

PREVISÃO DE INTEGRIDADE EM TUBULAÇÕES INDUSTRIAIS ATRAVÉS DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS: UMA ABORDAGEM ABRAGENTE

Data de aceite: 02/06/2023

Leonardo Lopes Nascimento

System Inspeção e aluno de pós-graduação do SENAI CIMATEC

Carlos Augusto de Souza

TRANSPETRO – Petrobras Transporte S.A. e professor do SENAI CIMATEC

ABSTRACT: This article evaluates the integrity of industrial drainage pipes, aiming for operational reliability in complex systems. Given the diversity of materials and fluids used, the use of Artificial Neural Networks (ANNs) emerges as a promising approach. Authors like Elsayed (1992) and Lafraia (2001) emphasize the relevance of reliability in industrial contexts. The methodology adopted included data normalization from the pipes, pre-processing, and exploratory analysis. Multi-Layer Perceptron (MLP), Stratified K-Fold cross-validation, and L2 regularization were chosen strategies for model construction. The results showed consistency, with average test accuracies ranging from 83.77% to 91.54%. Predictions confirmed trends identified in exploratory analysis, highlighting the influence of material and fluid type on predictions. The synergy between technical knowledge and AI

proved to be a valuable resource to enhance reliability management in complex industrial environments. Conclusions indicate that the application of ANNs in evaluating pipe integrity offers potential to improve decision-making, optimize maintenance, and extend the lifespan of these systems, positively impacting the industry as a whole.

PALAVRAS-CHAVE: Redes Neurais Artificiais, Confiabilidade, Drenagem Industrial, Tubulações Enterradas.

1 . INTRODUÇÃO

A integridade operacional das tubulações desempenha um papel fundamental na indústria, especialmente no contexto de sistemas de drenagem industrial. A confiabilidade desses sistemas é essencial para garantir que fluidos sejam direcionados de maneira eficiente e segura, contribuindo para a manutenção do desempenho e atendimento a regulamentações ambientais rigorosas. De acordo com Flogiatto e Da Silveira (2006), a confiabilidade é definida como a probabilidade de um sistema realizar suas funções sob condições estabelecidas, é um elemento crítico para a operação bem-sucedida de indústrias em todo o mundo.

A diversidade das tubulações de drenagem industrial envolve não apenas a grande variedade dos efluentes mas também dos materiais utilizados em sua construção. Materiais como polímeros, ligas metálicas e concreto são empregados para atender a requisitos específicos de cada aplicação. Essa variedade de materiais cria um ambiente desafiador para avaliar e prever a integridade dessas tubulações, demandando abordagens inovadoras e avançadas para garantir que a confiabilidade seja mantida ao longo do tempo (Lafraia, 2001).

Elsayed (1992) e Lafraia (2001) enfatizam a importância da confiabilidade na manutenção de sistemas complexos. Elsayed (1992) destaca a necessidade de métodos precisos para avaliar e melhorar a confiabilidade, especialmente em contextos industriais, onde as consequências de falhas podem ser significativas. Lafraia (2001) contribui com a aplicação da análise de sobrevivência na avaliação da confiabilidade de sistemas, demonstrando a relevância da abordagem de análise de dados para compreender a integridade e a longevidade dos sistemas.

No cenário atual, a Inteligência Artificial (IA) tem emergido como uma ferramenta poderosa para enfrentar os desafios da confiabilidade e integridade das tubulações de drenagem industrial. Especificamente, as Redes Neurais Artificiais (RNAs) têm se destacado como uma abordagem promissora para avaliar e prever problemas de integridade. Segundo Haykin (1994), as RNAs são estruturas computacionais inspiradas no funcionamento do cérebro humano, capazes de aprender padrões complexos a partir de dados brutos. Sua capacidade de lidar com informações multidimensionais e não lineares as torna particularmente adequadas para enfrentar os desafios inerentes à avaliação da confiabilidade de sistemas complexos, como as tubulações de drenagem industrial.

Este artigo apresenta uma aplicação das RNAs na avaliação da integridade das tubulações de drenagem industrial, considerando a diversidade de materiais empregados. Nele são discutidos os benefícios da utilização de RNAs para prever problemas de integridade, otimizar operações e garantir a confiabilidade desses sistemas. A abordagem proposta neste artigo combina conhecimentos técnicos de engenharia de materiais e IA (Inteligência Artificial), fornecendo uma metodologia inovadora para prevenir falhas e melhorar a eficiência das operações de drenagem industrial.

