

REDES NEURAIS ARTIFICIAIS APLICADAS NO CALCULO DAS FORÇAS PROVENIENTES DO CONTATO RODA-TRILHO

Luiz Henrique Alves Duzzi (luiz.duzzi@arthengenharia.com.br), Douglas Hideki Nakamura, Sergio Inacio Ferreira, Paulo Roberto Barbos

Resumo: A construção de locomotivas em meados do século XVIII melhorou de forma significativa o transporte de cargas e pessoas pelo mundo a fora, junto a isso surgiram problemas como o descarrilamento, fenômeno esse que há muito tempo é estudado com o intuito de erradicá-lo. Inúmeras soluções foram encontradas para identificar um coeficiente que auxilia no entendimento do fenômeno intitulado L/V (forças lateral/vertical). De forma geral, as soluções clássicas não são tão eficientes, pois nem sempre uma solução encontrada para um determinado perfil de roda serve para os demais existentes no mercado. A proposta aqui apresentada é o desenvolvimento de um modelo, baseado numa rede neural artificial, que poderá ser aplicado em qualquer perfil de roda. O modelo contempla, ainda, as características de deformação que são exclusivas de cada formato existente. Como dados de entrada do modelo foram consideradas variáveis de deformação e posição angular da roda, exibindo como resultado forças vertical e lateral. Os resultados mostraram a viabilidade da utilização do modelo neural, com erro máximo de 2,1% com relação aos valores experimentais.

Palavras-chave: Descarrilamento, Contato Roda-Trilho, Coeficiente L/V, Rede Neural Artificial, Força Lateral, Força Vertical.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS APPLIED IN THE CALCULATION OF THE FORCES ARRANGING FROM THE WHEEL-RAIL CONTACT

Abstract: The construction of locomotives in the middle of the eighteenth century has significantly improved the transportation of load and people around the world, in the same time, problems such as derailment have arisen. Derailment is a phenomenon that has long been studied with the aim of eradicating it. Numerous solutions have been studied to identify a coefficient that helps to understand the phenomenon called L/V (lateral/vertical forces). The classic solutions are not as efficient, because not always a solution found for a certain profile of wheel can be applied for the other profiles. The proposal presented here is the development of a model, based on an artificial neural network that can be applied to any wheel profiles, the model, also includes the deformation characteristics that are unique to each existing wheel's format. It was considered deformation variable and angular position of the wheels as input data of the model, resulting in vertical and lateral forces. The results showed the feasibility of using the neural model, with a maximum error of 2.1% in relation to the experimental values.

Keywords: Derailment, Wheel-Rail Contact, L/V Coefficient, Artificial Neural Network, Lateral Force, Vertical Force.

1. INTRODUÇÃO

As primeiras rodas ferroviárias de que se tem notícias, não tinha borda e rodavam em eixos independentes (IWNICKI, 2003). A primeira locomotiva registrada, criada por Richard Trevithick, carregava o minério de ferro em Pen-y-Darren, País de Gales, em 1804 (Almeida, 2006). Desde essa época existem estudos no setor ferroviário, uma das linhas de pesquisa é o entendimento do contato roda-trilho, bem como as forças de interação de tal fenômeno. O principal intuito dessas pesquisas é identificar imperfeições nos trilhos, fenômeno natural que é causado como consequência do alto tráfego de trens nas linhas e também pela falta de manutenção nas vias, esse fenômeno implica em descarrilamentos que podem ocorrer independente da velocidade do trem. Existe uma segunda causa de descarrilamento, essa de certa forma mais fácil de ser evitada, ocorre quando o trem entra em um movimento “circular”, ao realizar uma curva, nesse caso surge uma força que tende a “sair” tangencialmente ao

movimento, essa é a chamada de força centrífuga. Esse fenômeno, diferentemente do primeiro citado, é dependente da velocidade da locomotiva e não será foco nos estudos aqui apresentados.

Para conseguir identificar as forças resultantes do contato roda-trilho, existem várias soluções matemáticas que possibilitam o desacoplamento das forças resultantes do fenômeno, este trabalho apresenta uma solução inovadora, utilizando a aplicação de redes neurais artificiais.

O ser humano é dotado de complexos circuitos neurais cerebrais que constam de variadas conexões entre seus neurônios (sinapses) interagindo entre si de modo a fazer emergir comportamento inteligente. Sendo assim, surge a ideia de que se for possível modelar computacionalmente estas conexões neurais, poderia ser feito emergir comportamentos também inteligentes em máquinas. Neste contexto, surgem as redes neurais artificiais (RNAs) que são inspiradas na própria natureza das redes de neurônios e sinapses biológicas. Esta ideia de modelagem cerebral forma a vertente da Inteligência Artificial chamada Inteligência Artificial Conexionista.

Outro ponto importante para sedimentar à utilização das redes neurais artificiais é que existem classes de problemas que a complexidade algorítmica é muito grande, de modo a se tornar inviável a resolução algorítmica convencional, posto isso, a utilização da rede neural artificial para solução do problema de separação das forças provenientes do contato rodatrilho torna-se uma alternativa promissora.

Entretanto, o ser humano tem mecanismos intrínsecos que resolvem problemas complexos como reconhecimento de fala e segmentação de imagens de maneira inata.

RNAs são dispositivos que permitem tolerância a ruídos e falhas, o que advém da capacidade de generalização das redes, sendo capazes de suportar ruídos e imperfeições no ambiente, ainda mantendo um resultado desejado.

Apesar do pouco conhecimento do cérebro humano, além da dificuldade de modelar mesmo o que já se sabe, as pesquisas em redes neurais artificiais tem se mostrado bastantes promissoras em diversas áreas, como engenharia, computação e até mesmo nas neurociências. Sendo também de grande utilidade para problemas como reconhecimento de padrões, agrupamento, previsão de séries temporais, etc.

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é apresentar uma solução inovadora no que diz respeito à interpretação dos dados provenientes do contato roda-trilho.

A principal expectativa aqui é criar um algoritmo padrão aplicando redes neurais artificiais que seja capaz de, independentemente dos muitos perfis de roda existentes, extrair informações que possibilitem calcular a tendência de descarrilamento dos trens estudados. Isso resultaria em uma economia grande de tempo com estudos minuciosos de mapeamento de deformação da roda estudada.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desse artigo, foram utilizados os métodos de simulação computacional com o intuito de geração de dados, visto que para utilização de um modelo físico montado o custo seria muito alto. Obviamente que o início do processo deu-se com um roteiro real, com algumas simulações básicas e validação do modelo mecânico.

2.1 VALIDAÇÃO DO MODELO MECÂNICO

Para iniciar os testes de simulação real e comparação com o modelo computacional criado, foi necessário entender o contato roda-trilho. Os primeiros estudos realizados sobre o contato mecânico foram publicados em 1882 pelo físico alemão Heinrich Hertz, no artigo “*On the Contact of elastic solids*”. Uma das questões levantadas por Hertz era se a deformação elástica de duas lentes cilíndricas, sob um carregamento constante e que as mantinha em contato, poderia influenciar seu modelo de interferência óptica. As figuras 1 e 2 mostram os contornos obtidos com as lentes e as diferenças de forma dos mesmos sob carga.

