

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO
RETIFICADOR PRINCIPAL DE UMA LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA

Bernardo Nogueira Neto

São Luís - MA

2010

Bernardo Nogueira Neto

IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO
RETIFICADOR PRINCIPAL DE UMA LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado submetida à
Coordenação do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de
Eletricidade da Universidade Federal do
Maranhão - Campus I, como parte dos
requisitos necessários para obtenção do
grau de Mestre em Ciências no domínio
de Automação e Controle.

São Luís - MA

2010

IDENTIFICAÇÃO DO COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA DO
RETIFICADOR PRINCIPAL DE UMA LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA

Bernardo Nogueira Neto

(Mestrando)

Dissertação aprovada em 04 de Junho de 2010

Prof. Dr. João Viana da Fonseca Neto

(Orientador)

Prof. Dr. Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda

(Co-Orientador)

Prof. Dr. Ginalber Luís Oliveira Serra

(Membro da Banca Examinadora)

Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire

(Membro da Banca Examinadora)

MESTRADO

Área de Concentração: AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Neto, Bernardo Nogueira, Aplicação da Teoria de Identificação de Sistemas no Estudo e Análise do Comportamento da Temperatura do Retificador Principal de uma Locomotiva Diesel-Elétrica.

Bernardo Nogueira Neto – São Luis, 2010.

XX fls.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Eletricidade) – Curso de Engenharia Elétrica; Universidade Federal do Maranhão, 2010.

1. Locomotiva Diesel-Elétrica, 2. Retificador, 3. Identificação de Sistemas, 4. Modelo Paramétrico, I. Título.

Dedicatória

Este trabalho é dedicado à memória do meu pai, Bernardo Nogueira Filho.

Agradecimentos

Aos meus orientadores, Professores, João Viana da Fonseca Neto e Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda, por seus ensinamentos, amizade e apoio.

À minha Mãe Celênia, por seu amor, e por minha formação.

À minha filha Amanda e minha esposa Teyla, pela compreensão nos muitos momentos em que estive ausente.

A todos os professores do programa de pós-graduação em engenharia de eletricidade da UFMA, em especial os doutores: Allan Kardec, Maria da Guia, Sofianne Labidi e Carlos Brandão.

Aos meus amigos do DEE, Alcides Neto, Antônio Silva, João Inácio, Juan Mauricio e Jorge Farid, pelo apoio, incentivo e amizade.

Aos meus amigos de trabalho, Adriano Leitão e Reginaldo Braga, que sempre estiveram disponíveis, colaborando e apoiando este projeto.

À empresa Vale, por ter disponibilizado a estrutura necessária para realização dos experimentos e ensaios apresentados nesta dissertação.

Nesta dissertação, aborda-se a aplicação da Teoria de Identificação de Sistemas para escolha de um modelo polinomial, que represente o comportamento do retificador de corrente elétrica, utilizado para suprimento dos motores de tração de uma locomotiva diesel-elétrica, a partir da manipulação matemática de seus dados de temperatura. Desenvolve-se um modelo ARX e, com auxílio da ferramenta computacional do *toolbox* de identificação do MATLAB®, são feitas simulações para estimação e validação da ordem do modelo que melhor descreva a resposta dinâmica do sistema físico.

Os dados de entrada e saída do retificador são obtidos a partir da medição direta da corrente de saída do gerador principal, que corresponde à entrada, e da medição da temperatura na bancada retificadora, que corresponde à saída. Estes dados são utilizados na elaboração do modelo matemático do sistema em estudo.

Busca-se obter um modelo matemático que represente o comportamento do retificador principal da locomotiva, possibilitando ações de controle para uma melhor otimização entre a potência fornecida e a requerida para tração, de tal forma que os eventos de *downtime*, decorrentes da atuação da proteção contra altas temperaturas do retificador durante operações em regimes severos, sejam minimizados. Como resultado, tem-se um método mais avançado, eficaz e que possibilita uma estratégia de monitoramento nos diversos pontos de operação do equipamento, considerando suas variações e garantindo uma operação estável e segura do sistema.

Palavras Chaves: Locomotiva diesel-elétrica, retificador de corrente elétrica, teoria de identificação de sistemas, função de transferência, modelo ARX, modelagem paramétrica de sistemas dinâmicos.

In this dissertation, we explore the application of the Theory of System Identification to develop a mathematical model that represents the behavior of the electrical current rectifier used to power the traction motors of a locomotive diesel-electric, based on mathematical manipulation of its temperature data. It was developed an ARX model and, using the aid of the computational system identification toolbox of MATLAB®, simulations were made for estimation and validation of the order of the model that best describes the dynamic response of the physical system.

The input and output data of the rectifier are obtained from the direct measurement of the output current of main generator, which is the input, and from the measurement of the temperature on the rectifier, which corresponds to the output. These data are used in developing the mathematical model of the system under study.

The goal is to obtain a model that best represents the behavior of the main engine rectifier, allowing control actions to optimize the relation between supplied and required power of locomotive, so that downtime events resulting from self-protection mechanisms against high temperatures during operation of the rectifier in severe operations are minimized. As a result, we have a more advanced and efficient model that allows a strategy to monitoring the equipment at the various points of operation, considering their variation and ensuring a stable and safety locomotive's operation.

Keywords: Diesel-electric locomotive, rectifier, theory of system identification, transfer function, ARX model, parametric modeling of dynamic systems.

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIV
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XV
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	2
1.2 JUSTIFICATIVA.....	3
1.3 OBJETIVO GERAL.....	4
1.3.1. <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.4 METODOLOGIA.....	5
1.5 ESTADO DA ARTE.....	6
1.6 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	8
CAPÍTULO 2 A LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA E O EFEITO DA TEMPERATURA NO RETIFICADOR PRINCIPAL.....	10
2.1 LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA.....	10
2.1.1. <i>Motor Diesel</i>	11
2.1.2. <i>Alternador de Tração</i>	12
2.1.3. <i>Retificador Principal</i>	13
2.1.4. <i>Motor de Tração</i>	14
2.2 DINÂMICA FERROVIÁRIA.....	15
2.2.1. <i>Aderência</i>	15
2.2.2. <i>Valores de Coeficientes Aderência</i>	16
2.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO E TRANSPORTE DE MINÉRIO.....	16
2.3.1. <i>Processo Produtivo</i>	17
2.3.2. <i>Logística de Transporte do Minério</i>	17
2.3.3. <i>Logística de Embarque do Minério</i>	18
2.4 PROBLEMA: DIODOS QUENTES.....	18
2.4.1. <i>Caracterização de Esforços de Tração e Compressão</i>	21
CAPÍTULO 3 ABORDAGEM TEÓRICA PARA MODELAGEM DO RETIFICADOR PRINCIPAL DA LOCOMOTIVA.....	23
3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA DE IDENTIFICAÇÃO.....	23
3.2 IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DINÂMICOS.....	24
3.3 ESTRUTURA DO MODELO.....	30
3.3.1. <i>Métodos de Estimativa</i>	31
3.3.2. <i>Família de Modelos Paramétricos Lineares</i>	31
3.3.3. <i>Resposta ao Impulso, Função de Frequência</i>	32
3.3.4. <i>Representação da Função de Transferência Polinomial</i>	34

3.3 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS EM MODELOS DINÂMICOS	36
3.4 PROCEDIMENTOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO	36
CAPÍTULO 4 MODELAGEM ARX PARA O RETIFICADOR PRINCIPAL DE UMA LOCOMOTIVA	38
4.1 COLETA DE DADOS	38
4.1.1. <i>Sistema de Aquisição e Registro de Dados</i>	39
4.1.2. <i>Coleta de Dados do Retificador</i>	40
4.2 PRÉ PROCESSAMENTO DOS DADOS	40
4.3 REMOÇÃO DE MÉDIAS E TENDÊNCIAS	41
4.4 ESTIMAÇÃO DOS PARÂMETROS DO RETIFICADOR	43
4.5 CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	45
4.5.1. <i>Modelagem Física</i>	48
4.5.2. <i>Identificação</i>	48
4.6. ESCOLHA DA ESTRUTURA DO MODELO	48
4.6.1. <i>Estimação modelo regressão linear</i>	50
4.7. VALIDAÇÃO DO MODELO	52
CAPÍTULO 5 O PROJETO E A ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO	53
5.1. MÉTODO E PROPOSTA PARA IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA	53
5.1.1. <i>Pólos e Zeros</i>	60
5.1.2. <i>Função de Transferência e Ajuste do Modelo</i>	63
5.1.3. <i>Resposta ao Impulso e Degrau</i>	65
CAPÍTULO 6 CONCLUSÃO	68
6.1 TRABALHOS FUTUROS.....	70
6.2 TRABALHOS PUBLICADOS.....	70
APÊNDICE A	71
DESCRIÇÃO E PROPRIEDADES DE SISTEMA LINEAR	71
A.1 SISTEMA TEMPO CONTÍNUO	71
A.2 MODELO TEMPO DISCRETO	73
A.3 LIGAÇÕES ENTRE MODELOS DE TEMPO CONTÍNUOS E DISCRETOS.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76

Lista de Figuras

FIGURA 2.1 - DIAGRAMA BÁSICO DE UMA LOCOMOTIVA.	11
FIGURA 2.2 - LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA.	11
FIGURA 2.3 - MOTOR DE PROPULSÃO A DIESEL.....	12
FIGURA 2.4 - ALTERNADOR PRINCIPAL.....	13
FIGURA 2.5 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ALTERNADOR E RETIFICADOR.	14
FIGURA 2.6 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONJUNTOS DE DIODOS.	14
FIGURA 2.7 - CONFIGURAÇÕES DE COMBOIOS EM OPERAÇÃO NA EFC.....	18
FIGURA 2.8 – (A) FRATURA FRÁGIL, (B) DÚCTIL.	19
FIGURA 2.9 – REGISTROS DE EVENTOS DA LOCOMOTIVA.....	20
FIGURA 2.10 – REGISTRO DOS ESFORÇOS NOS ENGATES DO COMBOIO.....	22
FIGURA 3.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE CONTROLE DA TEMPERATURA DO RETIFICADOR.....	25
FIGURA 3.2. - DIAGRAMA DE IDENTIFICAÇÃO DE AJUSTE DO MODELO.....	27
FIGURA 3.3. - ETAPAS DO PROCEDIMENTO DE IDENTIFICAÇÃO.....	28
FIGURA 3.4. LAÇO DA IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS.....	30
FIGURA 3.5.- DIAGRAMA BÁSICO ENTRADA-SAÍDA.....	33
FIGURA 3.6.- ESTRUTURAS DOS MODELOS.....	35
FIGURA 3.7. – FLUXOGRAMA DE VALIDAÇÃO.....	37
FIGURA 3.8. - TESTE DE VALIDAÇÃO.....	37
FIGURA 4.1 – SISTEMA DE REGISTRADOS DE EVENTOS DA LOCOMOTIVA.....	40

FIGURA 4.2 - SINAIS DE ENTRADA E SAÍDA DO RETIFICADOR.	43
FIGURA 4.3 – CICLO PARA IDENTIFICAÇÃO.	47
FIGURA 4.4 – CONSTRUÇÃO DO MODELO.....	47
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA DE TRACÇÃO DA LOCOMOTIVA.	55
FIGURA 5.2 - A) $y(t)$ TEMPERATURA; B) $u(t)$ CORRENTE.	56
FIGURA 5.3 – $y(t)$ TEMPERATURA ; B) $u(t)$ CORRENTE ; C) $u'(t)$ ROTAÇÃO DO SOPRADOR.....	57
FIGURA 5.4 – RESULTADOS DA EQUAÇÃO À DIFERENÇA PARA 01 ENTRADA. ...	58
FIGURA 5.5 – RESULTADOS DA EQUAÇÃO A DIFERENÇA, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	59
FIGURA 5.6 – ERRO DO MODELO, $u = I_{Ger.Principal}$	59
FIGURA 5.7 – ERRO DO MODELO, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	60
FIGURA 5.8 – PÓLOS E ZEROS, $u = I_{Ger.Principal}$, $T_0 = 0$	61
FIGURA 5.9 – PÓLOS E ZEROS, $u = I_{GP}$	61
FIGURA 5.10 – PÓLOS E ZEROS, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$, $T_0 = 0$	62
FIGURA 5.11 – PÓLOS E ZEROS, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	62
FIGURA 5.12 – AJUSTE ARX_{211} , $u = I_{GP}$, $T_0 = 0$	64
FIGURA 5.13 – AJUSTE ARX_{211} , $u = I_{Ger.Principal}$	64
FIGURA 5.14 – AJUSTE ARX_{211} , $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$, $T_0 = 0$	65
FIGURA 5.15 – AJUSTE ARX_{211} , $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	65
FIGURA 5.16 – RESPOSTA AO IMPULSO, $u = I_{GP}$	66

FIGURA 5.17 – RESPOSTA AO DEGRAU $u = I_{GP}$	66
FIGURA 5.18 – RESPOSTA AO IMPULSO $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	67
FIGURA 5.19 – RESPOSTA AO DEGRAU $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$	67

Lista de Tabelas

TABELA 2.1 COMPARATIVO DE MOTORES CC.	15
TABELA 2.2 COEFICIENTES DE ADERÊNCIA.	16
TABELA 2.3 LIMITES DE ESFORÇOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO PARA ENGATES FERROVIÁRIOS.....	21

Lista de Abreviaturas e Símbolos

<i>ARMAX</i>	Auto-Regressive Moving with Exogenous Input
<i>ARX</i>	Auto-Regressive with Exogenous Input
<i>AT</i>	Alternador de Tração
<i>BJ</i>	Box-Jenkins
<i>EFC</i>	Estrada de Ferro Carajás
<i>GDT</i>	Vagão Tipo Gôndola
<i>GP</i>	Gerador Principal
<i>HP</i>	Horse Power
<i>MQ</i>	Mínimos Quadrados
<i>MV</i>	Máxima Verossimilhança
<i>NBR</i>	Norma Brasileira
<i>EDO</i>	Equação Diferencial Ordinária
<i>OE</i>	Output Error
<i>PDF</i>	Função de Densidade de Probabilidade
<i>SITB</i>	Math-Works System Identification Toolbox
<i>TCT</i>	Vagão Tipo Tanque
θ^T	Matriz de Regressores
$e(t)$	Ruído, Perturbação
$\omega(t)$	Termo de perturbação
$\eta(t)$	Ruído livre da saída
$\varphi(t)$	Vetor de regressão
na	Número de pólos
nb	Número de zeros
nk	Tempo de atraso
$y(t)$	Saída do sistema
$u(t)$	Entrada do sistema
q	Operador de deslocamento

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A finalidade principal ou idéia básica deste trabalho é representar o retificador principal de uma locomotiva diesel-elétrica, por um modelo, ou por uma descrição matemática determinada pelo tipo de sistema, como por exemplo, estático, dinâmico, linear, não linear, estocástico, determinístico, entre outros, a partir de dados, medições ou observações das suas entradas e saídas (Eykoﬀ, 1974 e Ljung, 1999).

Conhecer um modelo que descreva o comportamento de um sistema dinâmico é fundamental no desenvolvimento e implantação de melhorias em sistemas nas diversas áreas, tanto de ciências exatas, bem como de ciências naturais, objetivando o aprimoramento contínuo em estudo científico, desenvolvimento de projetos, previsões de compatibilidade econômica, aumento no desempenho, entre outros. Daí pode-se observar a necessidade de cada vez mais propiciar desenvolvimento nesta área de pesquisa, que tem recebido atenção relevante nas últimas décadas.

Entende-se por modelagem e identificação, a determinação do modelo matemático que represente um conjunto de regras, que descrevam o comportamento de um determinado sistema, fornecendo informação temporal de uma ou mais variáveis observadas. Modelos podem ser mentais, gráficos, algorítmicos e matemáticos (Ljung e Glad, 1994).

Os procedimentos envolvidos na elaboração do modelo, no problema de identificação, podem ser obtidos por meio de linhas não tão essencialmente desconexas, sendo usualmente classificados em: Análise física matemática, e identificação experimental. A primeira baseia-se nas leis da física que caracterizam um sistema específico, como por exemplo, as leis de conservação de massa, energia e movimento. A segunda baseia-se tão somente nas medidas ou observações do sistema (Ljung e Glad, 1994).

Com uso dos procedimentos citados no parágrafo anterior é possível representar a dinâmica de uma planta ou processo. No entanto, para que seja viável a aplicação de controle é necessário que seja encontrado um modelo adequado, e que este represente o sistema em

sintonia com a aplicação requerida. Na prática, isso significa que processos reais geralmente podem ser representados por modelos que não são complexos (Hang e Chin, 1991); (Gessing, 1996), (Coelho e Coelho Apud Isermann e Lachmann, 2004). No caso em que ocorrer de um modelo dinâmico ser muito complexo, e seu comportamento não seja descrito claramente, é possível descrevê-lo usando equações diferenciais genéricas, e a partir destas aproxima-se o modelo ao sistema real, observando o comportamento de ambos para um conjunto de dados de entrada e saída. A estimação de parâmetros é um procedimento numérico que determina os valores destes em um determinado sistema.

No trabalho de pesquisa aqui descrito, busca-se um modelo polinomial que possibilite a representação do comportamento da temperatura do retificador de corrente elétrica, utilizado no suprimento dos motores de tração de uma locomotiva diesel-elétrica. Será testada a estrutura de um modelo paramétrico e observado se este é adequado para possibilitar um controle esperado. A escolha dessa estrutura deve apresentar uma função de transferência simples, e possuir características para controle preditivo. A estimação e a validação do modelo são feitas utilizando o *toolbox* de identificação do MATLAB®.

A escolha da ordem do modelo que melhor descreva a resposta dinâmica do sistema físico é feita observando-se o percentual de ajuste da saída do sistema real em relação ao sistema modelado. Busca-se, portanto, um modelo que possibilite ações de controle para otimização entre a corrente elétrica fornecida através do retificador, e a requerida para tração, de tal forma que eventos de “diodos quentes”, que ocasionam *downtime* do equipamento, sejam minimizados.

1.1 Motivação

Durante a operação em trens de carga pesada, particularmente nos comboios utilizados no transporte de minério de ferro e seus derivados, a locomotiva quase sempre é solicitada a operar em seu limite máximo. Sob regime severo, um nível elevado de corrente elétrica passa a circular através dos diodos de potência do retificador, provocando o aumento da sua temperatura. Chaves termostáticas estão montadas no dissipador e atuam quando a temperatura atinge níveis pré-estabelecidos, provocando o corte instantâneo de toda potência entregue aos motores de tração, resultando na geração de ondas de choques entres os vagões da composição e, conseqüente potencialização de quebras por fraturas, normalmente frágeis,

em seus engates. Dessa forma, justifica-se a implementação de uma forma de estimar o comportamento da temperatura do retificador em função de sua corrente de entrada, a qual é demandada pelos motores de tração para produzir o conjugado necessário para impulsionar os comboios ferroviários.

Identificar um modelo matemático que represente adequadamente o retificador principal de uma locomotiva diesel-elétrica, a partir da medição dos valores de corrente em sua entrada e da temperatura dissipada em sua saída, é a motivação para esta pesquisa. Busca-se uma estratégia de controle capaz de minimizar os efeitos provocados pela atuação do sistema de proteção contra altas temperaturas, sendo o modelo obtido representado por meio de função de transferência.

1.2 Justificativa

Atualmente, com a tendência de processos cada vez mais complexos e da necessidade de manter os custos reduzidos, a utilização da teoria de identificação de sistemas tem sido uma ferramenta de grande importância para que as tarefas de analisar, identificar e projetar os sistemas se torne mais fácil. Devido às características típicas do controle de sistemas reais serem geralmente não linear, apresentar atrasos variantes no tempo e perturbação não branca (Ogata, 1997) (Luyben e Luyben, 1997), o uso de ferramentas matemáticas convencionais torna-se limitadas para determinação de um modelo.

A representação de um sistema por expressões matemáticas, que neste trabalho é feita por funções de transferência, é suficientemente eficiente para obter as respostas referentes às questões necessárias para tomada de decisão sobre o mesmo, considerando-se os dados obtidos em função da realização de experimentos.

Alguns dos diferentes propósitos para utilização da teoria de identificação de sistemas, a partir de um modelo paramétrico, é que a mesma permite um melhor ajuste na tentativa de prever os estados futuros do sistema, ou seja, o comportamento dinâmico. Tal procedimento permite uma supervisão de sua faixa de operação, reduzindo significativamente os eventos de *downtime*.

A escassez de pesquisas voltadas para otimização e desenvolvimento dos sistemas utilizados em plantas ferroviárias de carga pesada, tem feito com que a tecnologia deste tipo

de transporte seja relativamente baixa, se compararmos com o transporte ferroviário leve, como por exemplos os trens de alta velocidade. Com o crescente aumento da demanda de mercado para o transporte de carga pesada, é percebida a necessidade de desenvolver modelos de sistemas que possibilitem significativas melhorias de monitoramento e controle.

A importância em controlar a temperatura do retificador de uma locomotiva diesel-elétrica justifica-se pela necessidade de utilizar o máximo de sua capacidade, eliminando as perdas por parada indesejada e que oneram a produção. Em relação aos modelos tradicionais de controle, busca-se com a aplicação da teoria de identificação de sistemas e modelagem paramétrica, possibilitar ações de controle que garantam a eficiência do sistema. Ressalta-se a importância desta técnica para implantação de ações complementares de monitoramento, controle e, por conseguinte identificação dos parâmetros necessários para ajuste e eventuais correções no comportamento do sistema. A utilização dessa metodologia viabiliza-se principalmente por ser de baixo custo e apresentar resultados seguros.

1.3 Objetivo Geral

A proposta desta pesquisa é utilizar a teoria de identificação de sistemas para obtenção de um modelo, no domínio do tempo e com representação por meio de função de transferência, que represente matematicamente o comportamento da temperatura do retificador principal de uma locomotiva diesel-elétrica.

O modelo matemático, definido pela comparação entre as alternativas de classes de modelos identificados como apropriados para essa representação, e da imediata estimação de seus parâmetros, será utilizado para predição dos níveis de temperatura em um retificador durante sua ampla faixa de operação, possibilitando ações de controle mais eficazes.

