

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.

Bernardo Nogueira Neto¹, Sebastian Yuri Cavalcanti Catunda², João Viana da Fonseca Neto³.

¹ Companhia Vale do Rio Doce – Vale, São Luís – MA, Brasil, bernardo.nogueira@vale.com

² Universidade Federal do Maranhão – Ufma, São Luís – MA, Brasil, Catunda@dee.ufma.br

³ Universidade Federal do Maranhão – Ufma, São Luís – MA, Brasil, jviana@dee.ufma.br

PALAVRAS CHAVE: Locomotiva Diesel-Elétrica, Retificador, Identificação de Sistemas, Modelo Paramétrico ARX.

RESUMO

Este artigo aborda a Teoria de Identificação de Sistemas na escolha de um modelo polinomial que possibilite a observação do comportamento da temperatura do retificador de corrente elétrica utilizado para suprimento dos motores de tração de uma Locomotiva Diesel-Elétrica. Será observada a estrutura de um modelo ARX, do inglês Autoregressive with Exogenous input. A escolha desse modelo deve-se a sua função de transferência que é bastante simples e das características para controle preditivo. Será utilizado o toolbox de identificação do MATLAB para estimação e validação do modelo.

A escolha da ordem do modelo que melhor descreva a resposta dinâmica do sistema físico será feita observando-se a classificação do percentual do ajuste de saída do sistema em relação a sua entrada. Busca-se, portanto um modelo que possibilite ações de controle para otimização entre a potência fornecida através do retificador e a requerida para tração, de tal forma que eventos de *downtime* do equipamento sejam minimizados.

ABSTRACT

This article is related the theory of identification systems in the choice of a polynomial model that makes possible the observation of the behavior of the temperature in rectifier's of electrical current, used to supply the in traction motors of a Diesel-Electric Locomotive. It will be observed the structure of an ARX (Autoregressive with Exogenous Input) model. The choice of this model was due to the simplicity of its transfer function and also its features for support predictive control. Will be used for the identification of the MATLAB toolbox for estimation and validation of the model.

The choice of the order of the model that best describes the dynamic response of the physical system, will be observing the classification of the percentage adjustment of the output of the equipment on its input. We are looking for a model that makes possible control actions for optimization between the power supplied through the rectifier and the required power for locomotive's traction, in such a way downtime events are minimized.

INTRODUÇÃO

O controle da força de tração que é produzida por um sistema diesel-elétrico para impulsionar as composições de um comboio ferroviário é fator de grande importância para eficiência e segurança no processo deste tipo de transporte. O sistema de controle de uma Locomotiva Diesel-Elétrica é composto por vários subsistemas: mecânico, pneumático, elétrico e eletrônico. No caso específico do equipamento que será o instrumento de nosso trabalho o controle é realizado através do acionamento de uma chave termostática que desliga o sistema de potência quando a temperatura do retificador atinge 146 °C.

O modelo matemático de um sistema dinâmico pode ser entendido como um conjunto de equações e regras capaz de representar de forma resumida e precisa ou, pelo menos, razoavelmente bem ao comportamento do sistema [1] [4], fornecendo informação temporal de uma ou mais variáveis observadas. Esta dinâmica é descrita em termos de equações diferenciais, as quais são obtidas pelas leis físicas que regem determinado sistema. Uma vez obtido o modelo matemático do retificador é possível utilizar várias ferramentas para análise e síntese. A identificação de sistemas tem como objetivo obter o modelo matemático de um sistema dinâmico a partir de

medições de suas entradas e saídas. A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos de um modelo. Em geral um sistema dinâmico possui uma ou mais entradas que afetam o comportamento de uma ou mais saídas, de acordo com uma relação entrada/ saída intrínseca.

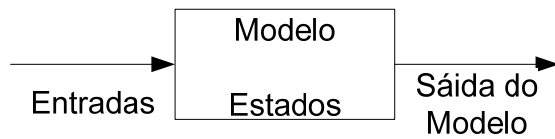


Figura 1 - Representação de Modelo.

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 [3]. Neste trabalho é apresentado uma avaliação e os resultados com base na teoria de identificação de sistemas com uso do método de modelagem do tipo caixa cinza semifísica, uma vez que a estrutura das equações dos referidos modelos utiliza-se de leis físicas do processo [5] e assim usado-a para sugerir combinações não-lineares entre os sinais medidos [6]. Esta estrutura é utilizada para escolha do modelo paramétrico regido pelas leis físicas [5].

