões de material particulado, enxofre e óxido de nitrogênio na atmosfera. Ela utiliza apenas diesel como óleo combustível em seus processos e conta com robustos sistemas de controle e automação à prova de falhas que gerenciam todos os processos da usina, inclusive as lógicas de controle do importante sistema de gerenciamento de queimadores, mais conhecido como BMS, do inglês *Burner Management System*.

2.1 Óleo Combustível

Derivado do petróleo, o óleo combustível é um produto bastante utilizado pela indústria em fornos, caldeiras e motores pesados. Ele é classificado de acordo com a sua viscosidade, seu teor de enxofre e seu ponto de fluidez. O que possui maior viscosidade é chamado de óleo pesado e o de menor viscosidade, óleo leve, como por exemplo, o óleo diesel.

Em usinas termelétricas a carvão mineral, o óleo combustível é utilizado como combustível de suporte ao carvão pulverizado e é fundamental para o sistema de ignição da caldeira, pois não é possível acendê-la e partir a unidade geradora (UG) somente com alimentação de carvão. Além disso, o óleo combustível é usado em condições de baixa carga (geralmente inferior a 40% da base), estabilização da chama de carvão e para entrada ou retirada de moinhos de operação em qualquer condição de carga.

Por questões econômicas, algumas usinas utilizam tanto o óleo leve, quanto o óleo pesado em suas operações. Por ser mais caro, o óleo diesel é geralmente utilizado apenas como combustível de partida, enquanto ainda não há vapor auxiliar disponível para aquecimento e atomização do óleo pesado. Os sistemas possuem controles semelhantes, porém independentes, tendo como principal diferença entre eles a necessidade de se controlar a temperatura do óleo pesado a fim de garantir a viscosidade ideal, tanto para facilitar o seu escoamento quanto para garantir uma atomização adequada e, conseqüentemente, uma boa queima.

A usina referência possui, de forma resumida, os seguintes subsistemas em seu processo de utilização desse insumo:

- Descarregamento: composto por ponto de conexão do caminhão-tanque, filtros, bombas de sucção, válvula de entrada do tanque de armazenamento e transmissores de temperatura,

- pressão e vazão;
- Armazenamento e transferência: composto por tanque de armazenamento de óleo, filtros, bombas de transferência, tanques de armazenamento auxiliares para geradores diesel de emergência e sistema de combate a incêndio;
 - Fornecimento e recirculação: composto por bombas de pressurização, válvulas de recirculação, válvula de controle de pressão, válvula de entrada de óleo na fachada de queimadores, válvula de retorno de óleo para o tanque de armazenamento e transmissores de pressão, temperatura e vazão.
 - Queima: composto por válvula de entrada de óleo no queimador, válvula de ar de atomização, válvula de purga, lança de óleo, lança do ignitor, ignitor e detector de chama.

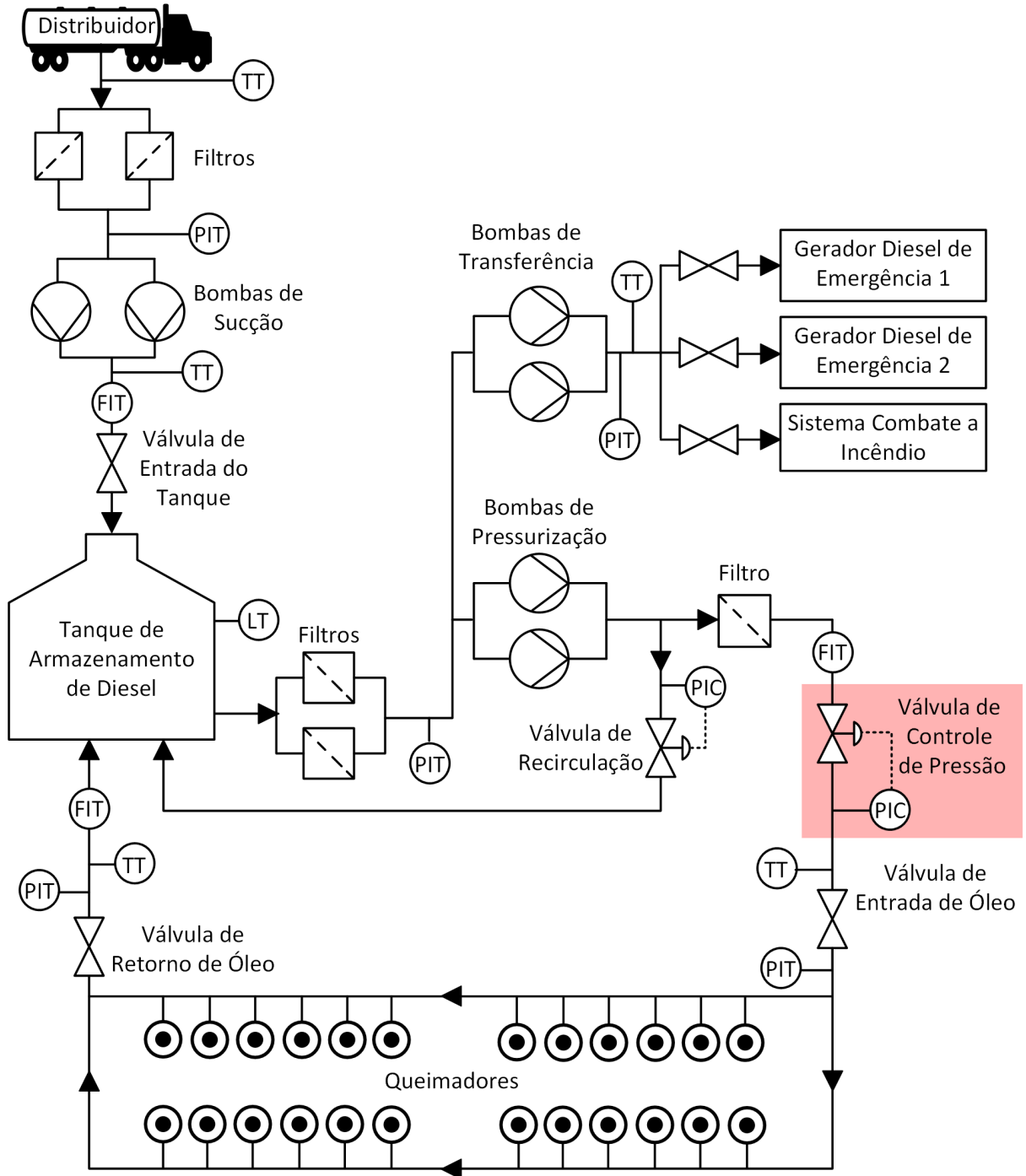
Os subsistemas *descarregamento, armazenamento e transferência* são compartilhados entre todas as UGs, enquanto *fornecimento, recirculação e queima* são individuais para cada uma delas.

O óleo diesel chega à usina através de caminhões-tanque e é armazenado em um tanque de grandes dimensões após passar por filtros para evitar a coleta de resíduos indesejados. Uma parte desse óleo pode seguir para os tanques de armazenamento auxiliares dos geradores de emergência e sistema de combate a incêndio através das bombas de transferência. As bombas de pressurização extraem do tanque o óleo que vai ser queimado na caldeira, porém uma parte desse óleo é recirculada logo após a descarga dessas bombas, o restante segue para a fachada de queimadores, passando novamente por filtros e válvulas que garantem a disponibilização do óleo para os queimadores. O combustível excedente, ou seja, aquele que não seguiu para um dos queimadores, é recirculado para o tanque de armazenamento.

De acordo com o código 85 da *National Fire Protection Association* (NFPA, 2019), que aborda os riscos para caldeiras e sistemas de combustão, é preciso garantir a disponibilidade do sistema de fornecimento de óleo combustível aos queimadores, caso contrário, por segurança, deve-se apagar imediatamente a caldeira, causando grandes prejuízos financeiros. Na usina referência deste trabalho, os valores de pressão, conforme orientação do fabricante da caldeira, devem permanecer sempre entre 3 e 12 bar para que o sistema seja considerado disponível.

Ter um bom sistema de controle de pressão da fachada dos queimadores é fundamental, tanto para segurança quanto para eficiência do processo. Manter a pressão razoavelmente constante também é importante para que cada queimador aceso obtenha aproximadamente a mesma vazão de óleo a ser queimado.

Figura 1 – Diagrama geral do processo de fornecimento de óleo combustível.



Fonte: Autor.

A figura 1 apresenta o diagrama geral do processo de fornecimento de óleo combustível para uma unidade geradora. A válvula responsável pelo controle de pressão de óleo na fachada de queimadores aparece em destaque. O quadro 1 apresenta a simbologia e terminologia de instrumentação utilizada, de acordo com a ANSI/ISA (2009).

Quadro 1 – Nomenclaturas utilizadas na figura 1.

Nomenclatura	Descrição
FIT	Transmissor e indicador de vazão
LT	Transmissor de nível
PIC	Controlador e indicador de pressão
PIT	Transmissor e indicador de pressão
TT	Transmissor de temperatura

Fonte: Autor

2.2 Controle de Pressão do Óleo Combustível

O óleo diesel é retirado do tanque de armazenamento por 2 (duas) bombas de pressurização que possuem em suas descargas uma válvula de controle que varia automaticamente sua posição para manter a pressão de óleo na saída das bombas constante, direcionando uma parte deste combustível de volta para o tanque de armazenamento.

O controle desta válvula de recirculação é descrito da seguinte forma: o desvio entre o valor de pressão medido na descarga das bombas e o valor de referência definido pelo operador através do sistema supervisório é usado como entrada de um controlador PI, que possui em sua saída o sinal de demanda de abertura da válvula.

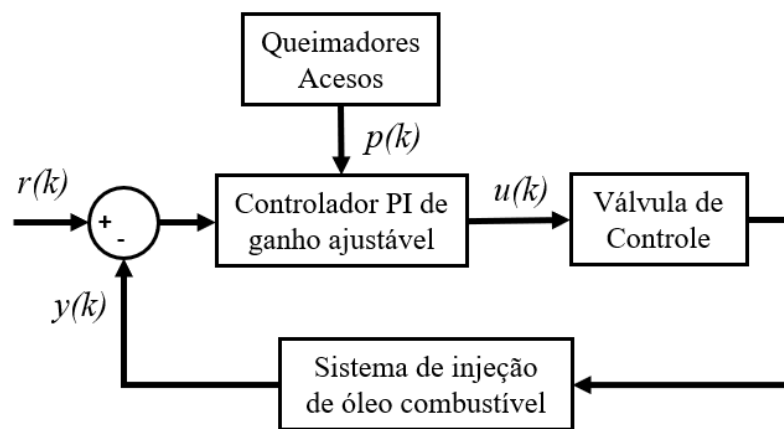
Figura 2 – Válvula de controle e transmissor de pressão.



Fonte: Autor.

O combustível que não é recirculado segue por outra linha que possui uma outra válvula de controle (figura 2) responsável por controlar a pressão de óleo na fachada dos queimadores. O controlador PI desta válvula (figura 3) tem como entrada o desvio entre o valor de referência definido pelo operador (limitado ao intervalo de 3,5 a 12 bar) e o valor de medição da pressão de entrada da fachada (figura 2). O ganho do controlador (KP) varia de acordo com a quantidade de queimadores acesos e o tempo de integração (TN) é fixo em 15s. A saída do controlador é o sinal de demanda de abertura da válvula.

Figura 3 – Malha de controle de pressão de óleo combustível.



$r(k)$: referência de pressão
 $u(k)$: posição da válvula
 $y(k)$: medição de pressão
 $p(k)$: queimadores acesos

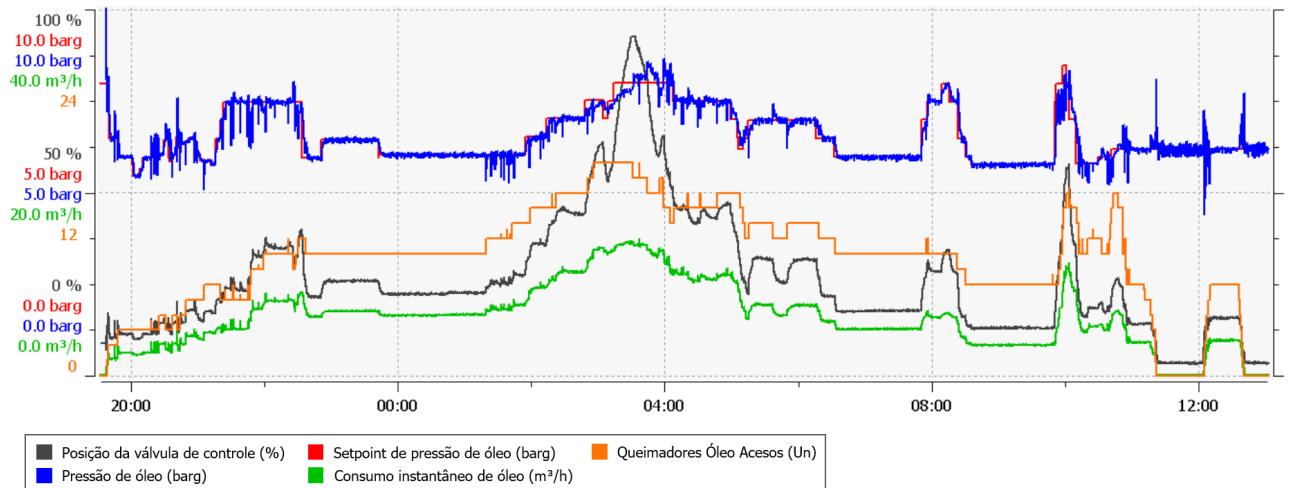
Fonte: Autor.

Por questões de segurança, esta linha possui duas válvulas pneumáticas, uma antes e outra depois da fachada, permitindo assim, a rápida interrupção do fornecimento de combustível caso necessário. O processo também conta com medição de temperatura, pressão e vazão antes e depois da fachada. O consumo instantâneo de combustível é definido pela subtração da vazão de entrada de óleo na fachada com a vazão de saída e retorno ao tanque de armazenamento. O processo também conta com redundância de instrumentos nos pontos críticos de medição, tais como temperatura e pressão do óleo na fachada de queimadores.

A figura 4 apresenta dados reais do controle de pressão durante uma partida de máquina. Nela é possível perceber que o consumo de óleo combustível aumenta à medida que os queimadores acendem. O acendimento de um queimador implica na abertura de sua respectiva válvula solenóide, que libera o fluxo de combustível para a lança. A abertura dessa válvula

solenóide faz com que a pressão sofra uma perturbação imediata fazendo com que a válvula de controle precise atuar imediatamente para compensar o desvio entre a medição de pressão e o valor de referência definido pelo operador.

Figura 4 – Comportamento da válvula de controle e variáveis relacionadas durante uma partida.



Fonte: Autor.

2.3 Sistema de Gerenciamento de Queimadores (BMS)

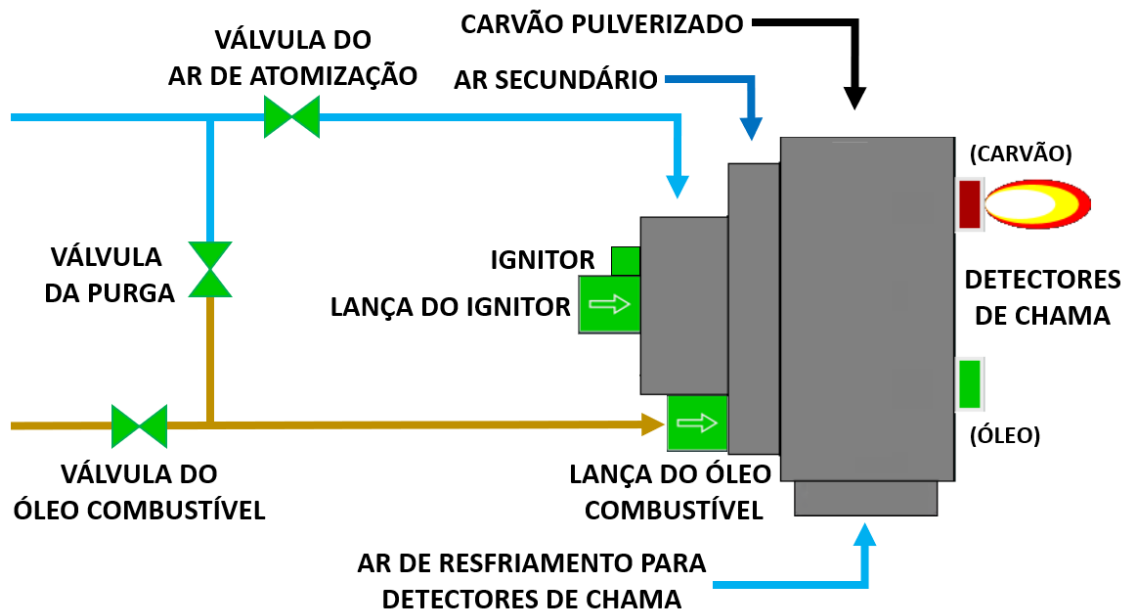
O queimador é o equipamento responsável pela introdução e pela mistura de combustível e ar na fornalha, realizando a ignição e garantindo uma combustão estável. A queima de óleo combustível é necessária para gerar calor suficiente para elevar a temperatura da caldeira até a temperatura em que o carvão pulverizado pode ser soprado para a fornalha como combustível principal, permitindo assim que a caldeira atinja todas as demandas de carga.

A figura 5 ilustra um queimador de uma usina termelétrica a carvão. Nela é possível identificar todos os componentes presentes: válvula de ar de atomização, válvula de purga, válvula de óleo, lança de óleo, lança do ignitor, ignitor, detector de chama de óleo e detector de chama de carvão, além da representação de entrada de ar de resfriamento dos detectores de chama, ar secundário e carvão pulverizado.

Para mitigar os riscos de acidentes relacionados à queima de combustível, é preciso garantir que sua utilização seja feita de forma segura, para isso é fundamental utilizar um sofisticado sistema de gerenciamento de queimadores.

O BMS é o sistema que monitora os equipamentos do processo de queima de combustível durante a partida, desligamento, operação e condições transitórias. Ele foi projetado

Figura 5 – Ilustração simplificada de um queimador.