1.3.1. Objetivos Específicos

Determinar uma classe de modelos polinomiais que possam representar o comportamento térmico do retificador principal de uma locomotiva.

Realizar simulação com cada modelo obtido e analisar o comportamento, em função do tempo, na ampla faixa de operação do equipamento.

Identificar os parâmetros de um modelo ARX que melhor represente o sistema objeto do estudo.

Contribuir para que ações de controle no sistema de excitação do campo de gerador principal possam ocorrer, otimizando a potência fornecida pelo mesmo e a suportada pelo retificador instalado em sua saída, reduzindo os eventos de atuação do sistema de proteção contra altas temperaturas.

1.4 Metodologia

Inicialmente realiza-se um estudo sobre a teoria de Identificação de Sistemas e modelagem paramétrica. Detalham-se principalmente as técnicas utilizadas na identificação empírica, sendo mostrado um estudo mais direcionado aos modelos polinomiais, em especial ao ARX. Conceituam-se sistemas dinâmicos e avalia-se o seu comportamento no tempo.

A pesquisa para desenvolvimento de um modelo dinâmico de um retificador, utilizado em locomotiva diesel-elétrica para suprir os motores de tração, é fundamentada em tópicos conceituais da teoria de identificação de sistemas, controle de processo e princípios da teoria de controle. É realizado o descritivo do problema e seus impactos potenciais, tendo por base estudos e bibliografia sobre dinâmica ferroviária. Estas referências e conceitos fazem parte do material utilizado no desenvolvimento do modelo matemático, produto desta dissertação.

Após abordagem anterior é realizado procedimento para aquisição dos dados utilizados no desenvolvimento do modelo. Utiliza-se a metodologia de identificação, já demonstrada anteriormente, de uma representação do sistema no domínio do tempo. Estes dados, observados durante funcionamento em condições equivalentes aos pontos de operação real do equipamento, são manipulados com utilização da ferramenta computacional do *toolbox* de identificação do MATLAB®.

Após tratamento dos dados são realizadas a estimação e validação, para que a partir daí seja possível proceder às simulações de onde será obtida uma família de modelos. Com os resultados das simulações é então observado e comparado o seu comportamento em relação à dinâmica do sistema real. A escolha do modelo é feita com base nos resultados destas observações.

Por fim, é realizada a apresentação dos resultados obtidos. Sugere-se ainda a implementação de um controlador de primeira ordem para inferir na corrente de entrada do retificador, o que possibilitará ação de controle da temperatura, uma vez que esta é função direta da corrente de entrada. É demonstrado o comportamento do sistema na ampla faixa de operação. Validações com dados de retificadores semelhantes de outros modelos de locomotivas também foram observados, não sendo apresentados neste trabalho, porém indicou viabilidade na obtenção de um modelo generalizado para este tipo de sistema, objeto deste estudo.

1.5 Estado da Arte

Toda corrente elétrica necessária para suprimento do sistema de potência de uma locomotiva diesel-elétrica, seja durante a operação em tração ou frenagem dinâmica, é produzida por um gerador de corrente alternada e entregue aos motores de tração através de um retificador. A energia térmica resultante da passagem da corrente pelos diodos é dissipada em placas de alumínio.

A bibliografia sobre o controle da temperatura do retificador de corrente para este tipo de planta, ou seja, locomotiva diesel elétrica, não é ampla, o que torna a utilização de expertise e observações aos manuais fornecidos pelos fabricantes destes equipamentos, sua principal fonte de informações. No entanto, o conhecimento a respeito deste tipo de equipamento mostra que os controles utilizados na maioria dos modelos de locomotivas, não possibilitam ações de controle capaz de evitar o colapso com base no comportamento operacional, principalmente sob regimes severos.

O motor diesel e o gerador principal são as principais fontes de energia em uma locomotiva, e estão providos de controles relativamente eficientes. Para outros equipamentos como, por exemplo, o retificador principal, não há um controle eficiente o bastante a possibilitar uma sintonia entre a potência fornecida aos motores de tração, e a temperatura dissipada em seus dissipadores de calor, possuindo apenas atuadores de proteção, os chamados controles *on/off*. O retificador possui apenas fusíveis de proteção, que atuam quando ocorre curto circuito dos diodos, e termostatos, que promovem o desligamento do sistema em caso de altas temperaturas.

Modelar equipamento de um ativo rodante em um sistema ferroviário de carga pesada, requer amplo conhecimento sobre a dinâmica da planta produtiva e da técnica a ser utilizada. Após avaliar algumas das diversas técnicas e metodologias existentes, foi adotada a identificação de sistemas e modelagem paramétrica como ferramenta para nossa pesquisa. Isto se justificou pelo fato do objetivo de prove ações para controle preditivo e esta técnica é a mais apropriada.

A técnica para identificação de um sistema é um campo diversificado que pode ser apresentado de várias maneiras diferentes. A bibliografia existente no sistema de identificação é realmente extensa, sendo praticamente impossível abranger todo material disponível e que trata o assunto. Nesta dissertação, concentraremos em matérias recentes e facilmente disponíveis, além de referências que sejam suficientemente adequadas para um estudo mais aprofundado, bem como em alguns trabalhos anteriores, que refletem as raízes das diversas técnicas e resultados.

Experimento para identificação dinâmica do processo tem sido uma área ativa de investigação em diversas áreas da engenharia. Vários livros são dedicados ao tema. Alguns aspectos teóricos estão contemplados no sistema de identificação (L. Ljung, 1987). Uma amigável discussão de alguns dos aspectos práticos de identificação é fornecida em "Identificação de Sistemas de Destilação", (Reinhold, 1992). Mais detalhes sobre identificação de sistemas estão em (Ljung, 1999), (Kashyap e Rao, 1976), (Eykhof, 1974) e (Söderström e Stoica, 1989), (Goodwin e Payne, 1977), (Davis e Vinter, 1985) que estão mais focados com a apresentação.

Entre os vários livros sobre o assunto, podemos mencionar ainda (Box e Jenkins, 1970), onde é feita abordagem de modelagem ARIMA (Auto-Regressivo –Integrador –Média Móvel), tal processo baseia-se na idéia de que uma série temporal não-estacionária pode ser modelada a partir de d -diferenciações e da inclusão de um componente auto-regressivo e uma componente média móvel.

O papel do modelo de validação e seleção em um sistema de tratamento de identificação é enfatizado em (Kashyap e Rao, 1976), enquanto (Söderström e Stoica, 1983) centram-se em métodos instrumentais variáveis. Textos que se concentram em técnicas de identificação recursivas estão incluídos em (Söderström e Ljung, 1983). Tratamento estatístico

de modelagem de séries temporais é ainda mais relevante para o problema de identificação de sistema e estão em (T. Anderson 1971) e (Brinllinger, 1981).

O procedimento para uma aplicação da modelagem é bastante dependente, e muitas vezes têm suas raízes na tradição e em técnicas específicas na área de aplicação. A outra rota para a matemática, bem como modelos gráficos é diretamente baseada sobre a experimentação. O processo de construção de modelos a partir da entrada (u) e saída (y) como, por exemplo, a corrente elétrica que representa a entrada deste estudo e sua temperatura, que representa a saída, que são registrados e submetidos à análise dos dados a fim de inferir um modelo, é conhecido como um sistema de identificação (Ljung, 1987).

1.6 Estrutura da Dissertação

O presente trabalho está organizado em seis capítulos, um apêndice e referências bibliográficas. O conteúdo dessa dissertação aborda todo o processo envolvido em uma planta de transporte ferroviário de carga pesada, focando os efeitos de parada indesejada, decorrentes da atuação do sistema de proteção contra alta temperatura do retificador principal da locomotiva, durante operação de carga.

Nesta dissertação são apresentadas generalidades relativas à teoria de identificação de sistemas, ferramentas computacionais aplicáveis, todo o trabalho de pesquisa e a fundamentação teórica utilizada na elaboração da modelagem do retificador principal de uma locomotiva. A formulação do problema e a fundamentação teórica são tratadas no Capítulo 2, onde se apresenta o propósito do monitoramento e controle do aquecimento do sistema. É descrito o funcionamento básico da locomotiva diesel-elétrica.

No Capítulo 3 é feita abordagem dos conceitos e procedimentos que serão utilizados durante o estudo para identificação do sistema e realizada a formulação da identificação com utilização de modelos paramétricos do tipo ARX.

No Capítulo 4 aborda-se a descrição de todo processo de segurança operacional envolvido. É apresentada a metodologia utilizada para realização da medição e registro da temperatura dos diodos do retificador e abordado os sistemas de aquisição e registro de eventos existentes no equipamento, no caso desta pesquisa, uma locomotiva diesel-elétrica.

Os procedimentos utilizados durante o desenvolvimento da pesquisa para esta dissertação têm fundamento na bibliografia existente, conforme pode ser visto em (Fonseca Neto, 2007), (Ljung e Glad, 1994), (Ljung, 1994), (Ljung, 1999) e (Aguirre, 2007). Após as etapas iniciais de coleta e registro das amostras, é feito o pré processamento das mesmas e selecionado a estrutura a ser identificada, obtendo assim um conjunto de modelos a partir dos quais possa ser escolhido o que seja capaz de reproduzir com o máximo ajuste os valores medidos. Para tal é estabelecido ainda os índices que definem de forma quantitativa a qualidade deste modelo.

O Capítulo 5 é dedicado ao projeto. Apresentam-se a estimação e validação dos dados coletados, as simulações e os resultados obtidos. Também são sugeridas ações de controle que possibilitem reduzir os eventos decorrentes de diodos quentes, que geram impactos ao sistema ferroviário.

O Capítulo 6 contém a conclusão sobre a utilização da teoria de identificação de sistemas na escolha de um modelo paramétrico que melhor represente o retificador principal de uma locomotiva. Também está sua contribuição para que seja possível uma considerável melhoria nos níveis de monitoramento e controle da temperatura.

CAPÍTULO 2

A LOCOMOTIVA DIESEL-ELÉTRICA E O EFEITO DA TEMPERATURA NO RETIFICADOR PRINCIPAL

Neste capítulo é descrito o conceito de uma locomotiva diesel-elétrica e seu princípio de funcionamento, sendo discutidos os vários sistemas existentes e suas interações. É apresentado o retificador principal de uma locomotiva e enfatizando o propósito do monitoramento e controle de sua temperatura.

Uma explanação a cerca da teoria de dinâmica ferroviária é realizada, apresentando-se o modelo matemático usualmente utilizado para estudo do comportamento dos trens. É apresentado o modelo do “trem tipo” utilizado e os impactos experimentados por sua composição por ocasião de paradas bruscas.

Alguns tópicos de falhas que ocorrem em estruturas que estão sujeitas a tensões dinâmicas e oscilantes (Callister, 2002) é apresentado, uma vez que tem relação direta com o efeito de quebras em comboios ferroviários.

2.1 Locomotiva Diesel-Elétrica

Analisando de uma forma bem superficial, uma locomotiva diesel-elétrica tem como princípio de funcionamento transformações de energia mecânica em elétrica e vice-versa. Figura 2.1 mostra um diagrama básico de uma locomotiva, enquanto que na Figura 2.2 temos o modelo real e seus principais componentes.

Um motor de propulsão a diesel é a fonte primária e produz energia mecânica para o acionamento dos diversos geradores elétricos disponíveis. A transferência da força mecânica produzida pelo motor diesel é feita por meio de acoplamento direto, engrenagens ou acoplamentos emborrachados. Os geradores por sua vez suprem os diversos sistemas elétricos.

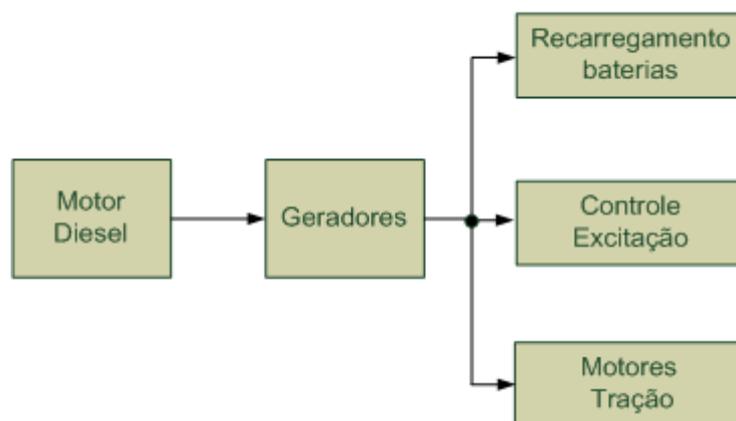


Figura 2.1 - Diagrama Básico de uma Locomotiva.

Uma locomotiva é formada por sistemas; elétrico, mecânico e pneumático, os quais são projetados de modo que possam ser ajustados e testados previamente, facilitando assim a sua manutenção, reduzindo significativamente o tempo de retenção da locomotiva. A maioria dos circuitos de controle e equipamentos é montada em módulos, que possuem padrão de identificação e em sua maioria são intercambiáveis. A seguir são descritos os principais componentes da locomotiva, bem como um resumo do seu funcionamento.



Figura 2.2 - Locomotiva Diesel-Elétrica.

2.1.1. Motor Diesel

Um motor diesel é uma máquina de combustão interna, que utiliza o calor de compressão para iniciar a ignição e queimar o combustível, que é injetado na câmara de combustão durante a fase final de compressão, característica que lhe dá maior eficiência

térmica em relação a qualquer outro motor de combustão (Taylor, C.F, 1977), sendo fabricado em versões de dois e quatro ciclos de curso. A Figura 2.3 ilustra um motor diesel, composto de dezesseis cilindros em “V”, quatro ciclos, equipado com turbo compressor e potência de 4.400 HP.



Figura 2.3 - Motor de Propulsão a Diesel.

2.1.2. Alternador de Tração

O alternador de tração é uma máquina de dez pólos, trifásica, que converte a energia mecânica do motor diesel em energia elétrica para tração. O alternador possui um único rolamento, localizado na extremidade dos anéis do rotor, sendo que no lado oposto é suspenso pelo próprio virabrequim do motor diesel.

O estator possui dois enrolamentos que são fechados em ligação estrela e operam em paralelo ou série. O rotor possui o enrolamento ligado aos anéis coletores, que é alimentado pela corrente contínua produzida por uma excitatriz, a qual também é acionada mecanicamente pelo motor diesel. O alternador de tração produz corrente elétrica alternada trifásica, com tensão e frequência variáveis. Possui um circuito de campo rotativo de 10 pólos, e uma armadura estacionária com três enrolamentos ligados em estrela.

Na Figura 2.4 é ilustrado um alternador de tração, gerador auxiliar e excitatriz, ambos montados no motor diesel.

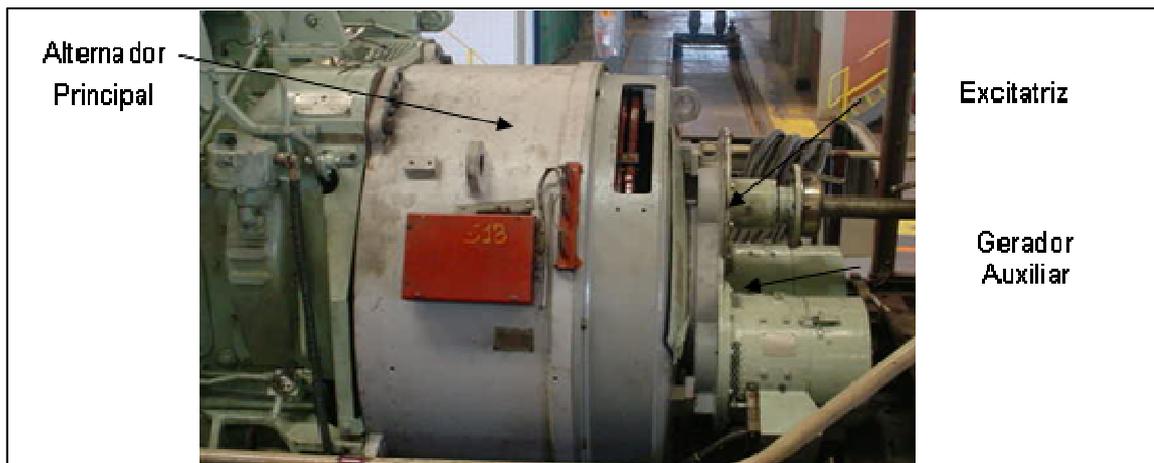


Figura 2.4 - Alternador Principal.

Toda corrente elétrica produzida pelo alternador é retificada por um banco de retificadores de onda completa, trifásico, e serve para alimentação dos motores de tração. O banco de retificadores está montado sobre o alternador de tração.

2.1.3. Retificador Principal

O retificador principal da locomotiva é constituído por 72 diodos de silício com alta capacidade de tensão e corrente. Os diodos são conectados de forma a constituírem uma ponte trifásica de onda completa. O calor produzido pela passagem da corrente elétrica através do retificador de corrente é reduzido com uso de ventilação forçada, produzida pelo soprador do alternador de tração ou por um soprador independente, sendo este acionado mecanicamente pelo motor diesel, ou eletricamente por meio da alimentação de um sistema auxiliar.

O retificador é provido de um *Snubber* (circuito de supressor de transientes) de comutação, formado por resistores e capacitores ligados em delta. O circuito ilustrado na Figura 2.5 representa o sistema descrito anteriormente.

Devido à alta demanda de corrente exigida pelos motores de tração, em particular quando a locomotiva opera em regime de esforço, é necessário que cada linha seja constituída por um conjunto de diodos em paralelo, conforme ilustrado na Figura 2.6.

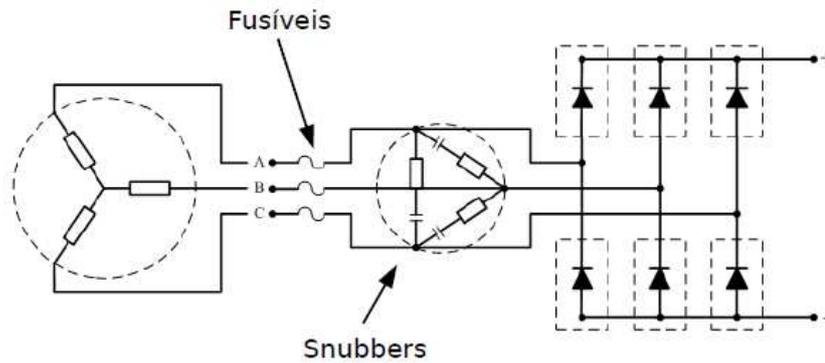


Figura 2.5 - Diagrama Esquemático do Alternador e Retificador.

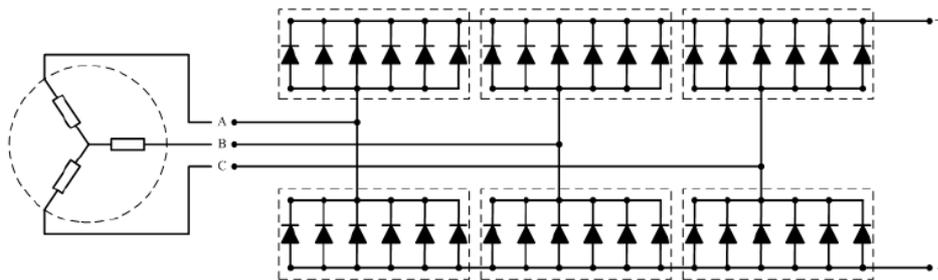


Figura 2.6 - Diagrama Esquemático do Conjuntos de Diodos.

Todos esses componentes estão montados sobre um dissipador de calor e protegidos por meio de uma caixa própria em fibra de vidro com alta isolamento.

2.1.4. Motor de Tração

Os motores de tração são máquinas de corrente contínua, com pólos de comutação e enrolamento série. Possuem resfriamento forçado e convertem a energia elétrica, fornecida através do retificador principal, em energia mecânica para o movimento da locomotiva. Alguns modelos mais recentes de locomotivas estão equipados com motores de tração de corrente alternada. No Brasil, o primeiro lote de locomotivas com essa tecnologia está em teste na ferrovia Carajás, operada pela empresa Vale. O lote é composto por 10 (dez) locomotivas modelos *evolution*, tendo cada uma delas uma potência de 6.000 HP para tração.

A ligação entre os motores de tração e os eixos da locomotiva, se dá por meio do acoplamento entre pinhão e coroa. Em frenagem dinâmica, os motores de tração comportam-

se como geradores, e servem para controle da velocidade do trem. Na tabela 2.1 é feito um comparativo entre diversos tipos de motores CC.

Tabela 2.1 Comparativo de Motores CC.

Tipo	Conjugado	Velocidade
Excitação Separada	Fraco	Constante
Série	Elevado	Variável (dispara em vazio)
Shunt	Fraco	Constante
Composto Cumulativo	Elevado	Pouco Variável
Composto Diferencial	Fraco	Constante

2.2 Dinâmica Ferroviária

Com o crescente aumento do mercado mundial de minério de ferro e produtos siderúrgicos em geral, a busca por mais segurança e eficiência por parte das empresas que operam ferrovias tem sido um diferencial para utilização de seus recursos, adequando-se à crescente demanda por este tipo de transporte. Assim, as ferrovias vêm buscando soluções em diversos pontos desta atividade, em especial no processo de segurança durante as operações de seus ativos.

Vários fatores estão relacionados com um sistema de transporte ferroviário, sejam, minério de ferro, cargas gerais, passageiros ou cargas perigosas. Os principais pontos referentes à dinâmica ferroviária são definidos em seguida, sendo que estes também apresentam relação com o estudo objeto deste trabalho de pesquisa.

