

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Felipe Miana de Faria Furtado

**Redes Neurais na Manutenção Preditiva de
Caminhões Fora de Estrada**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco

Co-Orientador: Prof. Carlos Roberto Hall Barbosa

Rio de Janeiro
Agosto de 2009



Felipe Miana de Faria Furtado

Redes Neurais na Manutenção Preditiva de Caminhões Fora de Estrada

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco
Orientadora
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Carlos Roberto Hall Barbosa
Co-Orientador
Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Dr. Nelson Francisco Favilla Ebecken
UFRJ

Dr. Luiz Biondi Neto
UERJ

Dra. Karla Tereza Figueiredo Leite
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de agosto de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Felipe Miana de Faria Furtado

É formado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), e atualmente é aluno de mestrado no programa de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Tem experiência na área de redes neurais, atuando principalmente na detecção de padrões de falha em equipamentos de grande porte.

Ficha Catalográfica

Furtado, Felipe Miana de Faria

Redes neurais na manutenção preditiva de caminhões fora de estrada / Felipe Miana de Faria Furtado ; orientadora: Marley Maria Bernardes Rebuszi Vellasco ; co-orientador: Carlos Roberto Hall Barbosa. – 2009.

92 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Equipamento fora de estrada. 3. Manutenção preditiva. 4. Classificação de padrões. 5. Redes neurais. I. Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuszi. II. Barbosa, Carlos Roberto Hall. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Agradecimentos

Quero agradecer a conclusão desse trabalho a várias pessoas, as quais de alguma forma, direta e indireta, contribuíram nessa jornada.

Aos Professores Marley Vellasco e Carlos Roberto Hall Barbosa pela fundamental orientação e confiança durante todo esse trabalho.

A todos os professores do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio pelo conhecimento passado.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos colegas Sergio Monteiro e Bernardo Spindel, por todo o incentivo e colaboração.

A meus colegas de mestrado, pelos bons e maus momentos que passamos juntos.

A Fernanda de Lima Martins, pelo companheirismo, incentivo e compreensão durante esses dois longos anos.

A minha família por tornar tudo isso possível.

Resumo

Furtado, Felipe Miana de Faria; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Orientadora); Barbosa, Carlos Roberto Hall (Co-orientador). **Redes Neurais na Manutenção Preditiva de Caminhões Fora de Estrada**. Rio de Janeiro, 2009. 92p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Com o aumento da demanda por minério no mundo, a complexidade, o tamanho e o preço dos equipamentos de extração mineral aumentaram consideravelmente. Como estas máquinas possuem uma tecnologia de monitoramento embarcada no equipamento, a utilização desses dados para o aumento da confiabilidade e da disponibilidade do equipamento tornou-se fundamental, de modo a reduzir os custos de manutenção. O objetivo desta dissertação foi desenvolver um modelo de apoio à decisão de parada de equipamento, baseado na classificação por Redes Neurais Artificiais de padrões pré-falha de caminhões fora de estrada. O modelo proposto tem como objetivo identificar o estado de falha, ou padrão pré-falha de um equipamento, utilizando os dados armazenados nos equipamentos e seus respectivos registros de falha, para que seja possível avaliar o risco de falha deste equipamento e decidir se o mesmo deve ser parado ou aguardar uma nova parada programada. Essa dissertação foi desenvolvida em quatro partes: estudo dos principais modelos de manutenção atualmente utilizados; definição e desenvolvimento do modelo para abordar o problema, baseado em redes neurais artificiais; avaliação de desempenho do modelo proposto; e simulação do *downtime* da máquina utilizando o modelo de decisão proposto. No estudo dos principais modelos foi realizada uma pesquisa bibliográfica sobre a evolução da manutenção, passando por modelos de manutenção corretiva, manutenção preventiva e, por fim, chegando ao modelo de manutenção baseada no monitoramento de condições. Para os dois últimos tipos de manutenção, foram apresentados os principais modelos utilizados na abordagem do problema, seus benefícios e deficiências. O desenvolvimento do modelo foi segmentado em três etapas principais: *tratamento das bases de dados*, tanto de dados obtidos diretamente do equipamento quanto das bases de registro de falha dos equipamentos; *seleção de variáveis*, baseada no cálculo da influência de cada sensor do equipamento na determinação de seu estado de falha, assim como na definição do intervalo ideal para se agrupar os dados; e *definição da topologia das redes*. Na etapa de avaliação do desempenho do modelo proposto foram utilizados dados de falhas corretivas mais recorrentes para os dois componentes específicos de caminhões fora de estrada: *motor* e *transmissão*, sendo que o monitoramento eletrônico do motor é mais extenso do que o de transmissão, no que diz respeito ao número de sensores empregados no monitoramento. Para a comparação de desempenho entre os diferentes modelos avaliados, dois fatores tiveram maior relevância: melhor desempenho na classificação e maior intervalo entre a identificação do padrão pré-falha e a ocorrência da falha. Os resultados de classificação dos padrões pré-falha foram bastante satisfatórios para a maioria dos casos de estudos, com as taxas de acerto variando entre 85% e 95%. A partir do modelo de classificação determinado na etapa anterior, passou-se à simulação de diferentes cenários de falhas, calculando-se os tempos de máquina parada (*downtimes*) que teriam sido evitados se as intervenções definidas pelo modelo tivessem sido executadas, analisando-se, assim, o aumento de disponibilidade proporcionado pelo uso do modelo proposto.