Fonte: Autor.

para evitar operação incorreta, iniciar o processo de forma segura, apresentar ao operador os estados de todos os equipamentos, assim como também controlar o procedimento de desligamento de emergência se detectar qualquer condição insegura, fazendo com que a caldeira vá para uma condição segura, a fim de evitar explosões, protegendo assim os equipamento contra danos e as pessoas contra ferimentos ou morte (NFPA, 2019).

O foco do BMS é garantir a operação segura da fornalha e da caldeira. A confiabilidade e a disponibilidade desse sistema são cruciais para a segurança de uma usina termelétrica. O BMS é, em regra, projetado de acordo com normas definidas pela *National Fire Protection Association* (NFPA) e outras diretrizes relevantes. Geralmente o BMS é subdividido nos seguintes subgrupos:

- Purga da caldeira;
- Acendimento;
- Gerenciamento do combustível principal;
- Disparo geral por combustível, mais conhecido como MFT, do inglês *Master Fuel Trip*;

O procedimento de purga é usado apenas quando uma caldeira está em processo de partida. Isso pode ocorrer tanto quando a caldeira não for utilizada por algum período de tempo ou quando houver algum disparo da caldeira.

Antes de acender o primeiro queimador é preciso realizar a purga da caldeira. Essa ação é necessária para limpar quaisquer combustíveis residuais não queimados que possam ter

se acumulado nos dutos ou equipamentos. O procedimento de purga deve ser realizado tanto quando a caldeira estiver em processo de partida após algum período de tempo parada quanto quando o combustível principal a tiver desarmado e a caldeira estiver sendo reiniciada.

Durante a execução da purga, é realizado um teste de vazamento de óleo combustível, onde as tubulações são pressurizadas com todas as válvulas fechadas e o sistema de controle monitora se a pressão se mantém constante. Caso positivo, a sequência de purga avança para os próximos passos, caso contrário a operação é alertada sobre o vazamento e a purga é finalizada sem sucesso, não permitindo o acendimento do primeiro queimador.

A purga é necessária não apenas no período "pré-queima", mas é igualmente importante purgar a fornalha após cada desligamento para mitigar os riscos de explosão. A purga também é necessária para as válvulas e tubulações dos queimadores de óleo sempre que eles se apagam, o que é feito, normalmente, soprando ar de atomização. A seção 2.4.2 detalha esta sequência de purga.

Explosão e implosão são dois fatores importantes para projetar um BMS. De acordo com a NFPA 8502, a explosão pode ser causada devido à ignição de mistura combustível acumulada dentro do espaço confinado da fornalha, dutos da caldeira e ventiladores que transportam gases para a chaminé. O grau de explosão depende da proporção de ar presente no momento da ignição e da quantidade relativa de combustíveis acumulados. As principais causas para tal explosão podem ser as seguintes:

- Perda momentânea de chama seguida de ignição atrasada;
- Vazamento de combustível inflamado por qualquer fonte em uma fornalha apagada;
- Perda de chama de um queimador enquanto outros estão acesos;
- Apagamento completo seguido de tentativa de acendimento.

Da mesma forma, de acordo com a NFPA 8502, a implosão pode ser causada, principalmente, por uma das seguintes razões:

- Mau funcionamento de equipamentos que regulam os fluxos de gases da caldeira, resultando em exposição da fornalha à capacidade excessiva do ventilador de tiragem induzida;
- Decaimento brusco da temperatura e pressão da fornalha devido ao MFT.

De forma geral, os aspectos básicos do projeto do BMS precisam atender aos seguintes critérios:

- Inibir o acendimento da caldeira em condições inseguras;
- Garantir a conclusão satisfatória da sequência de purga antes de cada partida de queima de

- combustível para garantir que não haja sobra de combustíveis não queimados para causar uma queima secundária;
- Proteção contra condições inseguras (por exemplo, disparo por baixa pressão de óleo combustível);
 - Monitoramento de chama (óleo e carvão pulverizado) quando o queimador estiver aceso;
 - Fornecer ao operador informações através do estado dos equipamentos, alarmes e eventos.
 - Gerenciar os intertravamentos para partida e desligamento seguros de equipamentos;
 - Permitir a implementação de sequencias para partida e parada do grupo de forma adequada;
 - Intertravamentos dependentes do estado atual da caldeira;
 - Iniciação do disparo geral de combustível (MFT) que fecha todas as fontes de combustível, não apenas na extremidade do queimador, mas também a montante.
 - Possibilidade de definição de valores-alvo de parâmetros de processo (setpoint);
 - Divisão de funções de segurança e funções de controle.

O BMS precisa ser implementado em sistemas de controle à prova de falhas (fail safe), ou seja, sistemas que não perdem suas funções de segurança por avarias únicas em sensores ou atuadores. Além disso, devem ter recursos de automonitoramento e todas as falhas devem ser notificadas ao operador no momento exato para que as medidas adequadas possam ser tomadas.

Em muitos casos, especialmente em grandes projetos, é utilizada a filosofia de redundância modular tripla, também conhecida com TRM, do inglês *Triple Modular Redundancy*. Pelo TRM, as lógicas de controle são desenvolvidas considerando três canais independentes que possuem processadores e módulos E/S dedicados para cada canal. Todas as entradas relacionadas à segurança são alimentadas a cada um desses canais separadamente. Em determinadas situações, existem tripla redundância de sensores e tripla redundância de canal. Nestes casos, o valor de medição considerado para as lógicas de controle é definido pela mediana ou média aritmética dos sinais de entrada, onde é preciso ter, pelo menos, 2 dos 3 sinais válidos para se ter uma saída considerada válida.

2.4 Sequencia de Acendimento e Purga de um Queimador de Óleo Combustível

O sistema de controle permite a implementação de funções lógicas de sequências automáticas. Estas sequências são divididas em passos, que podem executar uma ou mais ações. Para avançar para o passo seguinte é preciso que as condições de transição do passo atual sejam satisfeitas, por exemplo: se a ação for a abertura de uma válvula, em regra, a condição de

transição para o próximo passo será verificar, através do *feedback* de posição da válvula, se ela realmente está aberta.

2.4.1 Acendimento

De forma resumida, as ações dos passos da sequência automática de acendimento de um queimador de óleo são os seguintes:

1. Liga um dos ventiladores de resfriamento dos detectores de chama;
2. Fecha a válvula da purga;
3. Insere a lança do óleo combustível;
4. Abre a válvula do ar de atomização;
5. Insere a lança do ignitor;
6. Ativa o centelhamento do ignitor;
7. Abre a válvula do óleo combustível;
8. Desliga o centelhamento do ignitor;
9. Retrai a lança do ignitor;

Após a execução bem sucedida desta sequência, o queimador deve permanecer aceso, consumindo óleo combustível. Se houver qualquer tipo de falha durante o procedimento de acendimento do queimador ou detecção de chama, por questões de segurança, a sequência de purga deve ser iniciada antes de tentar acendê-lo novamente.

2.4.2 Purga

A execução da sequência de purga é importante para garantir que não ficou resíduos de combustível nas tubulações. Ela deve ser realizada sempre antes do acendimento do queimador ou para apagá-lo.

Seguem abaixo, de forma resumida, as ações dos passos da sequência automática de purga de um queimador de óleo:

1. Fecha a válvula do óleo combustível;
2. Insere a lança de óleo combustível;
3. Abre a válvula do ar de atomização;
4. Insere a lança do ignitor;
5. Ativa o centelhamento do ignitor;
6. Abre a válvula da purga;

7. Desliga o centelhamento do ignitor;
8. Retrai a lança do ignitor;
9. Fecha a válvula da purga;
10. Fecha a válvula do ar de atomização;
11. Retrai a lança de óleo combustível;

2.5 Processo de partida de uma unidade geradora

Tendo visto que o foco deste trabalho é o regime transitório, em especial a partida do grupo gerador, esta seção trará, de forma resumida, algumas informações importantes sobre o processo de partida de uma usina termelétrica a carvão mineral.

Devido a alta complexidade dos processos deste tipo planta, os sistemas de automação das usinas são, em regra, bastante robustos e contam com redundâncias em todos os pontos de medição críticos e acionamentos que interferem diretamente na proteção da caldeira, turbina e gerador.

Por em operação uma usina térmica é sempre um desafio, pois a vazão, a pressão, a temperatura e as propriedades químicas do vapor precisam atingir limites bem definidos antes do vapor seguir para a turbina. Além disso, é preciso garantir o aquecimento uniforme dos elementos termicamente sensíveis para evitar o aparecimento de tensões mecânicas excessivas, que podem provocar trincas e falhas em materiais durante suas dilatações.

2.5.1 Modos de partida

O processo de partida de uma usina termelétrica a vapor pode variar de acordo o estado da planta naquele momento. As temperaturas dos metais da turbina e o tempo em que a unidade geradora encontra-se parada são as principais variáveis a serem analisadas. A definição dos valores das temperaturas variam de acordo com a especificação do fabricante da turbina. Em relação aos tempos, é definido para cada usina pelo *Manual de Procedimentos da Operação*, módulo 5, submódulo 5.11 do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A usina referência desse trabalho possui os seguintes modos de partida:

- Partida fria: turbina fora de sincronismo por mais de 48 (quarenta e oito) horas. Temperatura dos metais da turbina abaixo de 204 °C. Nesta condição, as temperaturas e pressões gerais do processo tendem a estar mais próximas da temperatura ambiente;

- Partida morna: turbina fora de sincronismo por um período entre 8 (oito) e 48 (quarenta e oito) horas. Temperatura dos metais da turbina entre 204 °C e 408 °C. Nesta condição, as temperaturas e pressões gerais do processo caíram significativamente, mas continuam distantes da temperatura ambiente;
- Partida quente: interrupção da geração por um período entre 2 (duas) e 8 (oito) horas. Temperatura dos metais da turbina entre 408 °C e 455 °C. Nesta condição, as temperaturas e pressões gerais do processo continuam relativamente altas.
- Partida muito quente: interrupção da geração por um período inferior a 2 (duas) horas. Temperatura dos metais da turbina acima de 455 °C. As temperaturas e pressões gerais do processo continuam altas.

O processo de partida pode ser dividido em 4 (quatro) etapas:

1. Preparação para partida;
2. Acendimento da caldeira;
3. Rolagem da turbina e sincronização;
4. Subida de carga.

Os procedimentos para cada etapa serão explicados de forma bem resumida nas próximas seções. Considerando que o sistema elétrico interno encontra-se completamente energizado e sem falhas, que a área de utilidades está a fornecer água bruta e desmineralizada e que o ar de serviço e o ar de instrumentação estão disponíveis.

2.5.2 Preparação da partida

Nos passos iniciais, deve-se inspecionar os principais equipamentos e sistemas e verificar se todos estão operacionais, ou seja, sem bloqueios para serviços de manutenção. Em seguida é preciso colocar em operação o sistema de água de serviço auxiliar; ligar as bombas de circulação; partir o sistema de ciclo fechado de água para garantir o resfriamento dos equipamentos; fazer o alinhamento do circuito de condensados e água de alimentação; partir a linha de ar e gases (aquecedores de ar regenerativos, ventiladores induzidos, ventiladores forçados e dentre outros equipamentos) etc.

Antes de acender a caldeira é preciso purgá-la, ou seja, é preciso ventilar a câmara de combustão e dutos da linha de ar e gases para remover possíveis resíduos de gases combustíveis que podem provocar explosão durante o processo de acendimento. Durante o procedimento de purga é realizado um teste de vazamento na linha de óleo combustível para garantir que não

há perda de pressão nas tubulações ou equipamentos deste sistema. Se não houver qualquer anomalia durante esses procedimentos, o acendimento é liberado pelo sistema de controle.

2.5.3 *Acendimento da Caldeira*

Como o carvão mineral é um combustível de alta temperatura de ignição, é preciso acender a caldeira utilizando um combustível auxiliar, com baixo ponto de ignição, como o óleo diesel. O acendimento de um queimador é realizado através de uma sequencia automática que verifica se há vazão mínima de ar secundário na fila (15 kg/s), insere a lança de óleo, abre a válvula de ar de atomização, insere a lança do ignitor, inicia o centelhamento do ignitor, abre a válvula que libera a entrada de óleo diesel, desliga o centelhamento e retrai a lança do ignitor.

O gradiente de elevação de temperatura deve ficar entre 1,1 °C e 1,5 °C, este valor depende da temperatura do metal. Normalmente acende-se um queimador a cada 20 minutos até completar 8 queimadores em uma pressão de óleo de 6,5 barg. Com a pressão do tubulão acima de 10 barg é possível estabelecer o vapor auxiliar. Depois, deve-se alinhar o vapor de selagem. Com a turbina selada, já é possível fazer vácuo no condensador. Deve-se abrir a válvula de *bypass* de alta pressão e iniciar a pressurização e aquecimento do reaquecedor. À medida que a caldeira é aquecida, as temperaturas e pressões internas aumentam e a água começa a evaporar. Nesta fase inicial, o vapor ainda não atende às condições necessárias para ser expandido na turbina. Portanto, ele é recirculado na caldeira até que essas condições necessárias sejam alcançadas. A pressão na caldeira e o fluxo de vapor são controlados usando válvulas de *bypass* da turbina.

Em seguida, deve-se preparar a partida do primeiro moinho e colocá-lo em operação para que o carvão mineral assuma a queima como combustível principal, substituindo o óleo diesel.

Antes de iniciar a rolagem (ou partida) da turbina, é preciso verificar os sistemas auxiliares dela, tais como: sistemas de óleo (controle, levantamento, lubrificação e selagem), vácuo, pressão de H_2 e se os controles estão em modo automático. Adicionalmente, é preciso analisar se as condições químicas do vapor estão satisfeitas, se há pelo menos 40 barg de pressão no tubulão, se há um moinho com vazão mínima de carvão e se as pressões e temperaturas do reaquecedor e superaquecedor estão conforme limites determinados.

2.5.4 Rolagem da turbina e sincronização

A rolagem da turbina é iniciada em uma rampa de aceleração de 150 rpm/min até atingir 600 rpm, onde permanece por alguns minutos para verificações na integridade da máquina (alinhamento de refrigeração do óleo de lubrificação e selagem, análise de vibrações etc.). Em seguida, é definido o valor de referência de 3500 rpm, onde é feita a transferência do controle das válvulas aceleradoras para as válvulas governadoras. Após a comutação, a turbina segue para 3600 rpm em uma rampa de 50 rpm/min.

Durante toda a rolagem da turbina é fundamental observar, dentre outras variáveis importantes, as medições de deslocamento axial e excentricidade do rotor, o diferencial rotor/carga e o diferencial de temperatura entre a parte superior e a inferior das turbinas de alta e média pressão.

Para o fechamento do disjuntor de conexão do gerador à subestação é preciso que o gerador esteja em sincronismo com o sistema elétrico, ou seja, com a mesma frequência, mesma fase e mesma tensão.

A partir deste momento quem define qual a carga da unidade geradora é o ONS que, em regra, passa o plano de geração antecipadamente. Entretanto, todos os comandos são realizados pela sala de controle da própria usina.

2.5.5 Subida de carga

Nos passos iniciais, é realizado o alinhamento dos trocadores de calor dos aquecedores de vapor de alta e baixa pressão. O segundo moinho deve entrar em operação para permitir o aumento da alimentação de carvão e, conseqüentemente, o aumento da carga da caldeira. A válvula de *bypass* de alta pressão fecha por volta de 1/3 da carga nominal e a turbina passa a controlar a pressão ao invés dos MW diretamente. O terceiro moinho entra em operação por volta de metade da carga nominal da caldeira.

Os queimadores a óleo diesel são apagados quando a carga da caldeira ultrapassa 40% e a vazão de carvão de seu respectivo moinho possui, pelo menos, 25 t/h.

3 ANÁLISE DE PARTIDAS

Como mencionado no capítulo anterior, o procedimento a ser adotado em uma partida depende da situação atual da planta no momento do início do processo. Quanto mais tempo a caldeira e a turbina passarem paradas, maior será a tendência de seus componentes se aproximarem da temperatura ambiente, fazendo com que a duração de partida da unidade geradora seja maior. O inverso também é válido. Partidas imediatas após disparos levam bem menos tempo. Isso se dá, pois, é preciso respeitar as curvas de aquecimento dos componentes termicamente sensíveis, para que as expansões ocorram de forma uniforme. Caso contrário, devido ao aquecimento desigual, ocorrerá uma expansão desigual que pode levar à deformação permanente do rotor da turbina, por exemplo, causando grandes prejuízos.

O modo de partida da usina referência desse trabalho é definido automaticamente pelo sistema de controle da turbina de acordo com as medições de temperatura do metal do primeiro estágio e temperatura da primeira pá da turbina de média pressão. A temperatura mais baixa entre elas é considerada para definir o modo da seguinte forma:

- Partida fria: temperatura abaixo de 204 °C;
- Partida morna: temperatura entre 204 °C e 408 °C;
- Partida quente: temperatura entre 408 °C e 455 °C;
- Partida muito quente: temperatura acima de 455 °C.

O procedimento de partida determina, por exemplo, a rampa de subida da carga da caldeira para evitar deformação nos dutos e equipamentos de acordo com suas temperaturas naquele momento. O tempo médio de partida é diferente para cada modo, partidas muito quentes são bem mais rápidas que as frias. De qualquer forma, a duração de uma partida pode variar de acordo com eventuais problemas em campo que necessitem de intervenção imediata para avançar com o processo.