2.2.1. Aderência

A capacidade de tração, aceleração e frenagem de uma locomotiva é determinada por sua capacidade de aderência, que para este caso pode ser definido como sendo a quantidade de agarramento entre a roda da locomotiva e a superfície de rolamento, ou simplesmente o contato roda-trilho. Para que um trem desloque-se sobre a via férrea, é necessário que haja uma força no ponto de contato da roda com o trilho. Esta força é produzida pela locomotiva e denominada força de tração. Quando esta é aplicada

tangencialmente à roda terá efeito se, somente se, existir demanda de aderência, que pode ser definida por

$$D_a = \frac{\text{força de tração máxima}}{\text{peso aderente da locomotiva}} \quad (2.1)$$

A expressão (2.1) se aplica à frenagem, substituindo-se a força de tração pela força de retardamento do veículo e o peso aderente pela massa a frear, e pode ser definida então por

$$D_a = \frac{\text{força de tração máxima}}{\text{peso total do veículo}} \quad (2.2)$$

2.2.2. Valores de Coeficientes Aderência

Os valores do coeficiente de aderência adotados nos cálculos de tração são muito importantes uma vez que limitam o esforço de tração que uma locomotiva pode exercer. Experiências práticas e testes em simuladores de trens comprovam que 30% de aderência na partida com trilhos secos é um valor razoável. A Tabela 2.2 indica os valores admitidos no Brasil para fins de cálculos de trens:

Tabela 2.2 Coeficientes de aderência.

Tipo Locomotiva	Trem Tipo	Partida	Marcha
Diesel-Elétrica	Passageiro	25%	18%
	Carga	30%	20%
Elétrica	Passageiro	25%	20%
	Carga	25%	16%

2.3 Processo de Produção e Transporte de Minério

Os minérios de ferro são rochas a partir das quais pode ser fabricado o ferro metálico. O ferro encontra-se geralmente sob a forma de óxidos. Normalmente costuma ser extraído de um mineral chamado hematita. A hematita é formada principalmente por ferro combinando com o oxigênio. Os minerais dos quais são extraídos metais e outros produtos

com vantagem econômica são chamados minérios. Outros tipos de minérios de ferro comuns incluem a magnetita, ou ainda como um carbonato, a siderita.

O minério de ferro é um dos destaques do portfólio de produtos na maioria das empresas de mineração. No Brasil a jazida de Carajás destaca-se por sua qualidade superior, o que garante sua exportação para os quatro cantos do globo, acompanhando o crescimento do setor.

A qualidade do minério de ferro está basicamente ligada a sua propriedade química, que corresponde à própria composição. Quanto maior o teor de ferro e menor o de impurezas, melhor sua qualidade. As propriedades físicas, que se refere à granulometria, ou seja, ao tamanho das partículas, requer alto nível de controle nas etapas de peneiramento e classificação, mesmo para minérios de alto teor de ferro e baixo nível de impurezas, atendendo assim, as exigências do mercado.

2.3.1. Processo Produtivo

No complexo minerário onde foi realizado o estudo deste trabalho, o método de lavra é a céu aberto, com bancadas de 15 metros de altura e operações de perfuração, detonação, carregamento e transporte de minério. A operação de carregamento é efetuada com escavadeiras a cabo, hidráulicas e pás mecânicas. O transporte até as unidades de britagem é efetuado por meio de caminhões fora de estrada.

Para permitir a adequação granulométrica dos produtos, a usina de beneficiamento possui equipamentos que realizam operações de moagem, peneiramento a úmido e classificação do minério. As etapas são: britagem primária, britagem e peneiramento secundário, britagem e peneiramento terciário, moagem e filtragem de *pellet-feed*. O objetivo da usina de beneficiamento é obter três produtos de granulometria distintas: *pellet-feed*, *sinter-feed* e granulado.

2.3.2. Logística de Transporte do Minério

A produção de minério gerada nas minas a céu aberto de Carajás-PA, onde está localizada a planta industrial de tratamento de minério de ferro, é escoada por meio de

comboios ferroviários até o pátio de estocagem em São Luís. O transporte é feito pela ferrovia, Estrada de Ferro Carajás, EFC, cuja extensão mede 982 km. As composições ferroviárias são compostas por 330 carros e 04 locomotivas, que operam em modelo de potência distribuída, do tipo locotrol e tricotrol. Neste tipo de configuração as locomotivas posicionadas ao longo da composição são operadas remotamente a partir da locomotiva posicionada na frente do trem, que é denominada locomotiva líder, enquanto que as demais são denominadas locomotivas remotas. A Figura 2.7 ilustra alguns desses modelos e que estão em operação na EFC.

É fundamental que todas as etapas do processo sejam devidamente dimensionadas e controladas em função dos volumes transportados, de modo a minimizar os custos e assegurar sua qualidade e segurança.

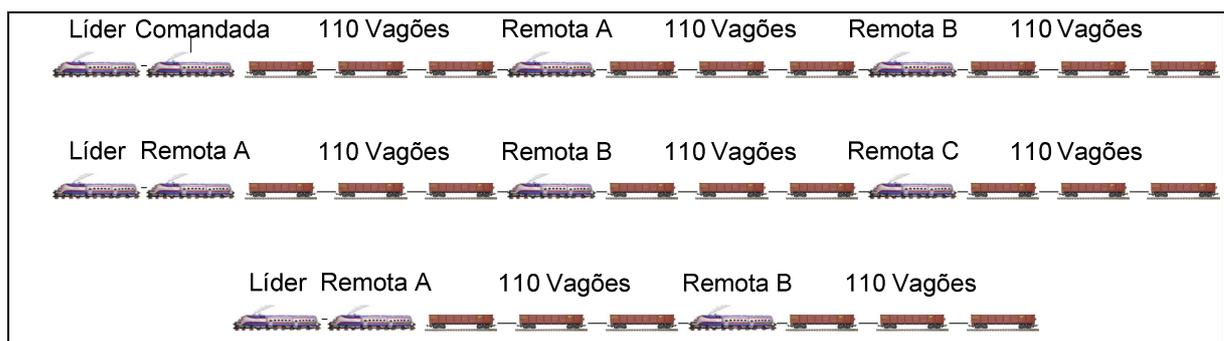


Figura 2.7 - Configurações de Comboios em Operação na EFC.

2.3.3. Logística de Embarque do Minério

Após um período mínimo de estocagem, o minério é levado por correias transportadoras até o carregador de navios. O processo de embarque faz uso de sistemas multi-agentes (SMA) que proporcionam suporte na detecção de falhas e otimização de rotas operacionais no terminal portuário (Fonseca Neto e Pinheiro, 2003).

2.4 Problema: Diodos Quentes

A possibilidade de quebras do comboio ocorre devido à tensão mecânica resultante ultrapassar os limites da resistência dos engates à tração, torção, compressão ou

cisalhamento, gerando dessa forma a fratura, que é fundamentalmente a separação de um corpo em duas ou mais partes, em resposta as tensões impostas. (Callister e Wiley, 1991). Na Figura 2.8 temos a curva de força versus deslocamento dos comportamentos tipo frágil e dúctil.

Conforme citado anteriormente, a operação em regime severo eleva a temperatura do retificador e potencializa a atuação dos termostatos de proteção do mesmo. Na Figura 2.9 temos o registro do momento em que ocorre o corte brusco da potência de tração devido à sobretemperatura do retificador. Este evento potencializa quebras e acidentes nos comboios ferroviários.

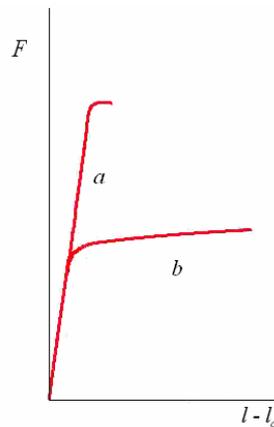


Figura 2.8 – (a) Fratura Frágil, (b) Dúctil.

Segundo diversos autores, a maioria das causas de falha de componentes mecânicos é decorrente da fadiga do material. A fadiga é uma forma de falha que ocorre em estruturas submetidas a tensões dinâmicas e flutuantes (Kanninen e Popelar, 1985), tais como as que agem diretamente nas estruturas dos engates rotativos e das hastes rígidas dos vagões.

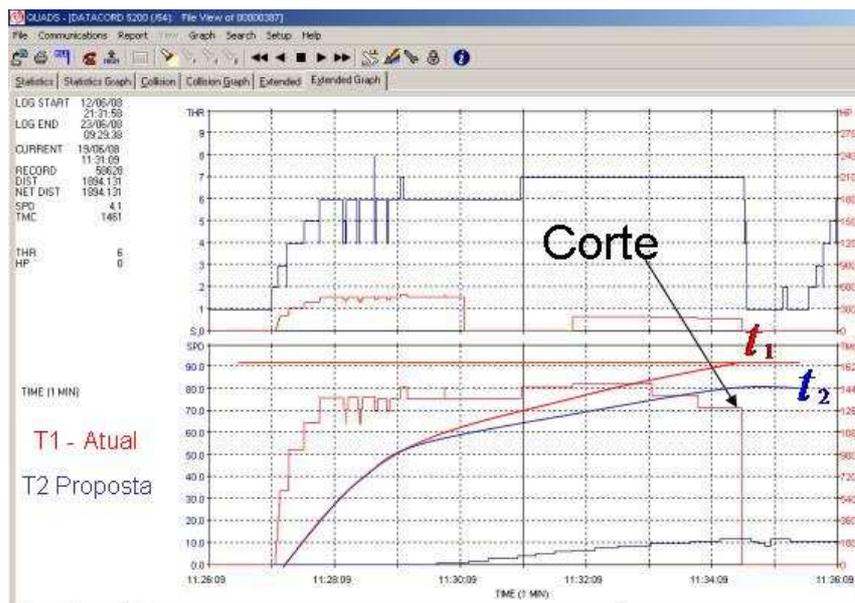


Figura 2.9 – Registros de Eventos da Locomotiva.

Estas condições elevam significativamente as possibilidades para ocorrência de falha em um nível de tensão, consideravelmente inferior ao limite de resistência à tração, compressão, ou ao limite de escoamento para uma carga estática. O termo "fadiga" é usado porque este tipo de falha normalmente acontece após os componentes serem submetidos, por determinados períodos, a ciclagem de tensão ou deformação.

Por ser a maior causa de falha nos componentes metálicos, há estimativas que cerca de 90% de todas as falhas em componentes metálicos é por este motivo, a fadiga torna-se um fator de grande importância. O estudo aqui realizado objetiva uma ação de controle mais eficiente, e que possa minimizar alguns desses fatores que geram ou contribuem para sua este tipo de falha. Além disto, uma quebra por fadiga é quase sempre catastrófica e traiçoeira.

Na maioria das vezes estas falhas ocorrem de forma inesperada, repentinamente, portanto bastante perigosas. Falhas por fadiga é do tipo frágil em natureza mesmo em metais normalmente dúcteis, no sentido de que existe muito pouca, se é que exista alguma deformação plástica bruta associada com a falha. O processo ocorre pela iniciação e propagação de trincas e ordinariamente a superfície de fratura é perpendicular à direção de uma tensão de tração aplicada (Callister e Wiley, 2001).

2.4.1. Caracterização de Esforços de Tração e Compressão

Durante todo o processo produtivo os engates são submetidos a esforços de compressão ou tração. Este comportamento faz parte de sua dinâmica, sendo seus limites estabelecidos a partir de ensaios e estudos para cada tipo de engate aplicado. No caso dos GDT, vagões tipo gôndola (NBR 11961) equipados com engates rotativos do tipo F, estes valores são mostrados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 Limites de esforços de tração e compressão para engates ferroviários.

Tipo Vagão	Engate Tipo	Limite Tração t	Limite Compressão t
GDT	F	150	113
TCT	F	150	113
Passageiro	E	110	90
Carga	E	110	90

Com a utilização do simulador de trens, modelo TDS 5000 NYAB, foi realizado uma simulação com um comboio ferroviário composto por 220 vagões e puxados por duas locomotivas à frente. Durante este teste foi simulado um evento de diodos quentes e observado o comportamento da composição. O resultado foram ondas de choques produzidas pelo corte de tração, além de impactos de compressão e tração de magnitudes elevadas, e valores próximos aos limites suportados, o que indica que este tipo de evento tem relação direta com a segurança do processo. A Figura 2.10 ilustra o registro dos valores das forças resultantes do corte instantâneo de tração. Observa-se a indicação de um choque de tração na ordem de 109 toneladas, impacto suficiente para romper de formar frágil a estrutura do engate ou ocasionar alterações em sua estrutura, potencializado ocorrência de acidentes.

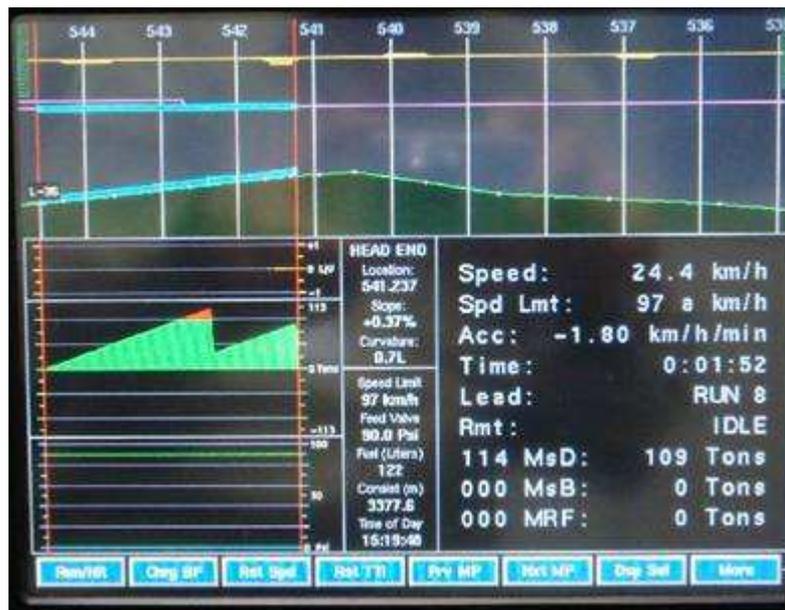


Figura 2.10 – Registro dos Esforços nos Engates do Comboio.

Os eventos de diodos quentes são quase sempre resultado da operação em regime severo e seu efeito ocasiona sérios transtornos à circulação dos trens, uma vez que pode provocar a parada dos mesmos, resultando também na geração de prejuízos significativos ao sistema ferroviário.

CAPÍTULO 3

ABORDAGEM TEÓRICA PARA MODELAGEM DO RETIFICADOR PRINCIPAL DA LOCOMOTIVA

Neste capítulo abordam-se os conceitos básicos e procedimentos que serão utilizados durante o estudo das técnicas para identificação do sistema. É discutida a modelagem matemática sob o ponto de vista de classificação empírica e modelagem paramétrica. A seleção de modelos e o ajuste dos parâmetros são observados a partir de conhecimento a priori e das propriedades do sistema, sabendo-se que a definição do melhor modelo que represente um determinado sistema é bastante subjetiva (Isermann, 1980; Ljung, 1996). O método baseado nos estimadores dos mínimos quadrados também é visto, pois tem relação direta com a seleção dos parâmetros envolvidos neste estudo.

3.1 Definição do Problema de Identificação

Um sistema é um conjunto composto por componentes cujo comportamento é regido por variáveis internas que interagem e produzem sinais observáveis denominados saídas. Estas variáveis internas são denominadas de estados e representam a evolução temporal do sistema. As variáveis de estado também são estimuladas por sinais inferidos na entrada para manipulação do sistema, que são os sinais de controle, e por sinais de ruídos que não estão acessíveis.

Parte do problema de identificação é determinar as melhores "ordem" do modelo. Quanto maior a ordem dos parâmetros, mais complexo se torna o processo de identificação e mais difícil problema da estimação se torna. É recomendado que o modelo seja definido com parcimônia, uma vez que com apenas alguns parâmetros é o mais fácil de identificar.

Um modelo de ordem elevada também está suscetível a ter uma variância relativamente alta, o que significa um baixo ajuste entre o modelo estimado e a planta real, além de um problema de mau condicionamento onde a matriz a ser invertida para solução numérica é quase singular (Luyben e Luyben, 1997). Ou seja, no modelo transformado pode

existir ortogonalidade entre os regressores, sendo o problema inicial da colinearidade eliminado por meio de transformações lineares (Hendry, 1995).

Estas dificuldades podem ser superadas aumentando os dados que compõe a amostra, porém isso aumenta a duração do ensaio, o que é indesejável, pois eleva a probabilidade da planta ser perturbada por outros eventos.

O problema da identificação é exatamente definir todas estas variáveis e possibilitar a sua representação por modelos matemático de tal forma que estes representem com a máxima exatidão o modelo real. As principais etapas de um problema de identificação são:

- 1 - Testes dinâmicos e coletas de dados
- 2 - Escolha da representação matemática a ser utilizada
- 3 - Determinação da estrutura do modelo
- 4 - Estimação dos parâmetros
- 5 - Validação do modelo

3.2 Identificação de Sistemas Dinâmicos

Inferir modelos a partir de observações e estudar suas propriedades é realmente um dos grandes propósitos da engenharia moderna. Os modelos ("hipóteses", "leis da natureza", "paradigmas", etc.) podem ser de caráter mais ou menos formal, mas possuem a característica básica que é a tentativa de *link* em algumas observações juntos em algum padrão. Sistema de identificação lida com o problema da construção de modelos matemáticos de sistemas dinâmicos baseados em observações a partir de dados dos sistemas (Ljung, 1987).

Evidencia-se que a noção de um sistema é um conceito bastante amplo e desempenha um papel importante na ciência moderna. Muitos problemas em vários campos são resolvidos em sistemas orientados para as estruturas. Em controle de processos, denota-se como um objeto ou uma coleção de objetos que realiza certo objetivo e cujas propriedades se desejam identificarem e realizar estudo. Alguns exemplos são o sistema solar de uma casa, um navio com direção dinâmica, o ato de falar, entre outros (Ljung, 1987; Dorf e Bishop, 1995;

Ogata, 2002). A Figura 3.1 ilustra o diagrama básico do sistema em estudo e seus principais elementos de controle.

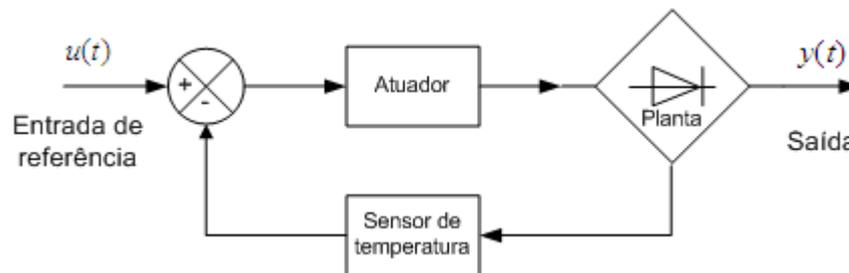


Figura 3.1 – Diagrama de Blocos de Controle da Temperatura do Retificador.

Um sistema é um objeto cujo comportamento é determinado por variáveis internas, que interagem com estímulos externos em sua entrada $u(t)$ e produzem sinais observáveis denominados saídas $y(t)$. As variáveis internas representam a evolução temporal do sistema. Os problemas associados à estrutura de um sistema idêntico ao ilustrado na Figura 3.1 são: análise, projeto e identificação.

Os exemplos citados fazem referência aos sistemas dinâmicos, o que significa que o valor presente de saída depende não apenas dos valores externos naquele momento, mas também dos valores dos estímulos anteriores. Saídas de sistemas dinâmicos onde estes valores não são observados, tal como no diagrama ilustrado na Figura 2.1, são muitas vezes chamados de séries temporais. Claramente, a lista de exemplos de sistemas dinâmicos pode ser muito longa e que se estende ao longo de muitos campos da ciência (Ljung, 1987).

Sistemas podem ser caracterizados pela sua resposta a entradas específicas tais como resposta ao impulso, ao degrau ou frequência. A caracterização de sistemas a partir destas respostas define os modelos não-paramétricos. Modelos obtidos a partir de leis da física possuem uma estrutura definida e que depende de um número finito de parâmetros. No caso específico deste trabalho, estes parâmetros serão os coeficientes de uma função de transferência ou equação diferencial, ou seja, os modelos paramétricos. A determinação destes parâmetros é feita com utilização da identificação paramétrica para descrição do modelo dinâmico.

Modelos para serem empregados em métodos paramétricos podem ainda ser classificados em modelos caixa preta ou cinza. No primeiro, os parâmetros são apenas constantes matemáticas, enquanto que o segundo possui algumas interpretações físicas

(Aguirre, 2007). Há ainda uma terceira técnica, caixa branca, onde é necessário conhecer bem o sistema em estudo e as leis físicas envolvidas no processo. Em muitos casos a utilização deste método é inviável devido ao tempo necessário para obter o equacionamento e o conhecimento dos fenômenos envolvidos.

O problema de identificação de sistemas é obter um modelo matemático, capaz de representar de forma idêntica a relação entrada/saída de um determinado sistema. Para tanto, o modelo é construído a partir de observação sobre o comportamento do sistema, que podem ser representados por dados numéricos, medições físicas, entre outras observações comportamentais possíveis. O grau de complexidade do modelo matemático estará diretamente relacionado com sua precisão em representar o modelo real. Modelos com equação diferencial de primeira ordem podem ser utilizados para aplicação simples enquanto que aplicações mais complexas exigirão ordem mais elevada.

Parte do problema é determinar a "melhor" ordem do modelo. Quanto maior a ordem, mais parâmetros existirão para serem identificados e mais difícil se torna a estimativa. O modelo "moderado", com poucos parâmetros, é o mais fácil de identificar. Um grande número de parâmetros confere elevada variância (uma medida da diferença entre o modelo de previsões e da própria planta) e uma estimativa mal condicionada torna-se um problema (a matriz a ser invertida na solução numérica técnica é quase singular). Estas dificuldades podem ser superadas por meio de um grande número de pontos de dados, mas isso aumenta a duração da instalação de ensaios, que é indesejável, porque aumenta a probabilidade da planta a ser perturbada por outros eventos.

O objetivo da identificação paramétrica é inferir um modelo que descreva o sistema. Deve ser de estrutura simples e precisa, que se ajuste as medidas com base no erro a partir do registro de N pares de dados de observação assumindo uma matriz $Z(N)$, de comprimento N . Este modelo é normalmente parametrizado em termos de um parâmetro vetor θ formado a partir das entradas e saídas do sistema. A análise baseia-se num modelo de regressão dado por:

$$y(k) = \varphi^T(k)\theta + v(k) \quad (3.3)$$

sendo $y(k)$ a saída, $\varphi(k)$ e θ denominados vetores de medidas e parâmetros, respectivamente, e $v(k)$ os ruídos. A minimização da função de custo é dada por:

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \sum_j |y(j) - \phi^T(j)\theta|^2 \quad \text{ou} \quad \min_{\theta} \frac{1}{2} \sum_j |y(j) - \phi^T(j)\theta| \quad (3.4)$$

A identificação de sistemas, de modo geral, consiste na determinação da estrutura, estimação dos parâmetros e validação do modelo. Estas etapas são ilustradas na Figura 3.3.