Palavras-chave

Equipamento fora de estrada, manutenção preditiva, classificação de padrões, redes neurais.

Abstract

Furtado, Felipe Miana de Faria; Vellasco, Marley Maria Bernardes Rebuzzi (Advisor); Barbosa, Carlos Roberto Hall (Co-advisor). **Neural Networks for Predictive maintenance on Off-Highway Trucks**. Rio de Janeiro, 2009. 92p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

With the increasing demand for ore in the world, the complexity, size and price of mining equipment have increased considerably. As these machines have embedded monitoring technology, the use of such data to increase the reliability and availability of the equipment has become essential in order to reduce maintenance costs. The objective of this work is developing a model that supports the decision of stopping an equipment, based on its actual state, using pattern recognition by neural networks. The proposed model aims to identify the state of equipment failure or pre-failure based on the data stored in the equipment and on the records of failure, so as to assess the risk of failure of equipment and to decide whether it should be stopped or wait for a new programmed shutdown. This dissertation was developed in four parts: study of the main models currently used for maintenance; design and implementation of the model to address this problem, based on artificial neural networks; performance evaluation of the proposed model; and simulation of equipment downtime using the proposed model. In the study of the main models a research was made about the evolution of maintenance techniques, through models of corrective maintenance, preventive maintenance and, finally, reaching the maintenance model based on condition monitoring. For the last two types of maintenance, it is presented the main models used in addressing the problem, its benefits and shortcomings. The development of the model was segmented into three main stages: processing of databases, from the data obtained directly from the equipment to the base of record of equipment failure; variable selection, based on the calculation of the influence of each equipment sensor to determine its failure state, as well as the definition of the ideal range of group data, and definition of the topology of networks. In the stage of assessing the performance of the proposed model we used data from corrective failures more often of two specific components of off-highway trucks: engine and transmission. To compare the performance between the different models evaluated, two factors were more important: classification performance and the longest interval between the identification of a pre-failure pattern and the occurrence of the failure. The results of classification of pre-failure patterns were quite satisfactory for most case studies, with hit rates ranging between 85% and 96%. From the classification model given in the previous step, we moved on to simulate different failure scenarios, calculating the equipment downtime that would have been avoided if the interventions defined by the model had been implemented, thus analyzing the increased availability provided by the use of the proposed model.