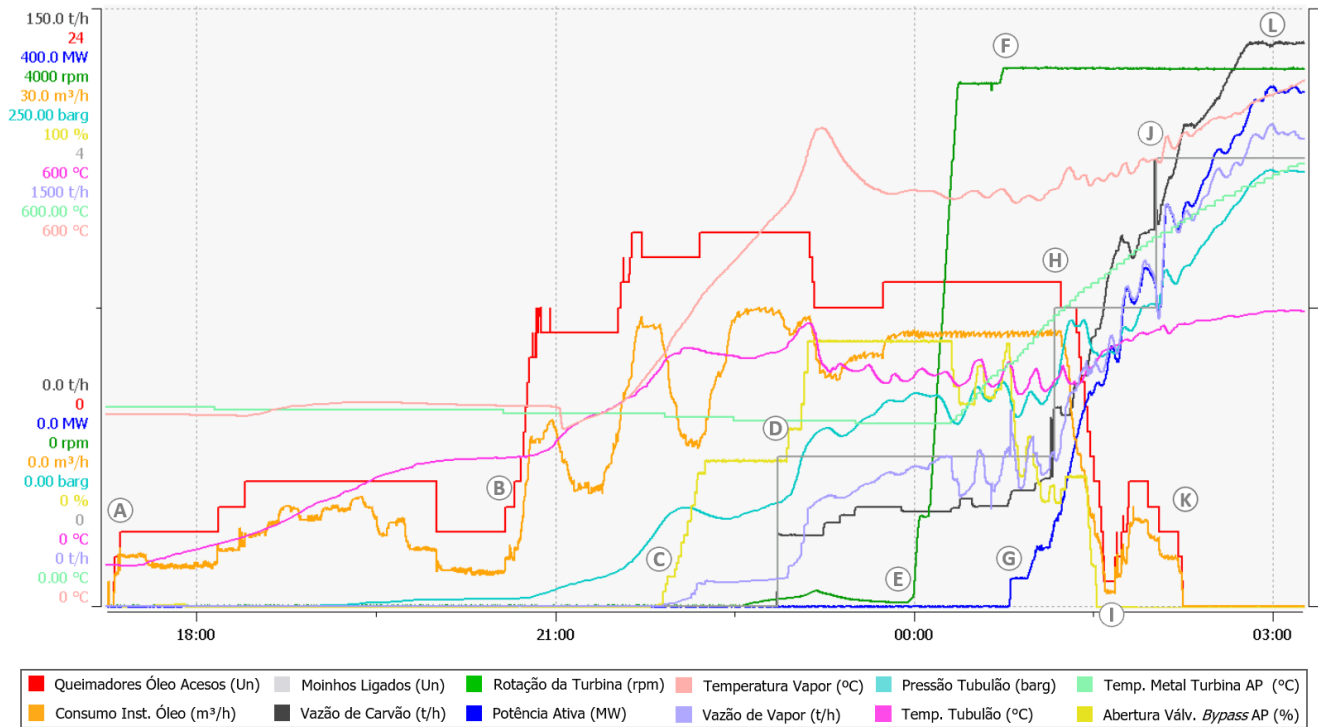
As seções seguintes apresentam dados reais de partidas coletados diretamente do sistema de controle das unidades geradoras.

3.1 Análise do Processo

A figura 6 mostra o gráfico de uma partida morna em uma das unidades geradoras de 360MW. Nela é possível ver a variação de parâmetros importantes, como: quantidade de queimadores de óleo acesos, consumo instantâneo de óleo, quantidade de moinhos ligados, vazão

de carvão, rotação da turbina, potência ativa do gerador, temperatura de vapor, vazão de vapor, pressão no tubulão, temperatura no tubulão, temperatura do metal de primeiro estágio da turbina (alta pressão) e percentual de abertura da válvula de *bypass* (alta pressão).

Figura 6 – Variáveis importantes para análise de uma partida.



Fonte: Autor.

Alguns dos momentos mais críticos da partida foram destacados na figura 6, com letras, sendo eles:

- A) Acendimento dos primeiros queimadores, após finalização da purga da caldeira;
- B) Acendimento de mais uma fila de queimadores;
- C) Abertura da válvula de *bypass* de alta pressão;
- D) Partida do primeiro moinho de carvão;
- E) Início da rolagem da turbina;
- F) Turbina em rotação nominal (3600 rpm / 60 Hz);
- G) Sincronismo do gerador ao Sistema Interligado Nacional (SIN);
- H) Partida do segundo moinho e início de desligamento dos queimadores a óleo. Carga da caldeira acima de 40%;
- I) Fechamento completo da válvula de *bypass* de alta pressão e acendimento dos queimadores da fila do próximo moinho a ser partido;

- J) Partida do terceiro moinho;
- K) Todos os queimadores à óleo combustível apagados;
- L) Unidade geradora em carga base (360MW);

3.2 Análise do Consumo de Óleo Combustível

Esta seção apresenta dados de partidas coletados em todos os modos para permitir a comparação entre eles. Esta análise é importante para ver, em gráficos e números, a diferença entre os modos e entender melhor o comportamento do sistema, além de fornecer informações relevantes para o embasamento da importância de se desenvolver novas lógicas de controle capazes de reduzir o consumo mantendo a segurança e disponibilidade do sistema.

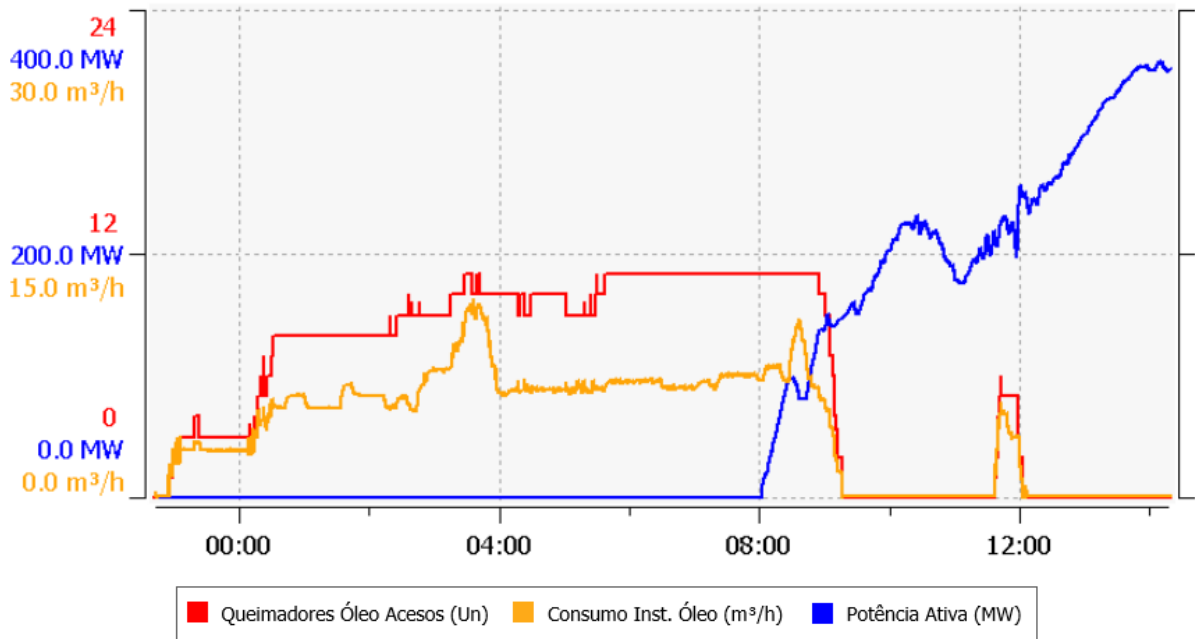
3.2.1 Partida Fria

A partida representada pela figura 7 levou 14 horas e 48 minutos entre o acendimento da caldeira e o momento em que a unidade geradora chegou à carga base. Destes, houve fornecimento de óleo combustível aos queimadores em 10 horas e 44 minutos, totalizando um consumo de 66 m³ de diesel. A partida da figura 8 levou um pouco mais de tempo, foram 15 horas e 24 minutos entre acendimento e carga base, consumindo 92 m³ de diesel durante as 12 horas e 58 minutos de fornecimento de combustível aos queimadores.

3.2.2 Partida Morna

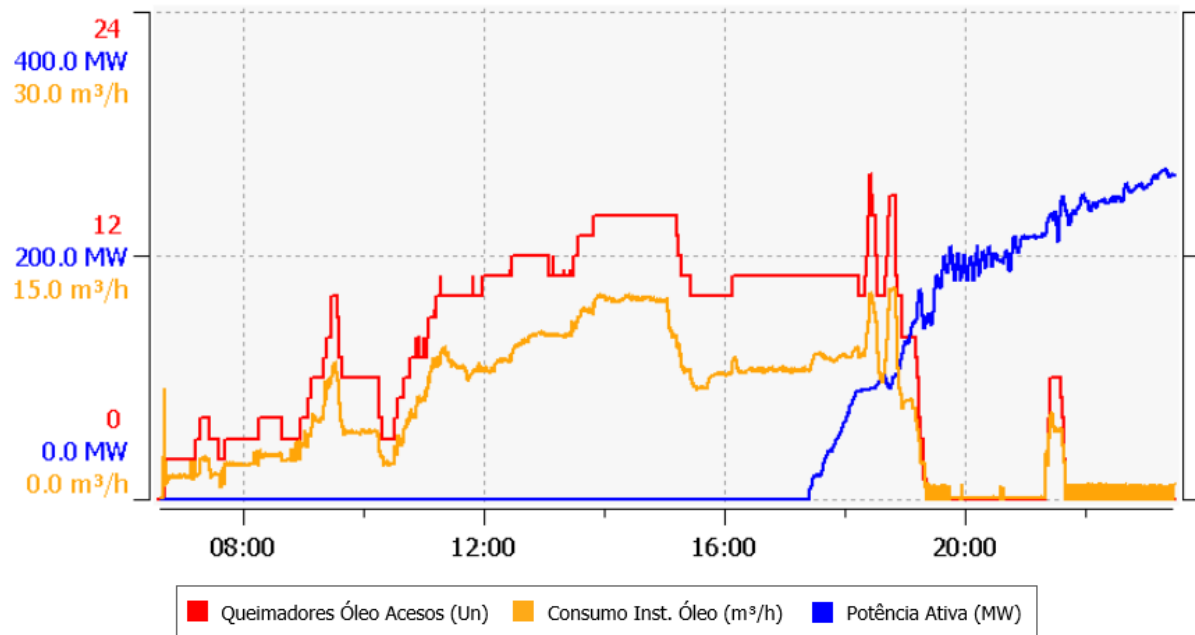
A partida representada pela figura 9 levou exatas 10 horas entre o acendimento da caldeira e o momento em que a unidade geradora chegou à carga base. Destes, houve fornecimento de óleo combustível aos queimadores em 8 horas e 58 minutos, totalizando um consumo de 69 m³ de diesel. A partida da figura 10 levou 9 horas e 5 minutos entre acendimento e a carga solicitada pelo ONS (240MW), consumindo exatamente o mesmo volume de óleo diesel: 67 m³. O fornecimento de combustível aos queimadores durou 8 horas e 34 minutos.

Figura 7 – Partida fria 1.



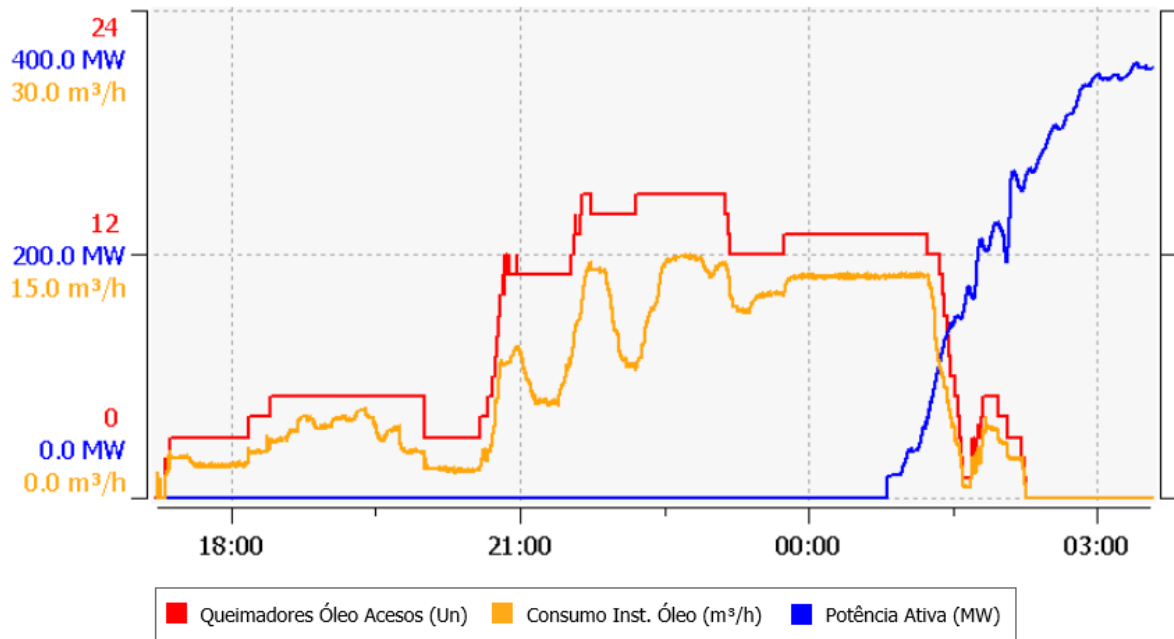
Fonte: Autor.

Figura 8 – Partida fria 2.



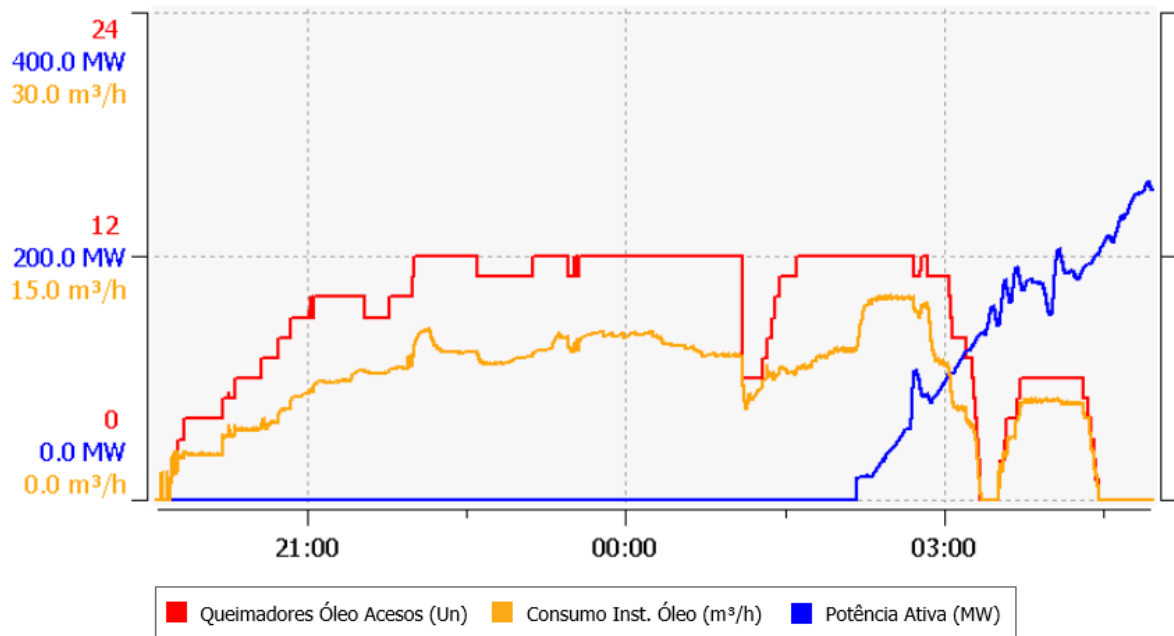
Fonte: Autor.

Figura 9 – Partida morna 1.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Partida morna 2.



Fonte: Autor.

3.2.3 Partida Quente

A partida representada pela figura 11 levou 6 horas e 36 minutos entre o acendimento da caldeira e o momento em que a unidade geradora chegou à carga base. Destes, houve fornecimento de óleo combustível aos queimadores em 4 horas e 15 minutos, totalizando um consumo de 19 m³ de diesel. A partida da figura 12 levou 4 horas e 49 minutos entre acendimento e a carga solicitada pelo ONS (240MW), consumindo 20 m³ de diesel durante as 4 horas e 27 minutos de fornecimento de combustível aos queimadores.

3.2.4 Partida Muito Quente

Na figura 13 é apresentada uma partida que levou 5 horas e 48 minutos entre o acendimento e a carga base. Deste período, houve injeção de óleo em 4 horas e 28 minutos, totalizando um consumo de 22 m³ de combustível. A partida da figura 14 levou 3 horas e 50 minutos entre acendimento e a carga solicitada pelo ONS (240MW), consumindo 20 m³ de diesel em 3 horas e 39 minutos de injeção de combustível.

Figura 11 – Partida quente 1.