Uma estrutura de modelos M é um mapeamento de um conjunto de parâmetros $D_M \subset \mathbb{R}^d$ para um conjunto de modelos. Cada elemento $\theta \in D_M$ é associado ao conjunto $M(\theta)$ do conjunto de modelos (Arruda e Barros, 2007). O objetivo é representar o comportamento do sistema segundo um determinado critério de desempenho, ou função de custo $J(\theta, Z(N))$. A técnica de identificação mapeia cada $Z(N) \in \mathbb{R}^N$, para um elemento do conjunto de modelos $M(\theta)$.

$$\theta \in D_M \subset \mathbb{R}^d \quad (3.5)$$

Uma decisão importante na identificação é a forma de parametrizar as propriedades do sistema ou sinal usando um modelo de estrutura adequada. O modelo é adequado se o erro cometido no ajuste está em valores estimados, ou para determinada aplicação, desde que a resposta do modelo estimado reflita corretamente a resposta do sistema, não apresentando discrepância entre o real e o estimado. A Figura 3.2 ilustra um procedimento para ajuste dos parâmetros do modelo, de modo que o erro entre a saída do sistema e a do modelo seja mínimo.

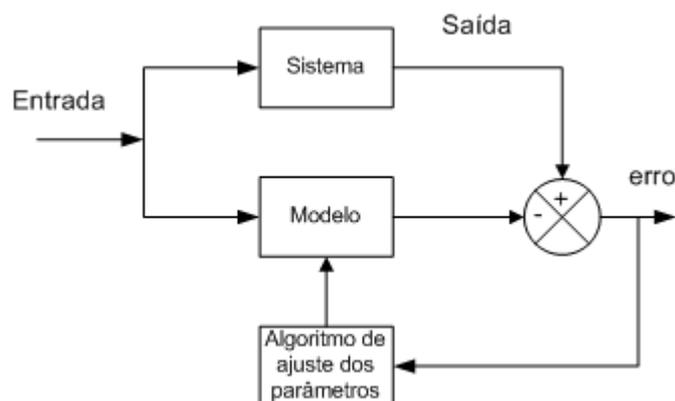


Figura 3.2. - Diagrama de Identificação de Ajuste do Modelo.

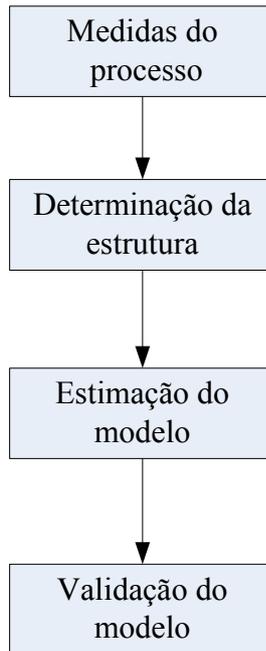


Figura 3.3. - Etapas do Procedimento de Identificação.

A realização do experimento proporciona a aquisição das medidas do processo, ou seja:

$$Z^N = \{Y, U\} \quad (3.6)$$

Sendo; $Y = \{y(t)/t = 1, \dots, N\}$; $U = \{u(t)/t = 1, \dots, N\}$, onde Y é o conjunto das amostras medidas na saída, $y(t)$, U é o conjunto das entradas do sistema $u(t)$, N representa a experimentação e t o instante amostral múltiplo de $T_s (T_s, 2T_s, 3T_s, \dots)$.

Em aplicações práticas, pode ser uma parte substancial do problema da identificação, decidir quais medições são valiosas para recolher e considerar como saídas, e quais são os sinais que devem ser considerados como fatores de produção. Importa também referir que os sinais $u(t)$ e $y(t)$ pode muito bem ser obtidos a partir de transformações não lineares das primeiras medições. Estas questões são, contudo, muito dependente do problema e, no presente contexto, simplesmente respeita as sequências (Ljung e Söderström, 1983):

$$\{y(t)\} = y(0), y(1), \dots, y(t) \dots \quad (3.7)$$

$$\{u(t)\} = u(0), u(1), \dots, u(t) \dots$$

Por simplicidade, assumimos em (3.7) que a amostragem é um intervalo de tempo unitário, sendo utilizada a seguinte simbologia:

$$Z(t) = \begin{pmatrix} y(t) \\ u(t) \end{pmatrix},$$

$$y' = (y(0) \dots y(t)),$$

$$u' = (u(0) \dots u(t)),$$

$$z' = (z(0) \dots y(t)),$$

No presente, não introduzir quaisquer restrições sobre os dados das observações realizadas. No entanto é importante definir um conceito para sequência de entradas u^t . É bastante óbvio que algumas condições entrada devem ser introduzidas a fim de garantir um resultado razoável de identificação. Como exemplo trivial, podemos imaginar em uma entrada de valor zero. Obviamente, esse tipo de entrada não será capaz de produzir uma informação completa sobre as propriedades de entrada / saída do sistema. As propriedades das entradas que são necessárias estão relacionadas com o fato de que a entrada deve excitar todos os modos do sistema.

Na equação (3.8) tem-se a função que representa o sistema e possibilita a estimação do processo.

$$\hat{g}N(k, Z^N) = \hat{y}(k) \quad (3.8)$$

A estimação de parâmetros busca um conjunto de coeficientes do modelo selecionado. No caso da estimação paramétrica, objetiva-se aproximar os parâmetros desconhecidos dos polinômios do modelo, entrada/saída.

A partir de Z^N , a validação é feita pela observação do comportamento do modelo escolhido com os dados obtidos, e que não foram utilizados na estimação de seus parâmetros. Este procedimento é utilizado com o propósito de aceitar ou rejeitar um determinado modelo. O critério para definir o ajuste do modelo é se, e somente se, este reproduzir as características esperadas. O modelo é adequado se a resposta do sistema não apresentar discrepância entre o

real e o estimado. É importante compreender que todo modelo tem um domínio limitado de validade.

A identificação do sistema tem um fluxo natural lógico, onde primeiramente é feita a coleta de dados, e em seguida, a escolha de um modelo que melhor se ajuste neste conjunto. A maior parte de uma identificação consiste no fato de abordar estes problemas, em particular a um terceiro, em uma forma iterativa, guiado pelas informações prévias e os resultados das tentativas anteriores. A Figura 3.4 ilustra um procedimento básico que obviamente é um importante instrumento para a manipulação destas variáveis.

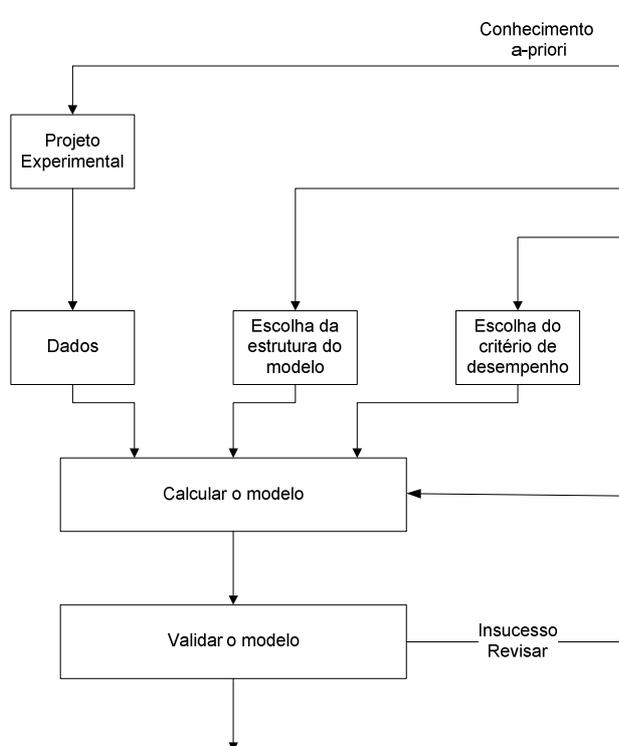


Figura 3.4. Laço da Identificação de Sistemas.

3.3 Estrutura do Modelo

A escolha da estrutura do modelo a ser utilizado, é uma questão fundamental para que seja possível a melhor representação do comportamento de um sistema dinâmico.

A modelagem de um sistema do mundo real pode ser realizada por equações diferenciais em tempo contínuo ou discreto, que são descritas função de transferência ou espaço de estado. (Fonseca Neto, 2007).

No entanto existem algumas representações matemáticas que são especialmente adequadas à identificação de sistemas (Fonseca Neto, 2007). Para aplicação em nosso estudo, podemos observar que a estrutura do modelo ARX mais utilizada é a equação à diferença linear simples, que é dada pela equação (3.9); que relaciona o sinal de saída $y(t)$ para um número finito de realizações passadas $y(t-k)$ e entradas $u(t-k)$. A estrutura é definida pelos parâmetros na , nb e nk . na é igual ao número de pólos, nb é o número de zeros, enquanto nk é o tempo de atraso puro, tempo morto, do sistema. Para que um sistema sob controle de amostra de dados, geralmente nk é igual a 1 se não houver tempo morto.

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_{na} y(t-na) = b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (3.9)$$

3.3.1. Métodos de Estimativa

Existem dois métodos para estimar os coeficientes A e B na estrutura do modelo ARX

1 - Mínimos Quadrados: Minimiza a soma dos quadrados do lado direito menos o lado esquerdo da expressão (3.9) acima, com relação à “A” e “B”.

2 - Variável Instrumental: Determina “A” e “B” de modo que o erro entre os lados direito e esquerdo torna-se correlacionadas com determinadas combinações lineares das entradas.

3.3.2. Família de Modelos Paramétricos Lineares

Em modelagem linear, a família de modelos matemáticos paramétricos difere em relação aos diversos tipos de ruído. Estes incluem conhecidos tipos de modelo, como ARMAX, Output-Error (OE), e Box-Jenkins (BJ). A entrada e saída de modelo linear geral para um sistema único com a entrada u e saída y pode ser escrita conforme a equação (3.10)

$$A(q)y(t) = \sum_{i=1}^{nu} [B_i(q) / F_i(q)] u_i(t - nk_i) + [C(q) / D(q)] e(t) \quad (3.10)$$

Sendo que u_i denota a entrada enquanto que, A, B_i, C, D e F_i são os polinômios de deslocamento (z ou q), que representa a forma reduzida da equação à diferença.

A estrutura geral é definida pelo tempo de atraso nk e pelas ordens destes polinômios, ou seja, o número de pólos e zeros do modelo dinâmico de u para y , bem como do modelo de perturbação e de y . Na maioria das vezes as escolhas são limitadas a um dos seguintes casos especiais.

$$ARX \rightarrow A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t)$$

$$ARMAX \rightarrow A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + C(q)e(t)$$

$$OE \rightarrow y(t) = [B(q) / F(q)]u(t - nk) + e(t)(output - Error)$$

$$BJ \rightarrow y(t) = [B(q) / F(q)]u(t - nk) + [C(q) / D(q)]e(t)(Box - Jenkins)$$

A “mudança de polinômios” é uma forma de compactar a escrita das equações à diferença. No exemplo para um modelo ARMAX, teríamos:

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_nay(t-na) = b_1u(t-nk) + \dots + b_{nb}u(t-nk-nb+1) + e(t) + c_1e(t-1) + \dots + c_{nc}e(t-nc) \quad (3.11)$$

3.3.3. Resposta ao Impulso, Função de Frequência

Partindo do princípio de unidade de intervalo de amostragem, há um sinal de entrada:

$$u(t); \quad t = 1, 2, \dots, N$$

E um sinal de saída:

$$y(t); \quad t = 1, 2, \dots, N$$

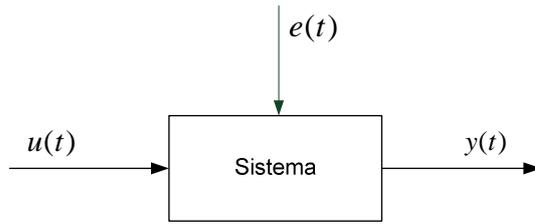


Figura 3.5.- Diagrama Básico Entrada-Saída.

Supondo que os sinais são relacionados por um sistema linear, então a relação pode ser escrita por

$$y(t) = G(q)u(t) + v(t) \quad (3.12)$$

Sendo q o operador de deslocamento, a forma reduzida de $G(q) u(t)$ é:

$$G(q)u(t) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)u(t-k) \quad (3.13)$$

e

$$G(q) = \sum_{k=1}^{\infty} g(k)q^{-k}; \quad q^{-1}u(t) = u(t-1) \quad (3.14)$$

Os números $\{g(k)\}$ são chamados de resposta do sistema ao impulso. Tem-se claramente então que $g(k)$ representa a saída do sistema no tempo k , se a entrada é um único pulso no tempo zero. A função $G(q)$ é chamada de função de transferência do sistema. Esta função avaliada dentro do círculo unitário ($q = e^{i\omega}$) vai ser uma função de frequência, ou melhor, função de resposta em frequência $G(e^{i\omega})$.

Na equação (3.12) está adicionado o ruído $v(t)$, suas propriedades podem ser expressas em termo do espectro de potência que é definido como

$$\Phi_v(\omega) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_v(\tau)e^{-i\omega\tau} \quad (3.15)$$

sendo $R_v(\tau)$ a função de covariância de $v(t)$

$$R_v(\tau) = Ev(t)v(t-\tau) \quad (3.16)$$

e E denota a expectativa matemática. Alternativamente o distúrbio $v(t)$ como filtragem do ruído branco que dado por

$$v(t) = H(q)e(t) \quad (3.17)$$

sendo $e(t)$ o ruído branco com a variância λ e:

$$\Phi_v(\omega) = \lambda |H(e^{i\omega})|^2 \quad (3.18)$$

As equações (3.12) e (3.17) trazem a descrição do sistema no domínio do tempo.

$$y(t) = G(q)u(t) + H(q)e(t) \quad (3.19)$$

sendo G a representação da função de transferência do sistema. $G(e^{i\omega})$ e $\Phi_v(\omega)$ constituem a descrição do sistema no domínio da frequência.

A resposta ao impulso (3.14) e a descrição no domínio da frequência, (3.20) são chamados de modelos de sistemas não paramétricos, pois não são definidos em termos de um número finito de parâmetros. A descrição básica da Equação (3.19) também se aplica ao caso multivariável, isto é, para sistemas com vários sinais de entrada (sinais nu) e vários sinais de saída (sinais ny). Neste caso $G(q)$ é a matriz $ny \times nu$, enquanto H_q e $\Phi_v(\omega)$ são as matrizes $ny \times ny$.

3.3.4. Representação da Função de Transferência Polinomial

Para descrever as funções G e H , Equação (3.19) em termos racionais é necessário especificar os coeficientes do numerador e denominador. Para este procedimento um modelo que é comumente utilizado é o ARX, apresentado na Equação (3.20).

$$G(q) = q^{-nk} \frac{B(q)}{A(q)}; \quad H(q) = \frac{1}{A(q)} \quad (3.20)$$

sendo A e B os polinômios de atraso do operador q^{-1}

$$A(q) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{na}q^{-na} \quad (3.21)$$

$$B(q) = b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb-1}$$

Sendo na e nb as ordens dos polinômios e nk o número de atraso entre a entrada e saída do sistema, o modelo é normalmente descrito por:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (3.22)$$

ou explicitamente:

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{na}y(t-na) = b_1u(t-nk) + b_2u(t-nk-1) + \dots + b_{nb}u(t-nk-nb-1) + e(t) \quad (3.23)$$

Nota-se que as equações (3.22) e (3.23) também se aplicam ao caso multivariável, com canais de saída ny e canais de entrada nu . Outra estrutura de modelo muito comum, e mais geral, é a estrutura ARMAX, representada na equação (3.24).

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + C(q)e(t) \quad (3.24)$$

Este modelo pronto é conhecido como modelo ARMAX, e o nome é devido o fato de $A(q)y(t)$ representar a autoregressão e $C(q)e(t)$ a média móvel do ruído branco. $B(q)u(t - nk)$ representa a entrada externa. Para o caso especial da equação (3.24), quando $C(q) = 1$ e $n_c = 0$, tem-se então a terminologia da equação (3.22) a qual chamamos de ARX. A Figura 3.6 ilustra a estrutura destes modelos.

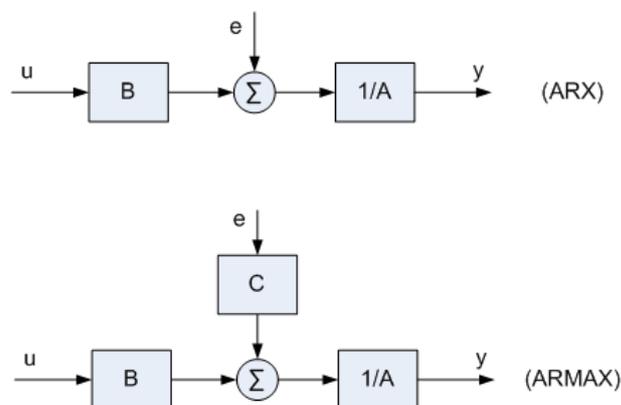


Figura 3.6.- Estruturas dos Modelos.

3.3 Estimação dos Parâmetros em Modelos Dinâmicos

Muitas vezes, é difícil estimar quantitativamente o quanto é boa a aproximação da solução é linear. Conclusões baseadas no sistema linear devem ser tratadas com uma quantidade considerável de cautela e de preferência, ser complementado por simulações do sistema original não-linear (Ljung e T.Glad, 1994).

Uma maneira comum para determinar a ordem melhor modelo é a utilização "de validação do modelo". Os dados experimentais são separados em dois conjuntos. Um número específico de parâmetros é assumido. O primeiro conjunto é utilizado nos cálculos numéricos para identificar um modelo. Então as previsões do modelo são comparadas com os dados reais a partir do segundo set e a variação é calculada. Uma ordem de modelo diferente é assumida e o procedimento é repetido. A parcela da variância do modelo na previsão de um segundo conjunto de dados versus o número de parâmetros é geralmente uma curva que passa por um mínimo. Este é o fim de melhor modelo.

3.4 Procedimentos Para Validação do Modelo

Decidir se um determinado modelo é "suficientemente bom", isto é, se ele é válido para a sua finalidade, é conhecido como validação do modelo. Isso envolve vários procedimentos para avaliar como o modelo refere-se aos dados observados, para conhecimento prévio e para seu uso pretendido. Deficiência nestes aspectos nos faz rejeitar o modelo, embora o bom desempenho possa desenvolver certa confiança no mesmo. Um modelo não pode ser aceito como uma descrição final e verdadeira do sistema. Isto significa que os passos na construção do modelo devem ser analisados de forma crítica, e que algumas partes do modelo têm que ser substituídas, retiradas ou melhoradas. Modelo de validação está, portanto, intimamente ligada à modelagem.

O procedimento para validação do modelo é representado na Figura 3.7. Também, se um determinado valor do parâmetro é encontrado e possa influenciar as propriedades do modelo, novas tentativas deverão que ser feitas para estimar o valor cuidadosamente. Este processo iterativo é descrito simbolicamente na Figura 3.7, (Ljung e T.Glad, 1994).

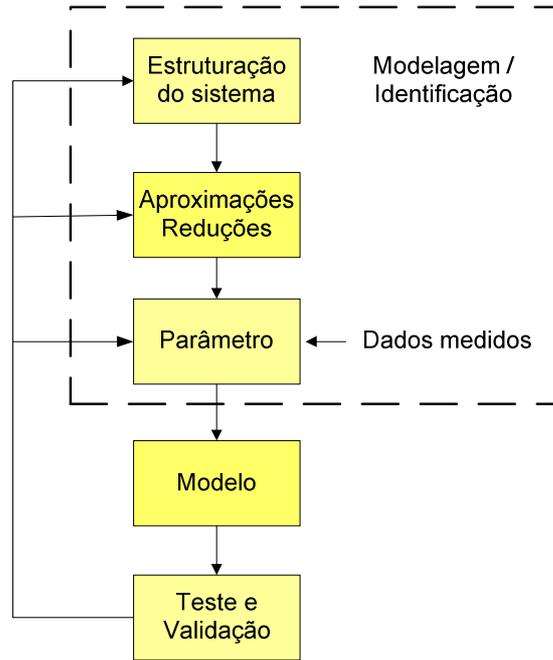


Figura 3.7. – Fluxograma de Validação.

Para determinar a validade de um modelo testado é comum, no entanto, que a saída do modelo e do sistema seja comparada, o que deve ser realizado com a mesma entrada. O procedimento anterior é ilustrado na Figura 3.8. Podemos concluir que a diferença tem de ser pequena, e que se entende por "pequena" o quanto o objeto do modelo e as perturbações possam influenciar no resultado esperado.

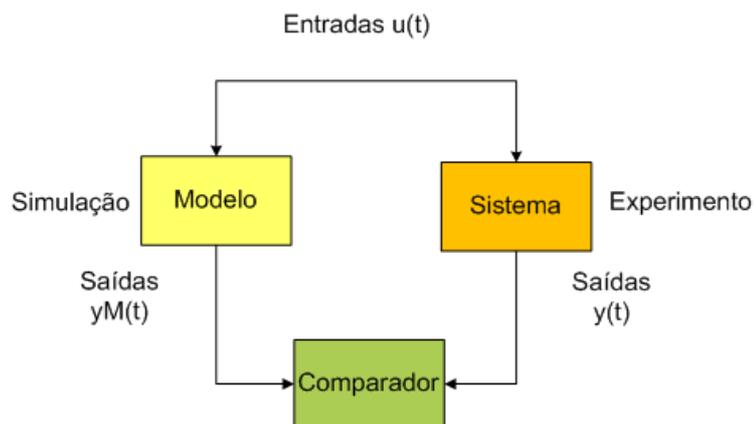


Figura 3.8. - Teste de Validação.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM ARX PARA O RETIFICADOR PRINCIPAL DE UMA LOCOMOTIVA

Apresentamos neste Capítulo a metodologia utilizada para aquisição e tratamento dos dados. É descrito o sistema utilizado para registrar os eventos da locomotiva. São descritas as etapas seguidas na pesquisa, de acordo com bibliografia existente, para modelagem do retificador principal da locomotiva a partir da técnica de identificação de sistemas, e do uso da estrutura ARX. São apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas para manipulação dos dados, e os modelos aplicados para seleção da melhor estrutura que representa o sistema em estudo, assim como os principais índices que indicam quantitativamente a qualidade do modelo escolhido.