O principal objetivo é discutir a efetividade de uma RNA criada de forma customizada para prever a integridade de tubulações com diversas características. Por consequência, o artigo apresenta os seguintes desdobramentos:

- A exploração da influência dos diferentes materiais de tubulação na confiabilidade e previsão de integridade em sistemas de drenagem industrial.
- Uma abordagem detalhada baseada em Redes Neurais Artificiais para avaliar a integridade de sistemas complexos de tubulação.
- A relevância da análise de dados e IA na detecção precoce de problemas de integridade e otimização da confiabilidade operacional.

- *Insights* sobre como a combinação de conhecimentos técnicos especializados e IA pode transformar a gestão da confiabilidade em ambientes industriais desafiadores.

Neste contexto, é importante ressaltar que os riscos de vazamento de produtos em sistemas de drenagem industrial podem ter sérios impactos ambientais, incluindo a contaminação do solo e a possibilidade de comprometimento dos ecossistemas locais. Normas regulamentadoras como a NR-25 (2023), estabelecem diretrizes estritas para a prevenção de vazamentos e o manuseio seguro de produtos químicos e materiais perigosos. Garantir a integridade desses sistemas não apenas promove a eficiência operacional, mas também contribui para a preservação ambiental e o cumprimento das regulamentações.

2 . APLICAÇÃO DE RNA NA AVALIAÇÃO DE INTEGRIDADE DE TUBULAÇÕES

Em uma planta industrial com mais de 3 quilômetros de linhas enterradas com diferentes diversos materiais, contendo diferentes tipos de drenagem, como drenagem oleosa, proveniente do resíduo de produtos em tanques, bombas, torres e outros equipamentos, e drenagem contaminada, que pode conter traços de substâncias como hidrocarbonetos e produtos químicos, uma amostra representativa de 15% dessas linhas foi selecionada para inspeção. A partir dessas inspeções, foi possível fazer a previsão da integridade das demais linhas, utilizando a RNA desenvolvida.

A avaliação da integridade das tubulações industriais foi conduzida através da aplicação de dois métodos: teste de estanqueidade e vídeo inspeção. O teste de estanqueidade verificou a capacidade das tubulações em manter a contenção do efluente transportado, enquanto a vídeo inspeção permitiu uma visualização direta do estado das tubulações, identificando danos, corrosão ou obstruções que pudessem comprometer sua integridade. Com base nos resultados desses ensaios, as tubulações foram categorizadas como “Integras” ou “Não Integras”, fornecendo insights valiosos para a tomada de decisões sobre intervenções corretivas ou preventivas.

Além disso, uma Rede Neural Artificial (RNA) customizada foi desenvolvida para prever o estado de integridade das tubulações. Essa RNA foi treinada e avaliada utilizando a técnica de validação cruzada Stratified K-Fold, que garante a representatividade das classes “Integras” e “Não Integras” em cada fold, evitando vieses na avaliação do modelo. A customização da RNA e a utilização do Stratified K-Fold destacam a abordagem acadêmica e a originalidade desta pesquisa, contribuindo para a criação de uma ferramenta precisa para prever a integridade das tubulações industriais.

2.1 Apresentação das tubulações avaliadas

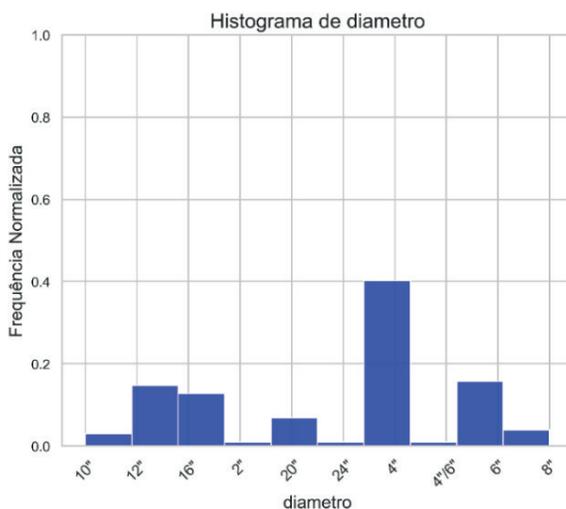
A extensão do estudo de caso abrangeu 6 quilômetros divididos em 765 linhas e durou 7 meses, envolvendo uma equipe de 2 inspetores de integridade, 1 projetista de tubulação e mais de 15 pessoas de campo responsáveis pela coleta de dados e imagens das tubulações, durante aproximadamente 1 ano.