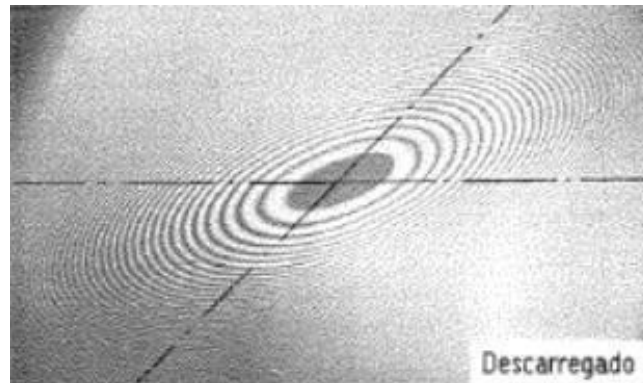


Figura 1 - Região de contato entre 2 lentes cilíndricas iguais sem carregamento (Johnson, 1985)

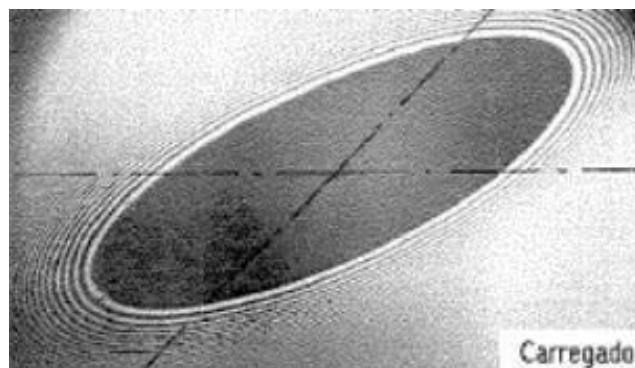


Figura 2 - Região de contato entre 2 lentes cilíndricas iguais com carregamento (Johnson, 1985)

Nota-se que a área de contato inicialmente circular, ao ser submetida a um carregamento passa a assumir o formato elíptico.

Porem a teoria de Hertz, embora contribuirá muito para a comunidade científica, é restrita a sólidos perfeitamente elásticos e superfícies sem escorregamento. Corpos em contato com curvaturas diferentes e eixos principais perpendiculares entre si possuem área de contato elíptica (Johnson, 1985). Pode-se assumir que o contato roda-trilho é um exemplo clássico de contato elíptico uma vez que os eixos principais da roda e trilho são perpendiculares entre si (Santos, 2000).

Posto isso, o desenvolvimento do ensaio no Laboratório de Equipamentos Mecânicos e Estruturas – LEME do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT foi realizado utilizando um cilindro como ponto de contato com o rodeiro conforme imagem abaixo:



Figura 3 - Contato entre roda e base em bancada de simulação

Para a geração das forças verticais e laterais, foram utilizados pistões hidráulicos aplicando força em regiões bem definidas com o intuito de simular o peso do vagão sobre o trilho, regiões essas que são os “extremos” do rodeiro definidos como:

- Tapeline: Posição central da roda, área de contato entre a roda e o trilho na qual a distância do ponto de contato até o limite interno ou externo da roda ao lado direito é exatamente igual à distância na roda do lado esquerdo, em outras palavras, é a posição nominal de contato da roda.
- Flange: Ponto de contato em que há existência de força lateral, onde o trilho fica em contato com a borda interna (flange) da roda que limita o curso do rodeiro no trilho. Quando uma roda está com seu ponto de contato na flange, a outra está no ponto oposto a flange.
- Oposto a Flange: ponto de contato mais próximo ao limite externo da roda, ou, mais distante da flange. Quando uma roda está no ponto de contato oposto a flange, a outra está na flange.

As figuras 4 e 5 mostram os pistões posicionados para aplicação de força lateral e vertical no ensaio de validação do modelo.



Figura 4 - Posicionamento do pistão para aplicação de força vertical



Figura 5 - Pistão para aplicação de força lateral

Com o intuito de controlar de forma precisa o valor da aplicação de força, foi colocado uma célula de carga acoplada aos pistões. Assim foi possível fechar a malha de controle de aplicação de força sobre a roda.

Para a aplicação de força lateral, foi possível posicionar o pistão apenas pelo lado interno da roda, sendo assim, todos os valores aqui encontrados tiveram de ser multiplicados por (-1) para exibição do resultado real baseado no ponto de contato.

De forma geral a aplicação de forças foi realizada baseando-se na interação rodatrilho, segundo

IWNICKY,2006 as forças verticais e laterais surgem a partir do contato que ocorre entre roda e trilho. Para que ocorra a sobreposição da flange e conseqüentemente o descarrilamento do veículo baseia-se no critério de Nadal (JRC, 2011) que estabelece a relação L/V, ou seja, a relação entre força lateral e força vertical.

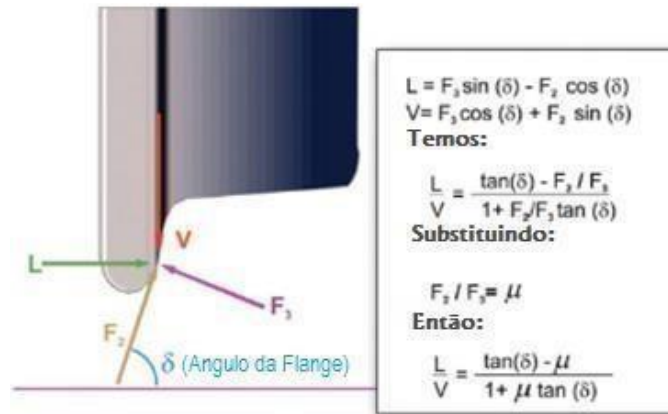


Figura 6 - Interação das Forças Vertical e Lateral baseado no critério de Nadal (JCR, 2011)

Para mapear os valores de deformação da roda foram utilizadas fitas de extensômetros elétrico de resistência (EER) com 5 unidades separadas a cada 3mm colados em alguns pontos estratégicos ao longo do lado externo da roda.

Os EERs foram utilizados com o intuito de coletar as deformações ao longo da extensão longitudinal das rodas. Seus dados foram salvos em um datalogger (sistema de aquisição e armazenamento de dados em mídia digital) que posteriormente foram levados ao software Matlab para análise e geração de curvas de tendência.

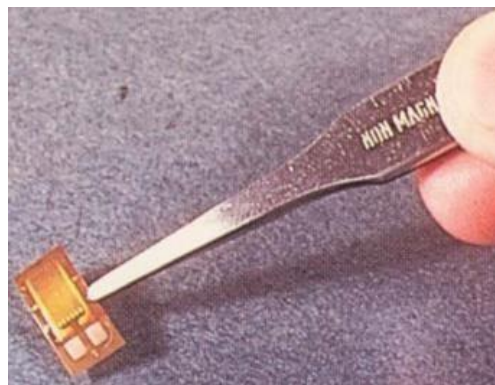


Figura 7 - EER elemento simples utilizado no ensaio (Weber, 2008)

Foram realizadas aplicações de 80kN para força vertical e 20kN para força lateral. As figuras 8, 9 e 10 mostram os gráficos gerados da deformação medida em cada um dos extensômetros relacionando deformação (μ strain/kN) com raio da roda (mm).