4.1 Coleta de Dados

É impossível descobrir como funciona um determinado sistema sem antes estudá-lo. No caso do trabalho aqui desenvolvido, isso significa que temos de usar os dados obtidos no processo de aquisição de alguma forma durante o trabalho de modelagem (L.Ljung e T.Glad, 1994). A utilização indireta de dados provenientes da análise do sistema ou de subsistemas, cujas funções são bem conhecidas, e com a utilização de experiências ou experimentos clássicos, geralmente não é suficiente para garantir o sucesso da sua identificação.

Não pode haver constantes do sistema cujos valores não sabemos. Também pode haver subsistemas de características tais, que é difícil descrever a sua função por leis físicas conhecidas. Nesses casos, os dados do sistema têm que ser usado para completar o modelo. Estes dados consistem de medições das variáveis do sistema real, que são as suas entradas, saídas e também os possíveis distúrbios. Essas medições podem ser usadas para entender como funciona o sistema, para descrever os sistemas parciais, e para calcular os valores de suas constantes. A partir destas medições, ou seja, do uso dos dados coletados, foi possível

construir e selecionar um modelo, utilizando-se da técnica de identificação de sistemas e de uma estrutura do tipo ARX.

A primeira fase deste estudo é baseada em experimento simples e objetiva a estruturação do problema que é a construção do modelo discreto, conforme descrito na Equação (3.6). Como a construção dos modelos que possam descrever como suas saídas depende das entradas, não são fundamentalmente baseados em percepção física do comportamento interno do sistema, sendo estes em sua maioria linear, foram então construídos modelos arbitrários e estimado sua resposta ao impulso, e em função de frequência.

4.1.1. Sistema de Aquisição e Registro de Dados

O registrador de eventos e uma locomotiva é um equipamento destinado a gravar em memória eletrônica os diversos sinais relativos à operação de um trem.

Cada locomotiva é equipada com um registrador próprio, o que possibilita uma análise completa de suas operações independentemente do tipo de regime operacional a que tenha sido submetida. Os dados referentes aos eventos operacionais são coletados por meio de sensores e fornecidos a um registrador, que após convertê-los em linguagem de máquina, procede ao seu armazenamento subscrevendo-os sempre que o limite de memória disponível é alcançado. Para análise desses dados um software específico é utilizado.

Vários pontos da locomotiva são monitorados com o propósito de fornecer informações que possibilitem as análises dos do comportamento dos seus diversos sistemas durante sua operação. O registrador está instalado na cabine do operador e tem fácil acesso para execução do download de dados, o que é realizado rotineiramente para que auxiliar na tomada de decisão do tipo de ações de manutenção a ser aplicada. A Figura 4.1 ilustra um diagrama simplificado de um sistema registrador de eventos utilizado em uma locomotiva.

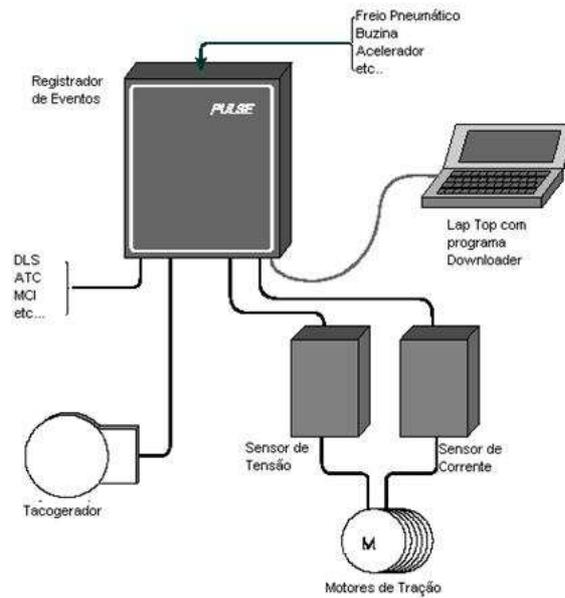


Figura 4.1 – Sistema de Registrados de Eventos da Locomotiva.

4.1.2. Coleta de Dados do Retificador

Os dados da temperatura coletados para esta pesquisa foram obtidos por meio de medição direta. Um termopar foi instalado na base de dissipação de calor dos diodos, e ligado diretamente a um termômetro digital para realização das medições. O instrumento utilizado foi configurado de modo a realizar as medições em intervalos pré estabelecidos, sendo as amostras armazenadas em função do tempo. Os valores da temperatura correspondem aos dados de saída da planta $y(t)$. O sinal de corrente, que corresponde à entrada do sistema $u(t)$, foi obtido a partir dos dados gravados no registrador de eventos da própria locomotiva. A medição da corrente elétrica correspondente à entrada do retificador é realizada com a utilização de um *shunt*.

4.2 Pré processamento dos Dados

Ao dar início ao processo de identificação, foi instaurado o procedimento de pré-processamento dos dados, uma vez que estamos tratando exclusivamente com dados de entrada (u), corrente do sistema de tração da locomotiva, e saída (y), temperatura dissipada pelo retificador, ambos em função do tempo. Este procedimento é necessário antes da aplicação dos procedimentos de estimação dos parâmetros, e detecção da estrutura do modelo.

O primeiro passo foi plotar os dados, e observar a sua dinâmica a partir da expertise sobre o comportamento do sistema. As ocorrências observadas como estando fora dos limites considerados aceitáveis, foram identificadas e ajustadas de forma que estas observações, consideradas anormais, não influenciem os resultados obtidos após as manipulações dos dados.

Estes dados, também conhecidos como *outliers*, possuem valores que se afastam da média em mais de três desvios-padrão, sendo assim radicalmente diferentes dos padrões dos outros dados. Ao estimar os parâmetros de dados que contêm *outliers*, os resultados podem não ser precisos. Eles podem ser devido a erro de medição, e representar características significativas nos dados. Após a identificação destes, foram feitas substituições com dados próximos, mantendo a média de forma a justar os valores e assim evitar o erro no resultado da estimação dos parâmetros do modelo pretendido.

Uma vez que a média da amostra é sensível a estes problemas, um valor de dados mal amostrado pode mover sua média da distância do centro dos demais, gerando assim uma distância arbitrariamente grande. Outros problemas também são observados, tais como ocorrência de *offset*, sazonalidade e tendências (Press, 1992).

4.3 Remoção de Médias e Tendências

Ao lidar com dados obtidos a partir de sistemas reais, é bastante comum a presença de *offsets*, tendências, *outliers*, etc. Estes distúrbios precisam ser retirados para que não gerem nenhum efeito sobre os dados quando da execução do procedimento de estimação dos parâmetros e seleção de estruturas dos modelos.

No caso especial das tendências, a série temporal é considerada não estacionária, o que faz necessário fazê-la estacionária, para que seja possível aplicar a maioria dos procedimentos para modelagem. Assim as componentes de tendências modificam o comportamento da série no decorrer do tempo.

Tendo em vista que os valores dos dados foram obtidos a partir da medição direta em um sistema físico, estes podem ter seus níveis inconsistentes, sendo necessária a verificação e remoção das tendências, *outliers* e *offsets*, uma vez que o processo de estimação

não é direto. Devem-se obter as referências sem níveis constantes e com média zero (Ljung,1997).

Ao dar início à importação dos dados referente às medições de corrente (y) e temperatura (u) do retificador, examina-se o conjunto de amostras e caso seja necessário é realizado o procedimento de eliminar as médias e tendências, o que é feito com uso da função *detrend* no MATLAB® , que subtrai à média ou a melhor linha de ajuste, sentido dos mínimos quadrados, de seus dados. Sendo que se os dados contêm várias colunas, e cada uma é feita separadamente. O comando *detrend* remove o valor médio ou a tendência linear de um vetor ou de uma matriz. O método convencional consiste em remover as médias a partir dos dados e assumir um modelo linear na forma:

$$y(k) + a_1 y(k-1) + \dots + a_m y(k-m) = u(k-d-n+1) \quad (4.1)$$

sendo: a_i (i parâmetros para $m=1$) e BJ (J parâmetros para $n=1$) são parâmetros a serem determinados por métodos de mínimos quadrados. Esta estrutura é denominada ARX, e é exatamente especificado por três inteiros [m, n, d].

Porém, não se deve eliminar a tendência dos dados quando os níveis físicos são incorporados ao modelo, ou quando a entrada no sistema requer níveis de sinal absoluto. No caso de se estimar os parâmetros EDO, não eliminar tendência dos dados, para se certificar que os modelos representam os níveis físicos real. Para realização de simulação tais como; resposta ao impulso ou degrau, não se deve remover as médias dos dados. Com dados transientes podemos ter um valor de saída para uma entrada zero, o que pode gerar erro ao querer subtrair o valor constante, que corresponde ao tempo, antes que a entrada seja aplicada.

A Figura 4.2 ilustra os sinais de entrada e saída do retificador na forma original, sem médias e sem tendências.

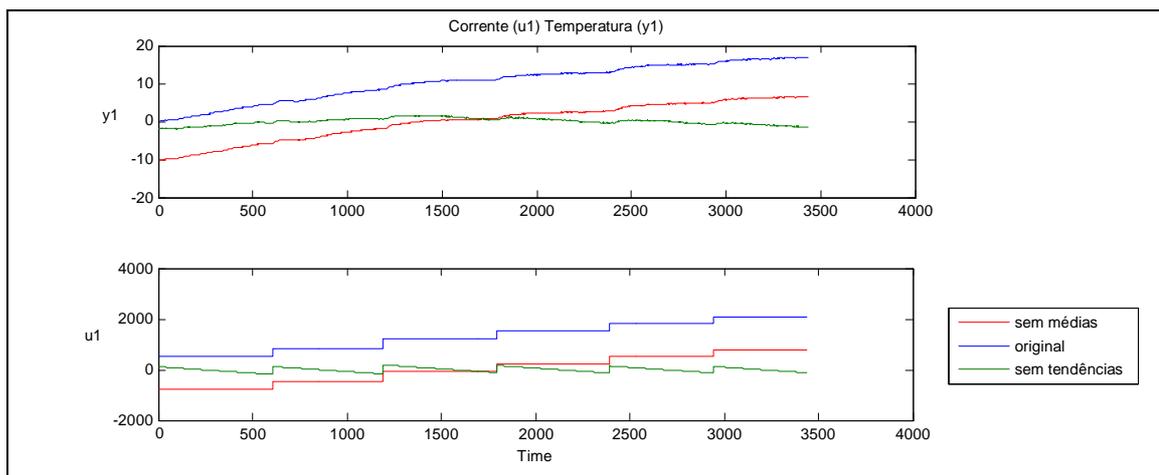


Figura 4.2 - Sinais de Entrada e Saída do Retificador.

4.4 Estimação dos Parâmetros do Retificador

Após a etapa de preparação dos dados, seguimos para determinação das constantes matemáticas presentes nas equações que descrevem o sistema. A metodologia é de grande importância ao construir modelos de sistemas dinâmicos. A falta de conhecimento sobre os detalhes específicos ou gerais dos subsistemas será representada usando parâmetros, cujos valores numéricos devem ser determinados por métodos estatísticos.

Para um sistema de entrada e saída únicas (SISO), a estrutura do ARX é dada na equação (3.9). Para estimar os modelos polinomiais, devem ser fornecidos os atrasos de entrada e a ordem do modelo. No caso em que já temos introspecção da física do sistema, podemos então sugerir o número de pólos e zeros. Como não é possível saber com antecedência a ordem do modelo, é estimada uma série de ordens e atrasos e comparado o desempenho de cada um deles.

Os parâmetros da estrutura do modelo ARX, equação (3.22), podem ser estimados por de diferentes variações do método de mínimos quadrados recursivo. Os dados de entrada/saída carregados no MATLAB® são armazenados em z , isto é, um objeto ou matriz do *iddata* $z = [y \ u]$, onde y e u são vetores coluna e nn é dado por $[na \ nb \ nk]$, sendo na e nb as ordens do modelo ARX e nk é o atraso específico. Em (4.2) temos a representação do ARX_{211} .

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} \quad (4.2)$$

$$nb : B(q) = b_1$$

Se Z é uma série cronológica, y e $nn = na$, o *rarx* estima os parâmetros de um modelo AR para y . No entanto para modelos com diversas entradas,

$$A(q)y(t) = B_1(q)u_1(t - nk_1) + \dots + B_{nu}(q)u_{nu}(t - nk_{nu}) + \omega(t) \quad (4.3)$$

sendo manipulados, permitindo que u contenha cada entrada como vetor coluna, e que nb e nk sejam vetores de linha que definem as ordens e os atrasos associados a cada entrada. Somente modelos com saída única são manipulados por *rarx*.

Normalmente os modelos prontos são descritos em tempo discreto (Ljung e Glad, 1994), portanto justificam-se os dados do retificador ser recolhidos em forma de amostragem. Se um modelo é necessário, o modelo discreto pode ser transformado. Em geral o modelo em tempo discreto pode ser escrito como:

$$y(t) = \eta(t) + \omega(t) \quad (4.4)$$

Sendo que $\omega(t)$ é um termo de perturbação e $\eta(t)$ é o ruído livre da saída. Que por sua vez pode ser escrito como

$$\eta(t) = G(q, \theta)u(t) \quad (4.5)$$

Com a utilização de um modelo predefinido, é necessário decidir sobre os valores de n_a , n_b , n_c , n_d , n_f e n_k , fazendo com que o aplicativo computacional utilizado escolha o melhor modelo da classe assim definida. O modelo obtido é então examinado, e outras ordens são testadas. A questão relevante é como usar o grau de liberdade que as estruturas permitem.

A partir do modelo ARX, equação (3.22) obtemos:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-nk) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (4.6)$$

E a predição com a supressão de $e(t)$ é dado por:

$$\begin{aligned}\hat{y}(t|\theta) = & -a_1y(t-1) - \dots - a_nay(t-a) \\ & + b_1u(t-nk) + \dots + b_nbu(t-nk-nb+1)\end{aligned}\tag{4.7}$$

Pode-se observar que a diferença entre a predição modelo ARX da equação (4.7) e o modelo OE da equação (4.8) ocorre devido este último ter sua previsão baseada exclusivamente na entrada, $u(t)$ enquanto que o primeiro modelo também utiliza os valores antigos de saída.

$$\hat{y}(t|\theta) = G(q, \theta)u(t)\tag{4.8}$$

Os modelos específicos descrevem como o valor previsto de $y(t)$ depende dos valores passados de y e u , e dos parâmetros θ . Esta predição é denotada por:

$$\hat{y}(t|\theta)\tag{4.9}$$

Geralmente a função de θ é mais complicada, sendo o trabalho de avaliação mais simples quando temos uma função linear de θ , conforme equação (4.10)

$$\hat{y}(t|\theta) = \theta^T \varphi(t)\tag{4.10}$$

Aqui θ é um vetor coluna que contém os parâmetros desconhecidos, enquanto $\varphi(t)$ é um vetor coluna formado por entradas e saídas. Essa estrutura é chamada de um modelo de regressão linear. O vetor $\varphi(t)$ é o vetor de regressão, e seus componentes são chamados de regressores.

Para manipulação dos parâmetros, foi utilizado o pacote do *Math Works System Identification Toolbox* (SITB), que é usado junto com o MATLAB®. A estrutura de comando é dada pelo próprio ambiente de programação do MATLAB®, com o conceito de espaço de trabalho, e possibilidades de macros sob a forma m-linhas. SITB possibilita a utilização total da estrutura do modelo da equação (3.22).

4.5 Construção do Modelo

Existem em princípio, duas fontes de conhecimento para as propriedades de um sistema real. Uma delas são a expertise dos especialistas e a bibliografia disponível para área

em questão. Neste contexto encontram-se as leis elaboradas por vários estudos passados. A outra fonte é o próprio sistema, onde as observações e experiência sobre o mesmo são a base para descrever suas propriedades. Há também dois tipos de áreas de conhecimento para a construção do modelo. Uma delas é o domínio da especialização, que é a compreensão sobre a aplicação e domínio de todos os fatos relevantes. A outra é a modelagem baseada em conhecimento prévio, normalmente utilizado na construção de sistemas especialistas, ou sistemas baseados em conhecimento, porém de grande importância para a construção de modelo matemático.

O trabalho para reproduzir um modelo é caracterizado pela seguinte sequência:

- 1 – Especificar a estrutura do modelo
- 2 – Obter o melhor modelo computacional para estrutura
- 3 – Avaliar as propriedades do modelo
- 4 - Teste de nova estrutura (volta ao passo 1)

O procedimento para construção de um modelo exige ajuda computacional para avaliar suas propriedades. A Figura 4.3 ilustra o ciclo de identificação, sendo as rotinas inseridas nos retângulos de responsabilidade do computador e as rotinas descritas nas formas ovais de responsabilidade do usuário. Os pacotes de programa utilizado para este trabalho possuem algumas rotinas típicas, a citar:

- 1 – Manipulação de dados, gráficos, etc.
- 2 – Identificação de métodos não paramétricos
- 3 – Estimação de métodos paramétricos
- 4 – Apresentação de modelos
- 5 – Validação dos modelos

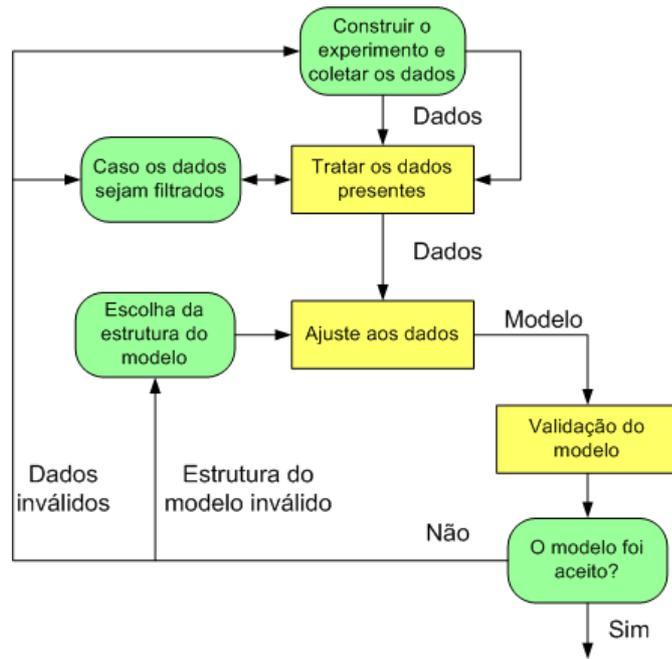


Figura 4.3 – Ciclo para Identificação.

Há dois princípios básicos e bastante diferentes para a construção do modelo, conforme ilustrado na Figura 4.4. As abordagens para o problema da construção de um modelo matemático de um determinado sistema são usualmente realizadas a partir dos princípios de modelagem física e identificação, (Ljung e Glad, 1994). Portanto temos basicamente uma representação dos modelos matemáticos dos sistemas sob a forma de descrição externa, ou por função de transferência e descrição interna ou variáveis de estado.

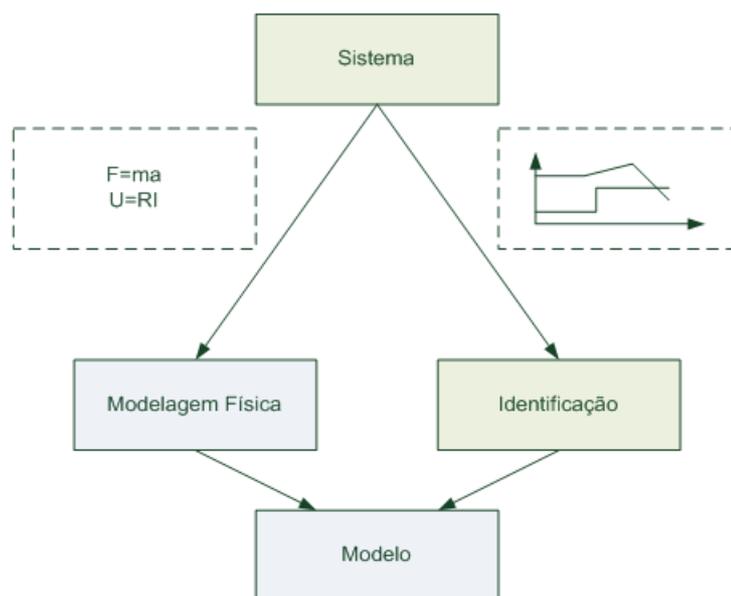


Figura 4.4 – Construção do Modelo.

4.5.1. Modelagem Física

É um princípio para obter as propriedades do sistema e subsistemas cujos comportamentos são conhecidos. Para os sistemas técnicos, isto significa que as leis da natureza que os descrevem são usadas em geral. Às vezes pode ser mais ou menos direta sobre os mecanismos que geram os sinais e as variáveis dentro do sistema. Com base nas leis físicas e relações que (supostamente) regem o comportamento do sistema, um modelo matemático pode ser construído. Este procedimento é usualmente chamado de modelagem pela física (Ljung e Glad, 1994).

4.5.2. Identificação

O outro princípio básico é usar as observações do sistema a fim de ajustar as suas propriedades ao modelo pretendido para sua representação. Este princípio é frequentemente utilizado como um complemento ao anterior. Para os sistemas técnicos baseados nas leis da natureza, são eles os próprios modelos matemáticos, que uma vez foram baseados em observações de sistemas de pequeno porte. Daí que estes modelos de acordo com o primeiro princípio básico também são originalmente baseados em observações do sistema. Isso significa que o modelo de um sistema, em última análise, terá como base a experiência (Ljung e Glad, 1994).