A rede de drenagem analisada apresenta uma constante flutuação na concentração de hidrocarbonetos, o que impõe desafios adicionais na análise e gestão eficaz do sistema. Essa complexidade exige uma abordagem especializada e cuidadosa na condução do estudo de caso na planta petroquímica em questão.

Durante a fase inicial do estudo, foi realizada uma abordagem de tratamento de dados para garantir a qualidade e veracidade das informações. A normalização dos dados de treinamento foi feita para padronizar os valores dos atributos, enquanto técnicas de pré-processamento foram aplicadas aos dados de operação, selecionando apenas aqueles dentro dos limites estabelecidos durante a fase de teste.

A análise exploratória dos dados proporcionou *insights* sobre as características das tubulações, com histogramas revelando a distribuição de frequência de atributos como diâmetro, material e fluido. Por exemplo, o histograma de diâmetros (Figura 1) apresenta variação considerável, com maioria das tubulações com diâmetros entre 4 e 6 polegadas.

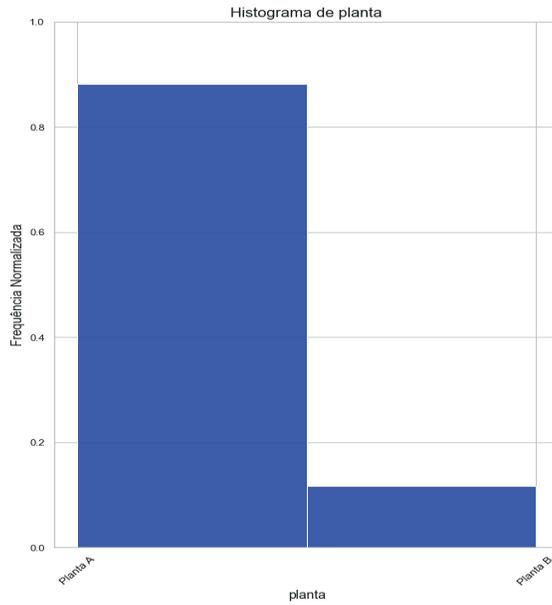
Figura 1 – Histograma dos diâmetros das tubulações (normalizados)



Fonte: produzido pelo autor

A Figura 2 apresenta o histograma das plantas, com uma concentração maior de dados na área Planta A, possivelmente indicando assimetrias na distribuição das áreas das tubulações.

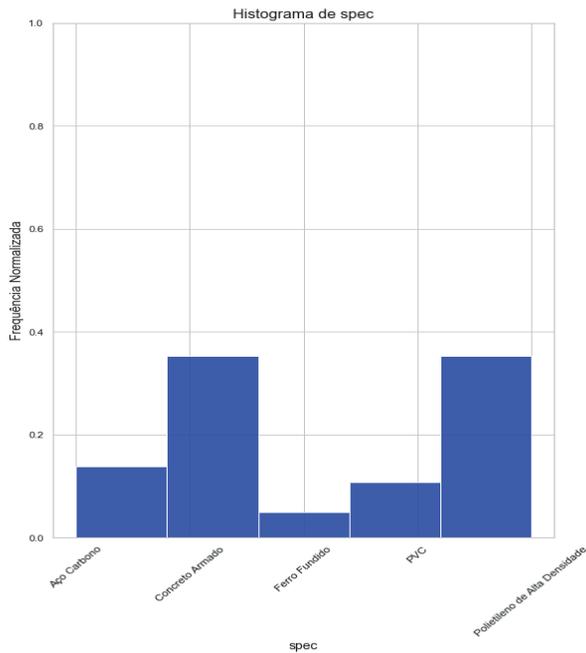
Figura 2 - Histograma das plantas (normalizados)



Fonte: produzido pelo autor

Em relação ao material, a Figura 3 revela a predominância dos tipos Polietileno de Alta Densidade (PEAD) e concreto armado nas tubulações analisadas.

