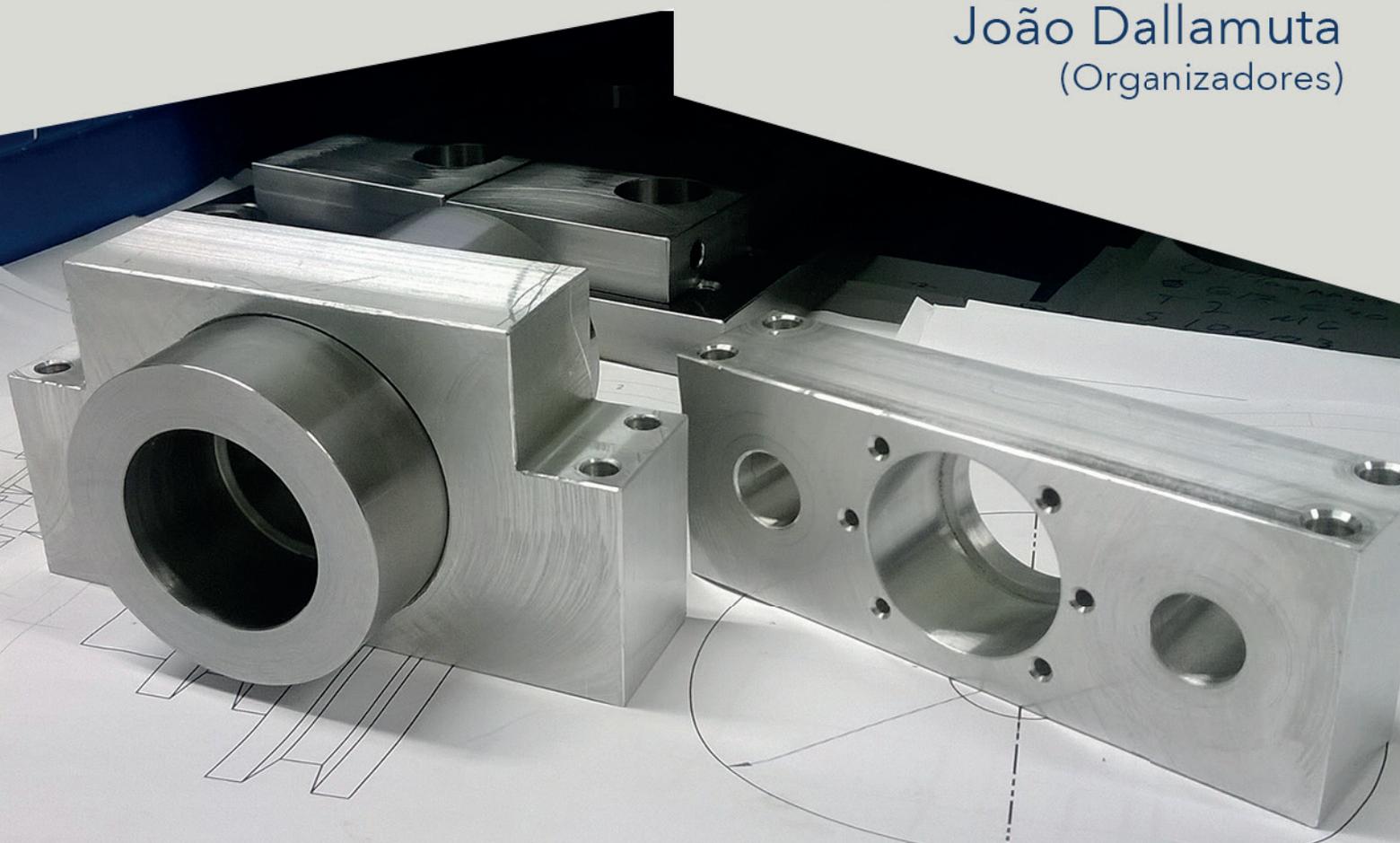


# Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta  
(Organizadores)



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
SURFACE FINISH:  
TOLERANCES:  
LINEAR:  
ANGULAR:  
FIT:  
TOLERANCE:  
SURFACE FINISH:  
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS  
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:

**Atena**  
Editora

Ano 2018

**Franciele Bonatto**  
**Henrique Ajuz Holzmann**  
**João Dallamuta**  
(Organizadores)

# **Engenharias Mecânica e Industrial: Gestão e Simulação**

Atena Editora  
2018

2018 by Atena Editora

Copyright © da Atena Editora

Editora Chefe: Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Diagramação e Edição de Arte: Geraldo Alves e Natália Sandrini

Revisão: Os autores

### Conselho Editorial

- Prof. Dr. Alan Mario Zuffo – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Álvaro Augusto de Borba Barreto – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Antonio Carlos Frasson – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Antonio Isidro-Filho – Universidade de Brasília  
Profª Drª Cristina Gaio – Universidade de Lisboa  
Prof. Dr. Constantino Ribeiro de Oliveira Junior – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Daiane Garabeli Trojan – Universidade Norte do Paraná  
Prof. Dr. Darllan Collins da Cunha e Silva – Universidade Estadual Paulista  
Profª Drª Deusilene Souza Vieira Dall’Acqua – Universidade Federal de Rondônia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Prof. Dr. Fábio Steiner – Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul  
Prof. Dr. Gianfábio Pimentel Franco – Universidade Federal de Santa Maria  
Prof. Dr. Gilmei Fleck – Universidade Estadual do Oeste do Paraná  
Profª Drª Girlene Santos de Souza – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia  
Profª Drª Ivone Goulart Lopes – Istituto Internazionele delle Figlie de Maria Ausiliatrice  
Profª Drª Juliane Sant’Ana Bento – Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Prof. Dr. Julio Candido de Meirelles Junior – Universidade Federal Fluminense  
Prof. Dr. Jorge González Aguilera – Universidade Federal de Mato Grosso do Sul  
Profª Drª Lina Maria Gonçalves – Universidade Federal do Tocantins  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Paola Andressa Scortegagna – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Profª Drª Raissa Rachel Salustriano da Silva Matos – Universidade Federal do Maranhão  
Prof. Dr. Ronilson Freitas de Souza – Universidade do Estado do Pará  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista  
Prof. Dr. Urandi João Rodrigues Junior – Universidade Federal do Oeste do Pará  
Prof. Dr. Valdemar Antonio Paffaro Junior – Universidade Federal de Alfenas  
Profª Drª Vanessa Bordin Viera – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Vanessa Lima Gonçalves – Universidade Estadual de Ponta Grossa  
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme – Universidade Federal do Tocantins

<b>Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (eDOC BRASIL, Belo Horizonte/MG)</b>	
E57	Engenharias mecânica e industrial [recurso eletrônico] : gestão e simulação / Organizadores Franciele Bonatto, Henrique Ajuz Holzmann, João Dallamuta. – Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2018.  Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web ISBN 978-85-85107-77-2 DOI 10.22533/at.ed.772180506  1. Automação industrial. 2. Engenharia mecânica. 3. Produtividade industrial. I. Bonatto, Franciele. II. Holzmann, Henrique Ajuz. III. Dallamuta, João.  CDD 670.427
<b>Elaborado por Maurício Amormino Júnior – CRB6/2422</b>	

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores.