OBJETIVO

Esta pesquisa busca obter um modelo ARX que melhor represente o retificador principal de uma locomotiva Diesel-Elétrica, possibilitando uma estratégia de controle capaz de minimizar os efeitos provocados pela atuação de seu sistema de proteção contra altas temperaturas. O modelo obtido será mostrado através de função de transferência.

A ação prática da pesquisa é a identificação do sistema retificador através de um modelo matemático e assim possibilitar uma perspectiva para implantação de um atuador para controle, de forma a reduzir os eventos decorrentes da atuação do sistema de proteção contra altas temperaturas no retificador principal de uma Locomotiva Diesel-Elétrica durante sua operação em regime severo, fato este que ocasiona bloqueio brusco em sua capacidade de tração, potencializando a geração de quebras e acidentes nos comboios ferroviários. Portanto busca-se com esta pesquisa uma estratégia de controle capaz de minimizar este efeito.

O EFEITO DE DÍODOS QUENTES NAS LOCOMOTIVAS DIESEL-ELÉTRICA – CC

Toda corrente elétrica para suprimento dos motores de tração de uma Locomotiva Diesel-Elétrica é fornecida por um gerador através de um retificador [1]. A atuação do sistema de proteção contra altas

temperaturas no retificador principal de uma Locomotiva Diesel-Elétrica durante a operação em regime severo ocasiona bloqueio brusco em sua capacidade de tração, potencializando a geração de quebras e acidentes nos comboios ferroviários. A Figura 2 ilustra uma quebra gerada após este tipo de evento.



Figura 2 – Fratura frágil em engate ferroviário.

REPRESENTAÇÃO DO MODELO ARX

O modelo auto-regressivo com entradas externas, ARX, onde AR se refere à parte auto-regressiva $A(q)y(t)$ e X a entrada externa $B(q)u(t)$, pode ser obtido a partir do modelo geral [5]:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t - nk) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t), \quad (1)$$

Considerando-se $C(q) = D(q) = F(q) = 1$, sendo $A(q)$ e $B(q)$ polinômios arbitrários, teremos então a seguinte forma:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t - nk) + e(t) \quad (2)$$

Com previsões naturais, a partir do caso ARX da equação (2), obtemos:

$$y(t) = -a_1 y(t-1) - \dots - a_{na} y(t-na) + b_1 u(t-1) + \dots + b_{nb} u(t-nk-nb+1) + e(t) \quad (3)$$

Sendo que o ruído aparece $e(t)$ e diretamente na equação, o modelo ARX é classificado como um modelo de erro na equação.

Então $C(q) = 1; F(q) = A(q) = D(q)$, a equação (2) pode ser manipulada para seguinte forma:

$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} u(t - nk) + \frac{1}{A(q)} e(t) \quad (4)$$

o que coloca em evidência as funções de transferência do sistema $H(q) = B(q) / A(q)$ e do ruído $C(q) / [D(q)A(q)] = 1 / A(q)$. Esta representação é ilustrada na Figura 3.

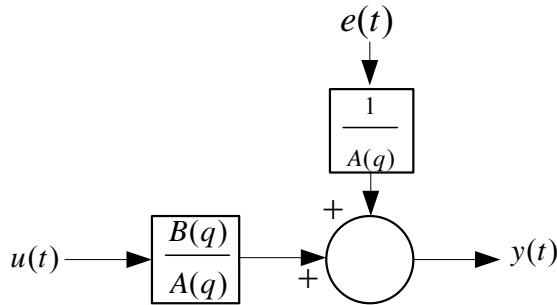


Figura 3 - Representação esquemática do modelo ARX.

Sendo o polinômio que representa a dinâmica de um sistema, $A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na}$, na é o número de parâmetros de $A(q)$, $B(q) = b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb}$, nb é o número de parâmetros de $B(q)$. Algumas vezes, a dinâmica a partir de u a y contém um atraso de amostras nk [7]. O modelo ARX (na, nb, nk) significa que será estimado com; na parâmetros no denominador, os pólos, nb parâmetros do denominador, zeros + 1 e nk atraso entre a entrada e a saída. A equação (2) pode ser reescrita em termos de regressores e parâmetros dos polinômios $A(q)$ e $b(q)$ na forma mostrada na equação (5).

$$y(k) = \psi^T \theta + e(k) \quad (5)$$

Sendo $\psi^T = [y(k-1) y(k-2) \dots y(k-na) u(k-1) u(k-2) \dots u(k-nb)]$ e $\theta^T = [a_1 a_2 \dots a_{na} b_1 b_2 \dots b_{nb}]$.