Keywords

Off-highway truck, predictive maintenance, pattern recognition, neural networks.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	11
1.1. Objetivo da Dissertação.....	13
1.2. Descrição do Trabalho.....	14
1.3. Organização da Dissertação.....	15
2. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	17
2.1. Evolução da Manutenção.....	17
2.2. Equipamentos Fora de Estrada.....	20
2.2.1. VIMS: Vital Information Management System.....	20
2.3. Processo de Manutenção em Equipamento de Mineração.....	22
2.4. Estado da Arte.....	23
2.4.1. Aplicação de Rede Neural no Diagnóstico de Falhas.....	24
2.4.2. Manutenção Preventiva.....	24
2.4.3. Manutenção Baseada no Monitoramento de Condições.....	28
2.4.4. Modelos de Manutenção Baseada no Monitoramento de Condição.....	29
3. METODOLOGIA DE PREVISÃO DE PADRÕES DE FALHA.....	35
3.1. Descrição e Tratamento da Base de Dados.....	36
3.1.1. Dados dos Equipamentos.....	36
3.1.2. Dados das Ordens de Serviço.....	37
3.2. Tratamento da Base de Dados.....	37
3.2.1. Agregação dos Indicadores de Evento.....	39
3.2.2. Agregação dos Indicadores de Tendência.....	39
3.3. Seleção de Variáveis pelo Teste T-Student.....	40
3.4. Determinação da Topologia da Rede.....	42
3.4.2. Treinamento da Rede.....	43
3.4.5. Determinação dos Parâmetros $Jt E \Delta$	45
3.5. Critério de Decisão.....	45
4. ESTUDO DE CASOS.....	47
4.1. Superaquecimento do Motor.....	49
4.1.1. Topologia da Rede.....	49
4.1.2. Rede com o Melhor Desempenho.....	50
4.1.3. Matriz Confusão.....	52
4.1.4. Resultados Sumarizados.....	52
5. SIMULAÇÃO DE REDUÇÃO DE DOWNTIME CORRETIVO.....	54
5.1. Primeiro Período.....	56
5.2. Segundo Período.....	58
5.3. Terceiro Período.....	59
5.4. Avaliação dos Benefícios.....	61

6. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	63
6.1 Conclusões.....	63
6.2 Trabalhos Futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APÊNDICE	71

Lista de figuras

Figura 2.1 – [58] Evolução das expectativas com relação à manutenção industrial - Gerações Corretivas, Preventivas e Preditiva, respectivamente	18
Figura 2.2 – [58] Evolução das ações e técnicas de manutenção no século XX - Gerações Corretivas, Preventivas e Preditiva, respectivamente	19
Figura 2.3 – Processo de detecção de falha por meio de redes neurais	24
Figura 2.4 – Conflito entre os critérios - região assinalada representa as melhores candidatas possíveis utilizando os dois critérios.	27
Figura 3.1 – Processo de extração de informação do histórico.	35
Figura 3.2 – Tratamento das bases de dados	38
Figura 3.3 – Parâmetros Jt e Δ	38
Figura 3.4 – Processamento paralelo para avaliação do critério de decisão	44
Figura 4.1 – Mapa de desempenho da classificação de Super aquecimento do motor	51

Lista de tabelas

Tabela 4.1 – Resumo de indicadores por tipo	47
Tabela 4.2 – Sumário de dados utilizados	48
Tabela 4.3 – Número aproximado de variáveis de entrada	50
Tabela 4.4 – Variáveis utilizadas pela rede de melhor desempenho	50
Tabela 4.5 – Erro médio de classificação	51
Tabela 4.6 – Resultados Sumarizados	53
Tabela 5.1 – Valores de tempo esperado de máquina parada	56
Tabela 5.2 – Valores de reais de máquina parada	57
Tabela 5.3 – Valores esperado de máquina parada	58
Tabela 5.4 – Valores reais de máquina parada	59
Tabela 5.5 – Valores esperado de máquina parada	60
Tabela 5.6 – Valores reais de máquina parada	61
Tabela 5.7 – Redução de Downtime	61