2018

Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)

## APRESENTAÇÃO

A engenharia mecânica provavelmente seja a mais versátil de todas as engenharias. Sua gama de atuação envolve praticamente todas as atividades industriais e inúmeros temas transversais como materiais, métodos, gestão e qualidade. Temas estes que se subdividem em vários outros, o que torna a organização de um livro de engenharia mecânica é uma tarefa desafiadora, porém gratificante. Nesta obra é possível verificar a diversidade de temas envolvendo a engenharia mecânica e industrial com metodologias de simulação e gestão.

A simulação é na sua essência uma ferramenta experimental e refere-se a um modelo de realidade que nos permite avaliar e prever a dinâmica de desdobramento dentro de condições pré definidas.

É uma das bases da atividade de engenharia, sem a qual viabilidades econômicas e sobretudo de segurança em projetos de componentes e sistemas não seriam obtidas. Processos de simulação buscam melhores índices de segurança e retorno para o projeto.

Neste livro são apresentados vários trabalhos, alguns com resultados práticos, sobre simulações em vários campos da engenharia industrial, nas áreas de escoamentos, elementos de máquinas e aproveitamento energético.

Igualmente importante para a segurança, mas sobretudo para o retorno econômico de projetos, são as técnicas de gestão adequadas. São apresentados trabalhos de análise de qualidade de vida, acidentes de trabalho e melhoria contínua do ambiente industrial. Estas abordagens trazem o elemento humano para a discussão e ratificam a importância do profissional de engenharia para a sociedade como um todo.

Boa leitura

Franciele Bonatto  
Henrique Ajuz Holzmann  
João Dallamuta

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>1</b>
ANÁLISE DA CARÇAÇA INTERTRAVADA DE UM TUBO FLEXÍVEL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	
<i>Virgínia Siqueira Gonçalves</i>	
<i>Elias Rocha Gonçalves Júnior</i>	
<i>Álvaro de Azeredo Araújo de Carvalho</i>	
<i>Juliana Araujo Brasil</i>	
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>15</b>
ESCOAMENTO GÁS-LÍQUIDO NO PADRÃO ANULAR: UMA ANÁLISE DE CORRELAÇÕES PARA O FATOR DE ATRITO INTERFACIAL	
<i>Cidelei Ferreira de Paula Junior</i>	
<i>Luiz Eduardo Melo Lima</i>	
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>28</b>
MODELAGEM NUMÉRICA EM LÂMINA DE MOLA SEMIELÍPTICA	
<i>Marcella Monnique Mello da Silva</i>	
<i>Leonel Leonardo Delgado Morales</i>	
<i>Vinícius Rodrigues Moraes Silva</i>	
<i>Yanique Vidal Costa</i>	
<i>André Nepomuceno Trajano</i>	
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>37</b>
DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	
<i>Luís Henrique Ferreira de Oliveira</i>	
<i>Jorge Nei Brito</i>	
<i>Lucas Costa Brito</i>	
<i>Daniel Junio Soares Rodrigues</i>	
<i>Vinícius Augusto Diniz Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	<b>49</b>
AVALIAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE SOMMERFELD E OCVRK PARA MANCAIS HIDRODINÂMICOS RADIAIS	
<i>Gabriel Alves Costa</i>	
<i>Erickson Fabiano Moura Sousa Silva</i>	
<i>Sillas de Oliveira Cezar</i>	
<i>Victor Hugo Martins de Almeida</i>	
<i>Vaneide Gomes</i>	
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	<b>63</b>
ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À FADIGA DE UM TRANSPORTADOR DE LÂMINAS DE CLÍNQUER	
<i>Raphael Calazans Cardoso</i>	
<i>Frederico Castro Souza</i>	
<i>Abraão Santos Silva</i>	
<i>Gustavo Dória Lima</i>	
<i>Sandro Griza</i>	
<b>CAPÍTULO 7</b> .....	<b>74</b>
TRAÇADO DO DIAGRAMA DE INTERAÇÃO N, M DE PILARES EM CONCRETO ARMADO SOB FLEXÃO NORMAL COMPOSTA	
<i>Ana Carolina De Oliveira Ribeiro</i>	
<i>Caroline Martins Calisto</i>	
<i>Cristiane Caroline Campos Lopes</i>	
<i>Thamires Carvalho Neves</i>	

<b>CAPÍTULO 8</b> .....	<b>82</b>
ANÁLISE DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA NA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA	
<i>Ricardo Cardoso Guimarães</i>	
<i>Phelype Haron Oleinik</i>	
<i>Eduardo de Paula Kirinus</i>	
<i>Bruno Vasconcellos Lopes</i>	
<i>William Correa Marques</i>	
<b>CAPÍTULO 9</b> .....	<b>90</b>
APLICATIVO EM AMBIENTE MATLAB PARA METODOLOGIA EDUCACIONAL NO DIMENSIONAMENTO DE PROJETOS FOTOVOLTAICOS	
<i>Bruno de Alencar Carneiro</i>	
<i>Rubens Soeiro Gonçalves</i>	
<i>Rômulo Diêgo Marinho Siqueira</i>	
<i>Ricardo Medeiros Rodrigues</i>	
<i>Dalmir dos Santos Matos</i>	
<b>CAPÍTULO 10</b> .....	<b>106</b>
ANÁLISE E DISCUSSÕES SOBRE ACIDENTES DE TRABALHO NAS OPERAÇÕES COM TRATORES AGRÍCOLAS NA REGIÃO DO ALTO SERTÃO SERGIPANO	
<i>Antonio Cardoso Ferreira</i>	
<i>Fábio Santos de Oliveira</i>	
<i>Fabrcio Oliveira da Silva</i>	
<i>Jubirai José Galliza Júnior</i>	
<i>Vagner dos Anjos Costa</i>	
<i>Silvio Leonardo Valença</i>	
<i>Cochiran Pereira dos Santos</i>	
<b>CAPÍTULO 11</b> .....	<b>118</b>
AS DIFERENTES NUANCES NA QUALIDADE DE VIDA NO TRABALHO (QVT) NA CONSTRUÇÃO CIVIL: ESTUDO COMPARATIVO EM EQUIPES DE MANUTENÇÃO E PROJETOS	
<i>André Luis Martins de Souza</i>	
<i>Renata Alessandra Evangelista</i>	
<i>Alexandre Assis Bueno</i>	
<i>Lucas Oliveira Magalhães</i>	
<i>Pedro de Freitas Silva</i>	
<b>CAPÍTULO 12</b> .....	<b>132</b>
O USO DA KAIZEN NO SETOR DE MONTAGEM	
<i>Maikon Ricardo Peruchini</i>	
<b>SOBRE OS ORGANIZADORES</b> .....	<b>145</b>