4.6. Escolha da Estrutura do Modelo

Para escolher a estrutura de um modelo que seja adequado para identificação de um sistema, é necessário a observação de vários aspectos. Neste trabalho, a escolha foi realizada dentre os modelos pré-fabricados, tipo ARX, OE, ARMAX, BJ e outros. Posteriormente foi decidido pelo modelo ARX, cuja função de transferência está representada na equação (3.22). Como o objeto do estudo trata de um problema que corresponde a uma avaliação uma regressão tipo linear, a estrutura ARX torna-se mais simples e possui maior rapidez, porém uma menor precisão em relação a outras, como por exemplo, as baseadas em lógica fuzzy.

Para modelagem paramétrica é necessário a especificação de uma estrutura. No entanto isso pode ser uma tarefa simples ou envolver várias opções. Para minimizar possíveis complexidades, assumimos que o sistema é linear para tornar possível estimar diretamente a sua resposta ao impulso ou degrau fazendo uso da análise de correlação ou resposta de frequência usando análise espectral. Este procedimento permite comparações úteis com outros modelos estimados.

À medida que os modelos específicos descrevem o valor previsto de $y(t)$ como dependentes dos valores anteriores de y, u e dos parâmetros de θ . Denotamos esta predição em (4.9):

O modelo ARX, (3.22) é o exemplo de (4.10) se definirmos:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \dots a_{na} \ b_1 \dots b_{nb}]^T \quad (4.11)$$

$$\varphi(t) = [-y(t-1) \dots -y(t-na) \ u(t-nk) \dots u(t-nk-nb+1)]^T$$

Notamos que se retirarmos $e(t)$ em (3.9), será correspondente a (4.10).

Para valores do vetor θ a predição de $y(t)$, s e o valor do tempo $t-1$, está em (4.9)

Assumimos então que θ é um vetor coluna d -dimensional. No tempo t o erro de predição será

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \hat{y}(t | \theta) \quad (4.12)$$

Com a coleta de dados de entrada e saída do sistema ao longo de um período $t = 1 \dots N$, é possível avaliar a qualidade do modelo com o valor do parâmetro θ podendo descrever o desempenho do sistema. Podemos formar o número:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t, \theta) \quad (4.13)$$

Como medida de verificar o quanto o valor do parâmetro θ é bom, é natural escolher o valor de θ que minimize (4.13):

$$\hat{\theta}_N = \arg \min_{\theta} V_N(\theta) \quad (4.14)$$

$\arg \min$ denota o argumento de minimizar.

Diversas variantes de (4.14) podem ser consideradas. Se o sistema tem várias saídas, a norma quadrática do vetor $\varepsilon(t, \theta)$ pode ser escolhida. Em geral podemos usar qualquer função arbitrária positiva, a função do valor escalar $\ell(\varepsilon)$ como uma medida minimizada:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \ell(\varepsilon(t, \theta)) \quad (4.15)$$

Temos em (4.14) a motivação do método de estimação de um ponto de vista prático. A escolha do melhor modelo que descreve os dados observados. Uma longa lista de estatísticas e informações teóricas de apoio à utilização do critério (4.14) como uma boa escolha para escolher os parâmetros. A função (4.14) é, por exemplo, o logaritmo negativo da função de verossimilhança para o problema se a estimativa é um suposto ruído gaussiano. Em geral (4.14) e (4.15) dar a máxima verossimilhança (MV) estimada de θ se $\ell(\varepsilon)$ é escolhido como:

$$\ell(\varepsilon) = \log f_e(\varepsilon) \quad (4.16)$$

Sendo $f_e(x)$ a função de densidade de probabilidade (pdf), e $e(t)$ o ruído em (3.19).

4.6.1. Estimação modelo regressão linear

Quando temos uma regressão linear (4.10) e assumimos que θ é um vetor coluna d -dimensional sendo o erro dado por:

$$\varepsilon(t, \theta) = y(t) - \theta^T \varphi(t) \quad (4.17)$$

Onde θ^T é a chamada matriz de regressores que pode incluir funções não lineares como quadrado, exponencial, etc. a única condição é que a expressão (4.10) permaneça linear nos parâmetros. Ao determinar os parâmetros do modelo em (4.10) é recomendado o uso de

algum método preestabelecido que minimize a soma dos quadrados dos erros. O método mais utilizado é o dos Mínimos Quadrados (MQ), desenvolvido por Gauss (Mazoni Apud Lawson e Hanson, 1974). O critério quadrático de (4.14) é escrito por:

$$V_N = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^n (y(t) - \theta^T \varphi(t))^2 = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (y^2(t) - \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n (2\theta^T \varphi(t) y(t) + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \theta^T \varphi(t) \varphi^T(t) \theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y^2(t) - 2\theta^T f_N + \theta^T R_N \theta \quad (4.18)$$

sendo

$$f_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \varphi(t) y(t) \quad (\text{a vetor coluna } d\text{-dimensional}) \quad (4.19)$$

$$R_N = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n \varphi(t) \varphi^T(t). \quad (\text{ad X matriz})$$

Se R_N a expressão anterior pode ser escrita como:

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y^2(t) - f_N^T R_N^{-1} f_N + (\theta - R_N^{-1} f_N)^T R_N (\theta - R_N^{-1} f_N) \quad (4.20)$$

O último termo é sempre positivo desde que a matriz R_N semi definida positiva.

O menor valor possível de $V_N(\theta)$ quando o termo é zero, isto é, quando

$$\theta = \hat{\theta} = R_N^{-1} f_N \quad (4.21)$$

A estimativa dos mínimos quadrados $\hat{\theta}_N$ é, portanto, calculado por (4.20) e (4.21).

Na prática a inversão de R_N é evitada por razões numéricas e $\hat{\theta}_N$ é resolvida a partir de um sistema de equações lineares.

Nota-se que os elementos da matriz R_N e do vetor f_N para o modelo ARX (4.11) são todos do tipo:

$$\frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y(t-j)u(t-k), \quad \frac{1}{N} \sum_{t=1}^n y(t-j)y(t-k), \quad (4.22)$$

Ou

$$\frac{1}{N} \sum_{t=1}^n u(t-j)u(t-k), \quad (4.23)$$

A estimação de $\hat{\theta}_N$ é, portanto, formada a partir da estimação da função de covariância de y 's e u 's.

4.7. Validação do Modelo

Todos os modelos têm um domínio de validade limitado. Eles podem representar as propriedades do sistema em um determinado ponto de operação ou ter limitações de precisão. Não é recomendada a utilização de um modelo fora da área para a qual foi validado.

Os modelos ARX e ARMAX têm uma dinâmica em comum, pólos comuns, para o ruído $e(t)$ e a entrada $u(t)$. Isto é apropriado quando os distúrbios são adicionados previamente no processo, por exemplo, na entrada.

Os modelos serão validados a partir dos dados coletados e que correspondem à fase de operação da locomotiva em regime de autocarga. Os dados coletados serão pré-processados com tratamento das médias e tendências. A validação ocorrerá com apenas parte da amostra, sendo que outro restante será utilizado para estimação dos parâmetros.

CAPÍTULO 5

O PROJETO E A ANÁLISE COMPUTACIONAL DE DESEMPENHO

Neste capítulo abordam-se as ferramentas computacionais e a metodologia utilizada para estimação e validação do modelo que representará o retificador principal da locomotiva. São apresentadas as simulações realizadas com uso do *toolbox* de identificação do MATLAB®, sua análise e os resultados obtidos.

5.1. Método e Proposta para Identificação do Sistema

A identificação de um sistema físico também pode ser definida como sendo a utilização de procedimentos numéricos, que visam obter modelos de sistemas dinâmicos a partir de medidas das suas entradas e saídas (Zambrozi e Murari, 2008). Assim, os resultados obtidos devem representar da maneira mais fidedigna possível, o sistema físico analisado. No caso específico do retificador utilizado em nosso estudo, o grau de complexidade é minimizado face o conhecimento a priori, o que vem a contribuir para a determinação das características dinâmicas, já que as características intrínsecas são consideradas, no caso a sua temperatura de operação.

A solução numérica de modelos de sistemas dinâmicos ou a simulação dos dados envolvidos nos mesmos podem se realizadas com uso de softwares próprios. Vários pacotes de ferramentas computacionais estão disponíveis, porém utilizamos o *toolbox* de identificação do MATLAB®. Tal fato justifica-se pela sua robustez e precisão nos resultados, além de possuir comando e funções específicas para o problema de identificação de sistemas.

Os dados utilizados para esta pesquisa são referentes aos valores, em função do tempo, da corrente elétrica na saída do gerador principal e da temperatura dissipada pelos diodos no radiador da bancada retificadora. Estes dados foram observados em uma locomotiva diesel-elétrica durante a ampla faixa de uma operação em auto carga. A partir dos dados de entrada $u(t)$ (corrente) e saída $y(t)$ (temperatura), utilizou-se a teoria de identificação de

sistemas para ajustar os parâmetros de um modelo polinomial tipo ARX, normalmente classificado como pertencente à classe de modelos de erro na equação (Aguirre, 2007), a fim de obter a função de transferência do sistema. Para efeito de comparação da contribuição ou influência do sistema de arrefecimento forçado existente, foi observada a rotação do soprador em cada ponto de aceleração, sendo esta uma relação linear. Estas últimas medições foram utilizadas como uma segunda entrada, de modo a possibilitar uma melhor avaliação do modelo matemático do retificador.

Nesta pesquisa realiza-se a análise e seleção de uma família de modelos de forma a obter a melhor representação do funcionamento do equipamento em estudo. As simulações do comportamento do sistema são realizadas com auxílio de ferramenta computacional. Os dados necessários para o processamento são obtidos com a realização de medições no sistema.

A solução proposta para minimizar o efeito provocado pela temperatura no retificador principal foi utilizar a teoria de identificação de sistemas, uma vez que podemos dispor de sinais de entrada (u) e saída (y) (Lindskog e Ljung, 1995), a fim de tornar possível a tomada de ações que possibilitem o controle do referido equipamento. O presente estudo aborda o modelo ARX e utiliza os dados de entrada e saída do sistema. Estas referências servem para ajustar os parâmetros de um modelo polinomial tipo ARX a fim de obter a função de transferência do modelo obtido. Tal procedimento possibilitou a obtenção de uma estratégia de controle capaz de minimizar as falhas potencialmente geradas por ocasião dos fatores anteriormente citados, além de otimizar e compatibilizar a potência de saída do retificador com a potência requerida para tração de forma a evitar *downtime* na locomotiva. A aplicação de método semelhante foi observada em outras plantas, a citar, cubas eletrolíticas (Fonseca Neto e Nagen, N, 2009).

Para um melhor entendimento da funcionalidade do equipamento em estudo, dentro do sistema da locomotiva, pode-se definir como sua função básica é a conversão da energia alternada, corrente elétrica fornecida pelo alternador principal da locomotiva, para suprimento dos seus motores de tração. A Figura 5.1 ilustra a posição do retificador no circuito da locomotiva.

O retificador principal é composto por 06 (seis) bancadas de diodos de alta potência e que estão montados em dissipadores de calor. O conjunto está instalado sobre o gerador principal, sendo ambos refrigerados por ventilação forçada. Durante todo o

funcionamento da locomotiva o soprador está em funcionamento, pois é acionado por um eixo que está acoplado diretamente ao eixo do virabrequim do motor diesel. Em alguns modelos o soprador é acionado eletricamente, porém segue o mesmo princípio de funcionamento do anterior.

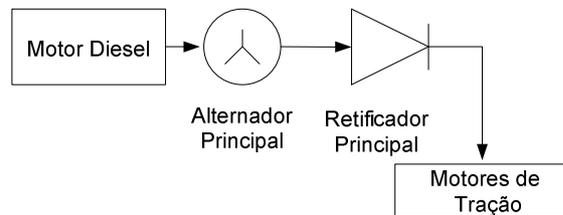


Figura 5.1 – Diagrama de Blocos do Sistema de Tração da Locomotiva.

Para observação do comportamento da temperatura no retificador principal foi inserido uma carga resistiva em sua saída, processo denominado de auto-carga. Em seguida foi acionado o conjunto Motor diesel - Gerador Principal, fazendo circular uma corrente elétrica pelo circuito. A partir daí foram observadas a temperatura do retificador $y(t)$ e da corrente elétrica $u(t)$. Também foi observada a rotação $u'(t)$ do soprador do retificador, cuja rotação é uma relação direta com os pontos de aceleração do motor diesel e conseqüentemente da corrente de entrada do circuito. A medição e armazenamento dos valores da temperatura foram realizados com a utilização de um multímetro digital modelo *Fluke 289*. Os dados de corrente na saída do gerador principal e que corresponde à corrente de entrada do retificador foram coletados com a utilização de um shunt e armazenados em um registrador de eventos modelo *Q-Tron da Wabtec* e disponível na máquina. O sincronismo dos dados da temperatura e corrente foi realizado a partir das observações do início de cada evento de excitação do campo do gerador principal durante a realização do teste de carga.

A amostra utilizada consta de um total de 1.719 medições, realizadas em intervalos equidistante de 5 segundos. Os dados são obtidos por medição direta e utilizados em sua forma original. A necessidade da remoção de distúrbios de alta ou baixa frequência foi desconsiderada.

Nas Figuras 5.2 e 5.3, temos os registros dos sinais referentes aos sistemas com uma e duas entradas respectivamente. As entradas $u(t)$ e $u'(t)$ são referentes às entradas de corrente e rotação do soprador respectivamente, enquanto que a saída $y(t)$ representa a temperatura observada.

Para medição dos dados referentes à temperatura no dissipador de calor dos diodos, foi considerado o fato do ambiente onde está instalado o retificador ser pressurizado e sua temperatura considerada controlada, mantida pelo funcionamento do motor de propulsão a diesel, que está montado no mesmo compartimento do retificador, ou seja, na cabine longa da locomotiva. Esta condição possibilita desconsiderar o ruído decorrente de temperatura externa, temperatura ambiente. O sinal de excitação é do tipo degrau, uma vez que a corrente em teste de carga varia dessa forma. Foi observada a dinâmica do sistema até atingir o regime estacionário. Métodos determinísticos também utilizam este tipo de entrada (Aguirre, 2004).

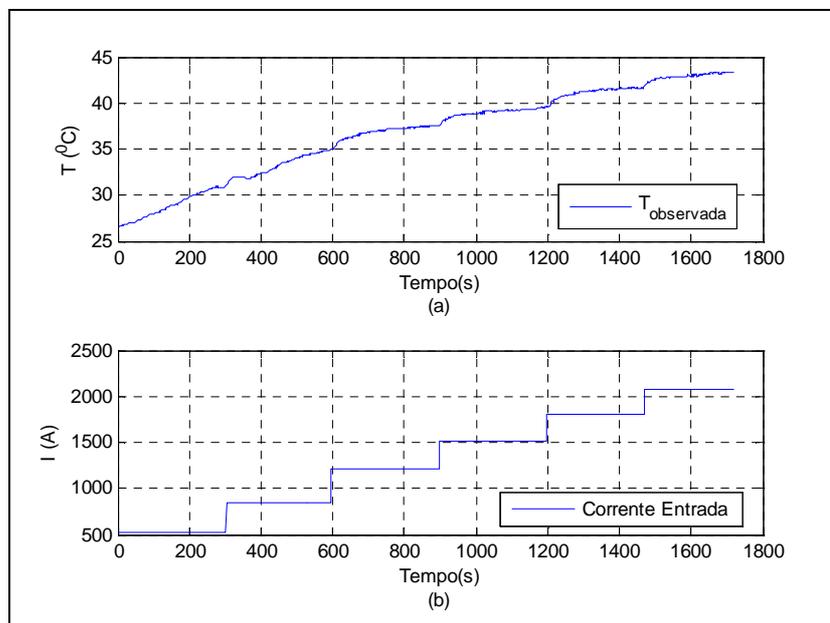


Figura 5.2 - a) $y(t)$ Temperatura; b) $u(t)$ Corrente.

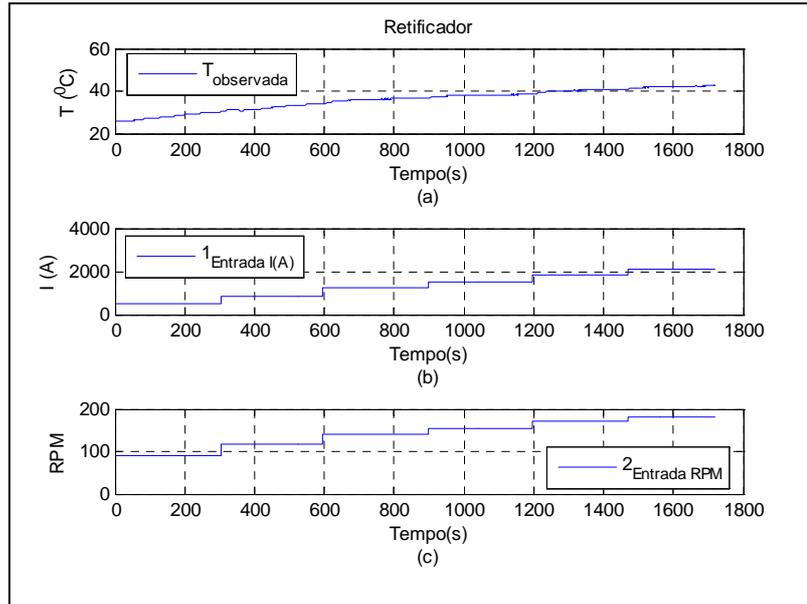


Figura 5.3 – y(t) Temperatura ; b) u(t) Corrente ; c) u'(t) Rotação do Soprador.

Os dados foram inicialmente estimados e validados com utilização apenas da corrente de entrada do retificador $u(t)$, e posteriormente foi realizada uma comparação entre seus resultados e os obtidos com o incremento de $u'(t)$. Em seguida foram testados os dois arranjos e escolhido a ordem do modelo, observando-se a relação custo benefício. O ajuste encontrado e que melhor satisfaz essa exigência, para uma e duas entradas, foi o modelos ARX_{211} . As representações em tempo discreto dos sistemas, conforme (3.20), são apresentados em (5.1) e (5.2) respectivamente.

$$A(q) = 1 - 0,5761 q^{-1} - 0,4159 q^{-2} \tag{5.1}$$

$$B(q) = 7,233^{-0,005} q^{-1}$$

$$A(q) = 1 - 0,5717 q^{-1} - 0,4222 q^{-2}$$

$$B1(q) = 3,02^{-0,005} q^{-1} \tag{5.2}$$

$$B2(q) = 0,0002643 q^{-1}$$

A partir destas definições, foram realizados testes com base na equação à diferença, mostrada em (3.9). Na Figura 5.4 são ilustrados os valores dos dados estimados e observados, obtidos a partir da referencia de entrada de corrente.

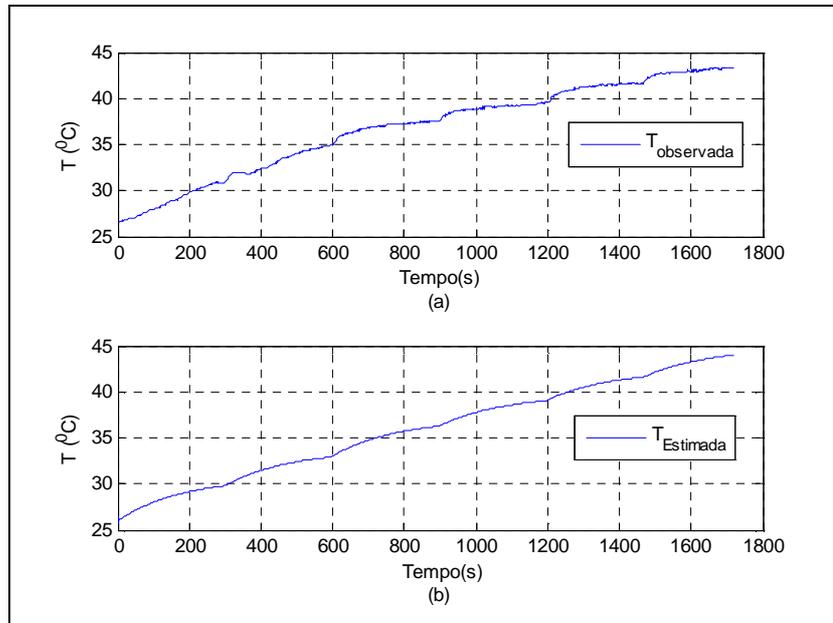


Figura 5.4 – Resultados da Equação à Diferença para 01 Entrada.

Após simulação com entrada unitária, foi incrementado o sinal correspondente ao soprador que arrefece o retificador. Devido sua rotação variar de acordo com os pontos de aceleração do motor diesel, e conseqüentemente com os níveis da corrente de entrada do retificador, adotou-se os dados correspondentes aos valores de RPM do motor diesel como fator para conversão da sua rotação, sendo os resultados obtidos correspondentes aos dados utilizados na entrada $u'(t)$

Os sinais de temperatura observados para o sistema com as referencias da corrente do retificador e RPM do soprador, estão ilustrados na Figura 5.5. Os resultados referentes ao erro correspondente aos valores medidos e estimados para uma e duas entradas estão ilustrados nas Figuras 5.6 e 5.7 respectivamente.