A equação (5) é dita linear porque cada parâmetro está com cada regressor [8].

MÉTODO E PROPOSTA UTILIZADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

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 na bancada retificadora. Estes dados foram observados em uma locomotiva Diesel-Elétrica durante a operação de auto carga em sua ampla faixa de operação. A partir dos dados de entrada (corrente) e saída (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 [5], a fim de obter a função de transferência do sistema. A coleta dos dados foi realizada por meio da utilização de shunt para medição da corrente elétrica na saída do alternador de tração e de um sensor de temperatura no retificador principal.

Nesta pesquisa propõe-se a análise e seleção de uma família de modelos que melhor representa o funcionamento do equipamento em estudo através da utilização e auxílio de ferramentas computacionais, em especial o Toolbox de identificação do matlab. Para implantar a estratégia de identificação proposta.

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) [6], 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 referência de corrente como sinal de entrada e de temperatura como sinal de saída. Estas referências servem para ajustar os parâmetros de um modelo polinomial tipo ARX a fim de obter a função de transferência do equipamento, retificador. Busca-se dessa forma, 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. Método semelhante pode ser aplicado em outras plantas, a citar, cubas eletrolíticas [10].

O equipamento objeto deste trabalho é o retificador de corrente elétrica utilizado para converter a energia alternada fornecida pelo alternador principal de uma locomotiva Diesel-Elétrica para suprimento dos seus motores de tração. A Figura 4 ilustra o diagrama de blocos de uma locomotiva Diesel-Elétrica.

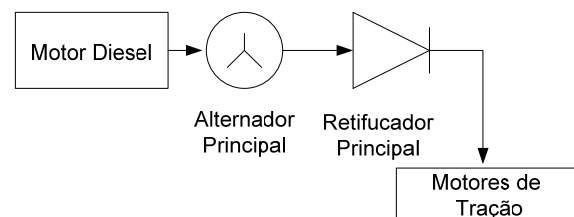


Figura 4 - Diagrama de blocos básico de uma locomotiva Diesel-Elétrica.

O retificador principal de uma locomotiva diesel-Elétrica é composto basicamente por 06 (seis) bancadas de diodos de alta potência, montados em dissipadores de calor. O conjunto retificador está instalado sobre o gerador principal e aproveita a mesma ventilação forçada para resfriamento que é utilizada pelo gerador principal. Durante todo o funcionamento da locomotiva, um soprador é

acionado, uma vez que o mesmo é possui acoplamento direto com o eixo de virabrequim do motor diesel

A Figura 5 ilustra uma bancada de diodos do retificador principal.

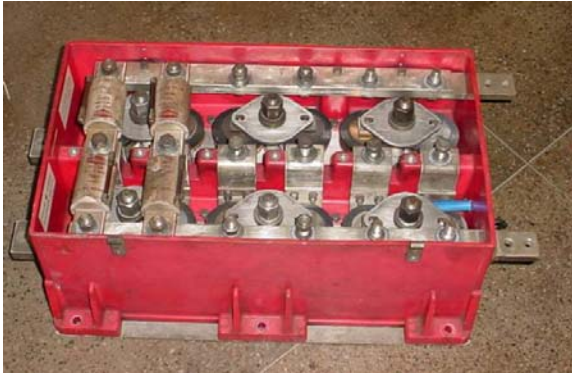


Figura 5 - Foto de uma bancada retificadora utilizada nas locomotivas Diesel-Elétrica.

Para observação do comportamento da temperatura no retificador principal foi inserido uma carga resistiva em sua saída, processo 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 $u(t)$. A medição e armazenamento dos valores da temperatura foram realizados com a utilização de um multímetro digital modelo 289-Fluke. Os dados de corrente no retificador foram obtidos com a utilização de um shunt e armazenados em um registrador de eventos modelo Q-Tron da Wabtec. 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.