## DETECÇÃO DE DEFEITOS EM ROLAMENTOS INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS E ANÁLISE DE VIBRAÇÃO

### **Luís Henrique Ferreira de Oliveira**

Universidade Federal de São João del Rei,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
São João del Rei - Minas Gerais

### **Jorge Nei Brito**

Universidade Federal de São João del Rei,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
São João del Rei - Minas Gerais

### **Lucas Costa Brito**

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade  
de Engenharia Mecânica  
Uberlândia - Minas Gerais

### **Daniel Junio Soares Rodrigues**

Universidade Federal de São João del Rei,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
São João del Rei - Minas Gerais

### **Vinícius Augusto Diniz Silva**

Universidade Federal de São João del Rei,  
Departamento de Engenharia Mecânica  
São João del Rei - Minas Gerais

**RESUMO:** As falhas de rolamentos são muito comuns em vários segmentos industriais. Monitoração do seu funcionamento por meio de técnicas de preditivas é essencial para evitar que falhas inesperadas ocorram. Por isso, é possível aumentar a disponibilidade de equipamentos dentro da planta industrial. Um dos parâmetros de monitoramento mais relevantes para classificar o trabalho de condição do

equipamento está em examinar como ele vibra. No entanto, os sinais de vibração de defeitos nos rolamentos são de natureza transitória, que não são bem analisadas por técnicas de análise convencionais. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo das técnicas de análise de envelope (tradicionalmente utilizado na indústria) e Redes Neurais Artificiais para a detecção de falhas em rolamentos demonstrando as vantagens e limitações. Defeitos foram inserido em rolamentos, montadas numa bancada didática, e os sinais foram coletados através do equipamento Microlog GX-75 SKF. As Redes Neurais foram treinadas e validadas no MatLab. Os resultados mostram o potencial e a viabilidade em que as Redes Neurais Artificiais possam ser inseridas no programa de manutenção preditiva.

**PALAVRAS-CHAVE:** Defeitos e Rolamentos, Manutenção Preditiva, Análise de Envelope, Redes Neurais Artificiais.

**ABSTRACT:** The bearing failures are very common in various industrial segments. Monitoring the functioning status through predictive techniques is essential to prevent unexpected failures occur. So it is possible to increase the availability of equipment within the industrial plant. One of the most relevant monitoring parameters to rate the working condition of equipment is examining how it

vibrates. However, the vibration signals from defects in rolling bearings are transient in nature, which are not well analyzed by conventional analysis techniques. The objective of this paper is to present a comparative study of the envelope analysis techniques (traditionally used in industry) and Artificial Neural Networks for the detection of bearing failures demonstrating that advantages and limitations. Defects was inserted into the bearings, mounted on a test bench, and the signals was collected through the Microlog GX-75 SKF. Neural networks was trained and validated on MatLab. The results show the potential and viability of Artificial Neural Networks, can be included in Predictive Maintenance programs.

**KEYWORDS:** Bearings Defects, Predictive Maintenance, Envelope Analysis, Artificial Neural Networks.

## 1 | INTRODUÇÃO

A busca crescente pela redução de custos visando a lucratividade gera como consequência um investimento em pesquisa maior na área de manutenção, pois segundo Mobley (2002), em geral, os custos de manutenção representam a maior parte das operações da empresa. Mobley (2008) também afirma que a maior parte dos problemas pode ser minimizada se eles forem detectados e reparados com antecedência.

Segundo Tao *et al.* (2007) o monitor das condições das máquinas rotativas, têm sido de grande importância na indústria moderna. Tao *et al.* (2007) também afirma que a maior causa de falhas ocorridas em máquinas rotativas, ocorrem devido aos rolamentos, estes que podem falhar devido a lubrificação excessiva ou a falta da mesma, desalinhamento do seu eixo, cargas excessivas, dentre outras. Isto justifica a necessidade do seu monitoramento através de técnicas preditivas para que não ocorra uma falha na máquina, muitas vezes causando um prejuízo maior do que o custo da própria máquina que apresentara a falha.

Segundo Kardec e Nascif (2009) a manutenção pode ser dividida em três gerações. A primeira, até a Segunda Guerra Mundial, tinha o foco na manutenção corretiva. Posteriormente, até a década de 70, tinha o foco na manutenção preventiva. A partir dessa década o foco da manutenção passou a ser manutenção preditiva considerada a primeira grande mudança de padrões na manutenção. Ela baseia-se na monitoração e diagnóstico de máquinas, ou componentes, através de acompanhamento de parâmetros diversos (vibração, temperatura, pressão, dentre outros).

Através da manutenção preditiva é possível predizer quando uma falha irá ocorrer, Brito (2012). Sua implantação tem um investimento inicial mais elevado, mas, em geral, de cada dólar investido têm-se cinco outros de retorno. A manutenção preditiva é uma técnica de manutenção onde nos mostra condições reais de funcionamento de máquinas e equipamentos com base em dados que informam a situação atual

de funcionamento e desgaste que esses se encontram, e claro, se há algum defeito ou mesmo a iminência de algum. Uma das técnicas mais efetivas da manutenção preditiva é a análise de vibrações que, de acordo com Menna (2007) e Santiago (2004), tem sido amplamente utilizada no diagnóstico de falhas e monitoração da condição de máquinas rotativas e é feita geralmente no domínio do tempo ou no domínio da frequência.

Na análise espectral no domínio da frequência, são analisadas as existências de picos de amplitudes nas frequências característica de cada tipo de defeito do rolamento (SEERA *et al.*, 2012; IMMOVILLI *et al.*, 2012).

Está cada vez mais usual o uso de técnicas de Inteligência Artificial na manutenção preditiva, neste trabalho optou-se por utilizar a técnica das Redes Neurais Artificiais (RNA). De acordo com Brito *et al.* (2005) as Redes Neurais Artificiais (RNAs) são modelos matemáticos e computacionais inspirados nos conhecimentos das neurociências.

As RNAs são compostas de elementos não lineares de processamento paralelo e são capazes de ‘aprender’ através de exemplos. Elas apresentam a capacidade de aprender, generalizar a informação obtida, organizar dados, definir padrões e podendo até tomar decisões. Dessa forma é possível espelhar várias funções cognitivas e motoras que o cérebro humano é capaz de fazer. Através dos sinais de vibração é possível montar um banco de dados para “treinar” e “ensinar” uma Rede Neural Artificial (RNA) a identificar um padrão de defeito.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia que possa contribuir para o estudo e detecção de falhas em rolamentos usando RNAs treinadas a partir de sinais de vibração obtidos experimentalmente. Para treinamento e qualificação das RNAs usou-se o Neural Network Toolbox, ferramenta do MATLAB. Os sinais de vibração foram coletados através do MICROLOG-GX, tecnologia SKF. Os resultados obtidos serão utilizados para auxiliar numa futura análise de defeitos nos rolamentos testados e poderão ser utilizados futuramente para uma análise em monitoramento online.