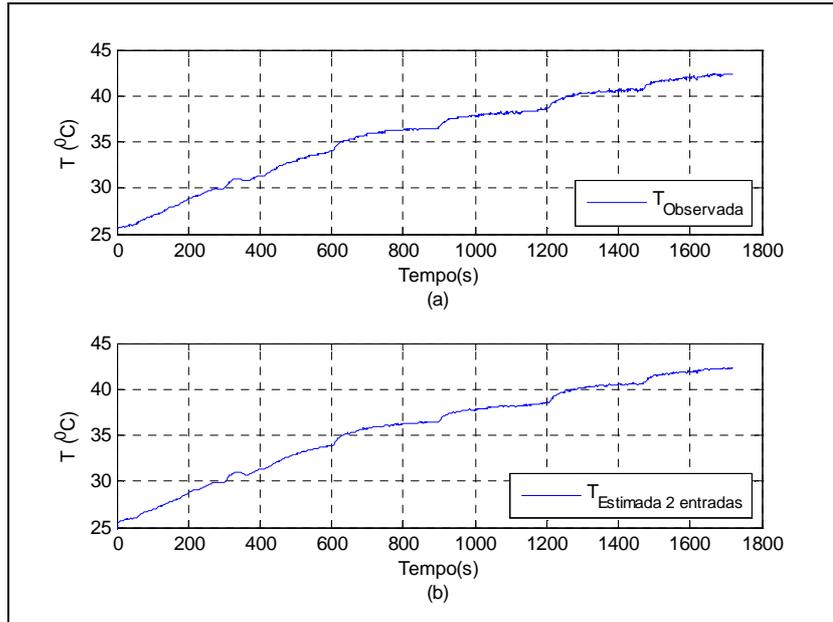


Figura 5.5 – Resultados da Equação a Diferença, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

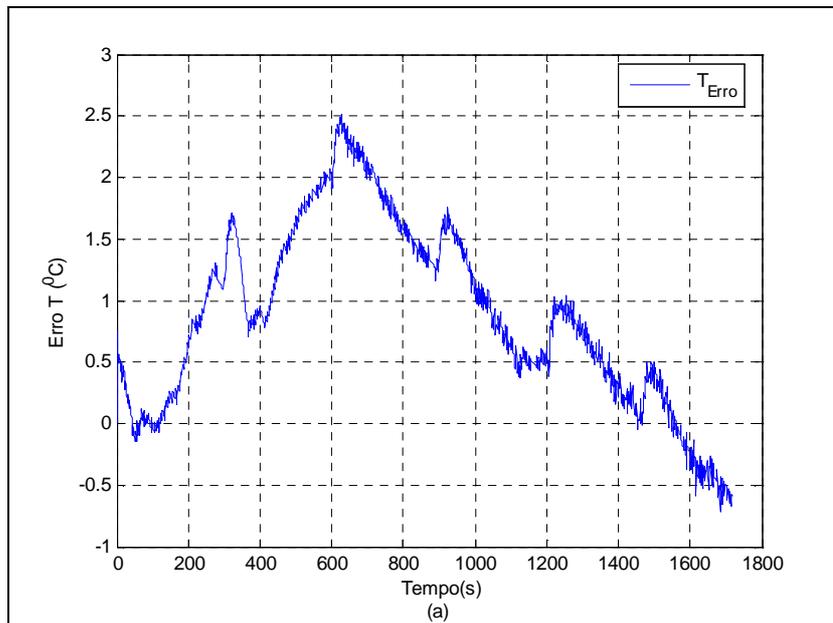


Figura 5.6 – Erro do Modelo, $u = I_{Ger.Principal}$.

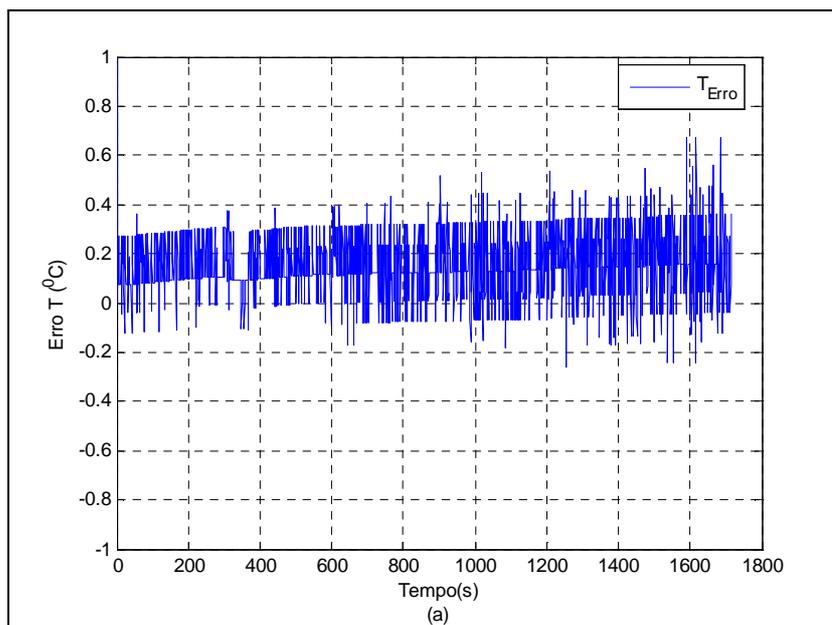


Figura 5.7 – Erro do Modelo, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

5.1.1. Pólos e Zeros

Em geral a equação de um sistema dinâmico é dada por:

$$y(t) = G(z)u(t) + v(t) \quad (5.3)$$

Em (5.3), G é o que leva a entrada para saída e capta a dinâmica do sistema e v é o termo aditivo do ruído. Os pólos de um sistema linear são as raízes do denominador da função de transferência G . Os pólos têm uma influência direta sobre as propriedades dinâmicas do sistema. Os zeros são as raízes do numerador de G . Pólos e zeros são formas equivalentes de descrever os coeficientes de uma equação linear à diferença, como no caso aqui abordado do modelo ARX.

Os pólos estão associados ao lado da saída da equação à diferença, enquanto que os zeros estão associados ao lado da entrada da equação. As Figuras 5.8 e 5.10 mostram o posicionamento dos pólos e zeros dos modelos com uma e duas entradas, com redução do valor da temperatura inicial do conjunto de dados medidos. Nota-se que todos os pólos e zeros para estas simulações, encontram-se dentro do círculo unitário, ou seja, temos um sistema de fase mínima. Em relação às simulações onde não foi reduzido o valor correspondente a temperatura local, tem-se os pólos dentro do círculo e os zeros à direita, o que denota então

que um sistema inverso estável e causal não existirá. As Figuras 5.9 e 5.11 ilustram a localização dos pólos e zeros dos modelos onde o valor da temperatura local não foi reduzido do conjunto de dados utilizados para simulação e estimação.

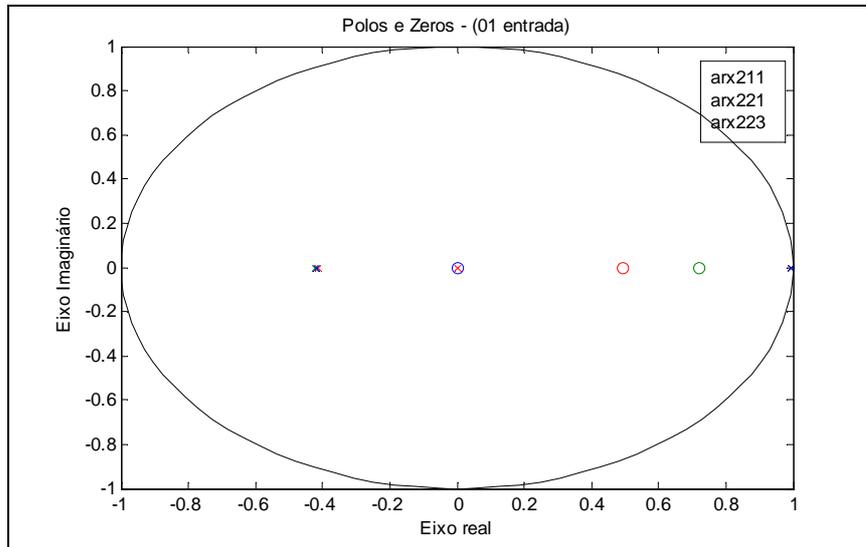


Figura 5.8 – Pólos e Zeros, $u = I_{Ger.Principal}$, $T_0 = 0$.

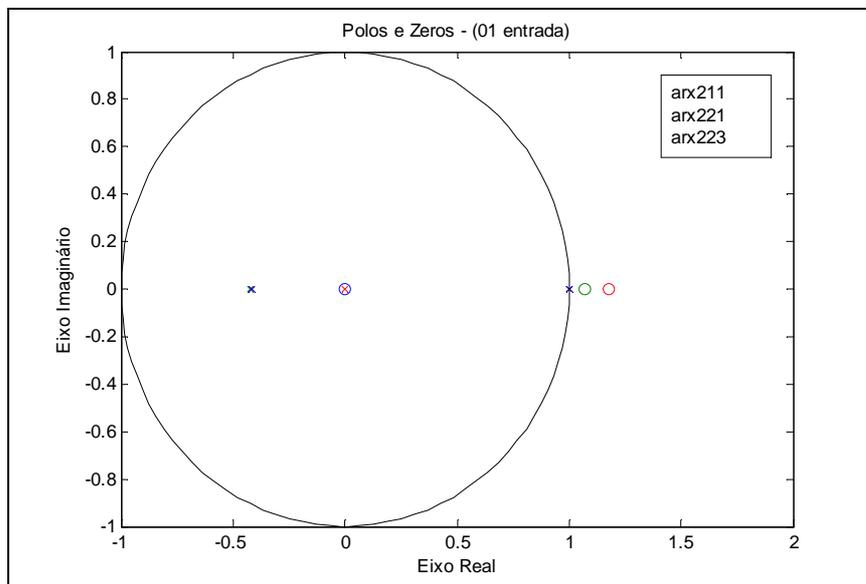


Figura 5.9 – Pólos e Zeros, $u = I_{GP}$.

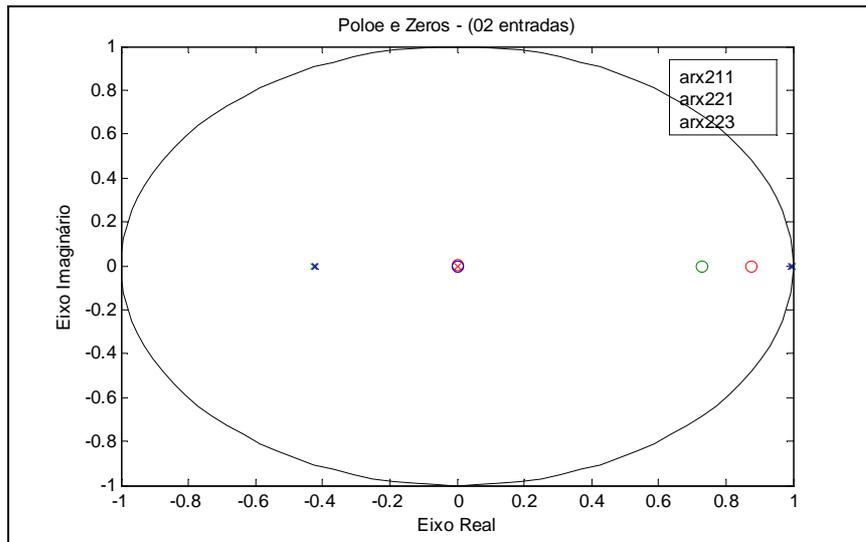


Figura 5.10 – Pólos e Zeros, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$, $T_0 = 0$.

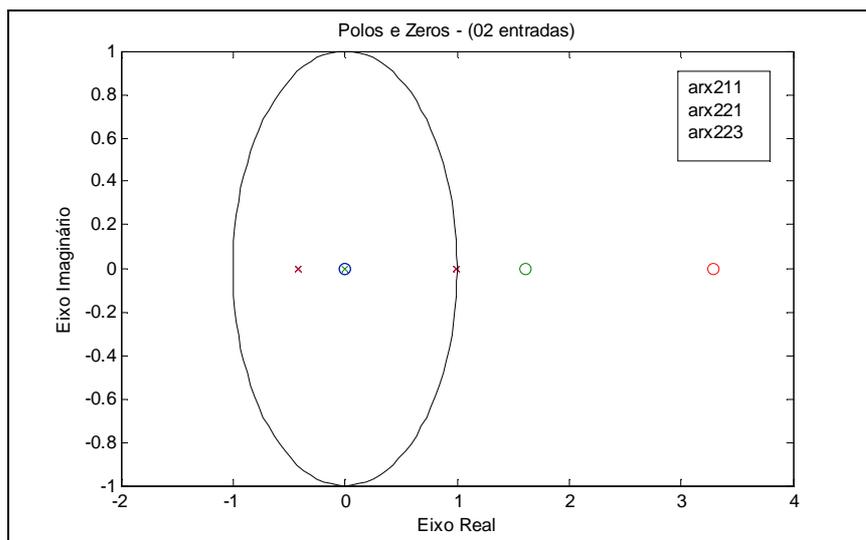


Figura 5.11 – Pólos e Zeros, $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

No caso de modelos lineares, a escolha da sua estrutura limita-se, basicamente, à escolha do número de pólos, zeros e do atraso puro de tempo. Vale lembrar que se a ordem de um modelo linear for maior do que a ordem efetiva do sistema, isso pode gerar cancelamento de pólos e zeros na função de transferência do sistema.

5.1.2. Função de Transferência e Ajuste do Modelo

A função de transferência de um sistema é um modelo matemático que constitui um método operacional para expressar a equação diferencial que relaciona a variável de saída à variável de entrada (Ogata, 2003).

A função de transferência discreta é a relação entre a transformada-z da saída $Y(z)$ e a transformada-z da entrada $U(z)$. A relação $H(z) = B(z)/A(z)$ é uma razão de dois polinômios em z , os polinômios são $B(z) = \sum_{j=0}^m b_j z^j$ e $A(z) = \sum_{i=0}^n a_i z^i$ sendo $n \geq m$, $a_n = 1$, n é a ordem do sistema. A função de transferência correspondente ao modelo ARX_{211} está em (5.4), e representa o modelo com o melhor ajuste, conforme pode ser observado na Figura 5.12. O modelo discreto $A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t)$ é dado em (5.1).

$$ft_{ARX_{211}} = \frac{7,233^{-0,005} z}{z^2 - 0,5761z - 0,4159} \quad (5.4)$$

Para o sistema com duas entradas, foram aplicadas as técnicas anteriores, sendo obtida e função de transferência apresentada em (5.5).

$$ft_{ARX_{211}} = \frac{3,02^{-0,005} z}{z^2 - 0,5717z - 0,4222} \quad (5.5)$$

Com utilização do *toolbox* de identificação do MATLAB® foi feita a estimação com uso da estrutura do modelo polinomial ARX. O utilitário também oferece várias opções para determinação do tempo de atraso e saída. Após definido o modelo da estrutura, é determinado a sua ordem, que ocorre após realização de análise do melhor ajuste indicado pela ferramenta computacional utilizada. Os ajustes obtidos para uma e duas entradas estão representados nas Figuras 5.12 a 5.15.

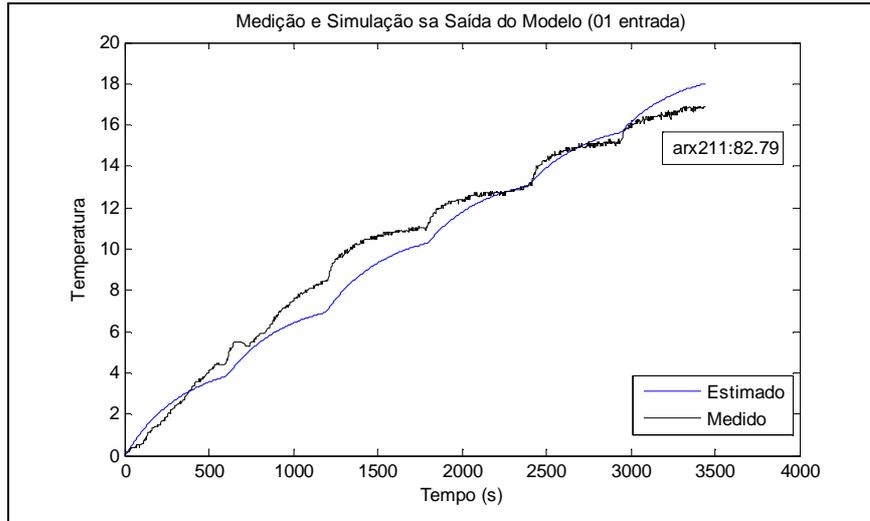


Figura 5.12 – Ajuste ARX_{211} , $u = I_{GP}$, $T_0 = 0$.

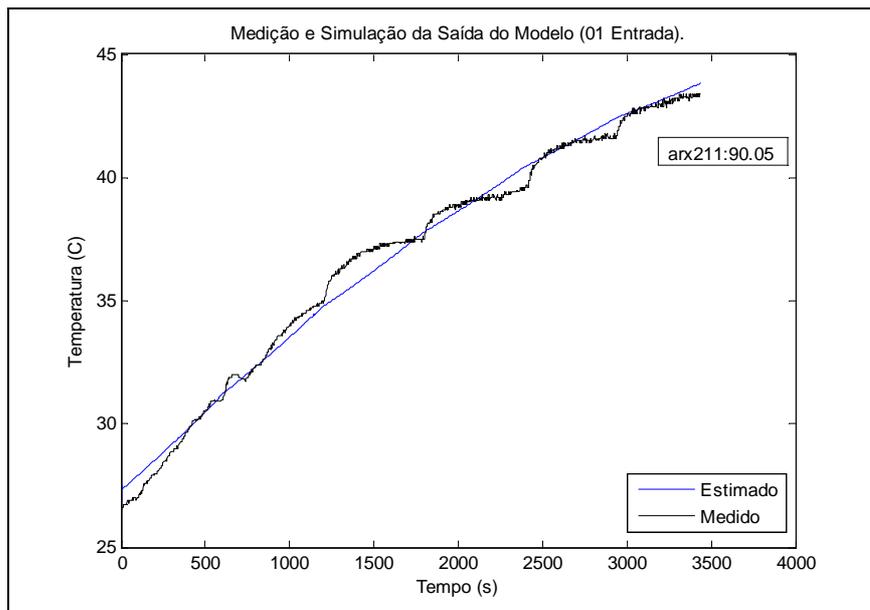


Figura 5.13 – Ajuste ARX_{211} , $u = I_{Ger.Principal}$.

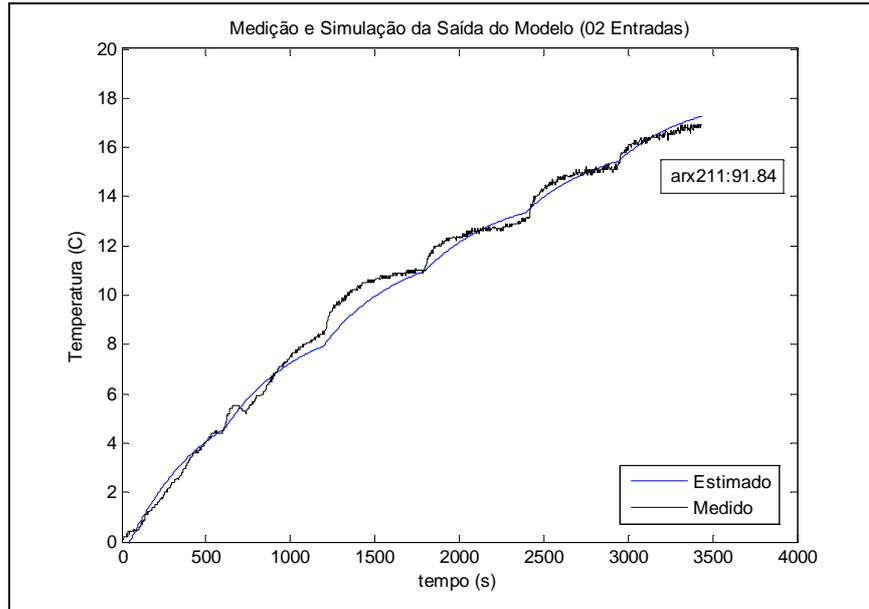


Figura 5.14 – Ajuste ARX_{211} , $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$, $T_0 = 0$.

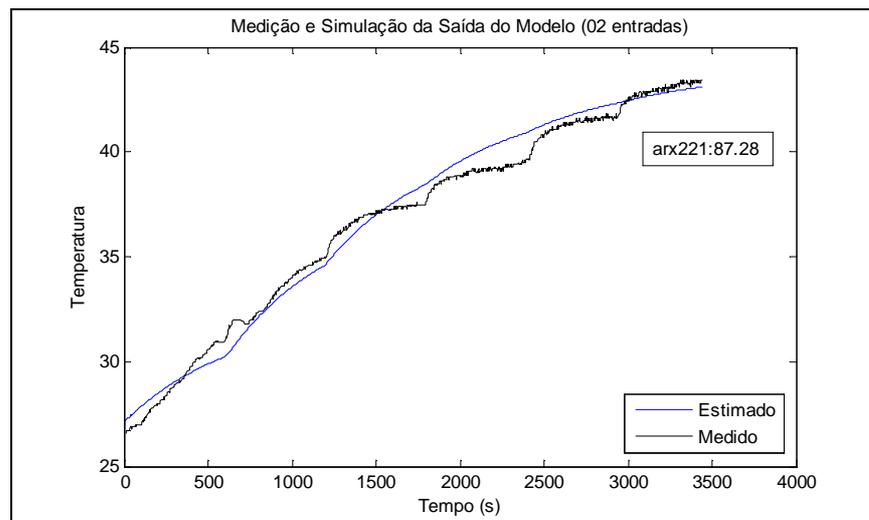


Figura 5.15 – Ajuste ARX_{211} , $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

5.1.3. Resposta ao Impulso e Degrau

Utilizando as funções de transferências representadas em (5.4) e (5.5), foram realizadas suas normalizações, de modo que as respostas transitórias possam ser melhor analisadas, uma vez termos um referencial unitário. A função de transferência normalizada resultante do modelo com uma entrada está em (5.6), enquanto que para o modelo com duas entradas é dada em (5.7). O gráfico de resposta ao impulso mostra que o sistema não é

sensível a variações bruscas, o que o torna compatível com a planta ferroviária de carga pesada.