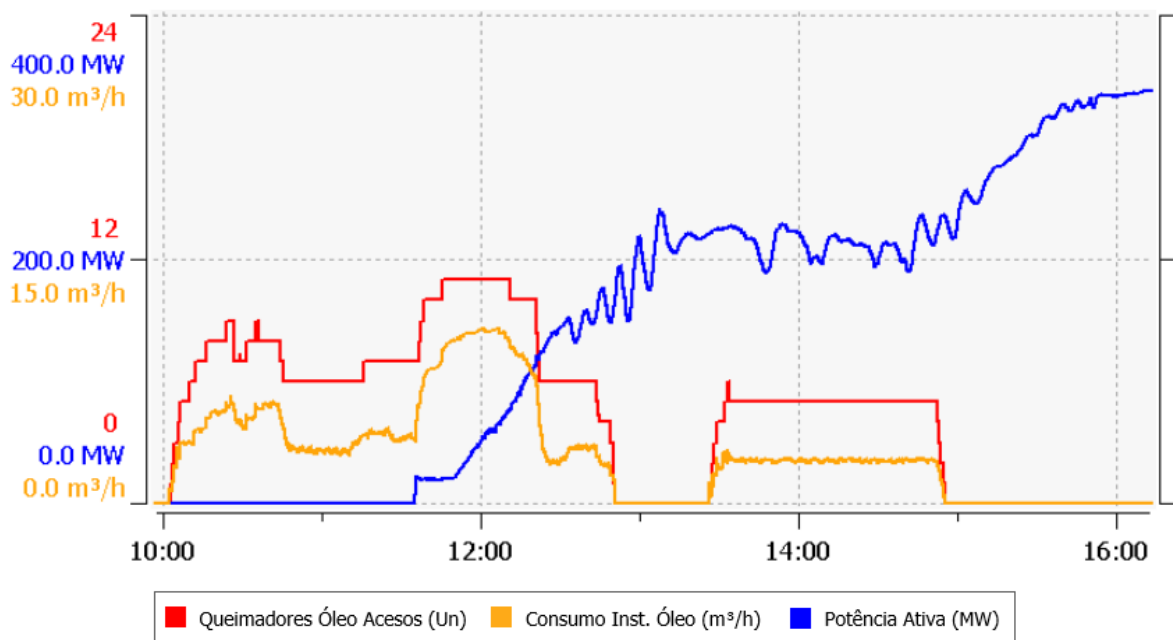
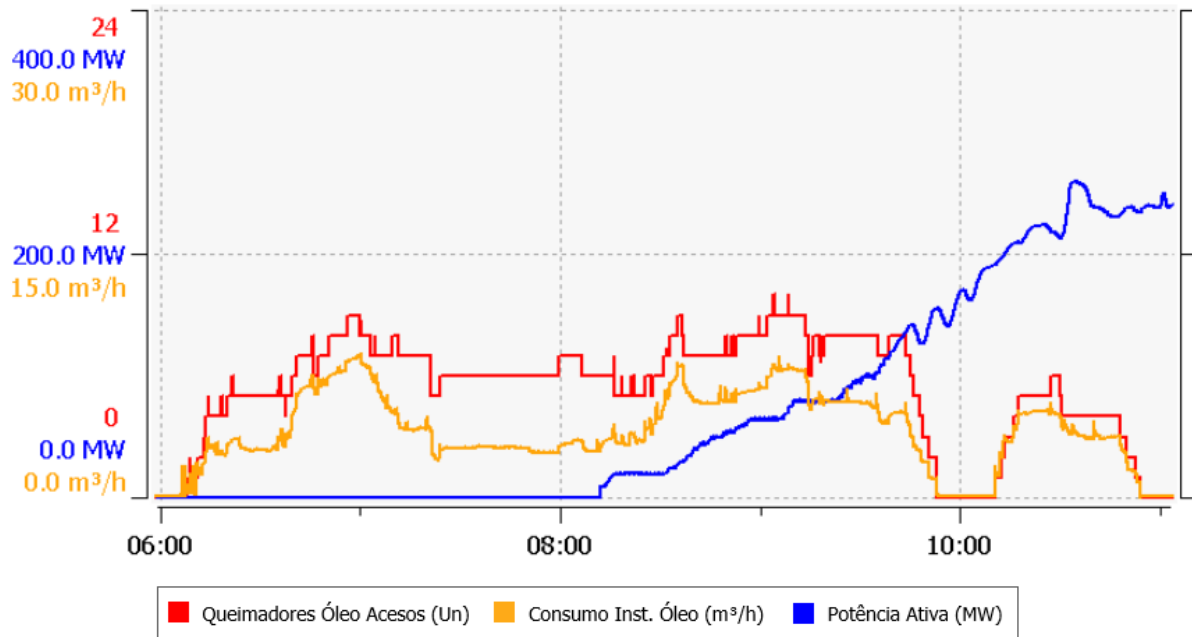
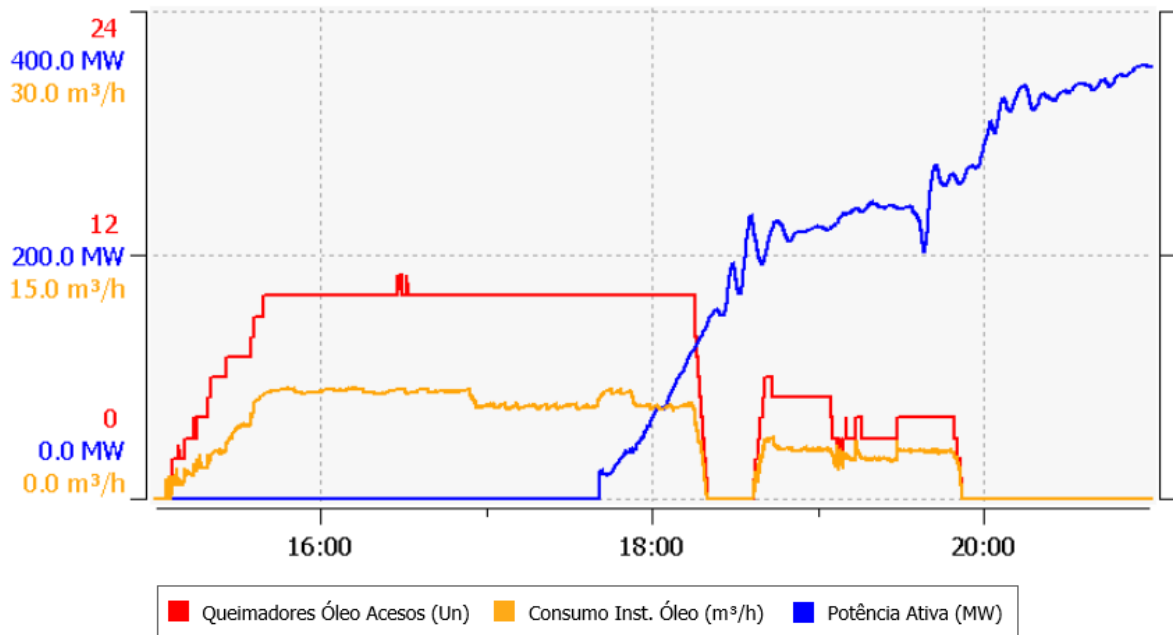


Figura 12 – Partida quente 2.



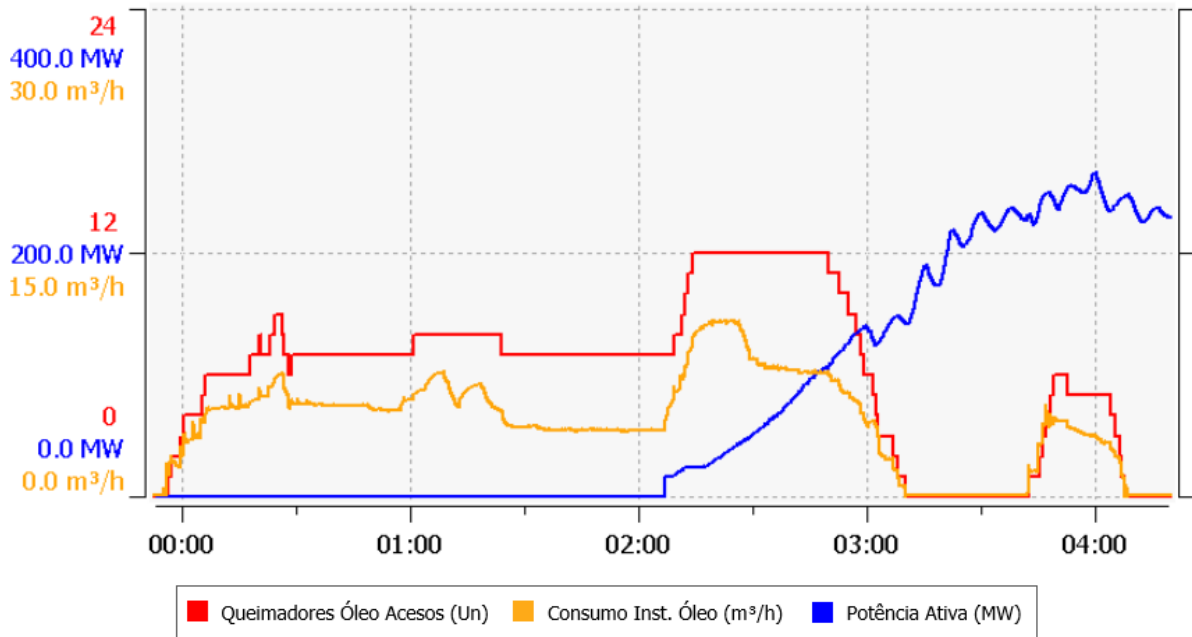
Fonte: Autor.

Figura 13 – Partida muito quente 1.



Fonte: Autor.

Figura 14 – Partida muito quente 2.



Fonte: Autor.

3.3 Comparação entre as partidas

A tabela 1 mostra a compilação dos dados das seções anteriores para facilitar a comparação e a melhor compreensão entre a diferença de consumo das partidas.

Tabela 1 – Comparação de partidas entre os diferentes modos

Modo	Partida	Duração	Duração	Consumo
		Partida Completa	Injeção Óleo	Combustível
Fria	1	14h48min	10h44min	66 m ³
	2	15h24min	12h58min	92 m ³
Morna	1	10h	8h58min	69 m ³
	2	9h5min	8h34min	67 m ³
Quente	1	6h36min	4h15min	19 m ³
	2	4h49min	4h27min	20 m ³
Muito Quente	1	5h48min	4h28min	22 m ³
	2	3h50min	3h39min	20 m ³

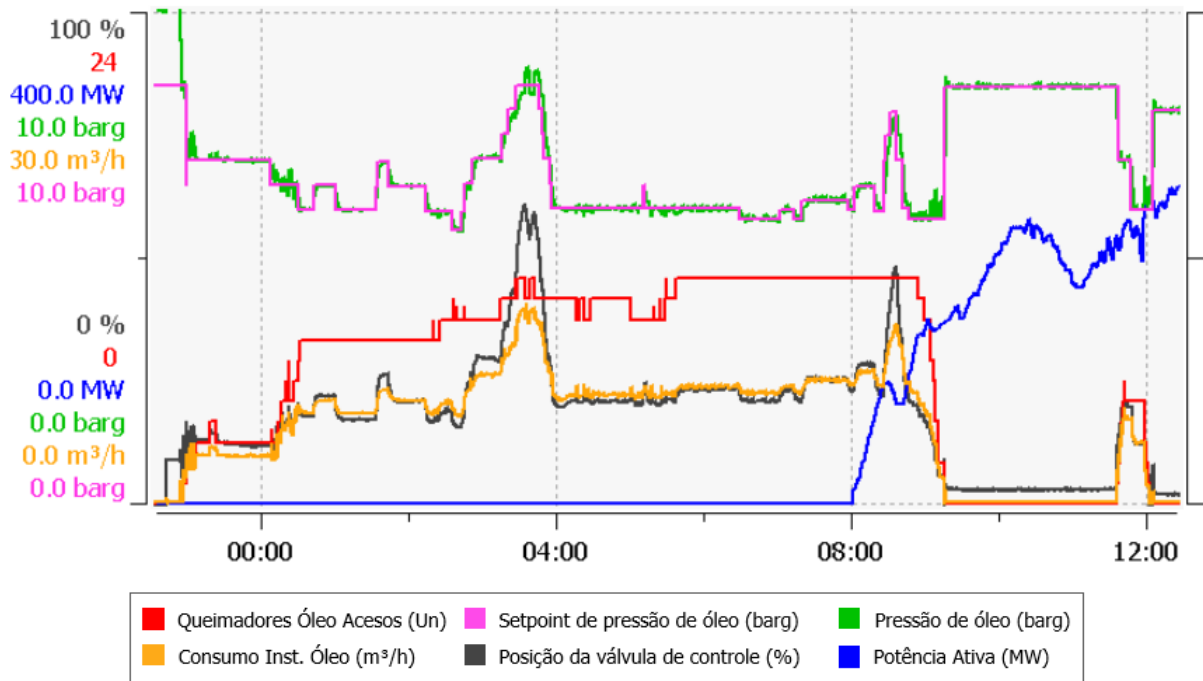
Fonte: Autor.

Percebe-se que, como o processo de partida na condição “fria” é mais complexo do

ponto de vista das tensões térmicas, ele torna-se naturalmente mais demorado que os demais, fazendo com que se consuma mais óleo combustível. Entretanto, a duração da partida não é o único fator determinante no consumo de combustível como pode-se perceber através dos dados coletados. O tempo de injeção de combustível da partida *Morna 2*, por exemplo, foi 20% menor que o da *Fria 1*, porém consumiu 1 m³ de diesel a mais.

As figuras 15 e 16 reapresentam as partidas *Fria 1* e *Morna 2*, respectivamente, acrescentando algumas variáveis do sistemas de injeção de óleo aos queimadores: pressão de óleo combustível, *setpoint* de pressão e posição da válvula automática que controla a pressão.

Figura 15 – Partida fria 1 com dados de pressão de óleo combustível.



Fonte: Autor.

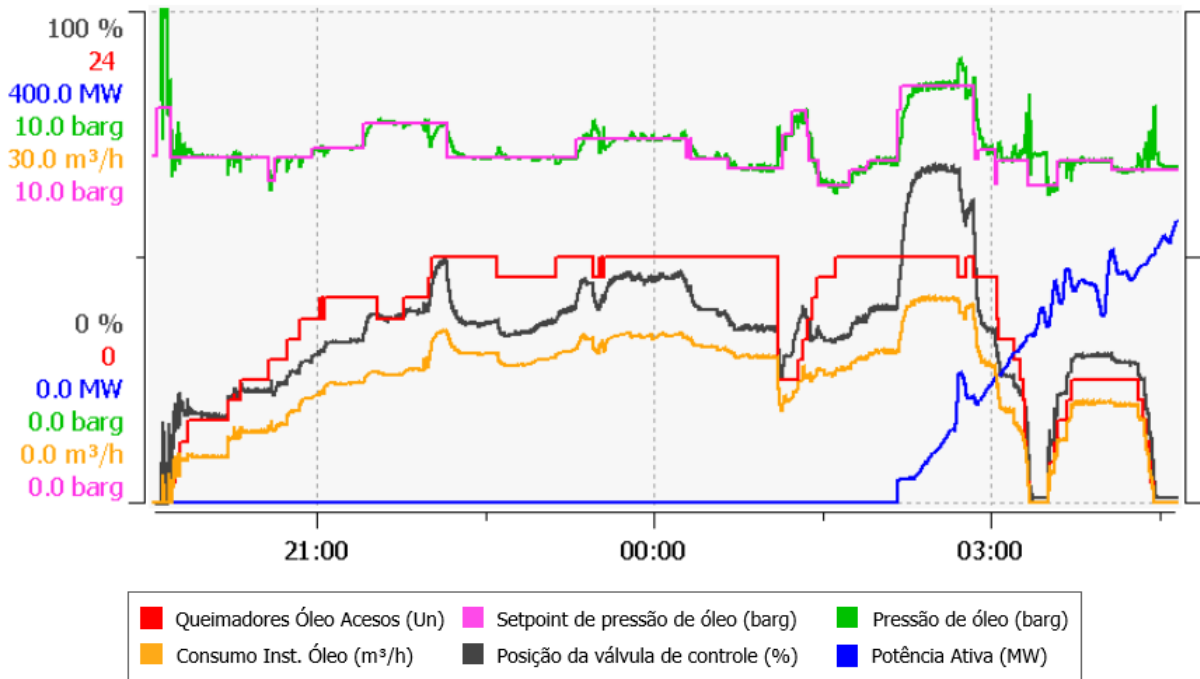
A tabela 2 apresenta os valores médios de pressão das partidas de acordo com os dados coletados do sistema de controle da usina.

Tabela 2 – Comparação entre as partidas Fria 1 e Morna 2

Partida	Consumo	Consumo	Duração	Pressão
	Total	Médio	Injeção	Valor Médio
Fria 1	66 m ³	6,14 m ³ /h	10h44min	6,41 barg
Morna 2	67 m ³	7,81 m ³ /h	8h34min	7,24 barg

Fonte: Autor.

Figura 16 – Partida morna 2 com dados de pressão de óleo combustível.



Fonte: Autor.

Percebe-se que a pressão de óleo combustível tem forte influência sobre o consumo de diesel durante a partida. Para validar essa teoria, foi feita a comparação entre as partidas *Quente 2* e *Muito Quente 1* que tiveram o mesmo tempo de fornecimento de óleo combustível aos queimadores, mas a partida *Muito Quente 1* consumiu 2 m³ a mais.

Tabela 3 – Comparação entre as partidas Quente 2 e Muito Quente 1

Partida	Consumo	Consumo	Duração	Pressão
	Total	Médio	Injeção	Valor Médio
Quente 2	20 m³	4,44 m³/h	4h27min	7,07 barg
Muito Quente 1	22 m³	4,87 m³/h	4h28min	7,83 barg

Fonte: Autor.

A definição do valor de referência (setpoint) de pressão de óleo combustível é feita manualmente pelo operador, que, além de possuir outras diversas atribuições críticas durante o processo de partida, precisa buscar um equilíbrio entre economizar combustível e ter pressão suficiente para manter as chamas acesas com segurança. O desenvolvimento de uma lógica de controle para definição automática do valor ótimo de *setpoint* de pressão traria ganhos consideráveis ao processo reduzindo o consumo de óleo.

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA SOBRE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS LPV

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre a estrutura do modelo LPV-ARX e o método de mínimos quadrados para a identificação dos parâmetros dos modelos LPV. São abordados o caso SISO, que possui uma entrada e uma saída, e o caso MISO, que permite múltiplas entradas e apenas uma saída.

As técnicas de identificação são vantajosas e possuem grande aplicabilidade em processos que possuem elevado grau de complexidade, sujeitos à diversas fontes de incertezas e parâmetros físicos. Em vista disso, um método de identificação matemático do tipo caixa-preta permite a obtenção de modelos matemáticos através de dados de entrada e saída (E/S) coletados experimentalmente.

Dentre as abordagens de identificação de sistemas não-lineares, destacam-se os métodos baseados em sistemas LPV (NOGUEIRA *et al.*, 2018; TÓTH, 2010), os quais permitem a obtenção de modelos que capturam a dinâmica do sistema para um conjunto de condições de operação.