## 2 | FALHAS EM ROLAMENTOS

Os rolamentos, como qualquer outra peça rotativa, sofrem desgaste e deterioração com o uso, que podem evoluir para algum defeito. Entretanto, um rolamento pode apresentar defeitos prematuros por diversas razões, dentre estas as mais comuns são: Lubrificação inadequada, montagem incorreta, desalinhamento e carga excessiva. Mesmo não ocorrendo defeito devido a estas razões, todos rolamentos estão sujeitos aos defeitos por fadiga natural. Bezerra (2004).

O método mais utilizado na manutenção preditiva para a detecção de defeitos em rolamentos é o método da análise de vibração, pois além de identificar se o rolamento

está com defeito ou não, com este método se consegue emitir a localização do defeito no rolamento.

Para Mc Fadden e Smith (1984) cada vez que uma superfície com defeito em um rolamento, entra em contato com outra superfície deste mesmo rolamento, seja pista interna ou externa, é gerado um impulso muito rápido de vibração, o qual gera um pico de amplitude que excita ressonâncias no rolamento e no equipamento, o qual ele está instalado. Os rolamentos industriais são compostos por pista interna, pista externa, gaiola e elementos rolantes. Para cada um desses componentes existe uma frequência característica de defeito, ou seja, caso haja algum defeito no rolamento, o pico de amplitude ocorrerá em uma frequência que é determinada pela localização deste defeito.

Essas frequências (BPFO - Pista Externa; BPFI - Pista Interna; BSF - Elemento Rolante e FTF - Gaiola) estão representadas pelas Equações (1), (2), (3) e (4), respectivamente, onde, onde  $f_r$  é a frequência de rotação (Hz),  $d$  é o diâmetro da esfera ou do rolo (mm),  $D$  é o diâmetro primitivo do rolamento (mm),  $n$  é o número de esferas ou rolos e  $\theta$  é o ângulo de contato do rolamento.

$$BPFO = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (1)$$

$$BPFI = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (2)$$

$$BSF = \frac{d}{2D} f_r \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \cos^2\theta \right] \quad (3)$$

$$FTF = \frac{1}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cdot \cos\theta \right) \quad (4)$$

Caso o rolamento apresente algum defeito, irão aparecer, no espectro de vibrações, picos de amplitudes em algumas dessas frequências. Vai depender da localização do defeito. Figura 1 têm-se os elementos de um rolamento.

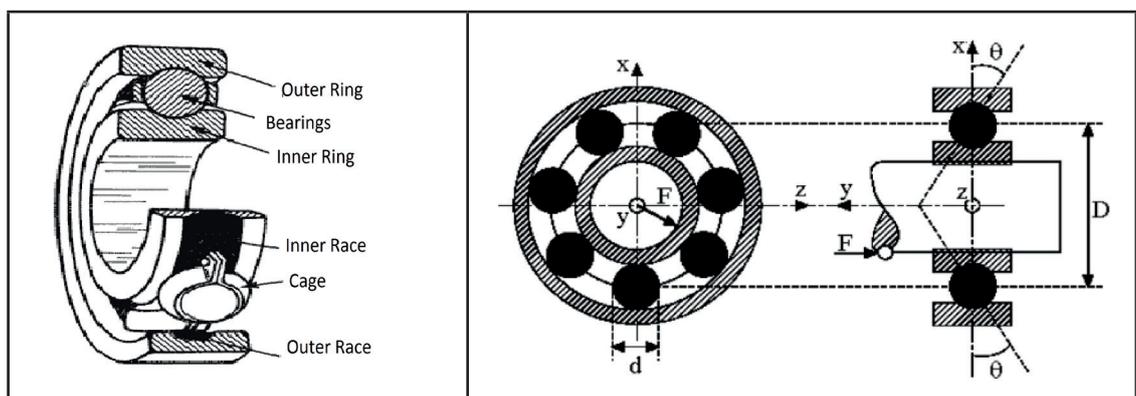


Figura 1. Elementos do Rolamento. Fonte: Mesquita *et al.* (2002).

### 3 | BANCADA EXPERIMENTAL

Os testes foram realizados na bancada experimental, Figura 2, disponível no Laboratório de Sistemas Dinâmicos (LASID) do Departamento de Engenharia Mecânica (Demec) da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ).

Foi utilizado um rolamento Timken W209PP sem defeito, um rolamento SKF 3209 sem defeito, um Timken W209PP com defeito e um rolamento SKF 3209 com defeito. O Motor da bancada é de Indução Trifásico [1], modelo C184T4-E1611, Fabricante Eberle, quatro polos, A rotação (RPM e Hz) 1745 - 29, Potência (HP e kW) 5 e 3,72. Mancal MDS SN 509 (LP-Lado da polia) [2]; mancal MDS SN 509 (LD - Lado do disco) [3]. Para a aplicação de carga utilizou-se o freio mecânico Twiflex da TecTor Modelo MR 12,7 [4] e foi usado um multímetro para controlar a carga aplicada através da corrente do motor elétrico.