Os foram utilizados os dados na forma original, sendo estes coletados através de medição direta. A necessidade da remoção de distúrbios de alta ou baixa frequência não foi desconsiderada. A Figura 6 ilustra o sinal de entrada e os dados observados na saída.

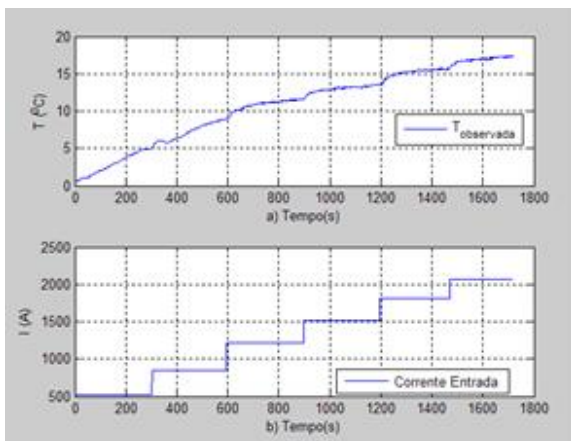


Figura 6 – Dados de entrada e saída do retificador.

Para medição de temperatura, levou-se em consideração o equipamento está em ambiente pressurizado e com temperatura controlada, o que possibilita desconsiderar o ruído decorrente de temperatura externa, ambiente.

O sinal de excitação escolhido é do tipo degrau, uma vez que a corrente em teste de carga varia dessa forma. Foi observado a dinâmica do sistema até atingir o regime estacionário. Métodos determinísticos utilizam também este tipo de entrada [9].

Os dados foram estimados e validados e posteriormente feito uma validação cruzada com dados que não foram utilizados na identificação. Com a escolha da ordem do modelo, foi então realizado teste dos mesmos, com uso de equação à diferença equação 6. Observa-se os valores estimados e o erro em relação ao sinal original, sinal de saída medido. Os resultados podem ser observados na Figura 9

$$\begin{matrix} A_0 y(k) + A_1 y(k-1) + \dots + A_{n_y} y(k-n_y) = \\ B_0 u(k) + B_1 u(k-1) + \dots + B_{n_u} u(k-n_u) + e(k) \end{matrix} \quad (6)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o sistema pode ser representado por um modelo de ordem baixa, o que viabiliza a implementação de ações de controle, uma vez que devido à robustez do equipamento os recursos computacionais disponíveis são significativamente baixos.

Para obter o modelo foram utilizadas 1.719 amostras, onde o ARX 1 1 0 apresentou ajuste de 85.01, Figura 7. O modelo discreto $A(q)y(t) = B(q) + e(t)$ sendo;

$$A(q) = 1 - 0.9931q^{-1} \quad \text{e} \quad B(q) = 6.155^{-005}$$

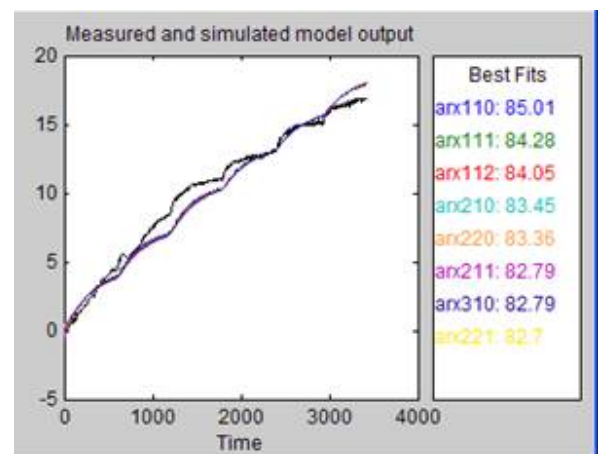


Figura 7 – Modelos testados e identificados

A função de transferência (Tf) obtida é dada pela equação 7.

$$Tf_{arx110} = \frac{6.155 z^{-0.005}}{z - 0.9931} \quad (7)$$

Os resultados do teste com base na equação à diferença são apresentados na Figura 8.