4.1 Modelo LPV-ARX caso SISO

O modelo utilizado é um modelo autorregressivo com entradas exógenas (ARX) de tempo discreto que possui coeficientes dependentes de parâmetros variantes no tempo, denominado de modelo LPV-ARX. Este modelo pode ser escrito da seguinte forma:

$$A(q^{-1}, p)y(k) = B(q^{-1}, p)u(k) + e(k), \quad (4.1)$$

onde q^{-1} é o operador de atraso discreto, $k \in \mathbb{Z}$ é o índice de tempo discreto, $u(k) \in \mathbb{R}$ e $y(k) \in \mathbb{R}$ são, respectivamente, os sinais de entrada e saída do modelo no instante k . A variável $e(k) \in \mathbb{R}$ é o erro de estimação, que é considerada como um ruído branco de média zero e incorpora os ruídos de leitura e os erros de modelagem. O parâmetro variante no tempo $p(k) := p \in \mathbb{R}$, definido como variável de ajuste, é um parâmetro medido ou estimado associado à condição de operação da planta (BAMIEH; GIARRE, 2002). Os polinômios do modelo possuem a seguinte estrutura:

$$B(q^{-1}, p) = b_0(p) + b_1(p)q^{-1} + \dots + b_{n_b}(p)q^{-n_b}, \quad (4.2)$$

$$A(q^{-1}, p) = 1 + a_1(p)q^{-1} + \dots + a_{n_a}(p)q^{-n_a}, \quad (4.3)$$

onde n_a e n_b são os graus dos polinômios e definem a ordem do modelo. As funções dependentes dos coeficientes $a_i(p)$ e $b_i(p)$ são definidas como:

$$a_i(p) = a_i^1 + a_i^2 p + \dots + a_i^N p^{N-1}, i = 1 \dots n_a, \quad (4.4)$$

$$b_j(p) = b_j^1 + b_j^2 p + \dots + b_j^N p^{N-1}, j = 1 \dots n_b, \quad (4.5)$$

onde N representa o grau polinomial de dependência entre o modelo e a variável de ajuste. Observe que quando $N = 1$ o modelo resultante se torna um ARX clássico.

4.1.1 Representação matricial do modelo LPV-ARX caso SISO

O modelo LPV-ARX apresentado pode ser representado em uma forma matricial equivalente da seguinte forma:

$$y(k) = \phi(k)^T \psi(k), \quad (4.6)$$

$$\phi(k) = \varphi(k) \otimes \eta(k), \quad (4.7)$$

$$\varphi(k) = [-y(k-1) \dots -y(k-n_a) \ u(k-1) \dots u(k-n_b)]^T, \quad (4.8)$$

$$\eta(k) = [1 \ p(k) \ p(k)^2 \ \dots \ p(k)^N]^T, \quad (4.9)$$

$$\psi = \begin{pmatrix} a_{10} & a_{11} & \dots & a_{1N} \\ a_{20} & a_{21} & \dots & a_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n_a 0} & a_{n_a 1} & \dots & a_{n_a N} \\ b_{10} & b_{11} & \dots & b_{1N} \\ b_{20} & a_{21} & \dots & b_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n_b 0} & b_{n_b 1} & \dots & b_{n_b N} \end{pmatrix}_{(n_a+n_b) \times N+1}, \quad (4.10)$$

onde $\psi \in \mathbb{R}^{n_a+n_b}$ é o vetor de coeficientes a serem identificados a_{ij} , onde $i = 1 \dots n_a, j = 0 \dots N$ concatenado com o vetor de coeficientes b_{ij} , onde $i = 1 \dots n_b, j = 0 \dots N$. T representa o operador transposto (BAMIEH; GIARRE, 2002). A operação \otimes denota o produto de Kronecker entre os operadores $\varphi(k) \in \mathbb{R}^{n_a+n_b}$ e $\eta(k) \in \mathbb{R}^N$ resultando em $\phi(k) \in \mathbb{R}^{N(n_a+n_b)}$.

4.1.2 Algoritmo de Identificação LPV-ARX caso SISO

O algoritmo de identificação é baseado no modelo LPV descrito na Seção 4.1, onde conjuntos de dados de entradas e saídas (E/S) são coletados juntamente com os valores da variável de ajuste com o sistema operando em diferentes condições de operação.

A representação regressora (equação 4.6) permite que seja feita uma estimação da saída do modelo $\hat{y}(k)$ para cada instante de tempo k por meio do estimador de mínimos quadrados (TÓTH, 2010; BAMIEH; GIARRE, 2002). Esta estimação da saída permite o cálculo dos coeficientes de A e B presentes em ψ (GIDON *et al.*, 2021)

$$\psi = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi Y, \quad (4.11)$$

de forma a minimizar o erro quadrático médio da saída estimada, onde

$$Y = [y(1) \quad y(2) \quad \dots \quad y(N_d)]^T, \quad (4.12)$$

$$\Phi = [\phi(1)^T \quad \phi(2)^T \quad \dots \quad \phi(N_d)^T]^T, \quad (4.13)$$

com N_d representando o número de amostras coletadas.

4.2 Modelo LPV-ARX caso MISO

Nesta subseção será apresentada a estrutura do modelo LPV-ARX para o caso MISO, que permite múltiplas entradas e única saída.

Dada as equações de entrada e saída do LPV-ARX MISO:

$$y(k) = - \sum_{i=1}^{n_a} a_i(p(k))y(k-i) + \sum_{j=1}^{n_b} b_j(p(k))u(k-j) + \omega(k), \quad (4.14)$$

onde $a_i \in \mathbb{R}$ e $b_j \in \mathbb{R}^{n_u}$ são funções de $p(k)$; $\omega(k) \in \mathbb{R}$ é o vetor de perturbação aditiva e pode ser considerado de média zero como ruído branco de tempo discreto com distribuição normal quando aplicado a uma regressão linear; $y(k) \in \mathbb{R}^{n_y}$ é o sinal de saída e $u(k) \in \mathbb{R}^{n_u}$ é o vetor de entrada:

$$u(k) = \begin{pmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_{n_u}(k) \end{pmatrix}. \quad (4.15)$$

4.2.1 Representação matricial do modelo LPV-ARX caso MISO

A equação (4.14) pode ser expandida da seguinte forma:

$$y(k) = - \sum_{i=1}^{n_a} a_i(p(k))y(k-i) + \sum_{j=1}^{n_b} b_{u_1j}(p(k))u_1(k-j) + \dots + \sum_{j=1}^{n_b} b_{n_uj}(p(k))u_{n_u}(k-j). \quad (4.16)$$

Substituindo cada soma por uma matriz, obtém-se a seguinte representação vetorial equivalente a 4.14:

$$y(k) = -A(p(k))y_0(k) + B(p(k))u_0(k), \quad (4.17)$$

onde $y_0(k)$ e $u_0(k)$ são, respectivamente, a saída e os vetores regressivos de entrada:

$$y_0(k) = \begin{pmatrix} y(k-1) \\ \vdots \\ y(k-n_a) \end{pmatrix}_{n_a \times 1}, \quad u_0(k) = \begin{pmatrix} u_1(k-1) \\ \vdots \\ u_1(k-n_b) \\ u_2(k-1) \\ \vdots \\ u_2(k-n_b) \\ \vdots \\ u_{n_u}(k-1) \\ \vdots \\ u_{n_u}(k-n_b) \end{pmatrix}_{n_u n_b \times 1} \quad (4.18)$$

e $A(p(k))$ e $B(p(k))$ são vetores na forma reduzida:

$$A(p(k)) = \begin{pmatrix} a_1(p(k)) & a_2(p(k)) & \dots & a_{n_a}(p(k)) \end{pmatrix}_{1 \times n_a}, \quad (4.19)$$

$$B(p(k)) = \begin{pmatrix} b_{u_1}(p(k)) & b_{u_2}(p(k)) & \dots & b_{n_u}(p(k)) \end{pmatrix}_{1 \times n_u n_b}. \quad (4.20)$$

Usando a forma expandida de coeficiente $b_{u_i}(p(k))$:

$$b_{u_i}(p(k)) = \begin{bmatrix} b_{1,u_i}(p(k)) & b_{1,u_i}(p(k)) & \dots & b_{n_b,u_i}(p(k)) \end{bmatrix}, \quad (4.21)$$

o vetor B pode ser expandido para:

$$B(p(k)) = \begin{pmatrix} b_{1,u_1} & \dots & b_{n_b,u_1} & b_{1,u_2} & \dots & b_{n_b,u_2} & \dots & b_{1,u_{n_u}} & \dots & b_{n_b,u_{n_u}} \end{pmatrix}_{1 \times n_u n_b}, \quad (4.22)$$

a dependencia de $p(k)$ de cada elemento de $B(p(k))$ é omitida por simplicidade.

Considerando uma dependência polinomial de n_p^{th} -ordem em $p(k)$, os termos dos vetores $A_\mu(p(k))$ e $B_\mu(p(k))$ devem ter as formas genéricas:

$$a_j(p(k)) : \alpha(p(k)) = \alpha_0 + \alpha_1 p(k) + \alpha_2 p(k)^2 + \cdots + \alpha_n p(k)^{n_p}, \quad (4.23)$$

$$b_{u_w,j}(p(k)) : \beta(p(k)) = \beta_0 + \beta_1 p(k) + \beta_2 p(k)^2 + \cdots + \beta_n p(k)^{n_p}. \quad (4.24)$$

Usando (4.23) e (4.24), pode-se obter a seguinte representação expandida para (4.18)-(4.22):

$$y(k) = -\bar{A}(p(k))\bar{y}_0 + \bar{B}(p(k))\bar{u}_r, \quad (4.25)$$

$$\bar{y}_0(k) = y_0(k) \otimes \begin{pmatrix} 1 & p(k) & \cdots & p(k)^{n_p} \end{pmatrix}^T, \quad (4.26)$$

$$\bar{u}_r(k) = u_r(k) \otimes \begin{pmatrix} 1 & p(k) & \cdots & p(k)^{n_p} \end{pmatrix}^T, \quad (4.27)$$

$$\bar{A}(p(k)) = \begin{pmatrix} a_{1,0} & \cdots & a_{1,n_p} & a_{2,0} & \cdots & a_{2,n_p} & \cdots & a_{n_a,0} & \cdots & a_{n_a,n_p} \end{pmatrix}, \quad (4.28)$$

$$\bar{B}(p(k)) = \begin{pmatrix} b_{1,u_1,0} & \cdots & b_{1,u_1,n_p} & b_{1,u_2,0} & \cdots & b_{1,u_2,n_p} & \cdots & b_{n_b,u_{n_u},0} & \cdots & b_{n_b,u_{n_u},n_p} \end{pmatrix}, \quad (4.29)$$

onde \otimes representa o produto de Kronecker entre vetores, assim $\bar{y}_0(k) \in \mathbb{R}^{n_a(n_p+1) \times 1}$, $\bar{u}_r(k) \in \mathbb{R}^{n_u n_b(n_p+1) \times 1}$, $\bar{A}_\mu \in \mathbb{R}^{1 \times n_a(n_p+1)}$, e $\bar{B}_\mu \in \mathbb{R}^{1 \times n_u n_b(n_p+1)}$. As constantes de (4.28) e (4.29) podem ser concatenadas dentro do vetor $p(k)_\mu$ e os valores anteriores dos sinais $u(k)$ e $y(k)$ podem ser concatenadas dentro do vetor ϕ :

$$y(k) = \phi(k)p(k), \quad (4.30)$$

$$\phi(k) = \begin{pmatrix} -\bar{y}_0(k)^T & \bar{u}_r(k)^T \end{pmatrix}_{1 \times (n_a+n_u n_b)(n_p+1)}, \quad (4.31)$$

$$\theta(k) = \begin{pmatrix} \bar{A}(p(k))^T \\ \bar{B}(p(k))^T \end{pmatrix}_{(n_a+n_u n_b)(n_p+1) \times 1}. \quad (4.32)$$

Essa abordagem permite a implementação da forma de regressão:

$$Y = \Phi p, \quad (4.33)$$

$$Y = \begin{pmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N_s) \end{pmatrix}_{N_s \times 1}, \quad (4.34)$$

$$\Phi(k) = \begin{pmatrix} \phi(1) \\ \phi(2) \\ \vdots \\ \phi(N_s) \end{pmatrix}_{N_s \times (n_a + n_u n_b)(n_p + 1)}. \quad (4.35)$$

4.2.2 Algoritmo de identificação LPV-ARX caso MISO

O vetor $p(k)$ pode ser estimado como $\hat{p}(k)$ através do método de estimação de mínimos quadrados:

$$\hat{p}(k) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y, \quad (4.36)$$

onde N_s representa o número de amostras de dados. Para calcular uma solução única $N_s \geq (n_a + n_u n_b)(n_p + 1)$.

O cálculo de $\hat{p}(k)$ em 4.36 implica nos valores estimados das incógnitas 4.28 e 4.29. Essas incógnitas são os coeficientes da equação do modelo LPV-ARX MISO mostrado em 4.17.

5 EXPERIMENTAÇÃO E RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados resultados experimentais de coleta de dados e identificação de modelos do sistema de injeção de óleo combustível para a fachada de queimadores em duas unidades geradoras termelétricas de 360 MW cada.

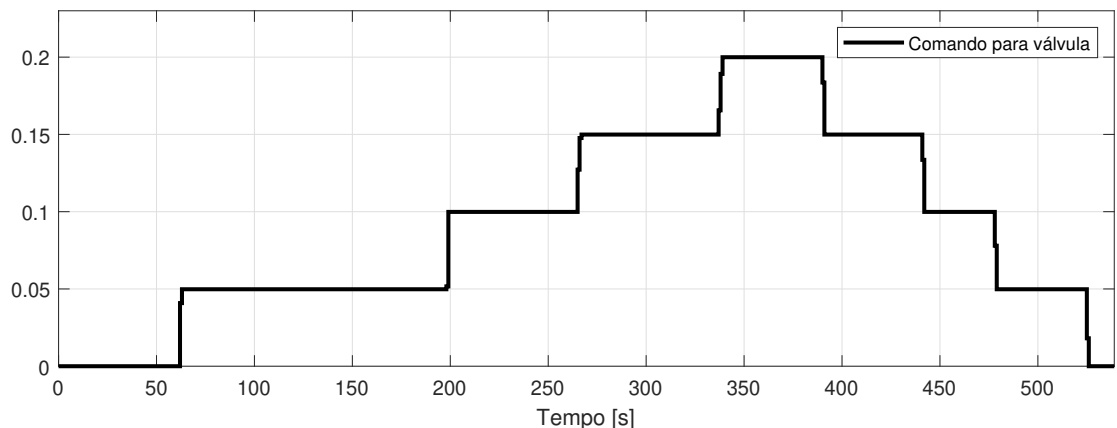
A primeira seção apresentará os resultados de experimentos realizados em malha aberta, aplicando degraus no comando de abertura da válvula de controle. Será feita uma comparação entre os modelos LPV e LTI. Na segunda seção serão identificados e validados modelos LPV-ARX do tipo SISO e MISO a partir de dados coletados de partidas reais.

Todas as curvas e resultados apresentados neste capítulo foram calculados por meio de algoritmos escritos no *software* de computação matemática MATLAB (MATHWORKS, 2022). Os valores dos gráficos estão representados em *pu*.

5.1 Experimentação em Malha Aberta

Foi realizado um experimento no sistema de injeção de combustível em malha aberta, ou seja, com a válvula de controle em modo manual, sem controlar a pressão de acordo com o valor de referência definido pelo operador. O teste foi realizado da seguinte forma: ligou-se as bombas de pressurização do sistema de fornecimento de óleo combustível para a fachada de queimadores, manteve-se o valor de referência da pressão de descarga das bombas de recirculação em 11 barg, abriu-se as válvulas de entrada e retorno de óleo e foram aplicados degraus na válvula de controle conforme apresentado na figura 17.

Figura 17 – Degraus aplicados na válvula de controle de óleo combustível.



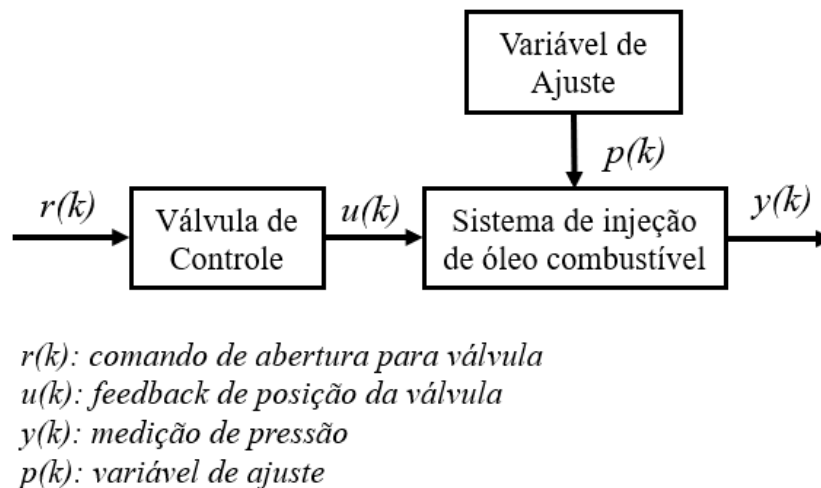
Fonte: Autor.

Inicialmente foi realizada uma identificação LPV e, em seguida, para fins comparativos, foi realizada também uma identificação utilizando um modelo LTI utilizando os dados coletados do mesmo teste.

5.1.1 Modelo LPV

A planta tem o *feedback* de posição da válvula de controle como sinal de entrada $u(k)$. A saída é a medição de pressão de óleo combustível, sinal $y(k)$. A figura 18 apresenta o diagrama de blocos do sistema.

Figura 18 – Sistema de controle de pressão de óleo combustível em malha aberta.



Fonte: Autor.

Durante a realização dos testes, as unidades geradoras encontravam-se fora de sincronismo, com as caldeiras apagadas. Por isso, não foi possível definir a variável de ajuste como *número de queimadores* ou *consumo de óleo combustível*. Dessa forma, a posição da válvula foi escolhida para ser o sinal $p(k)$.

Para este caso, como existe apenas uma entrada e uma saída no sistema, foi utilizado o modelo LPV SISO para identificação. Os dados do ensaio completo foram utilizados para treinamento pelos algoritmos.

Durante as simulações para modelagem do sistema, foram avaliadas diversas estruturas, a tabela 4 apresenta a configuração que obteve melhor resultado.