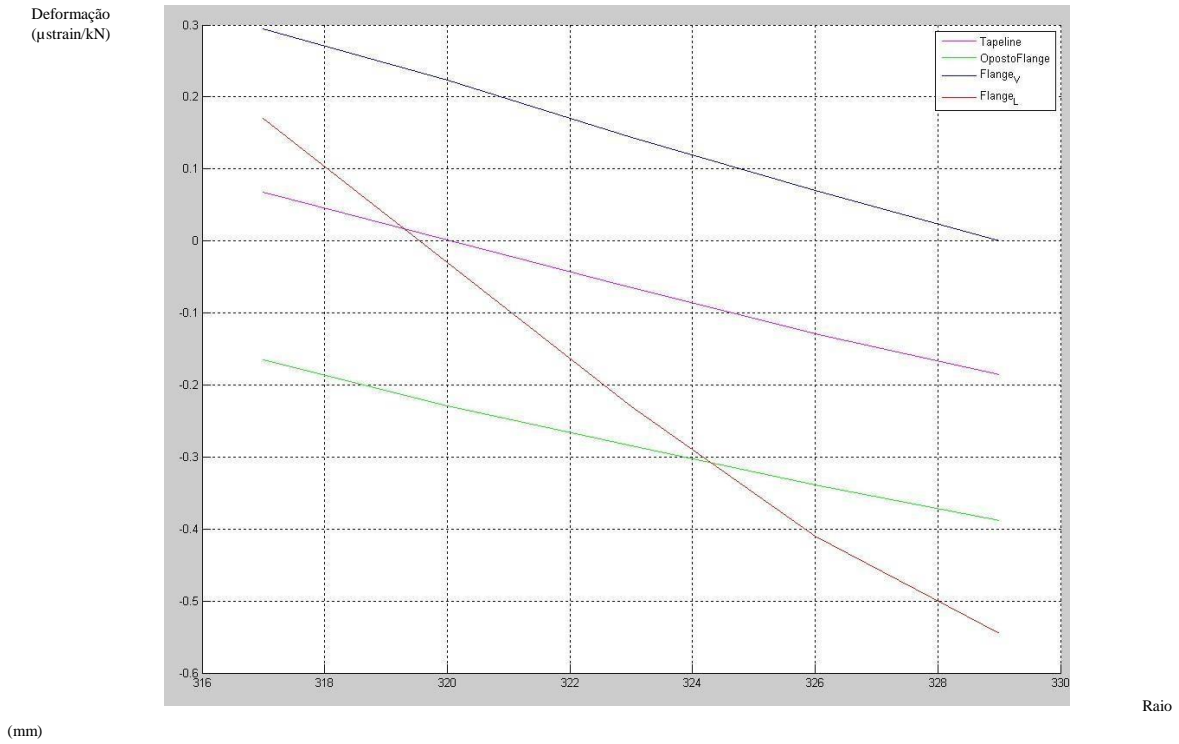


Figura 8 - Resultado dos extensômetros colados na região entre 317 e 329 mm em relação ao centro da roda

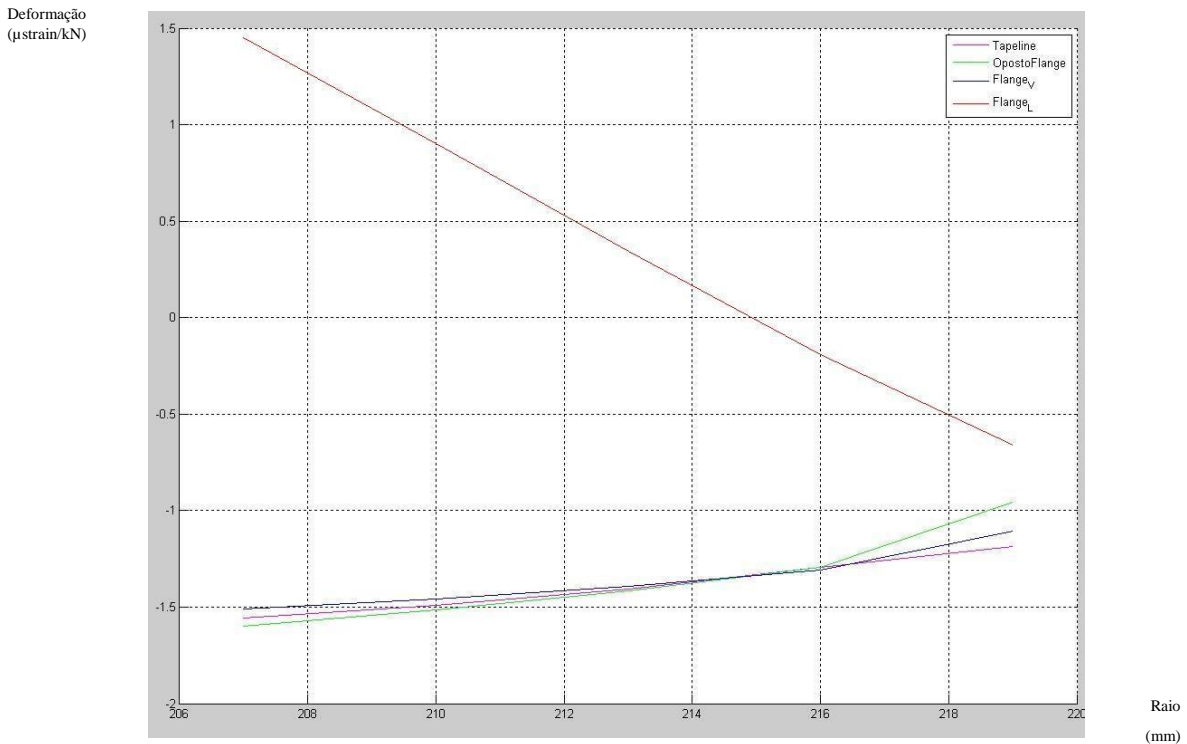
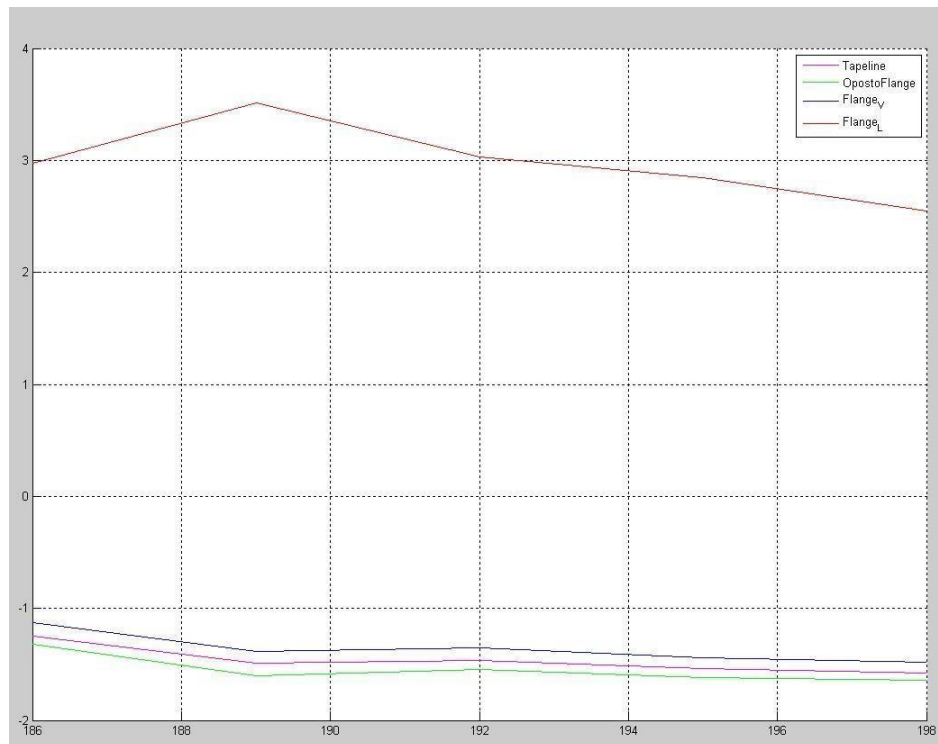


Figura 9 - Resultados dos extensômetros colados na região entre 207 e 219 mm em relação ao centro da roda

Deformação ($\mu\text{strain/kN}$)

Raio (mm)

Figura 10



Resultados dos extensômetros colados na região entre 186 e 198 mm em relação ao centro da roda

As variáveis mostradas nos gráficos acima tratam-se da deformação da roda quando aplicada força em cada um dos pontos de contato citados anteriormente (Flange, Oposto a Flange, e Tapeline) com um destaque especial para a Flange, que nesse caso aparece em duas vertentes (Flange_V e Flange_L), nada mais são do que as deformações quando aplicando Força Lateral (Flange_L) e Força Vertical (Flange_V).