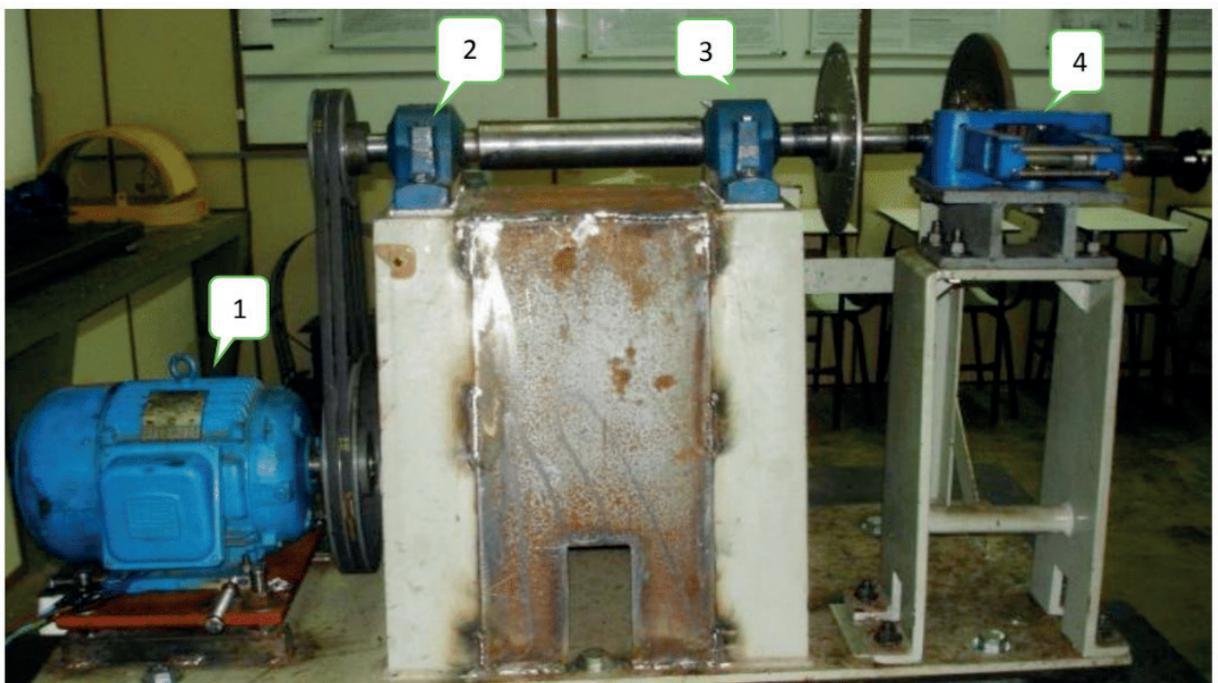


Figura 2. Bancada Experimental. Fonte: Autor.

Para aquisição de sinais de vibração foi utilizado o coletor/analizador de dados SKF Microlog GX -75. Os sinais coletados podem ser analisadas diretamente no equipamento ou transferidos para o computador através do *software SKF @mplitude Analyst*. Nessa opção tem-se um ambiente mais confortável, permitindo uma análise mais detalhada, emissão de relatórios, inclusão de alarmes e montagem do banco de dados. Através desse equipamento também é possível coletar espectros de envelope, comumente usado para análise de defeitos em rolamentos.

Para aquisição de vibração os sinais foram coletados com o acelerômetro SKF CMSS2200, com uma sensibilidade de 100 mV, colocadas alternadamente na posição vertical e horizontal nos mancais de rolamento.

## 4 | CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS PARA A REDE NEURAL

Segundo Haykin (2009) uma rede neural concretiza seu reconhecimento de padrões passando inicialmente por uma seção de treinamento, durante a qual se apresenta repetidamente à rede, um conjunto de exemplos de entrada, junto com a categoria a qual cada exemplo particular pertence. As Redes Neurais Artificiais são uma ferramenta computacional baseada nos neurônios cerebrais dos seres vivos. Redes neurais artificiais são utilizadas em diversas áreas de conhecimento, como o controle de processos, análise e processamento de sinais, classificação de dados, reconhecimento de padrões, análise de imagens, diagnóstico científico etc. Na área industrial utiliza-se de maneira eficaz as Redes Neurais, por se tratar de uma ferramenta que consegue resolver problemas de difícil quantificação matemática, ineficazes podendo até solucionar problemas impossíveis.

A primeira etapa para o desenvolvimento da RNA é a criação de um banco de dados de vibração coletados dos mancais com os rolamentos sem defeitos e os rolamentos com defeito. Um vasto banco de dados com muitas coletas, gera muitos exemplos de entrada para a RNA, fazendo com que esta tenha uma grande eficiência e qualidade.

Segundo Ponci e Cunha (2005) os defeitos em rolamentos geram vibrações de alta frequência e com menor intensidade do que as geradas por componentes de baixa frequência, como desalinhamento, desbalanceamento, folgas e etc. Portanto, analisar as vibrações de alta frequência geradas pelos defeitos de rolamentos, excluindo os sinais vibrações de baixa frequência, garantem o sucesso e precisão na detecção de defeitos em rolamentos.

Samanta e Al-Balushi (2003) trabalharam com máquinas rotativas e utilizaram dados de vibração do domínio do tempo como entrada de uma RNA do tipo MLP para detecção de defeitos em rolamentos destas máquinas. Cinco características foram extraídas e usadas como sinais de entrada, raiz quadrada média (rms), variação, assimetria (terceiro momento central normalizado), curtose (momento central normalizado do quarto) e sexto momento central normalizado. As RNAs tiveram ótimos resultados, algumas delas com 100% de sucesso. Os autores também notaram a importância de remover as baixas frequências (causando por componentes de interferências). Portanto, eles usaram um filtro passa-alta e passagem de banda, análise de envelope e transformação de wavelets nessas cinco características e fizeram os testes nas RNAs. O filtro passa-alta, o filtro passa-banda e o envelope causaram uma leve melhora nos resultados das RNAs. A transformação wavelet não apresentou melhora significativa nos resultados. Provando que esses cinco recursos também podem ser uma boa metodologia para diagnosticar falhas nos rolamentos.

Neste trabalho utilizou-se a técnica de envelope na coleta de dados de vibração dos mancais de rolamentos, pois as frequências características dos defeitos de rolamentos são difíceis de serem detectadas em uma simples análise espectral. O envelope faz

com que seja detectado no espectro frequência x amplitude, as frequências de defeito dos rolamentos com maior facilidade e precisão. O envelope do sinal fornecerá os dados necessários para serem usados como variáveis de entrada para a Rede Neural Artificial.

Na Tabela 1 tem-se as frequências determinísticas de defeito de cada rolamento analisado. Nas Figuras 3 a 7 tem-se os respectivos espectros de vibrações.

<b>Rolamento SKF 3209ATN9</b>	<b>Frequências</b>
BPFO (Pista Externa)	$4,18 f_r$
BPFI (Pista Interna)	$5,82 f_r$
BSF (Elemento Rolante)	$2,51 f_r$
FTF (Gaiola)	$0,42 f_r$
<b>Rolamento Tinkem W209PP</b>	<b>Frequências</b>
BPFO (Pista Externa)	$3,62 f_r$
BPFI (Pista Interna)	$5,38 f_r$
BSF (Elemento Rolante)	$2,46 f_r$
FTF (Gaiola)	$0,40 f_r$

Tabela 1. Frequências determinísticas de defeito.

Fonte: Autor

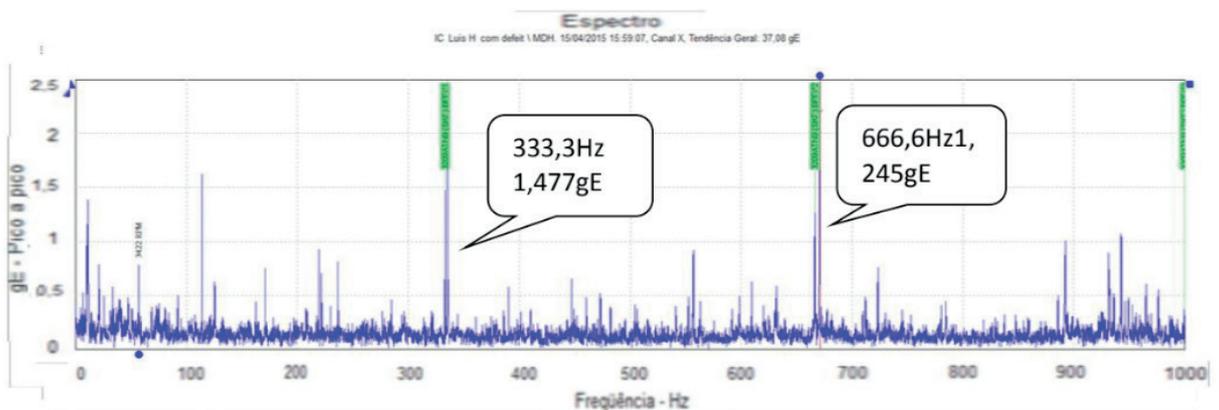


Figura 3. Espectro do Rolamento SKF 3209 com defeito na pista interna. Fonte: Autor.