A função de resposta impulsiva é resposta de um sistema linear a um impulso unitário de entrada, quando as condições iniciais do sistema são nulas. Assim, a função de transferência e a função de resposta impulsiva de um sistema linear, contêm as mesmas informações sobre a dinâmica do sistema. Dessa maneira, é possível obter informações completas sobre as características dinâmicas de um sistema, por meio da excitação por um impulso de entrada e medindo a resposta. (Ogata, 2003)

$$ft_{ARX211} = \frac{0,007989 z}{z^2 - 0,5761 z - 0,4159} \quad (5.6)$$

$$ft_{ARX211} = \frac{0,006076 z}{z^2 - 0,5717 z - 0,4222} \quad (5.7)$$

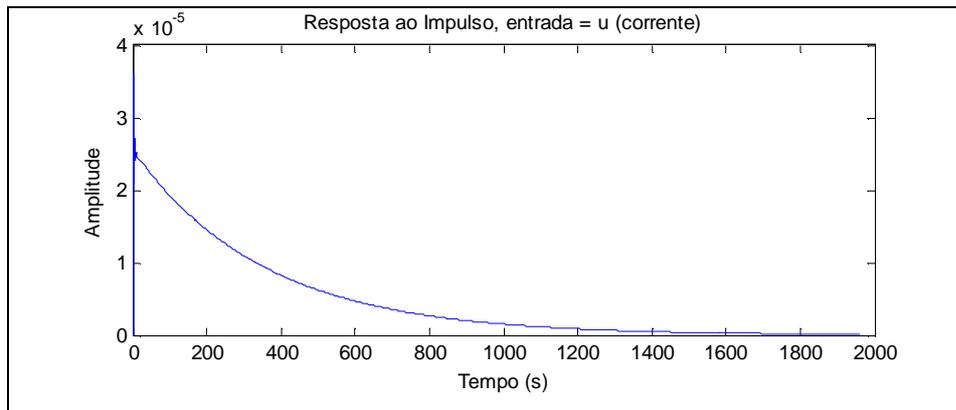


Figura 5.16 – Resposta ao Impulso, $u = I_{GP}$.

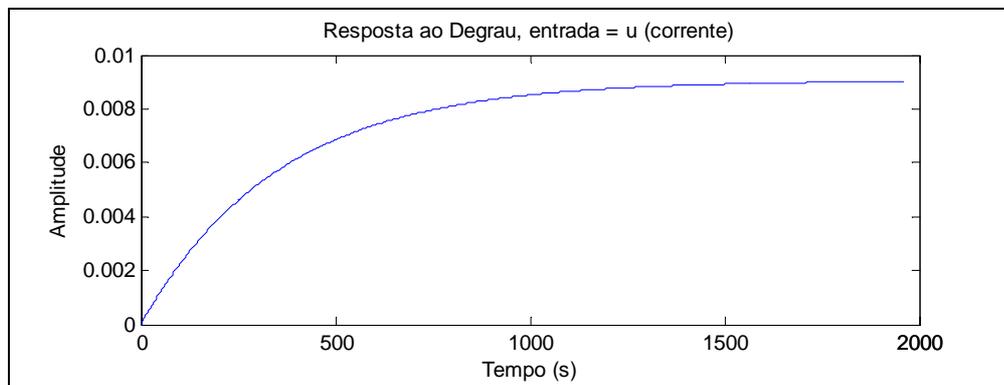


Figura 5.17 – Resposta ao Degrau $u = I_{GP}$.

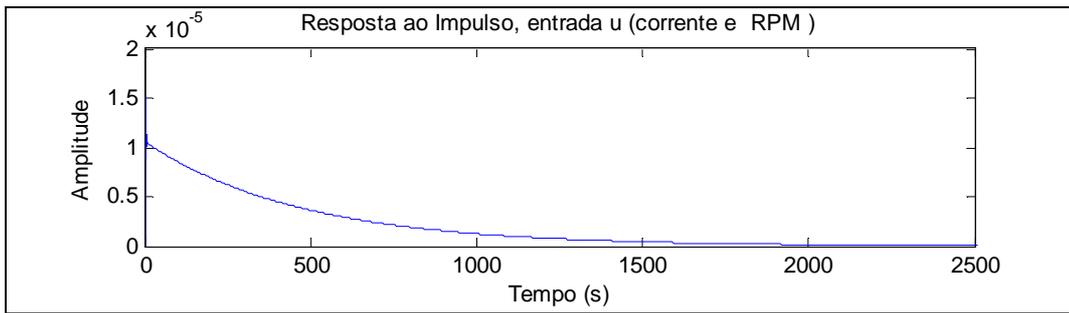


Figura 5.18 – Resposta ao Impulso $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

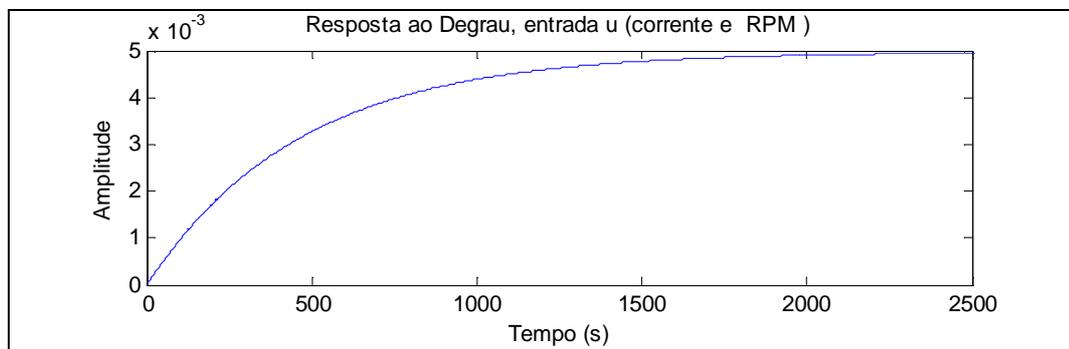


Figura 5.19 – Resposta ao Degrau $u = I_{GP} + RPM_{Soprador}$.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÃO

A modelagem e estimação de um retificador de potência, bem como a de outros sistemas reais é sempre um grande desafio. A tarefa de representar um sistema físico por um modelo matemático requer um levantamento prévio das suas características intrínsecas, além de uma metodologia adequada para análise de suas respostas as entradas, excitações e perturbações.

Os resultados dos experimentos realizados nesta pesquisa demonstram que o retificador principal de uma locomotiva pode ser representado por um modelo matemático de ordem relativamente baixa. Esta característica torna viável a implementação de ações de controle não complexas, uma vez os recursos computacionais disponíveis nesses equipamentos são limitados ou não estão disponíveis. Outro ponto importante a considerar é a compatibilidade entre a resposta do modelo encontrado e a dinâmica do processo produtivo, onde foi observado considerável sintonia entre a característica do modelo e a requerida pelo sistema real.

Em relação às respostas ao degrau e impulso, foi observado que o modelo responde de forma coerente, uma vez que não estamos tratando de elevação súbita da temperatura. Ao contrário, o aumento da temperatura no retificador principal é relativamente lento, fazendo com que a tolerância de acomodação seja aceitável. Isto significa respostas temporais aceitáveis, ou seja, a resposta transitória do sistema é satisfatória.

Ao longo desta pesquisa, evidencia-se a importância de determinar um modelo matemático que represente o retificador da corrente de saída do gerador principal de uma locomotiva diesel-elétrica, de modo a possibilitar ações de controle que evitem o seu superaquecimento. A partir da simulação de autocarga, onde é possível observar o desempenho com base na curva de potência da mesma, foram realizadas as medições das componentes de entrada e saída do retificador e adquirido os dados necessários para estimar e validar o modelo. Concluiu-se que o ensaio adotado para realização do experimento é suficientemente eficiente para observação do comportamento deste equipamento no sistema,

evitando atividades com a locomotiva em movimento, fato que eleva a condição de segurança da tarefa.

Com utilização de apenas um conjunto de amostras de dados na entrada, quando foram utilizados os valores da corrente de saída do gerador principal, o modelo ARX_{211} foi o que apresentou melhor validação, obtendo uma coerência de 82,79% em relação ao sistema real, conforme ilustrado na Figura 5.12. Foram considerados todos os dados observados e avaliado as médias e tendências oriundas do meio externo e que pudessem inferir no resultado do modelo. Como não existe nenhum tipo de controle preditivo da temperatura nos retificadores de corrente elétrica utilizados para suprimento dos motores de tração das locomotivas, este estudo torna-se de grande importância para o desenvolvimento, aprimoramento e implantação de um sistema de controle, capaz de minimizar os impactos ocasionados por paradas indesejadas devido evento de “diodos quentes”.

Com o incremento de uma segunda referência na entrada, ou seja, um conjunto de dados referente aos valores de RPM do soprador, ocorreu considerável redução na diferença entre os valores estimados e observados, isto é, minimização do erro para essa configuração. O ajuste obtido foi de 91.84%, para o modelo ARX_{211} , estando os pólos e zeros dentro do círculo unitário, conforme ilustrado na Figura 5.10.

Nas simulações onde não foi considerado o valor da temperatura inicial, referente à temperatura do ambiente onde está montado o retificador, foram obtidos os ajustes conforme ilustrado nas Figuras 5.13 e 5.15, porém como pode ser observado nas Figuras 5.9 e 5.11 que existem pólos e zeros fora do círculo unitário, o que conforme mencionado nesta dissertação, indica instabilidade, não sendo sugestivo a utilização dessa configuração.

Outras técnicas de identificação e modelagem podem ser aplicadas, sendo a bibliografia sobre o assunto bastante amplo. Em alguns métodos, como por exemplo, o baseado em lógica *fuzzy* (disponível no *toolbox* lógica *fuzzy*™) possibilita uma maior precisão, porém o tempo gasto com a exaustiva busca do algoritmo é muito elevado. Em outras palavras, nesta pesquisa o objetivo foi obter um modelo com tempo de processamento adequado e que seja relativamente simples, motivo pelo qual a escolha foi direcionada ao modelo ARX.

Por fim, concluímos que este trabalho é de grande importância para possibilitar um controle mais eficaz nos diversos sistemas de uma locomotiva, contribuindo significativamente para redução de perdas na produção. A planta ferroviária utilizada nesta pesquisa caracteriza-se pela elevada capacidade no volume de carga pesada, portanto justifica-se a busca por modelos matemáticos que possam ser utilizados em seu material rodante afim de possibilitar ações de controle mais eficientes.

6.1 Trabalhos Futuros

Estudo estatístico para detecção de eventos de sobreaquecimento em rodas e rolamentos das composições ferroviárias, a partir do estudo dos registros de alarmes no sistema de detecção de caixa quente.

Implementação de um atuador no sistema de controle de excitação da locomotiva, com base no comportamento do modelo do retificador principal.

6.2 Trabalhos Publicados

NOGUEIRA NETO, BERNARDO; CATUNDA, S. Y. C.; FONSECA NETO, J. V. Utilização de Modelo ARX e Teoria de Identificação de Sistemas no Estudo e Análise do Comportamento da Temperatura do Retificador Principal de uma Locomotiva Diesel-Elétrica. In: VIII Semetro, 2009, João Pessoa. Anais do VIII Semetro, 2009. v. 1. p. 1.

Descrição e Propriedades de Sistema Linear

A.1 Sistema tempo contínuo

Um sistema linear na forma de espaço de estado é descrito por:

$$\frac{d}{dt}x = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

(A.1)

Se x é um vetor de n , u é vetor de m e y é um vetor de p , A, B, C e D são matrizes de dimensões $n \times n$, $n \times m$, $p \times n$, e $p \times m$, respectivamente. x é chamado de estado, u de entrada e y de saída. n é chamado de ordem do sistema. $D = 0$.

Se u e y são escalares, ($m = p = 1$), B é um vetor coluna e C um vetor linha.

A solução de (A.1) é dada por:

$$x(t) = e^{At}x(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)}Bu(\tau)d\tau$$

(A.2)

onde a matriz exponencial é definida de acordo com

$$e^{At} = I + t \cdot A + \frac{t^2}{2}A^2 + \dots + \frac{t^k}{k!} + \dots$$

(A.3)

Se u e y tem a transformada de laplace $U(s)$ e $Y(s)$ respectivamente, estes são relacionados por:

$$Y(s) = G(s)U(s)$$

(A.4)

sendo G a matriz $p \times m$, chamada de função de transferência. Considerando supostamente a condição inicial ser zero. O sistema (A.1) corresponde à função $G(s)$

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A.5})$$

Se u e y são escalares ($m = p = 1$), $G(s)$ é a função racional

$$G(s) = \frac{b_0s^n + b_1s^{n-1} + \dots + b_n}{s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_n} \quad (\text{A.6})$$

Os valores de s para o qual $G(s) = 0$ são chamados de *zeros*, enquanto os valores onde $G(s) = \infty$ são chamados de *pólos* (zeros do denominador G)

Normalmente os *pólos* de G são idênticos aos autovalores da matriz A em (A.1). No entanto alguns autovalores podem correspondem a uma dinâmica não observada no comportamento da entrada/saída. Estes autovalores não são incluídos entre estes *pólos*. Uma vez que a diferenciação no domínio do tempo corresponde à multiplicação por s da transformada de Laplace, (A.4) pode ser reescrita como:

$$y(t) = G(p)u(t), \quad p = \frac{d}{dt} \quad (\text{A.7})$$

Se G é da forma de (A.5), esta corresponderá ao linear, equação diferencial de ordem superior.

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y = b_0 \frac{d^n u}{dt^n} + b_1 \frac{d^{n-1} u}{dt^{n-1}} + \dots + b_n u \quad (\text{A.8})$$

Se (A.4) é transformada para o domínio do tempo, pode ser escrita como:

$$y(t) = \int_0^t h(\tau)u(t-\tau)d\tau \quad (\text{A.9})$$

sendo h chamado de resposta ao impulso. $G(s)$ e $h(t)$ estão relacionados por G , sendo a transformada de Laplace de h :

$$y(t) = \int_0^\infty h(t)e^{-st} dt \quad (\text{A.10})$$

Se a entrada do sistema é escolhido como $u = \sin \omega t$ e todos seus pólos tem parte real estritamente real negativa, a saída é dada, quando todos os transientes de saídas findarem, pela expressão:

$$y(t) = |G(i\omega)| \sin(\omega t + \arg G(i\omega)) \quad (\text{A.11})$$

A função

$$G(i\omega)$$

que, portanto, pode ser interpretada como a resposta do sistema a frequência angular ω , é a função de frequência ou resposta de frequência.

A.2 Modelo tempo discreto

O modelo linear em tempo discreto é dado de forma análoga ao (A.1) por

$$x((k+1)T) = Ax(kT) + Bu(kT) \quad (\text{A.12})$$

$$y(kT) = Cx(kT) + Du(kT)$$

Aqui se assume que os sinais medidos possuem intervalos de tempos equidistantes $(0, T, 2T, \dots)$, separados por intervalo de amostragem T .

Se a transformada z de u e y , são dadas por $U(z)$ e $Y(z)$, respectivamente, a saída correspondente é dada por

$$Y(z) = G(z)U(z) \quad (\text{A.13})$$

sendo G é uma matriz $p \times m$ chamada de função de transferência em tempo discreto. Para (A.12), $G(z)$ pode ser computada a partir de

$$G(z) = C(zI - A)^{-1}B + D \quad (\text{A.14})$$

Se u e y são escalares ($p = m = 1$), então $G(z)$ é uma função racional.

$$G(z) = \frac{b_0 z^n + b_1 z^{n-1} + \dots + b_n}{z^n + a_1 z^{n-1} + \dots + a_n} \quad (\text{A.15})$$

Os valores de z que satisfazem $G(z) = 0$ são chamados de *zeros* enquanto que os valores em que $G(z) = \infty$ são chamados de *pólos*, estes serão zeros do denominador de G . Normalmente os *pólos* de G são identificados pelos autovalores da matriz A (A.12).

As equações anteriores também podem ser escritas em termo em termos de mudança do operador qT com as propriedades:

$$qT y(t) = y(t+T), \quad qT^{-1} y(t) = y(t-T)$$

Desde que a mudança do tempo correspondente para multiplicação por z e a transformada z , (A.13) também pode ser escrito como:

$$y(t) = G(qT)u(t) \quad (\text{A.16})$$

Ou com G de acordo com (A.14),

$$y(t+nT) + a_1 y(t+(n-1)T) + \dots + a_n y(t) = b_0 u(t-nT) + \dots + b_n u(t) \quad (\text{A.17})$$

Ou equivalente

$$Y(t) = -a_1 y(t-T) - \dots - a_n y(t-nT) + b_0 u(t) + b_1 u(t-T) + \dots + b_n u(t-nT) \quad (\text{y minúsculo}) \quad (\text{A.18})$$

O intervalo de amostragem é muitas vezes implícito e podemos escreve $q = qT$ e:

$$y(t) = G(q)u(t)$$

Se (A.13) é transformado para o domínio do tempo, temos a representação:

$$y(kT) = \sum_r^{\infty} (rT)u((k-r)T) \quad (\text{A.19})$$

sendo a resposta ao impulso. $G(z)$ e (t) estão relacionados por G sendo a transformada z de :

$$G(z) = \sum_{k=0}^{\infty} (kT)z^{-k} \quad (\text{A.20})$$

A função de ω que se obtêm quando substitui z por $e^{i\omega T}$ em G é chamada de função de frequência do sistema:

$$G(e^{i\omega T}) \quad (\text{A.21})$$

Ela tem a mesma interpretação do caso de tempo contínuo: Se o sinal $u(kT) = \sin \omega kT$ está submetido ao sistema, com todos os *pólos* dentro do ciclo unitário, a saída é dada, quando todos os transientes findarem, pela expressão:

$$y(kT) = |G(e^{i\omega T})| \sin(\omega kT + \phi) \quad (\text{A.22})$$

sendo

$$\phi = \arg G(e^{i\omega T})$$

A.3 Ligações entre modelos de tempo contínuos e discretos

Se a entrada u é partes constantes de acordo com:

$$u(t) = u(kT), \quad kT \leq t < (k+1)T$$

Então (A.1) corresponde a:

$$x((k+1)T) = Fx(kT) + Gu(kT) \quad (\text{A.23})$$

$$y(kT) = Cx(kT) + Du(kT)$$

Onde as matrizes F e G são dadas por:

$$F = e^{AT}, \quad G = \int_0^T e^{A\tau} B d\tau \quad (\text{A.24})$$

Tem-se assim uma representação exata de (A.12).

Referências Bibliográficas

- [1] Aguirre, L. A. “Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais”. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2007.
- [2] Aguirre, L. A. “Introdução à Identificação de Sistemas” 2^a- Ed. Belo Horizonte, 2004.
- [3] Arruda, G. H M. de, Barros , P. R. (2007), “Introdução à identificação de sistemas dinâmicos”, Enciclopédia de Automática controle e automação. Volume 3. editora Blucher
- [4] Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1970) “Time series analysis: Forecasting and control”, San Francisco: Holden-Day.
- [5] Brinlinger, D. R. “Time Series Data Analysis and Theory. Holden Day”, San Francisco, 1981
- [6] Callister, William D. e John Wiley & Sons, (1991) Inc. “MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING An Introduction”, New York, NY, 1991.
- [7] Davis, M. H. A. and Vinter, R. B., “Stochastic modelling and control. Chapman and Hall”, London, 1985;
- [8] Eykoff, P. “System identification: parameter and state estimation”. London, Wiley, 1974.
- [9] Fonseca Neto, J. V. “Identificação de Sistemas. Uma Abordagem para o Projeto em Controle, Instrumentação e Processamento de Sinais”. Apostila Ufma – LAC (2007)

- [10] Fonseca Neto, J. V. and Nagen, N. F. "Parametric ARX Modeling of the Electrolytic Smelter Pot. In: Sim 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2009", Cambridge, England. UKSim 11th International Conference on Computer Modelling and Simulation, 2009.
- [11] Gessing, R (1996). "Measurements and Estimation in Adaptive Control Systems", 13th IFAC World Congress, San Francisco, USA, p.103
- [12] Goodwin, G. C. and. Payne, R. L (1977) "Dynamic System Identification: Experiment Design and Data Analysis". Academic Press, New York.
- [13] Hang, C. C. and Chin, D. (1991). "Reduced order Process Modeling in Self-tuning Control", automática, v 27, p. 529-534.
- [14] Hendry, D. F. (1995), "Dynamic Econometrics", Oxford University Press.
- [15] Kanninen, M. F. & Popelar, C. H. "Advanced Fracture Mechanics". Oxford University Press. 1985
- [16] Kashyap, R. L. and Rao, A. R. (1976), "Dynamic Stochastic Models from Empirical Data Academic. Press"
- [17] Lindskog, P; Ljung, L. "Tools for semiphysical modeling. Int. J. of Adaptive Control and Signal processing" 1995.
- [18] Ljung, L. "System Identification: Theory for the User". Prentice - Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2nd edition, 1999.
- [19] Ljung, L. "System Identification. Theory for the user" Prentice-Hall, 1987.
- [20] Ljung, L. and Glad, T. "Modeling of Dynamic Systems". Prentice Hall, 1 edition, 1994.

- [21] Ljung, Lenart (2007). “System Identification Toolbox 7 User’s Guide. The Math-Works”, Inc.
- [22] Ljung, L. and Söderström, T. “Theory and Practice of Recursive Identification” The MIT Press Cambridge, Massachusetts London, England, 1983
- [23] Luyben, William L. and Michael L. Luyben (1997). “Essentials of Process Control. Chemical Engineering”, McGrawHill international Editions.
- [24] Ogata, K. “Engenharia de controle moderno” 3ª edição, 1997. LTC- Livros Técnicos e Científicos editora S.A. Reimpressão 2005.
- [25] Press, W. H., Teukolsky, S.A., Vetterling, W.T. and Flannery, B.P. (1992). “Numerical Recipes in C: the art of scientific Computing”, Cambridge Univ.
- [26] Salunkhe, D. K.; Chavan, J. K.; ADSULE, R. N.; KADAM, S.S. “World oilseeds, chemistry, technology and utilization”. Van Nostrand Reinhold, 1992
- [27] Söderström, T. and Stoica, P.G. (1989). “System Identification”, Practice Hall, London.
- [28] Söderström, T. and Stoica, P.G. (1983). “Instrumental Variable Methods for System Identification, Lecture Notes in Control and Information Sciences, Springer-Verlag”.
- [29] Taylor, C. F. “The Internal Combustion Engine in Theory and Practice”. Cambridge, MA: M.I.T. Press, 1977.
- [30] Zambrozi de Souza, A. C. e Murari Pinheiro, C. A. “Introdução à modelagem, Análise e Simulação de Sistemas Dinâmicos ”, Editora Interciência , Rio de Janeiro, Brasil, 2008.