A realização do modelo da roda foi criada utilizando o software de desenho/simulação Solidworks.

O modelo foi criado baseado no desenho fornecido pelo fabricante da roda (perfil S conforme nota-se na figura 10)

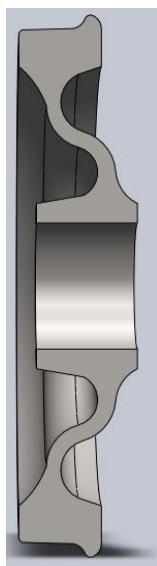


Figura 11 - Perfil da roda utilizada nos testes

O modelo final criado foi importado ao conjunto de software da MCS Software (Patran e Nastran). O Patran é um software que possibilita ao usuário criar as malhas de elementos finitos, restrições ao ensaio como pontos de engaste e aplicações de força. Já o Nastran é o “solver”, o software que realiza os cálculos iterativos gerando os resultados buscados, como deformação ao longo do corpo estudado.

O material utilizado na fabricação da roda é aço carbono SAE1070 segundo informações do próprio fabricante. Os dados de características do material foram importados ao Patran conforme tabela 1

Tabela 1 - Características do aço carbono SAE 1070

Continua

SAE 1070		
Composição Química:	C=0.70%, Mn=0.75%, P=0.04% max, S=0.05% max	ax,
Propriedade	Sistema Internacional	Sistema Inglês
Densidade	7.872*10 ³ kg/m ³	491.4 lb/ft ³
Módulo de Elasticidade	201 GPa	29200 ksi
Expansão Térmica (20 °C)	12.1*10 ⁻⁶ °C ⁻¹	6.72*10 ⁻⁶ in/(in* °F)
Calor específico	490 J/(kg*K)	6 BTU/(lb*°F)
Condutividade Térmica	51.2 W/(m*K)	0.117 BTU/(lb*°F) 355 BTU*in/(hr*ft ² *°F)
Resistividade Elétrica	1.68*10 ⁻⁷ Ohm*m	1.68*10 ⁻⁶ Ohm*cm
Resistência à Tração (Recozido)	640 MPa	5 92800 psi

Resistência ao

escoamento(Recozido)	495	MPa	71800	psi
Alongamento (Recozido)	10	%	10	%
Dureza (Recozido)	91	RB	91	RB

SAE 1070

Composição Química: C=0.70%, Mn=0.75%, P=0.04% max, S=0.05% max

Propriedade	Sistema Internacional		Sistema Inglês	
Resistência à Tração (Lâminado a quente)	703	MPa	102000	psi
Resistência ao escoamento (Lâminado a quente)	385	MPa	55800	psi
Alongamento (Lâminado a quente)	12	%	12	%
Dureza (Lâminado a quente)	94	RB	94	RB

Para a geração da malha de elementos finitos (M.E.F.) foram considerados itens importantes como: tamanho, número, formato dos elementos, quantidade de nós, etc.

Esses itens foram considerados para alcançar uma malha adequada que gere bons resultados e que não sobrecarregue o processamento do microcomputador utilizado para os testes. O primeiro teste foi com uma malha tetraédrica com 10 nós e 13 mm de tamanho máximo dos elementos (Figura 14). O segundo consistiu em uma malha tetraédrica com 4 nós e 13 mm de tamanho máximo dos elementos (Figura 13). O terceiro e último teste foi de uma malha de 4 nós e 5mm (Figura 12).

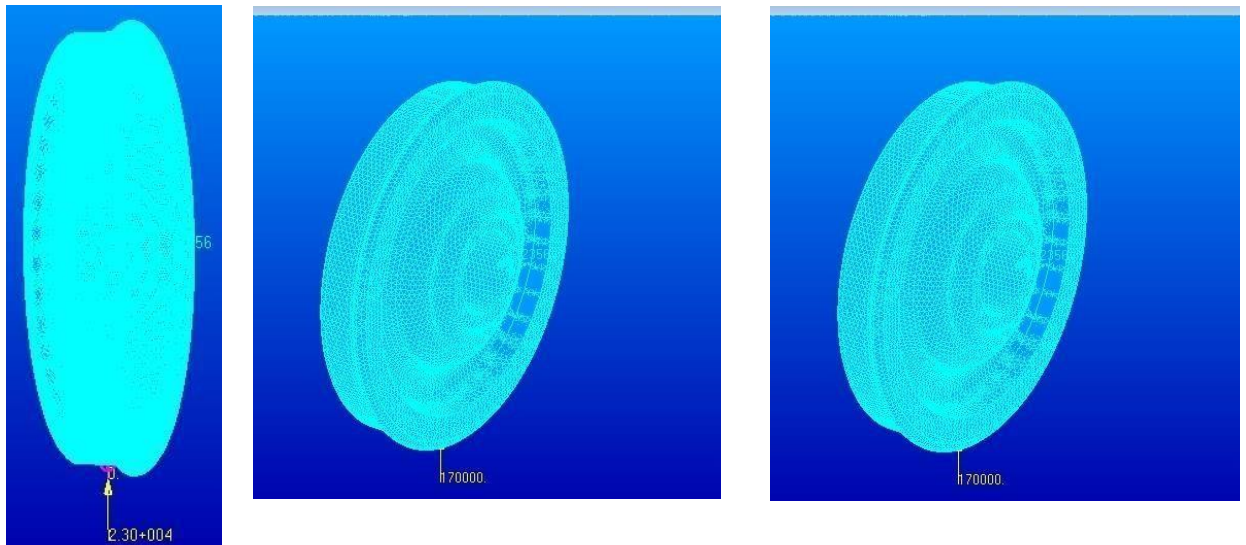


Figura 14 - Malha com 4 nós e 14 mm - Figura 13 - Malha com 4 nós e 13 mm - Figura 12 - Malha com 10 nós e 13 mm

Ao comparar o primeiro teste com o segundo, conclui-se que o número de nós não afeta efetivamente no resultado final, mas diminui em aproximadamente dez vezes o tempo de processamento e o arquivo de dados gerado, porém o problema foi o tamanho da malha, já que para a simulação há a necessidade da criação de um elemento rígido que faça o papel da geometria do contato roda trilho (uma elipse). Essa elipse (Teoria proposta pelo físico alemão Heinrich Hertz, 1882, Contato elástico entre sólidos) foi estudada ao longo do tempo em ensaios e revela-se que para um contato elástico, com uma roda e trilho sem desgastes, a área de contato (em formato elíptico) gira em torno de 200mm^2 . Descartando assim a malha gerada com 13mm, pois para a criação de um elemento rígido a área calculada fica maior que 1000mm^2 . Logo conclui-se que dentre os ensaios acima descritos o melhor foi o terceiro, pois não sobrecarrega o processamento do microcomputador e a malha de 5mm gera um elemento rígido de aproximadamente 160mm^2 (Figura 15).