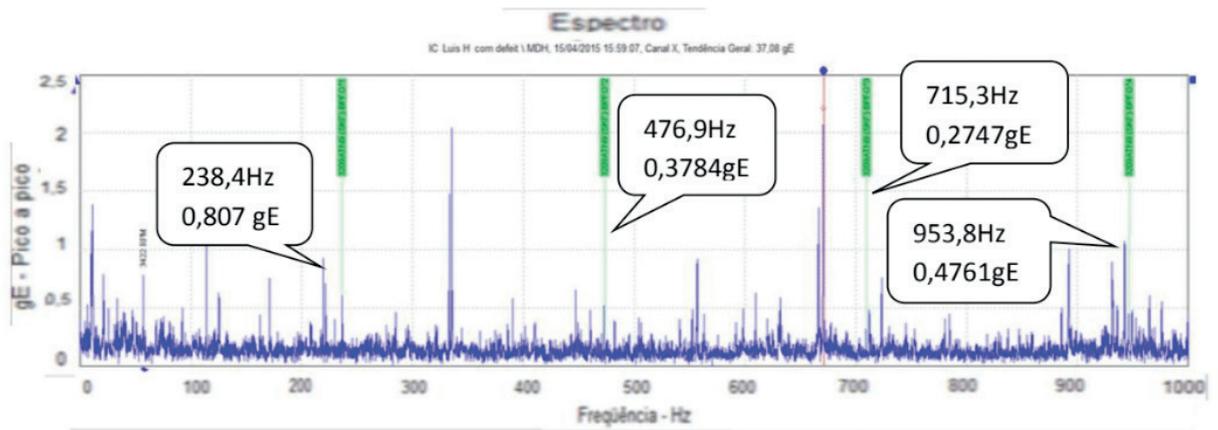


Figura 4. Espectro do Rolamento SKF 3209 com defeito na pista externa. Fonte: Autor

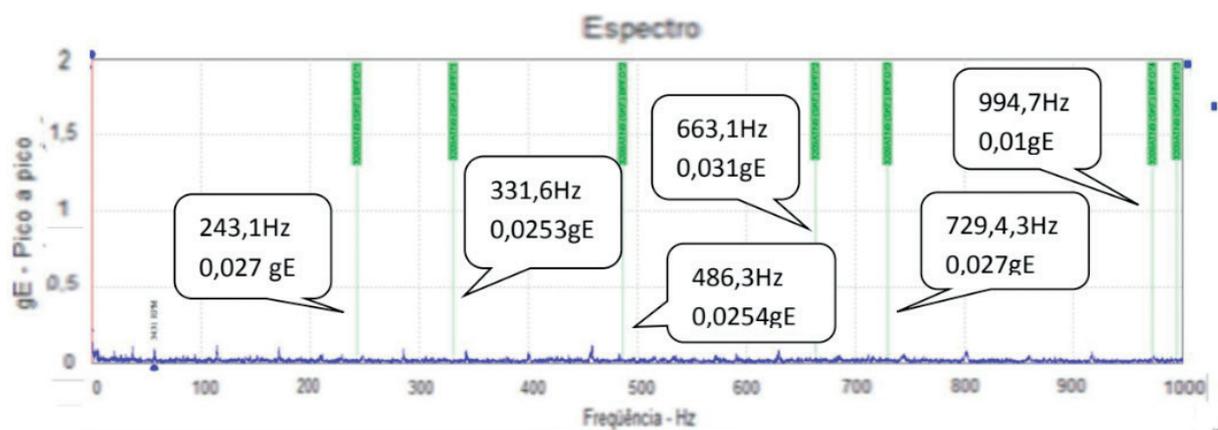


Figura 5. Espectro do Rolamento SFK 3209 sem defeito. Fonte: Autor

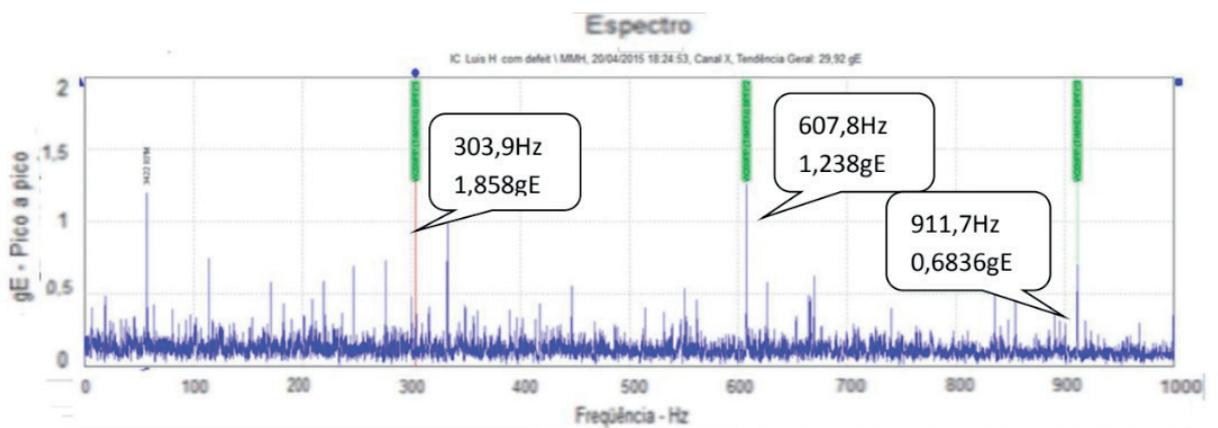


Figura 6. Espectro do Rolamento Timken W209PP com defeito. Fonte: Autor.