Tabela 4 – Parâmetros da topologia do modelo em malha aberta

n_a	n_b	N
6	6	4

De acordo com as equações 4.2 e 4.3, tem-se, para os parâmetros apresentados na tabela 4, a seguinte topologia:

$$A(q^{-1}, p) = 1 + a_1(p)q^{-1} + a_2(p)q^{-2} + a_3(p)q^{-3} + a_4(p)q^{-4} + a_5(p)q^{-5} + a_6(p)q^{-6}, \quad (5.1)$$

$$B(q^{-1}, p) = b_1(p)q^{-1} + b_2(p)q^{-2} + b_3(p)q^{-3} + b_4(p)q^{-4} + b_5(p)q^{-5} + b_6(p)q^{-6}, \quad (5.2)$$

onde cada coeficiente de A e B é uma função de p , de acordo com um polinômio de quarta ordem dado a seguir:

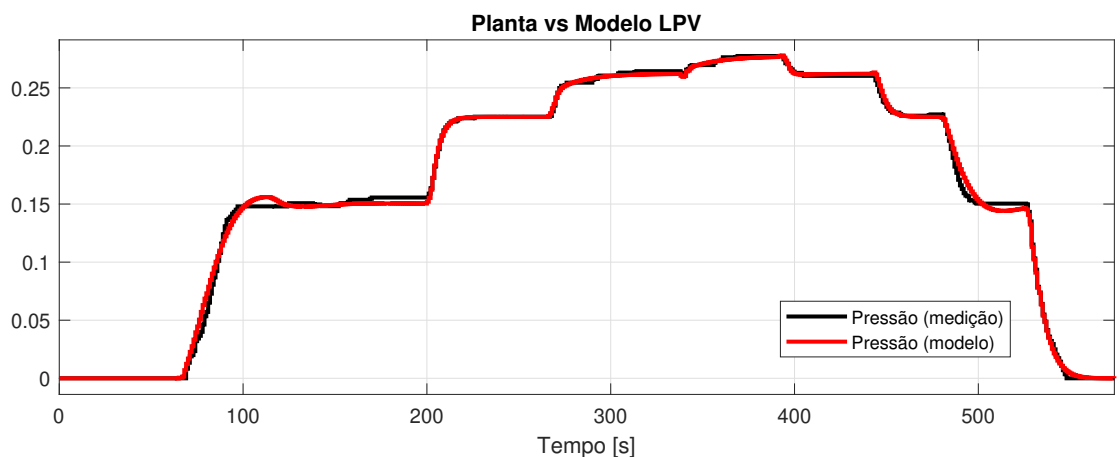
$$\begin{aligned}
a_1(p(k)) &= a_{10} + a_{11}p(k) + a_{12}p(k)^2 + a_{13}p(k)^3 + a_{14}p(k)^4, \\
a_2(p(k)) &= a_{20} + a_{21}p(k) + a_{22}p(k)^2 + a_{23}p(k)^3 + a_{24}p(k)^4, \\
a_3(p(k)) &= a_{30} + a_{31}p(k) + a_{32}p(k)^2 + a_{33}p(k)^3 + a_{34}p(k)^4, \\
a_4(p(k)) &= a_{40} + a_{41}p(k) + a_{42}p(k)^2 + a_{43}p(k)^3 + a_{44}p(k)^4, \\
a_5(p(k)) &= a_{50} + a_{51}p(k) + a_{52}p(k)^2 + a_{53}p(k)^3 + a_{54}p(k)^4, \\
a_6(p(k)) &= a_{60} + a_{61}p(k) + a_{62}p(k)^2 + a_{63}p(k)^3 + a_{64}p(k)^4, \\
b_1(p(k)) &= b_{10} + b_{11}p(k) + b_{12}p(k)^2 + b_{13}p(k)^3 + b_{14}p(k)^4, \\
b_2(p(k)) &= b_{20} + b_{21}p(k) + b_{22}p(k)^2 + b_{23}p(k)^3 + b_{24}p(k)^4, \\
b_3(p(k)) &= b_{30} + b_{31}p(k) + b_{32}p(k)^2 + b_{33}p(k)^3 + b_{34}p(k)^4, \\
b_4(p(k)) &= b_{40} + b_{41}p(k) + b_{42}p(k)^2 + b_{43}p(k)^3 + b_{44}p(k)^4, \\
b_5(p(k)) &= b_{50} + b_{51}p(k) + b_{52}p(k)^2 + b_{53}p(k)^3 + b_{54}p(k)^4, \\
b_6(p(k)) &= b_{60} + b_{61}p(k) + b_{62}p(k)^2 + b_{63}p(k)^3 + b_{64}p(k)^4,
\end{aligned} \quad (5.3)$$

Após o processo de identificação, o modelo obtido apresentou os seguintes parâmetros para os polinômios $A(q^{-1}, p)$ e $B(q^{-1}, p)$, de acordo com as equações 4.2 e 4.3 e os valores apresentados na tabela 4:

$$\begin{aligned}
a_1(p(k)) &= -1,1897 - 32,3753p(k) + 850,4368p(k)^2 - 6541,4487p(k)^3 + 15359,1639p(k)^4; \\
a_2(p(k)) &= 0,4728 + 22,8581p(k) - 771,8586p(k)^2 + 6287,8520p(k)^3 - 14892,6841p(k)^4; \\
a_3(p(k)) &= -0,5403 + 4,2180p(k) + 252,7313p(k)^2 - 3031,1817p(k)^3 + 8529,9854p(k)^4; \\
a_4(p(k)) &= 0,4894 - 7,1709p(k) - 186,2426p(k)^2 + 2825,2601p(k)^3 - 8928,0383p(k)^4; \\
a_5(p(k)) &= -0,2853 - 5,3085p(k) + 386,6250p(k)^2 - 3861,0807p(k)^3 + 10544,9804p(k)^4; \\
a_6(p(k)) &= 0,1288 + 9,4028p(k) - 309,2361p(k)^2 + 2553,0992p(k)^3 - 6311,6065p(k)^4; \\
b_1(p(k)) &= -0,0076 + 5,5928p(k) - 89,9555p(k)^2 + 438,3539p(k)^3 - 687,2243p(k)^4; \\
b_2(p(k)) &= 0,4000 - 35,2566p(k) + 704,7990p(k)^2 - 4813,2254p(k)^3 + 10734,1300p(k)^4; \\
b_3(p(k)) &= -2,6580 + 132,5243p(k) - 1973,9110p(k)^2 + 11627,5697p(k)^3 - 23763,6338p(k)^4; \\
b_4(p(k)) &= 2,9288 - 152,2607p(k) + 2403,1056p(k)^2 - 14829,3918p(k)^3 + 31315,8902p(k)^4; \\
b_5(p(k)) &= -1,9634 + 103,3069p(k) - 1693,1744p(k)^2 + 10813,4439p(k)^3 - 23436,2412p(k)^4; \\
b_6(p(k)) &= 0,5983 - 35,5557p(k) + 626,3801p(k)^2 - 4233,3679p(k)^3 + 9570,0281p(k)^4.
\end{aligned}$$

A figura 19 apresenta o resultado da modelagem do sistema. Em preto, os valores de medição de pressão de óleo combustível coletados dos sistemas de controle da usina. Em vermelho, a saída estimada pelo modelo LPV.

Figura 19 – Validação do modelo LPV em malha aberta.



Fonte: Autor.

Para quantificar a qualidade do modelo, foi considerado o *Best Fit Rate* (BFR), também conhecido como *fit score*, como índice de desempenho (TOTH *et al.*, 2009) (GIDON *et al.*, 2021).

$$BFR = 100\% \times \max \left(1 - \frac{\|y(k) - \hat{y}(k)\|}{\|y(k) - y_m\|} \right), \quad (5.4)$$

onde $y(k)$ são os valores de medição da planta, $\hat{y}(k)$ é o modelo e y_m é a média de $y(k)$. Então, para esta modelagem, tem-se:

$$BFR = 96,2\%.$$

O modelo também foi submetido ao índice de performance *Root Mean Squared Error* (RMSE), que é a medida que calcula a raiz quadrática média dos erros entre os valores medidos $y(k)$ e o modelo $\hat{y}(k)$. Quanto mais próximo de zero for o valor do índice, menor será o desvio entre o modelo estimado e o valor real medido, indicando uma identificação mais acertiva.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k) - \hat{y}(k))^2}, \quad (5.5)$$

onde a variável n representa o número de amostras. Aplicando para este modelo, tem-se:

$$RMSE = 0,002369.$$

5.1.2 Modelo LTI

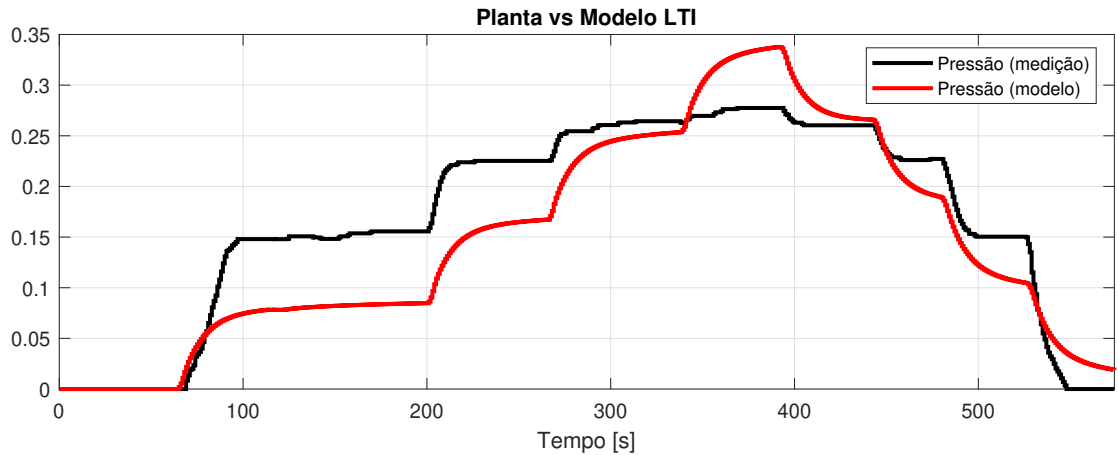
Para modelagem LTI, definiu-se o *feedback* de posição da válvula de controle como a entrada da planta, sinal $u(k)$. A medição de pressão foi definida como o sinal de saída $y(k)$. A ordem do modelo LPV foi mantida, dessa forma tem-se $n_a = n_b = 6$.

O modelo foi validado usando os mesmos dados utilizados na validação do modelo LPV da seção anterior. A figura 20 apresenta o resultado.

Aplicando as equações 5.4 e 5.5 para calcular os os índices de performance BFR e RMSE do modelo LTI, tem-se, respectivamente, os seguintes resultados: 52,8% e 0,036776.

Percebe-se que a identificação LTI tem bastante dificuldade em estimar processos não lineares, que é uma característica do sistema de fornecimento de óleo combustível. O modelo LPV estimado ficou bem mais fiel à planta real que a modelagem LTI.

Figura 20 – Validação do modelo LTI em malha aberta.



Fonte: Autor.

5.2 Experimentação em Malha Fechada

Foram coletados dados de partidas reais com o sistema de injeção de combustível em malha fechada, ou seja, com a válvula de controle em modo automático, controlando a pressão de óleo de acordo com o valor de referência definido pelo operador.

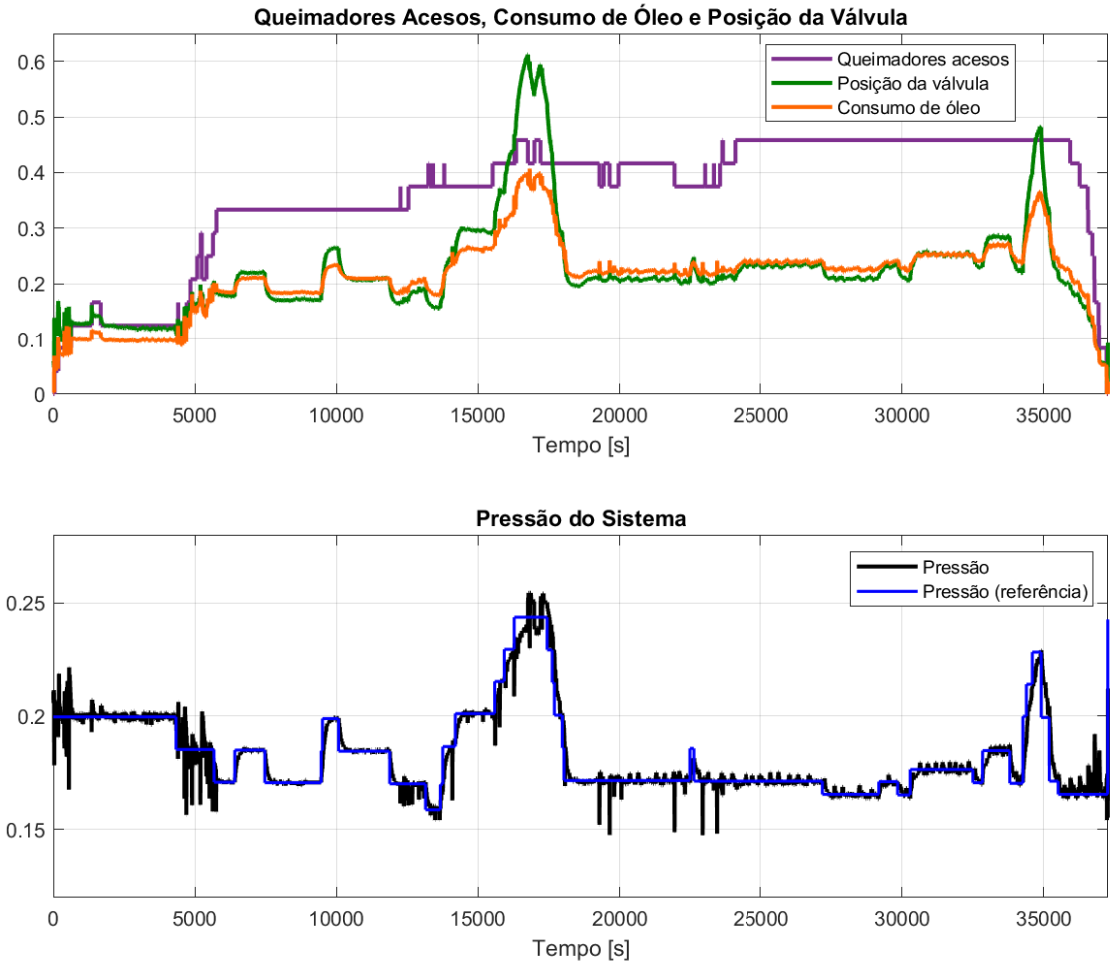
5.2.1 Modelo LPV SISO

Conforme ilustrado na figura 3, a planta tem o comando de abertura da válvula de controle como sinal de entrada $u(k)$. A saída é a medição de pressão de óleo combustível, sinal $y(k)$. Desta forma, como há apenas uma entrada e uma saída no sistema, pode-se utilizar um modelo LPV SISO para identificação.

5.2.1.1 Identificação LPV SISO

A identificação do modelo LPV demanda a escolha de uma variável de ajuste a qual a operação do sistema possua uma dependência. Entende-se que a pressão de óleo varia a medida que os queimadores vão acendendo ou apagando, pois o acendimento de um queimador causa a imediata queda de pressão do combustível, bem como o desligamento de um queimador teria o efeito contrário. Por sua vez, o consumo de combustível é diretamente associado a esse número de queimadores e, ao mesmo tempo, à pressão controlada, como pode-se observar na figura 21. Por isso, os dados de consumo instantâneo de óleo diesel foram utilizados como variável de ajuste $p(k)$.

Figura 21 – Partida fria utilizada para modelagem do sistema.



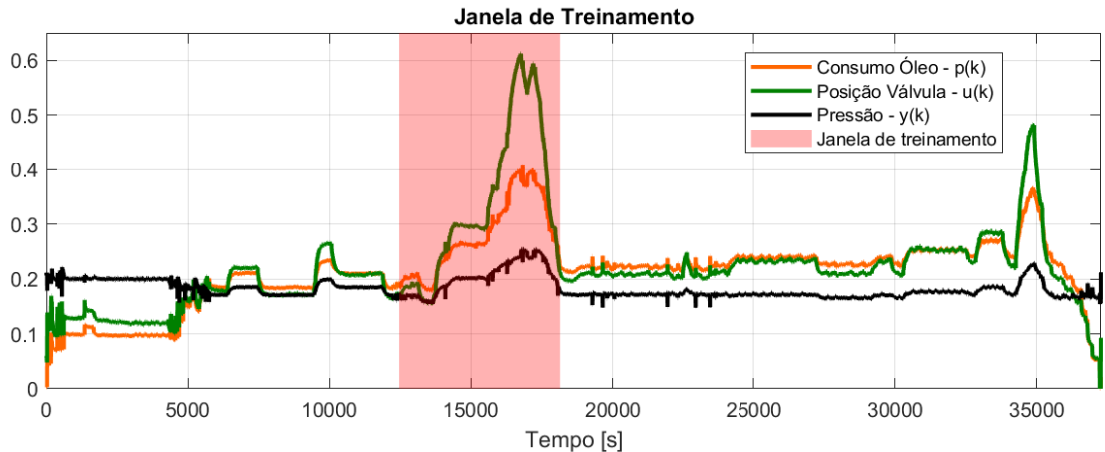
Fonte: Autor.

Os dados coletados de uma partida completa possuem trechos em que o sistema opera em regime permanente por um longo período de tempo. Durante esse período, existe pouca informação relevante e correlação entre os dados de entrada e saída, por isso eles são considerados inadequados para fins de identificação. Trechos em que o sinal de saída está sujeito à elevada influência de distúrbios também podem ser prejudiciais à identificação.

Deve-se priorizar os momentos transitórios. Neles é possível extrair mais informações significativas e criar melhores correlações entre as variáveis de entrada, saída e ajuste, abrangendo mais condições operacionais. Por isso, uma janela de treinamento foi definida em um dos regimes transitórios de uma partida fria da unidade geradora 1, conforme indicado na figura 22.

Os dados dessa amostra foram utilizados no algoritmo de identificação para treinamento do sistema e modelagem de toda partida desta mesma unidade.

Figura 22 – Janela de treinamento da partida fria usada no algoritmo de identificação LPV SISO.



Fonte: Autor.