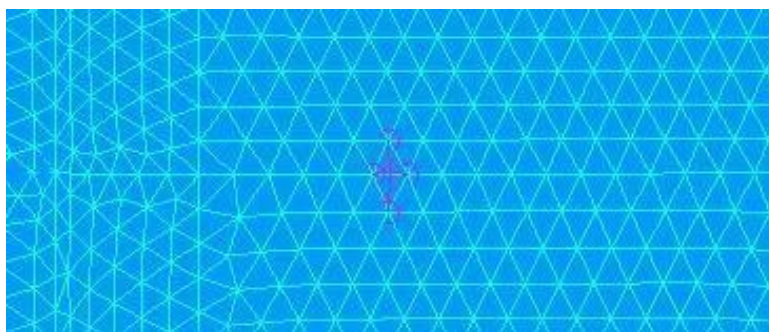


Figura 15 - Elemento rígido

Após a realização dos testes simulados utilizando as mesmas tensões aplicadas no teste real (80kN para força vertical e 20kN para força lateral). Utilizando o software de cálculos matemáticos MATLAB foram gerados os gráficos provenientes do modelo (figura 16) ao comparar os dados gerados aqui com os dados gerados pelo ensaio real (figura 10), nota-se que o comportamento nas regiões estudadas são semelhantes, validando assim o modelo virtual.

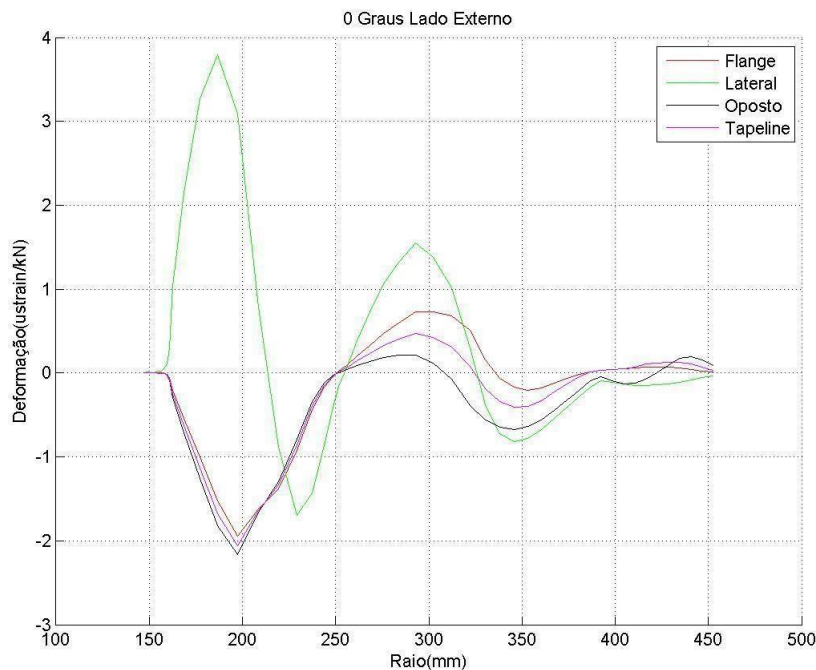


Figura 16 - Curva gerada pelo MATLAB a partir dos dados simulados no PATRAN / NASTRAN

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Ligação dos extensômetros

Para garantir uma menor influencia externa nos resultados, e aumentando os valores lidos pelos extensômetros colados na roda, os mesmos foram ligados em pontes de Wheatstone.

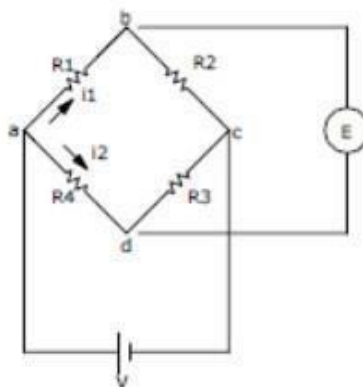


Figura 17 - Esquema de ligação dos extensômetros ao logo da roda

Onde E é a tensão de saída e V é a tensão de excitação. Sabendo que a variação de resistência é muito baixa e que geraria certamente muita influencia externa nesse caso, foi considerado a implementação do circuito acima com o intuito de ler a variação de tensão. Inicialmente as pontes são calibradas para que cada um dos extensômetros ali colados mantenham-se em equilíbrio, fazendo com que o valor lido em “E” seja 0 (zero) Volts. A medida que o material da roda se deforma, existe variação na resistência dos extensômetros e por consequência há um desbalanceamento na ponte fazendo com que surja uma tensão considerável em “E” Abaixo

as figuras representam exatamente os formatos utilizados para cada uma das pontes, considerando que esses pontos monitorados atenuem a força indesejada e prevaleçam apenas aquele valor de força que interessa, em outras palavras, a ponte Vertical deve apenas realizar leituras dos valores de força vertical, e atenuar qualquer influencia de força lateral, da mesma maneira que a ponte lateral somente deve fazer com que os valores laterais prevaleçam. Por fim a ponte de posição é útil para auxiliar a identificar qual o ponto de contato entre flange, oposto a flange e tapeline.