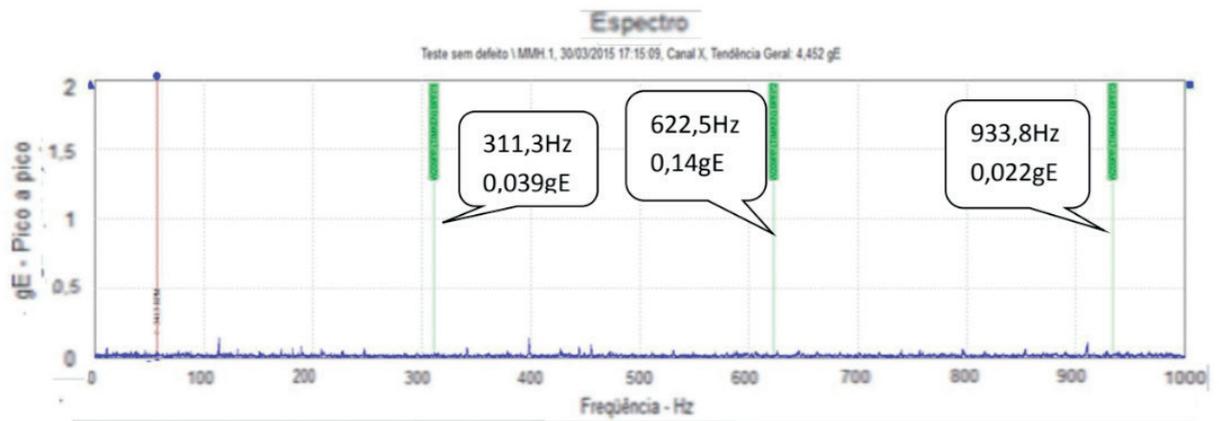


Figura 7. Espectro Rolamento Timken W209PP sem defeito. Fonte: Autor.

## 5 | DESENVOLVIMENTO DAS REDES NEURAS E SEUS RESULTADOS

Foram feitas 40 coletas na posição vertical e na horizontal em cada rolamento, gerando um total de 320 espectros (160 sem defeito e 160 com defeito). Cada coleta foi feita em um intervalo de 2 horas. A coleta de dados foi feita como Microlog-GX, tecnologia SKF, e Software SKF @mplitude Analyst, nos forneceu o espectro de envelope do sinal. Coletamos as amplitudes das frequências características de defeito, as quais serviram de dados de entrada para a rede neural.

Analisando os resultados da análise de envelope, optou-se por montar a rede neural apenas com os valores das coletas na Horizontal, devido esta posição ter gerado um espectro mais “limpo” e “claro” na detecção de picos de amplitudes específicos de defeitos em rolamentos

As Redes Neurais foram montadas no software Matlab, que contém o Neural Network Toolbox, uma ferramenta prática, simples e eficiente no desenvolvimento de Redes Neurais Artificiais.

Os rolamentos analisados foram dois Timken W209PP um sem defeito e o outro com defeito na pista interna. Dois da SKF 3209 um sem defeito e o outro com defeito na pista interna e externa. Os valores de entrada para as redes neurais foram as amplitudes das frequências de defeitos dos rolamentos e suas harmônicas.

A rede neural para os rolamentos Tinkem W209PP foram criadas da seguinte maneira, extraímos as amplitudes de 3 harmônicos de defeito na pista interna, tanto no rolamento com defeito como para o rolamento sem defeito. Foi “apresentada” para a rede neural na entrada as amplitudes do rolamento sem defeito e as amplitudes para o rolamento com defeito. Para as amplitudes sem falha foi definido como saída o número “0” e para as amplitudes de defeito foi definido como saída o número “1”.

Para os rolamentos SKF3209 ATN a metodologia foi a mesma utilizada nos rolamentos Tinkem W209PP a diferença foi no número de entradas. Foram apenas 2 entradas para a rede com defeito na pista interna, pois o espectro nos forneceu

apenas 2 harmônicos de defeito. E 4 entradas para a Rede Neural com defeito na pista externa, pois o espectro nos forneceu 4 harmônicos de defeito.

As redes utilizadas foram do tipo Feed-Foward, algoritmo de treinamento utilizados foram o algoritmo 'Backpropagation' e o algoritmo de otimização 'Levenberg-Marquardt', as funções de transferência foram as de Tangente Hiperbólica. A velocidade de ativação foi 0,01, número máximo de épocas foi 1000 e o erro desejado 0,1%, a taxa de aprendizagem de 0,01 e a inicialização dos pesos foi aleatória. Fora usado 60% dos espectros para treinamento, 20% para validação e 20% para teste. Para os valores das amplitudes da condição sem defeito fora denominada a saída '0' e para os valores das amplitudes da condição com defeito for a denominada a saída '1'. Foram testadas as redes com arquitetura mostradas na Tabela 2.

SKF 3209		Tinkem W209PP
Defeito na Pista Interna	Defeito na Pista Externa	Defeito na Pista Interna
2x2x1	3x3x1	3x3x1
2x4x1	3x6x1	3x6x1
2x2x2x1	3x3x3x1	3x3x3x1

Tabela 2. Arquiteturas das Redes Neurais. Fonte: Autor

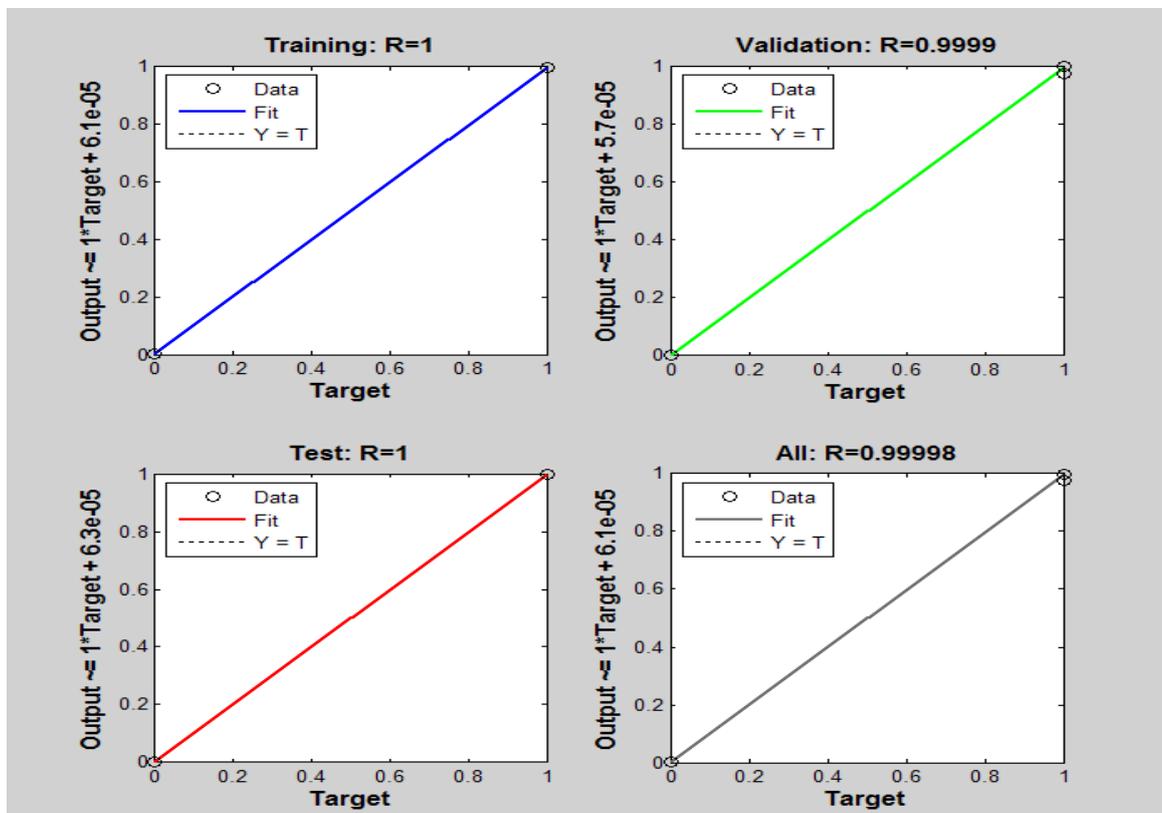


Figura 8. Resultado de teste, treinamento e validação da Rede Neural. Fonte: Autor