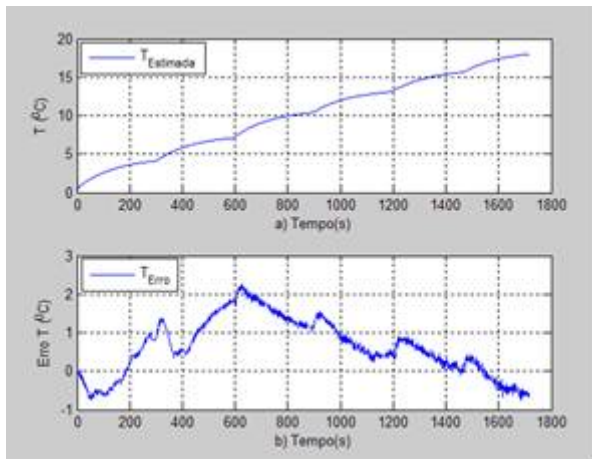


Figura 8 – Resultados de teste com equação à diferença

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Foi executado teste em simulador de trem e observado o comportamento da composição. As ondas de choques produzidas pelo corte de tração geraram impactos de compressão e tração variáveis e em alguns casos chegou a ultrapassar os limites estabelecidos pela segurança do processo. A Figura 9 o registro de um choque de compressão na ordem de 109 toneladas, impacto suficiente para romper de formar frágil a estrutura do engate. Tal ruptura produz flambagem e alívio do contato roda trilho o que potencializa acidentes.

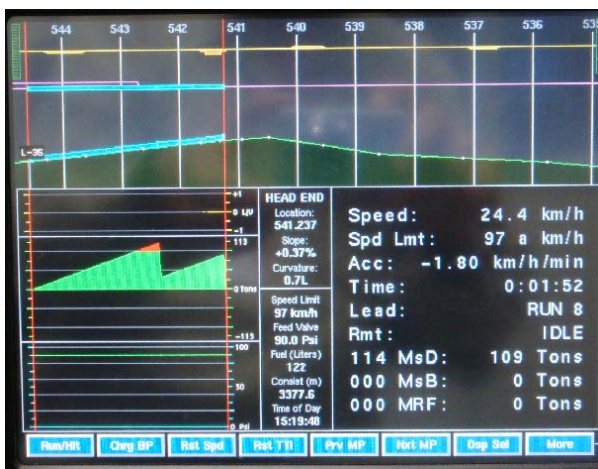


Figura 9 – Tela do simulador de trens.

Para simulação de corte com potência baixa, onde foi considerado o controle da temperatura através da

redução da corrente de entrada, não foram registrados impactos de magnitude alta.

CONCLUSÃO

O modelo ARX 110 foi o que apresentou melhor validação, obtendo uma coerência de 85.01% com o sistema real. Foram considerados todos os dados observados e avaliando as médias e tendências oriundas do meio externo e que pudesse 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 diesel-elétrica, 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 tais paradas indesejadas.

AGRADECIMENTOS

- Universidade Federal do Maranhão - Programa de Pós Graduação de Engenharia de Eletricidade.
- Companhia Vale - Gerência Geral de Manutenção, Diretoria de Logística Norte.

REFERÊNCIAS

- [1] Manual GE, Locomotiva Diesel Elétrica Modelo C-36 – 7B, Vale do rio doce, Brasil.
- [2] L. Ljung. “System Identification: Theory for the User”. Prentice - Hall, Englewood Cliffs, NJ, 2nd edition, 1999.
- [3] P. A. S, Alexandre, F. M. C, Mario e C. A , Wagner “Enciclopédia de Automática – Controle e Automação” Volume 3. Editora Edgard Blucher. 1a Ed. 2007
- [4] Ogata. Katsuhiko “Engenharia de controle moderno” 4a edição. Editora Pearson education do Brasil. 2003. Reimpressão 2005.
- [5] L. A. Aguirre “Introdução à Identificação de Sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais”. Editora UFMG. Belo Horizonte, 2007.
- [6] Lindskog, P; Ljung, L “Tools for semiphsical modeling. Int. J. of Adaptative Control and Signal processing” 1995.
- [7] L. Ljung “System Identification. Theory for the user” Prentice-Hall, 1987.
- [8] L. Ljung and T. Glad. “Modeling of Dynamic Systems”. Prentice Hall, 1 edition, 1994.
- [9] L. A. Aguirre “Introdução à Identificação de Sistemas” 2ª Ed. Belo Horizonte, 2004.
- [10] FONSECA NETO, J. V. ; 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.