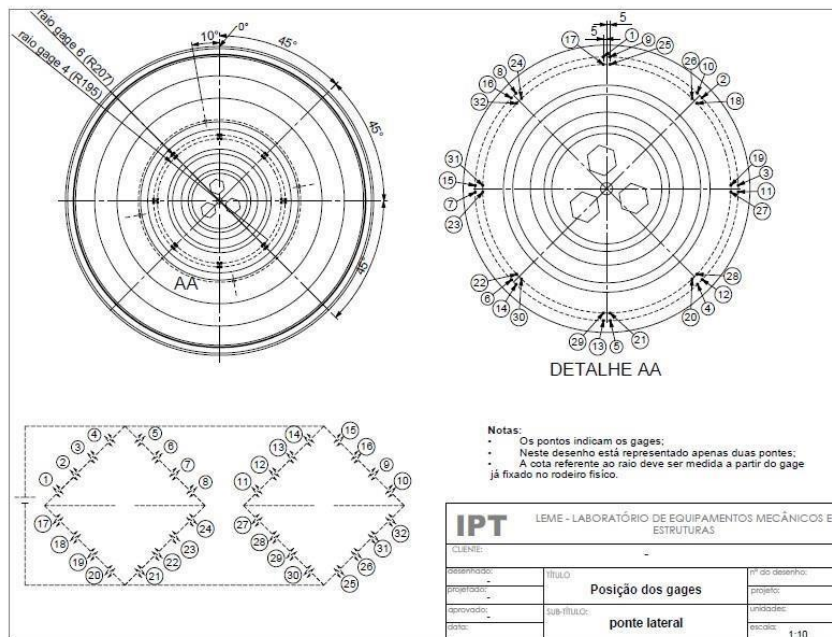


Figura 18 - Ponte Lateral

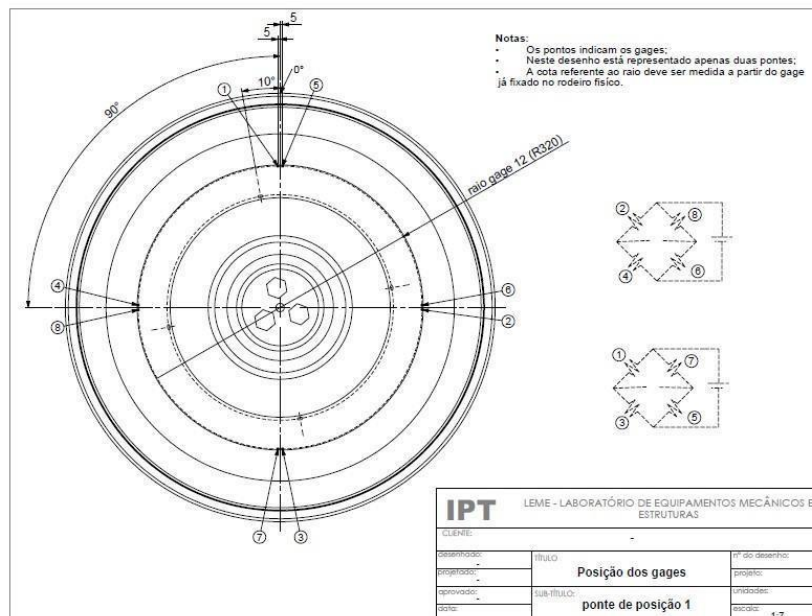


Figura 19 - Ponte de Posição

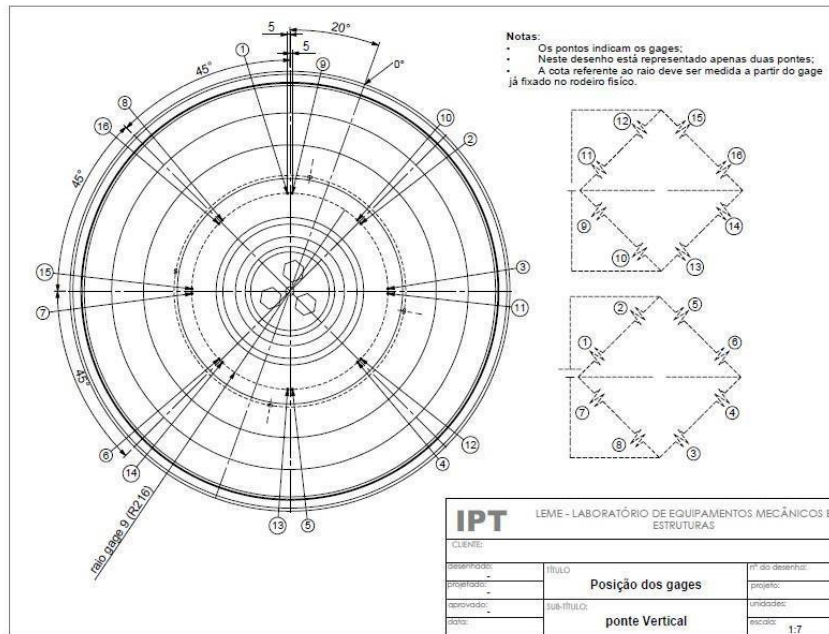


Figura 20 - Ponte Vertical

3.2. Treinamento da Rede Neural Artificial

3.2.1. Definição do numero de entradas e saídas

O número de entradas da rede neural basicamente se caracteriza pelo número de variáveis que serão analisadas, são elas:

- Posição angular do contato (graus) - x1;
- Ponte Lateral (μ strain) - x2;
- Ponte Lateral defasada em 90 graus (μ strain) - x3;
- Ponte Vertical (μ strain) - x4;
- Ponte Vertical defasada em 90 graus (μ strain) - x5;
- Ponte de Posição (μ strain) - x6;
- Ponte de Posição defasada em 90 graus (μ strain) - x7. E como saída tem-se:
- Força Lateral (kN);
- Força Vertical (kN);
- Posição da aplicação da Força (número de 1 a 4 onde: 1=Flange + Lateral, 2=Flange, 3=Tape Line, 4=Oposto Flange).

Devido ao tamanho da tabela com os dados de treinamento e pela quantidade de informações (aproximadamente 2500 linhas de treinamento) os dados na íntegra não serão apresentados neste artigo. Logo optou-se apenas pela exposição dos dados que serão utilizados para realização da validação da rede (serão apresentados abaixo).

3.2.2. Arquitetura da Rede.

Foram realizados testes em diversas arquiteturas diferentes. A que obteve o melhor desempenho dentre os testes executados foi a arquitetura apresentada na figura 21. Não foram testado casos com mais de 100

neurônios por camada, pois neurônios demais pode levar a rede a memorizar os dados de treinamento (overfitting), ao invés de extrair as características gerais que permitirão a generalização.

O erro médio quadrático considerado como critério de parada do treinamento foi de 0,00001, tendo em vista os valores apresentados com dimensões muito discrepantes, foi realizada a normalização dos dados dentro do Matlab. O treinamento utilizado foi o padrão do próprio Matlab (Levenberg-Marquardt), assim como a função de ativação dos neurônios da camada escondida e camada de saída (tangente hiperbólico e função linear, respectivamente).

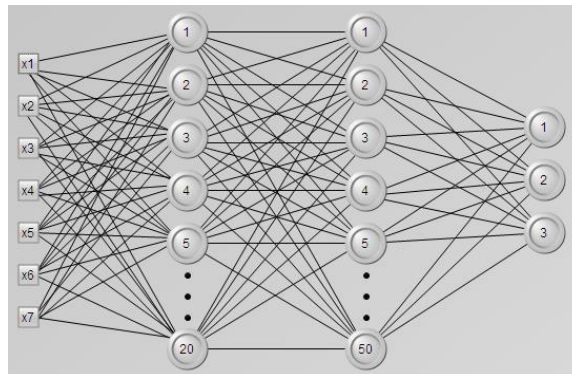


Figura 21 - Arquitetura da rede neural

3.2.3 Treinamento

Com o auxílio da biblioteca de redes neurais do Matlab, alguns parâmetros foram definidos para o treinamento do modelo:

- Número de épocas: 100000;
- Erro médio quadrático: 0,00001;
- Taxa de aprendizagem: 0,1.

Abaixo são apresentadas as figuras 21, 22, 23 e 24 que mostram o status durante o treinamento e após o seu término.

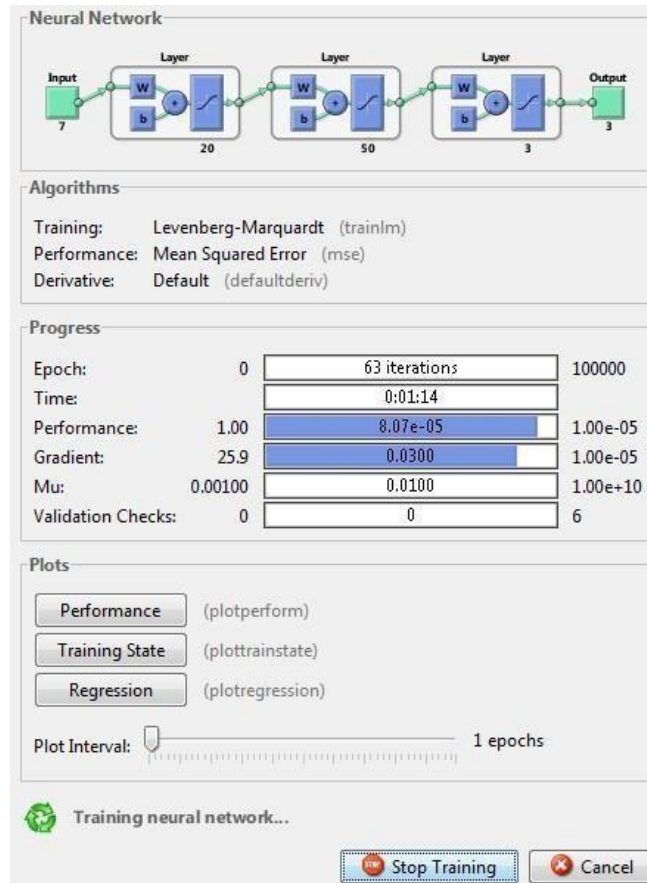


Figura 22 - Status durante o treinamento (63 iterações)