O resultado, como esperado, foi muito satisfatório, todas as redes testadas obtiveram 100% de acerto. Resultado já esperado, por ser uma rede de classificação de padrões entre as amplitudes das frequências de um rolamento sem defeito e as amplitudes das frequências determinísticas de rolamentos com defeitos.

## 6 | COCLUSÃO

A Análise de Vibração pode ser considerada o método de análise mais efetiva da manutenção preditiva. Com esta detecta-se a iminência de defeitos antes que estes se tornem uma falha. Identifica-se esta eficiência da análise de vibração e além da detecção de defeito, a análise de vibração foi muito efetiva no fornecimento do banco de dados que serviu para a criação da Rede Neural.

As Redes Neurais têm despertado interesse nos últimos anos em pesquisadores de diversas áreas, devido sua vasta capacidade funções, sendo uma destas o reconhecimento de padrões usados na manutenção preditiva. Além de ser uma ferramenta utilizada para o monitoramento online, visando a minimização do tempo, praticidade e otimização das informações obtidas para o diagnóstico do problema.

Para definir os parâmetros para a Rede Neural necessita-se primeiro do conhecimento prévio da metodologia utilizada pelo projetista, no nosso caso a metodologia utilizada foi colocar como dados de entrada as amplitudes das frequências de defeito dos rolamentos. O projetista necessita também de conhecimento sobre as topologias de rede, é importante que saiba os algoritmos de treinamento e otimização de melhor escolha, para determinado objetivo, é importante saber as funções de ativação que devem ser utilizadas e ter um conhecimento para definir a arquitetura da Rede Neural. Mesmo tendo grande conhecimento sobre tais assuntos, não existe uma 'fórmula certa', cada caso tem-se uma resposta diferente, cada Rede Neural responde de uma diferente maneira para cada tipo de diagnóstico.

As Redes Neurais se convergiram facilmente obtendo uma taxa de acerto de 100%, isto é, devido ao fato do diagnóstico solucionado ser um diagnóstico simples. Mas essas Redes Neurais são uma ferramenta que facilitam no uso na indústria onde se coletam dados de vibração de milhares de rolamentos, além destas Redes Neurais podem ser usadas no monitoramento online, otimizando e minimizando o tempo de coleta, proporcionando assim um melhor diagnóstico e maior lucro para a indústria.

## REFERÊNCIAS

BEZERRA, R. A., PEDERIVA, R. **Detecção de Falhas em Rolamentos por Análise de Vibração**. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil. Dissertação (Doutorado),2004.

- BRITO, J. N., PORTES, D. F., TAVARES, F., PINTO, G. R. **Detecção de imperfeições em Máquinas Rotativas através de Redes Neurais Artificiais**. Artigo científico, COBEM, 2005.
- BRITO, L. C., LACERDA, A. L. M., REIS, R. A., LAMIM FILHO, P. C. M., BRITO, J. N. **Estudo comparativo de diferentes técnicas de Análise de Sinais de Vibração aplicadas na detecção de falhas em Rolamentos**. Artigo científico, CONEM, 2012.
- HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Education, 906 p., 2009.
- IMMOVILLI, F.; BIANCHINI, C.; COCCONCELLI, M.; BELLINI, A.; RUBINI, R. **Bearing fault model for induction motor with externally induced vibration**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, PP, n. 99, p. 1, 2012.
- KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. Qualitymark Ed., Rio de Janeiro, 384 p, ISBN 85-7303-898-5, Terceira Edição, 2009.
- MCFADDEN, P. D.; SMITH, J. D. **Vibration monitoring of rolling element bearings by the high-frequency resonance technique — a review**. Tribology International, v. 17, n. 1, p. 3– 10, fev. 1984.
- MENNA, A.R. **Detecção de falhas em mancais de rolamento por análise de vibrações em banda larga: um caso prático de aplicação em uma população de elementos rotativos**. Dissertação(Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2007.
- MOBLEY, R. K.,. **An Introduction to Predictive Maintenance**. 2. ed. Elsevier Science 438 p.,2002.
- MOBLEY, R. K.; HIGGINS, L. R.; WIKOFF, D. J. **Maintenance Engineering Handbook**. 7. ed. United States: McGraw-Hill, 1243 p., 2008.
- PONCII L., CUNHA P. **Previsão de Falha de Rolamentos por Análise Espectral de Envelope**. Teknikao, 2005.
- SAMANTA, B.; AL-BALUSHI, K. R. **Artificial Neural Network Based Fault Diagnostics of Rolling Element Bearings Using Time-Domain Features, Mechanical Systems and Signal Processing**. v. 17, n. 2, p. 317-328., 2003.
- SANTIAGO, D. F. A. **Diagnóstico de Falha em Máquinas Rotativas Utilizando Transformada de Wavelet Redes Neurais Artificiais**. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica), 2004.
- SEERA, M.; LIM, C. P.; ISHAK, D.; SINGH, H. **Fault detection and diagnosis of induction motors using motor current signature analysis and a hybrid FMM-CART model**. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, v. 23, n. 1, p. 97-108, jan. 2012.
- TAO, B.; ZHU, L.; DING, H.; XIONG, Y. **An alternative time-domain index for condition monitoring of rolling element bearings - a comparison study**. Reliability Engineering & System Safety, v. 92, n. 5, p. 660–670, 2007.

## **SOBRE OS ORGANIZADORES**

**Franciele Bonatto** Professora assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação e mestrado em engenharia de produção pela UTFPR e doutorado em andamento em Engenharia de Produção pela mesma universidade. Trabalha com os temas: gestão da qualidade, planejamento e controle da produção e cadeia de suprimentos.

**Henrique Ajuz Holzmann** Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná Doutorando em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

**João Dallamuta** Professor assistente da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Engenheiro de Telecomunicações pela UFPR. Especialista em Inteligência de Mercado pela FAE Business School. Mestre em Engenharia pela UEL. Trabalha com os temas: Inteligência de Mercado, Sistemas Eletrônicos e Gestão Institucional.

Agência Brasileira do ISBN  
ISBN 978-85-85107-77-2