Observa-se também na Figura 22 que a variável de ajuste situa-se majoritariamente na faixa entre 0,1 e 0,4 pu e que a planta, em malha fechada, é comandada pela ação de controle para diversas condições de operação. Essas condições são favoráveis ao algoritmo de identificação do modelo, pois vários valores das variáveis de interesse são contemplados no ensaio de treinamento. É possível notar também algumas quedas repentinas de pressão na planta. Essas quedas não devem ser compreendidas como ruídos, pois estão presentes na dinâmica do processo e são provenientes de perturbações externas. Quando a sequência de acendimento de um queimador é acionada, sua respectiva válvula de alimentação de óleo abre, ocasionando uma queda de pressão imediata no sistema. Logo, o modelo ignora essas dinâmicas, pois são perturbações externas que são observadas em virtude dos dados coletados de uma máquina real em operação.

Foram avaliadas diversas estruturas durante as simulações para modelagem do sistema, a tabela 5 apresenta a configuração que obteve uma melhor relação entre complexidade e erro de predição.

Tabela 5 – Parâmetros da topologia do modelo LPV SISO

n_a	n_b	N
2	2	1

De acordo com as equações 4.2 e 4.3, tem-se, para os parâmetros apresentados na tabela 5, a seguinte topologia:

$$A(q^{-1}, p) = 1 + a_1(p)q^{-1} + a_2(p)q^{-2}, \quad (5.6)$$

$$B(q^{-1}, p) = b_1(p)q^{-1} + b_2(p)q^{-2}, \quad (5.7)$$

onde cada coeficiente de A e B é uma função de p , de acordo com um polinômio de primeira ordem dado a seguir:

$$\begin{aligned} a_1(p(k)) &= a_{10} + a_{11}p(k), \\ a_2(p(k)) &= a_{20} + a_{21}p(k), \\ b_1(p(k)) &= b_{10} + b_{11}p(k), \\ b_2(p(k)) &= b_{20} + b_{21}p(k). \end{aligned} \quad (5.8)$$

Após o processo de identificação, o modelo obtido apresentou os seguintes parâmetros para os polinômios $A(q^{-1}, p)$ e $B(q^{-1}, p)$:

$$a_1(p(k)) = -1.295813 - 0.338993p(k),$$

$$a_2(p(k)) = 0.296567 + 0.351050p(k),$$

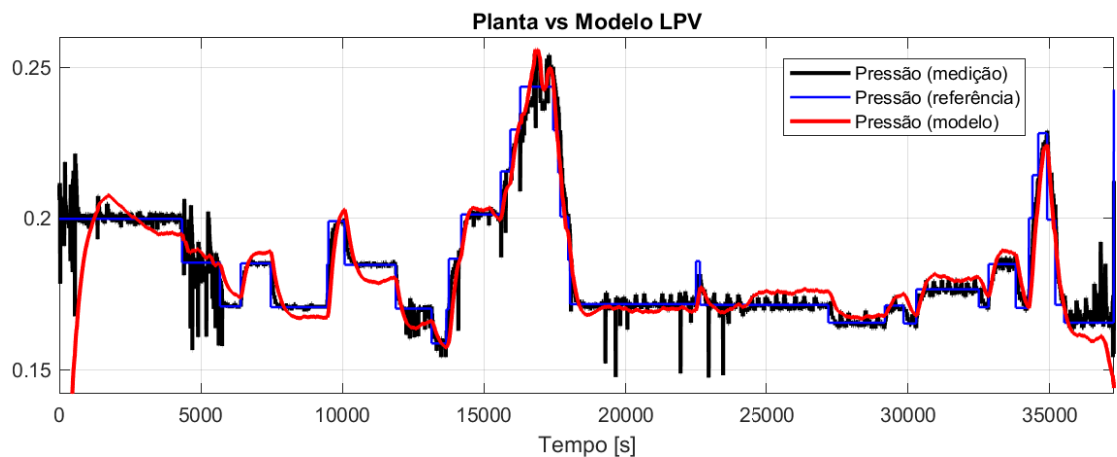
$$b_1(p(k)) = -0.011392 + 0.095138p(k),$$

$$b_2(p(k)) = 0.014802 - 0.097903p(k).$$

5.2.1.2 Validação 1 LPV SISO

A Figura 23 apresenta a comparação entre sinal de saída (medição de pressão) com o sinal de saída estimado pelo modelo durante o processo de identificação.

Figura 23 – Validação do modelo LPV SISO na própria partida fria.



Fonte: Autor.

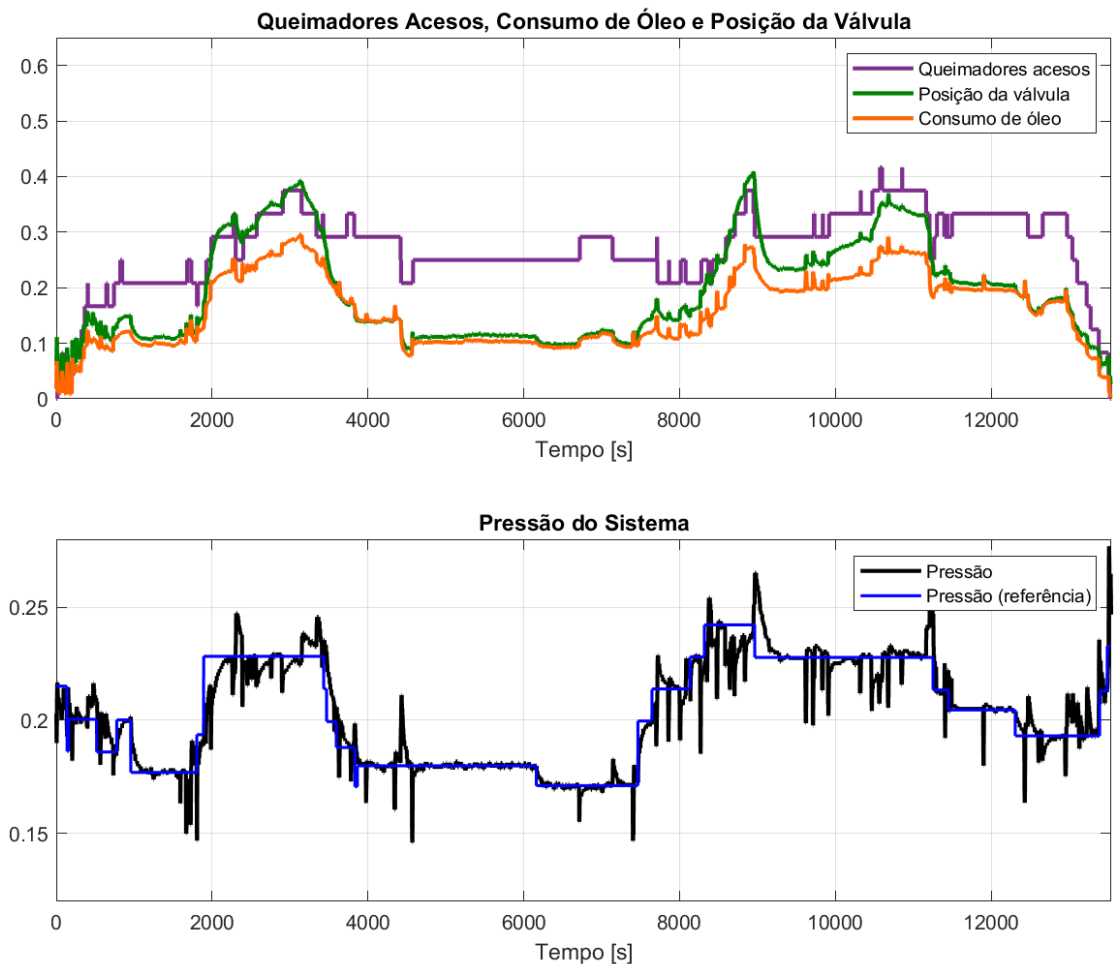
Como foi utilizado apenas uma janela de treinamento desta partida no algoritmo de identificação, os dados completos da própria partida foram utilizados para validar o modelo, que obteve excelentes resultados.

De forma semelhante aos ensaios em malha aberta, para quantificar a qualidade do modelo, foram considerados os índices de performance *Best Fit Rate* (BFR) e *Root Mean Squared Error* (RMSE). Então, aplicando as equações 5.4 e 5.5, tem-se $BFR=76,1\%$ e $RMSE=0,003556$.

5.2.1.3 Validação 2 LPV SISO

A fim de verificar a robustez do modelo frente a outros sinais de entrada para faixas de operação semelhante, o modelo foi validado também utilizando dados coletados de uma partida quente da mesma unidade geradora. Os dados dessa nova partida são apresentados na figura 24.

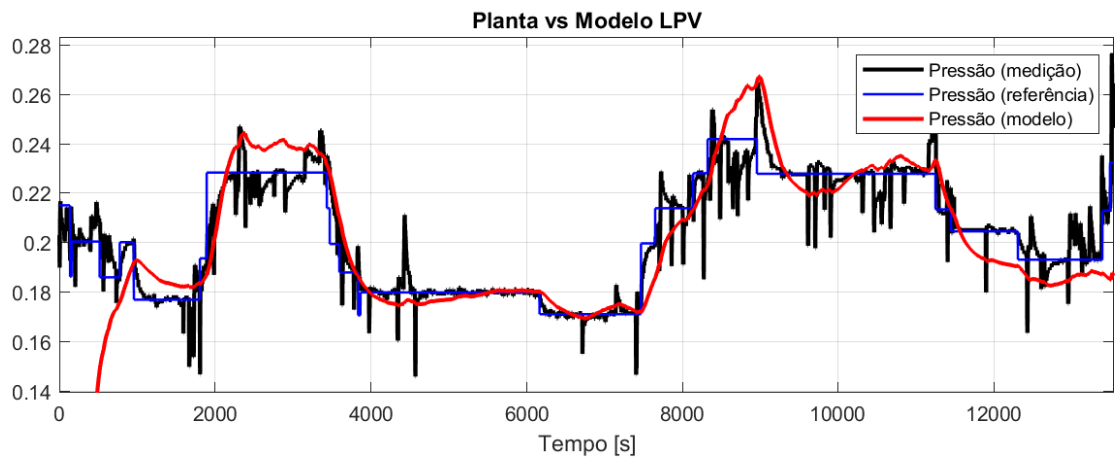
Figura 24 – Partida quente utilizada para validação do modelo LPV SISO.



Fonte: Autor.

A figura 25 apresenta o resultado da validação na partida quente da identificação realizada na partida fria. Percebe-se que o modelo conseguiu capturar os modos dominantes observados para toda a faixa de condições de operação considerada durante o processo de aquisição de dados.

Figura 25 – Validação do modelo LPV SISO na partida quente.



Fonte: Autor.

Aplicando as equações 5.4 e 5.5 para calcular os índices de performance BFR e RMSE, tem-se, respectivamente, os seguintes resultados para a validação 2: 58,7% e 0,010251.

5.2.2 Modelo LPV MISO

Nesta seção será utilizada a mesma planta, porém será acrescentada uma nova entrada $u(k)$ no algoritmo de identificação. Desta forma, tem-se um modelo em espaço de estados LPV MISO com as seguintes variáveis:

- Entrada $u_1(k)$: posição de abertura da válvula de controle;
- Entrada $u_2(k)$: número de queimadores de óleo acesos;
- Saída $y(k)$: pressão de óleo combustível;
- Ajuste $p(k)$: número de queimadores de óleo acesos.

5.2.2.1 Identificação LPV MISO

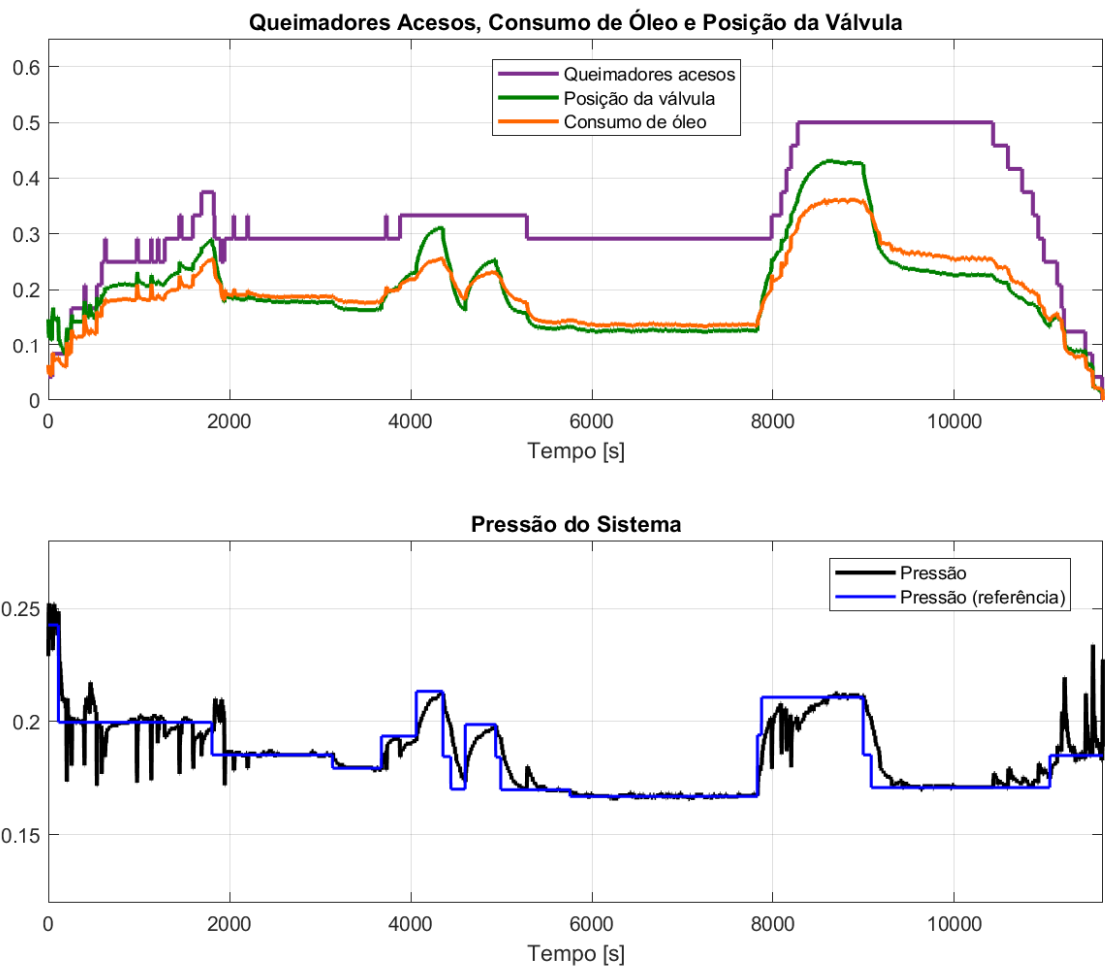
Usando a topologia do modelo apresentada na equação (4.14) e a dependência polinomial em $p(k)$ descrita nas equações (4.23) e (4.24), foram escolhidos arbitrariamente os parâmetros da tabela 6 para se obter uma configuração simples do modelo.

Tabela 6 – Parâmetros da topologia do modelo LPV MISO

n_a	n_b	N
2	2	1

Para essa identificação foram utilizados dados da unidade geradora em uma partida muito quente. A figura 26 mostra os sinais relevantes dessa partida.

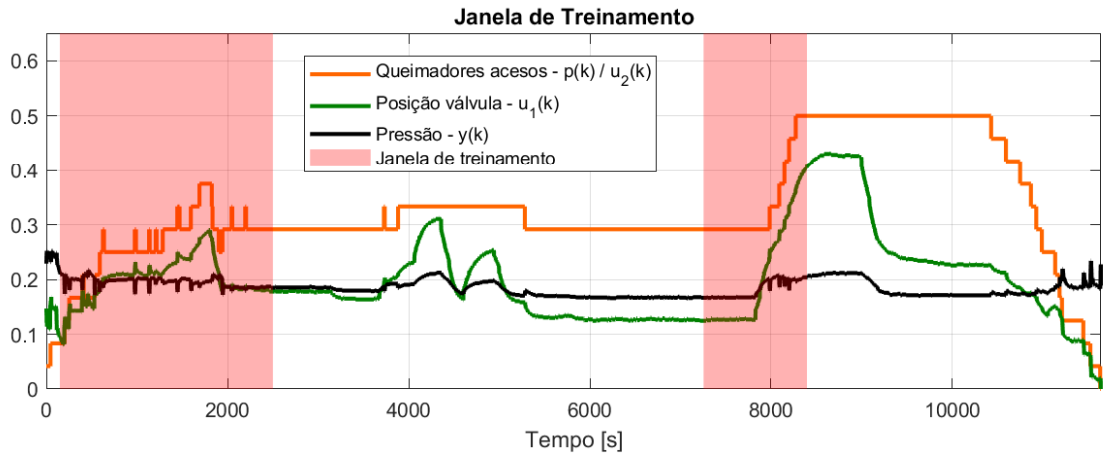
Figura 26 – Partida muito quente utilizada para modelagem do sistema.



Fonte: Autor.

A fim de extrair mais informações dos dados coletados e aprimorar ainda mais o algoritmo de identificação, para este modelo, foram definidas 2 janelas de treinamento conforme apresentado na figura 27.

Figura 27 – Janelas de treinamento da partida muito quente utilizadas no algoritmo de identificação LPV MISO.



Fonte: Autor.