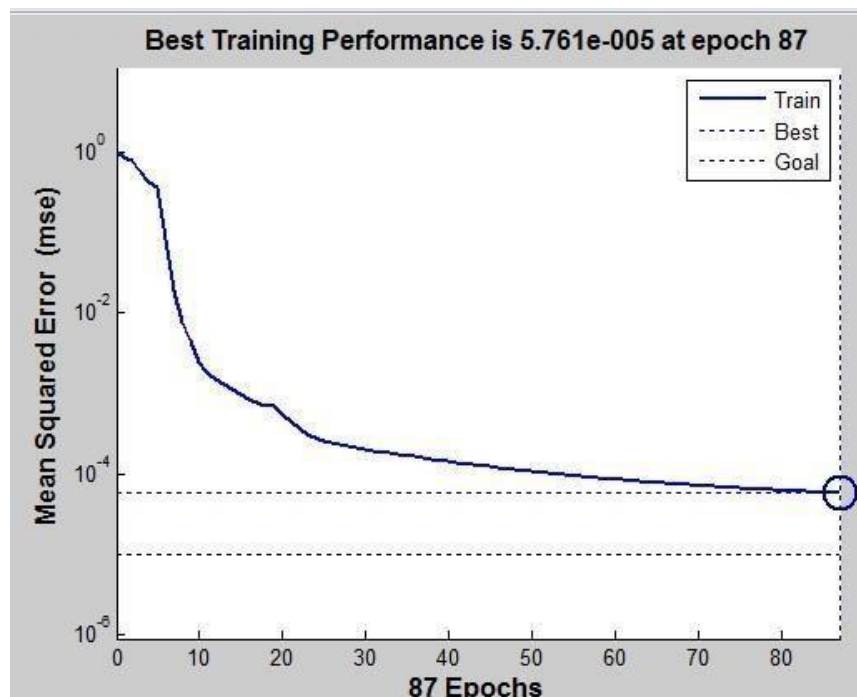


Figura 23 - Performance durante o treinamento (87 iterações)

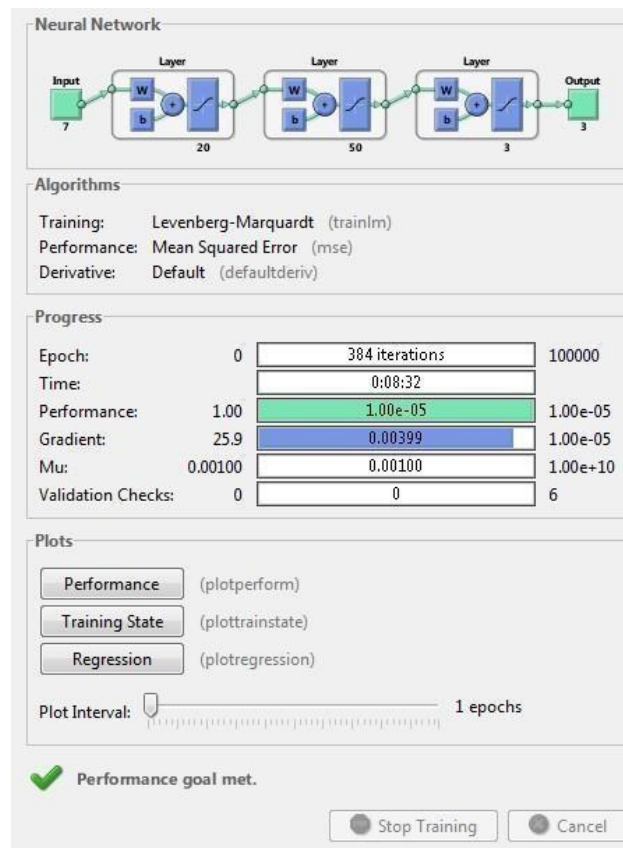


Figura 24 - Status ao fim do treinamento

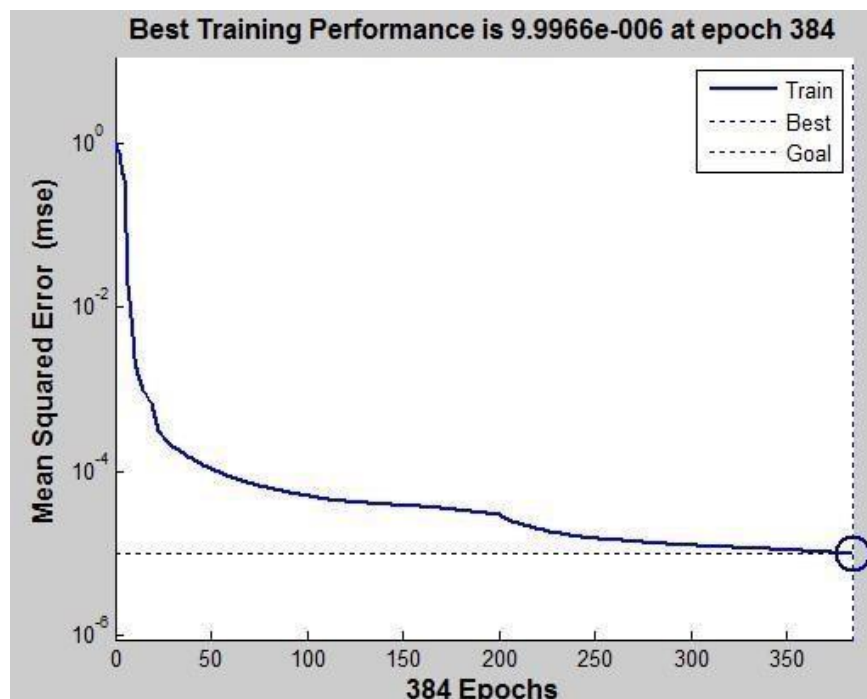


Figura 25 - Performance ao fim do treinamento

Nas Figuras 19 e 20 é possível verificar que o treinamento finaliza após 384 iterações considerando o erro médio quadrático como critério de parada, quando a variável atinge o valor de 0,00001.

As Tabelas 7, 8 e 9 abaixo mostram, os dados de validação, a saída esperada, a saída obtida e por fim o erro percentual entre o esperado e o obtido respectivamente, para o caso da posição, por serem valores inteiros de 1 a 4, foi considerado a seguinte situação:

- $0 < x \leq 1,5$ • para o valor de x é 1;
- $1,5 < x \leq 2,5$ • para o valor de x é 2;
- $2,5 < x \leq 3,5$ • para o valor de x é 3;
- $3,5 < x$ • para o valor de x é 4.

Tabela 2 - Dados utilizados para validação do modelo neural

Entradas							Saídas Esperadas		
Ângulo	P. Lateral	P. Lateral 90°	P. Vertical	P. Vertical 90°	P. Posição	P. Posição 90°	Força Vertical	Força Lateral	Posição
60	23,3101	33,7467	-15,3264	-50,1402	-58,479	81,7765	15	15	1
65	25,711	31,9228	-19,4984	-48,2522	-50,8268	81,8449	15	15	1
70	28,0122	29,8911	-23,8291	-46,1416	-42,2283	81,6551	15	15	1
280	-4,5441	-1,35	233,9161	169,9283	-47,7939	-179,9827	45	0	2
285	-4,8293	-1,595	242,0437	150,6792	-70,2815	-194,867	45	0	2
290	-4,7732	-1,8176	248,8972	129,3099	-91,8005	-203,2935	45	0	2
140	10,9001	-0,642	-381,2044	68,2345	272,6377	239,2291	65	0	3
145	11,8986	-4,2069	-381,3118	109,4713	283,5057	220,3054	65	0	3
150	8,8406	-5,0082	-372,785	148,5283	278,5756	189,1082	65	0	3
190	0,8022	-9,0031	-94,7506	125,9386	48,0261	-30,2709	25	0	4
195	0,3421	-9,3975	-84,3357	130,2273	70,4068	-43,5213	25	0	4
200	-0,1995	-9,4807	-70,5729	134,2908	85,8758	-57,1714	25	0	4

Tabela 3 – Dados gerados pelo modelo neural

Entradas							Saídas Obtidas		
Ângulo	P. Lateral	P. Lateral 90°	P. Vertical	P. Vertical 90°	P. Posição	P. Posição 90°	Força Vertical	Força Lateral	Posição
60	23,3101	33,7467	-15,3264	-50,1402	-58,479	81,7765	14,8776	15,0939	1
65	25,711	31,9228	-19,4984	-48,2522	-50,8268	81,8449	14,6902	14,7358	1
70	28,0122	29,8911	-23,8291	-46,1416	-42,2283	81,6551	14,8814	14,9491	1
280	-4,5441	-1,35	233,9161	169,9283	-47,7939	-179,9827	45,0896	0,1196	2
285	-4,8293	-1,595	242,0437	150,6792	-70,2815	-194,867	45,0052	0,1383	2
290	-4,7732	-1,8176	248,8972	129,3099	-91,8005	-203,2935	45,0405	0,0392	2
140	10,9001	-0,642	-381,2044	68,2345	272,6377	239,2291	65,129	-0,0172	3

145	11,8986	-4,2069	-381,3118	109,4713	283,5057	220,3054	65,3017	-0,089	3
150	8,8406	-5,0082	-372,785	148,5283	278,5756	189,1082	65,043	-0,0905	3
190	0,8022	-9,0031	-94,7506	125,9386	48,0261	-30,2709	24,9246	0,0609	4
	195	0,3421	-9,3975	-84,3357	130,2273	70,4068	-43,5213	24,8105	0,3092
	200	-0,1995	-9,4807	-70,5729	134,2908	85,8758	-57,1714	25,3562	0,0403

Tabela 4 - Tabela indicativa do erro percentual de cada um dos valores testados

Ângulo	Entradas						Erro (%)		
	P. Lateral	P. Lateral 90°	P. Vertical	P. Vertical 90°	P. Posição	P. Posição 90°	Forca Vertical	Forca Lateral	Posição
60	23,3101	33,7467	-15,3264	-50,1402	-58,479	81,7765	0,8225	0,6222	OK
65	25,711	31,9228	-19,4984	-48,2522	-50,8268	81,8449	2,1086	1,7931	OK
70	28,0122	29,8911	-23,8291	-46,1416	-42,2283	81,6551	0,7968	0,3406	OK
280	-4,5441	-1,35	233,9161	169,9283	-47,7939	-179,9827	0,1986	0,1196	OK
285	-4,8293	-1,595	242,0437	150,6792	-70,2815	-194,867	0,0116	0,1383	OK
290	-4,7732	-1,8176	248,8972	129,3099	-91,8005	-203,2935	0,0898	0,0392	OK
140	10,9001	-0,642	-381,2044	68,2345	272,6377	239,2291	0,198	0,0172	OK
145	11,8986	-4,2069	-381,3118	109,4713	283,5057	220,3054	0,462	0,089	OK
150	8,8406	-5,0082	-372,785	148,5283	278,5756	189,1082	0,0661	0,0905	OK
190	0,8022	-9,0031	-94,7506	125,9386	48,0261	-30,2709	0,3026	0,0609	OK
195	0,3421	-9,3975	-84,3357	130,2273	70,4068	-43,5213	0,7637	0,3092	OK
200	-0,1995	-9,4807	-70,5729	134,2908	85,8758	-57,1714	1,4047	0,0403	OK

Nota-se que o erro máximo foi de 2,1%. Abaixo dos valores de erro obtidos utilizando métodos matemáticos tradicionais como series de Fourier para solução do problema.

4. CONCLUSÕES

A proposta de implementação de um modelo neural na área de transporte sobre trilhos, com o objetivo de se obter dados sobre o contato roda-trilho, se demonstrou viável, a partir dos dados apresentados nesta pesquisa. Ressaltamos porém, a importância de uma análise prévia dos pontos de sensibilidade da roda, para que os resultados coletados e treinados sejam adequados. Apoiando-se em softwares de simulação é possível, com um baixo custo, efetuar tais análises. É também buscar a arquitetura de rede ideal para a implementação correta do sistema.

Para próximos passos relacionado a essa pesquisa, pode-se estudar formas de, primeiramente minimizar o erro aqui encontrado de 2,1%, mas também viabilizar a criação de um hardware

que receba as entradas do sistema (deformação da roda e posição angular) e em tempo real efetue o cálculo do coeficiente de descarrilamento (L/V). Conseguindo realizar o cálculo do coeficiente, é possível ainda atuar de forma preventiva no trem e evitar um dos problemas que mais preocupa e gera prejuízos, tanto financeiro quanto material para as empresas responsáveis.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Apoio ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

HAYKIN, S. *Redes Neurais: Princípios e Práticas. 2ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900 p.;*

BISHOP, C. M.; *Neural Networks for Pattern Recognition; Oxford University Press; 1995.*

TATIBANA, C. Y.; KAETSU, D. Y. *Uma introdução às redes neurais. Disponível em: <http://www.din.uem.br/ia/neurais/>. Acesso em: 9/11/2011;*

VIEIRA, R. C.; ROSEINBERG, M. *Redes Neurais Artificiais: Um breve tutorial. Disponível em: <http://www.educaonline.eng.br/UNISANTA/HTML/DOWNLOAD/AULAS/TutorialRNA.pdf>. Acesso em: 10/11/2011;*

SANTOS, F. C. *“Análise do Contato Roda-Trilho e sua Influência na Vida em Serviço de Rodas Ferroviárias”, 2000;*

Joint Rail Conference (JRC), *“Application of Nadal Limit in the prediction of wheel climb derailment”, 2011*

ALMEIDA, F.C, *“Análise das Forças de Contato e Comportamento Dinâmico de Rodeiro Ferroviário”, 2006*

BARBOSA, R. S. *“Aplicação de Sistemas Multicorpos na Dinâmica de Veículos Guiados”. Tese de Doutorado na Universidade de São Paulo. (1999)*

IWNICKI, S., *“Handbook of Railway Vehicle Dynamics” 1ed. New York, 2006*

JOHNSON, K.L.: *“Contact Mechanics” Cambridge University Press, 1985*

WEBER, A. L.: *“Metrologia e Instrumentação” UCS – Departamento de Engenharia Mecânica, 2008*