Após o processo de identificação, o modelo obtido apresentou os seguintes parâmetros, de acordo com as equações 4.2 e 4.3 e os dados apresentados na tabela 6:

$$a_1(p(k)) = -1,901242 + 1,238110p(k);$$

$$a_2(p(k)) = 0,902679 - 1,036005p(k);$$

$$b_{1u_1}(p(k)) = -0,201359 + 0,445307p(k);$$

$$b_{1u_2}(p(k)) = 0,065263 - 0,251963p(k);$$

$$b_{2u_1}(p(k)) = 0,214627 - 0,430640p(k);$$

$$b_{2u_2}(p(k)) = -0,035528 + 0,243248p(k).$$

5.2.2.2 Validação 1 LPV MISO

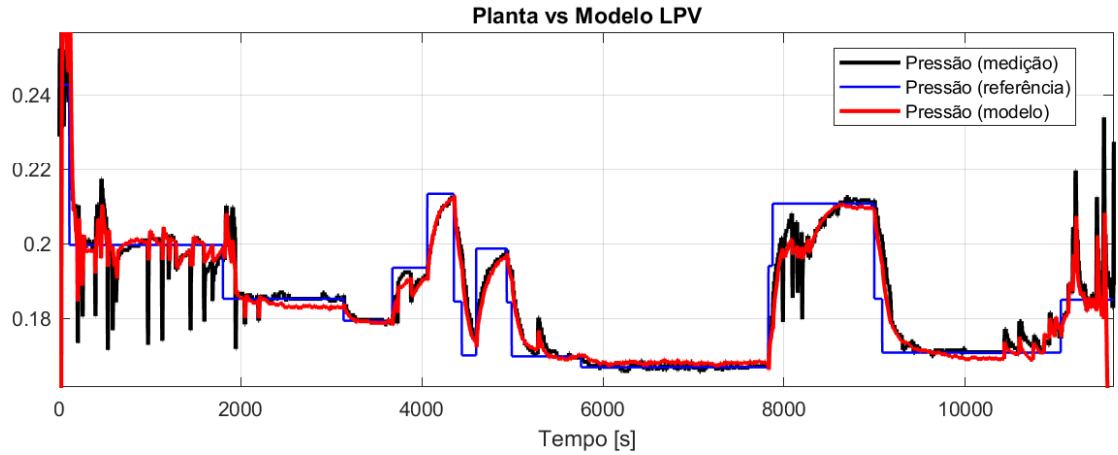
Assim como proposto para o caso LPV SISO, o modelo foi validado utilizando os dados completos da própria partida muito quente. Os resultados foram excelentes conforme mostra a figura 28.

Aplicando as equações 5.4 e 5.5 para calcular os índices de performance BFR e RMSE, tem-se, respectivamente, os seguintes resultados: 83,5% e 0.002379.

5.2.2.3 Validação 2 LPV MISO

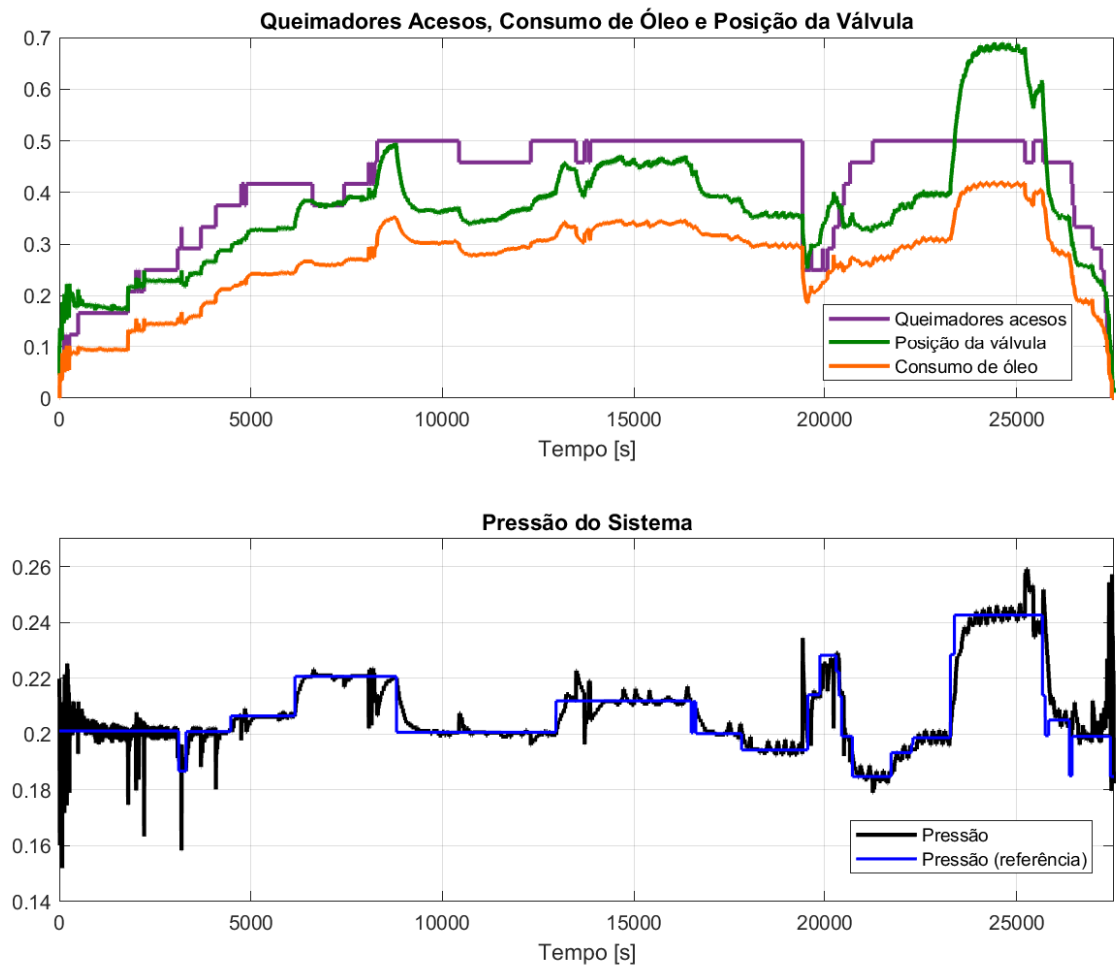
Para comprovar a robustez do modelo comparado a sinais distintos aos utilizados nas janelas de treinamento, o modelo foi validado também utilizando dados coletados de uma partida morna da mesma unidade geradora. Os dados dessa nova partida são apresentados na figura 29.

Figura 28 – Validação do modelo LPV MISO na própria partida muito quente.



Fonte: Autor.

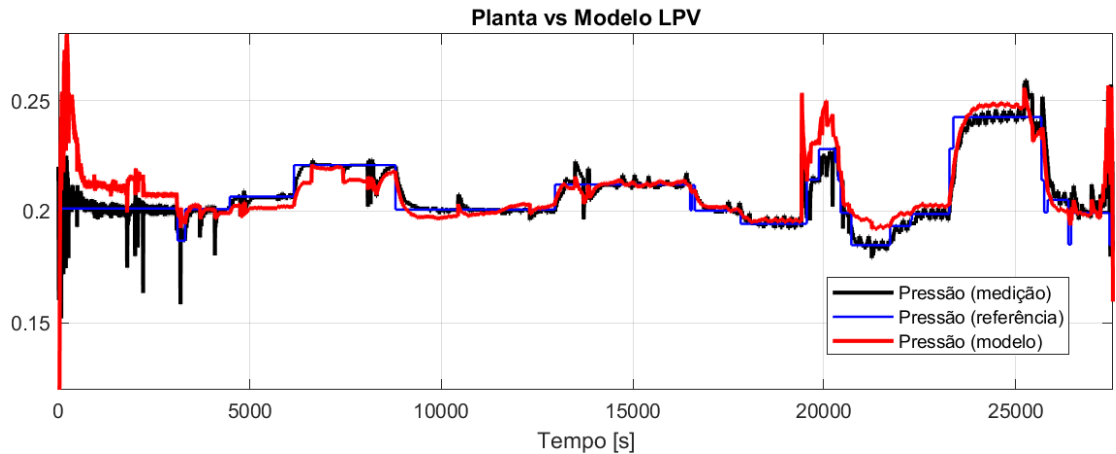
Figura 29 – Partida morna utilizada para validação do modelo LPV MISO.



Fonte: Autor.

A figura 30 apresenta o resultado da validação na partida morna da identificação realizada na partida muito quente. Percebe-se que o modelo conseguiu capturar os modos dominantes observados para toda a faixa de condições de operação considerada durante o processo de aquisição de dados.

Figura 30 – Validação do modelo LPV MISO na partida morna.



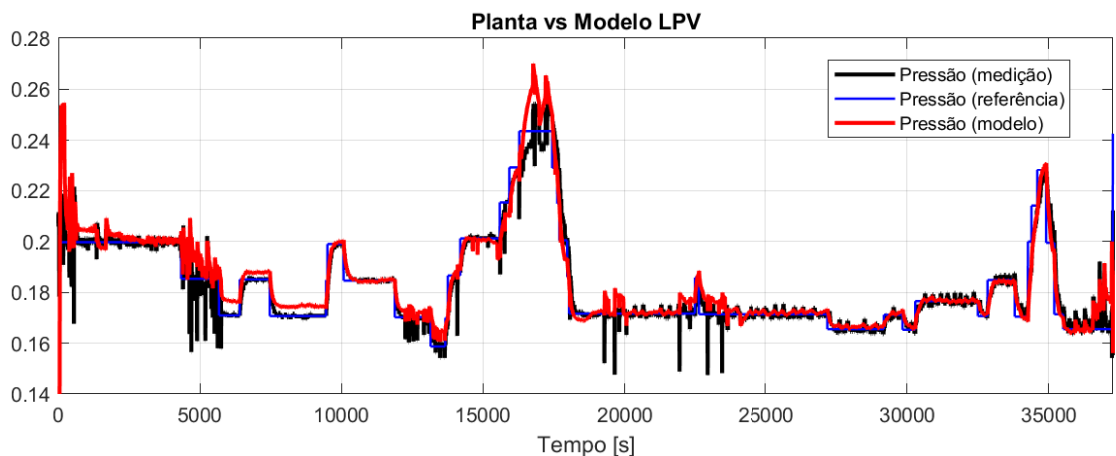
Fonte: Autor.

Aplicando as equações 5.4 e 5.5 para calcular os índices de performance BFR e RMSE, tem-se, respectivamente, os seguintes resultados para a validação 2: 58,7% e 0,010251.

5.2.2.4 Validação 3 LPV MISO

Adicionalmente, os dados da partida fria (figura 21) validados na seção anterior através do modelo LPV SISO (figura 23) foram utilizados também para validação do modelo LPV MISO. A figura 31 apresenta os resultados.

Figura 31 – Validação do modelo LPV MISO na partida fria.



Fonte: Autor.

Aplicando as equações 5.4 e 5.5 para calcular os os índices de performance BFR e RMSE, tem-se, respectivamente, os seguintes resultados para a validação 3: 76,8% e 0,004251.

5.2.3 Comparação entre os resultados

Tanto a identificação utilizando o modelo LPV SISO quanto LPV MISO trouxeram bons resultados de modelagem para todos os modos de partidas experimentados, como pode-se ver através das figuras 25, 28, 30 e 31.

A tabela 7 apresenta a compilação do resultados os índices de performance dos modelos apresentados nas seções 5.2.1 e 5.2.2.

Tabela 7 – Índices de performance dos modelos LPV apresentados

Modelo	Seção	Identificação	Validação	BFR	RMSE
LPV SISO	5.2.1.2	Fria 1	Fria 1	76,1%	0,003556
LPV SISO	5.2.1.3	Fria 1	Quente 2	58,7%	0,010251
LPV MISO	5.2.2.2	Muito Quente 2	Muito Quente 2	83,5%	0,002379
LPV MISO	5.2.2.3	Muito Quente 2	Morna 2	58,3%	0,006002
LPV MISO	5.2.2.4	Muito Quente 2	Fria 1	76,8%	0,004251

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo cenário presente às usinas de geração de energia convencionais, especialmente às termelétricas a carvão mineral: aumento da flexibilidade. Isso torna os estudos sobre otimização dos processos durante regimes transitórios, outrora pouco valorizados devido a sua pouca frequência, bastante relevantes e importantes para obtenção de uma operação mais econômica e sustentável.

O processo de partida de uma usina termelétrica a carvão real foi analisado em diferentes modos de operação: fria, morna, quente e muito quente. Com os dados coletados foi possível perceber que o tempo de fornecimento de óleo aos queimadores durante uma partida de máquina é importante, porém não é o único fator decisivo para o consumo de combustível. A pressão de óleo na fachada de queimadores é que realmente define se uma partida foi ou não econômica.

O valor de referência de pressão é definido de forma manual pelo operador na sala de controle, que precisa buscar um equilíbrio entre economizar combustível e ter pressão suficiente para manter as chamas acesas com segurança.

Como o sistema de injeção de óleo combustível nos queimadores é fundamental para o processo de partida da usina, este trabalho apresentou um estudo de modelagem desse sistema utilizando algoritmos de identificação LPV SISO e LPV MISO, pois eles são capazes de representar o comportamento não linear do processo durante a transição entre as regiões de operação.

Por meio das técnicas apresentadas, foi possível obter um bom modelo matemático validado experimentalmente, contornando problemas presentes em outros métodos populares de modelagem, como a modelagem física, que pode possuir grande complexidade matemática e dificuldade na estimação de valores para variáveis do sistema.

A utilização de dados reais coletados dos sistemas de controle da usina garantiu uma maior confiabilidade e provou que o modelo é, de fato, representativo à dinâmica do sistema estudado, além de possibilitar a inclusão no modelo variáveis difíceis de serem estimadas como perda de rendimento por desgaste mecânico, por exemplo.

Os resultados apresentados neste trabalho são apenas a etapa inicial para o projeto de um sistema de controle que visa reduzir o consumo de óleo combustível durante as partidas das unidades geradoras.

O modelo de entradas e saídas de segunda ordem com dependência de primeiro grau possui baixa complexidade numérica, possibilitando que o trabalho desenvolvido possa ser facilmente implementado no ambiente industrial e estendido a outras aplicações.

REFERÊNCIAS

- ANSI/ISA (Ed.). **ANSI/ISA-5.1 – Instrumentation Symbols and Identification**. [S. l.]: International Society of Automation, 2009.
- BAMIEH, B.; GIARRE, L. Identification of linear parameter varying models. **International Journal of Robust and Nonlinear Control: IFAC-Affiliated Journal**, Wiley Online Library, v. 12, n. 9, p. 841–853, 2002.
- BASU, S.; DEBNATH, A. K. Chapter 2 - main equipment. In: BASU, S.; DEBNATH, A. K. (Ed.). **Power Plant Instrumentation and Control Handbook (Second Edition)**. Second edition. Boston: Academic Press, 2019. p. 41–147. ISBN 978-0-12-819504-8.
- BIRD, L.; LEW, D.; MILLIGAN, M.; CARLINI, E. M.; ESTANQUEIRO, A.; FLYNN, D.; GOMEZ-LAZARO, E.; HOLTTINEN, H.; MENEMENLIS, N.; ORTHS, A.; ERIKSEN, P. B.; SMITH, J. C.; SODER, L.; SORENSEN, P.; ALTIPARMAKIS, A.; YASUDA, Y.; MILLER, J. Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 577–586, 2016. ISSN 1364-0321.
- GIDON, D.; ABBAS, H. S.; BONZANINI, A. D.; GRAVES, D. B.; Mohammadpour Velni, J.; MESBAH, A. Data-driven l_p model predictive control of a cold atmospheric plasma jet for biomaterials processing. **Control Engineering Practice**, v. 109, p. 104725, 2021. ISSN 0967-0661.
- GONZALEZ-SALAZAR, M. A.; KIRSTEN, T.; PRCHLIK, L. Review of the operational flexibility and emissions of gas and coal-fired power plants in a future with growing renewables. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1497–1513, 2018.
- HÜBEL, M.; MEINKE, S.; ANDRÉN, M. T.; WEDDING, C.; NOCKE, J.; GIEROW, C.; HASSEL, E.; FUNKQUIST, J. Modelling and simulation of a coal-fired power plant for start-up optimisation. **Applied Energy**, v. 208, p. 319–331, 2017.
- IEA (Ed.). **World Energy Investment 2021**. [S. l.]: International Energy Agency, 2021.
- LJUNG, L. **System Identification (2nd Ed.): Theory for the User**. USA: Prentice Hall PTR, 1999. ISBN 0136566952.
- LUO, X.; WANG, J.; DOONER, M.; CLARKE, J. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. **Applied Energy**, v. 137, p. 511–536, 2015. ISSN 0306-2619.
- MAI, T.; R., W.; D., S.; G., B.; G., H.; P., D. Renewable electricity futures study. volume 1: Exploration of high-penetration renewable electricity futures. Nat. Renew. Energy Lab, 2012.
- MARX-SCHUBACH, T.; SCHMITZ, G. Modeling and simulation of the start-up process of coal fired power plants with post-combustion CO₂ capture. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 87, p. 44–57, 2019.
- MATHWORKS. **MATLAB version 9.11.0 (R2021b)**. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2022.
- NEETZOW, P. The effects of power system flexibility on the efficient transition to renewable generation. **Applied Energy**, v. 283, p. 116278, 2021. ISSN 0306-2619.

NFPA (Ed.). **NFPA 85 – Boiler and Combustion Systems Hazards Code**. [S. l.]: National Fire Protection Association, 2019.

NOGUEIRA, F. G.; JUNIOR, W. B.; JUNIOR, C. T. da C.; LANA, J. J. Lpv-based power system stabilizer: Identification, control and field tests. **Control Engineering Practice**, Elsevier, v. 72, p. 53–67, 2018.

REN21. **Renewables 2020 global status report 2020**. Paris, France: [S. n.], 2020. Disponível em: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf. Acesso em: 01 de Março, 2022.

SANKARAN, V.; MANAMALLI, D.; THIRUNAVUKARASU, N. Model identification for industrial coal fired boiler based on linear parameter varying method. **International Journal of Engineering and Technology**, v. 5, p. 4116–4126, 01 2013.

TIELENS, P.; HERTEM, D. V. The relevance of inertia in power systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 999–1009, 2016. ISSN 1364-0321.

TÓTH, R. **Modeling and identification of linear parameter-varying systems**. [S. l.]: Springer, 2010. v. 403.

TOTH, R.; LYZELL, C.; ENQVIST, M.; HEUBERGER, P. S. C.; HOF, P. M. J. Van den. Order and structural dependence selection of lpv-arx models using a nonnegative garrote approach. In: **Proceedings of the 48h IEEE Conference on Decision and Control (CDC) held jointly with 2009 28th Chinese Control Conference**. [S. l.: s. n.], 2009. p. 7406–7411.

UNFCCC. **Adoption of the Paris Agreement**. Paris, France: [S. n.], 2015. Report No. FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf>. Acesso em: 01 de Março, 2022.

WANG, C.; MINGLIU; LI, B.; LIU, Y.; JUNJIEYAN. Thermodynamic analysis on the transient cycling of coal-fired power plants: Simulation study of a 660 mw supercritical unit. **Energy**, v. 122, p. 505–527, 2017.