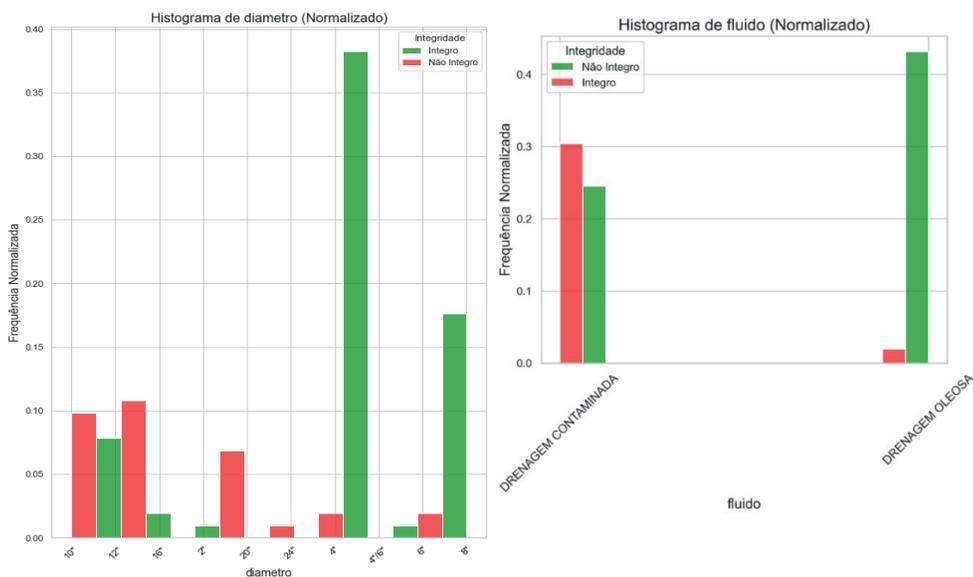
Figura 3 - Histograma dos materiais (normalizados)



Fonte: produzido pelo autor

A relação entre o diâmetro das tubulações e seu estado de integridade foi destacada, assim como a influência do tipo de fluido transportado. Por exemplo, a Figura 4 mostra a relação entre o estado de integridade e os diâmetros, evidenciando que tubulações com maiores diâmetros tendiam a apresentar mais casos de não integridade.

Figuras 4 e 5 – Relação entre o estado de integridade e os diâmetros (normalizados) e Relação entre o estado de integridade e tipo de fluido (normalizado)



Fonte: produzido pelo autor

Igualmente, a Figura 5 apresenta a relação entre o estado de integridade e o tipo de fluido, demonstrando que tubulações destinadas à drenagem de efluentes oleosos mostraram uma proporção significativamente maior de componentes íntegros em comparação com aquelas destinadas à drenagem de efluentes contaminados.

2.2 Descrição breve do modelo de RNA

Esses dados foram fundamentais para o desenvolvimento de um modelo de previsão de integridade baseado em Redes Neurais Artificiais (RNAs), utilizando a arquitetura de Multi-Layer Perceptron (MLP). O modelo foi avaliado utilizando a técnica de validação cruzada Stratified K-Fold e técnicas de regularização L2 para lidar com *overfitting*. O otimizador estocástico SGD foi escolhido para otimizar o MLP, garantindo uma convergência eficiente durante o treinamento da rede.

Essa abordagem robusta e cuidadosamente definida permitiu a construção de um modelo preciso e confiável de previsão de integridade de tubulações, considerando

a complexidade dos dados e garantindo a generalização do modelo para cenários de operação real.

A metodologia adotada visou avaliar a integridade das tubulações industriais, utilizando métodos de teste de estanqueidade e vídeo inspeção como base para análise subsequente. Com esses métodos, foi possível classificar as tubulações em “Integras” e “Não Integras”, estabelecendo a fundação para o desenvolvimento de uma Rede Neural Artificial (RNA) personalizada. A RNA foi elaborada com parâmetros selecionados, como material, diâmetro, tipo de fluido, entre outros, após análise exploratória dos dados e considerações especializadas do domínio das tubulações industriais, garantindo a relevância e eficácia do modelo. Com a metodologia estabelecida, os resultados foram obtidos e podem ser apresentados a partir da aplicação dessa abordagem em um estudo de caso específico.

2.3 Resultados e Discussões

Os resultados do algoritmo de previsão de integridade de tubulações revelaram um desempenho satisfatório, conforme mostrado na Tabela 1. A acurácia média de teste variou entre aproximadamente 83,77% e 91,54%, com consistência entre diferentes folds, evidenciando a robustez do modelo e sua capacidade de generalização.

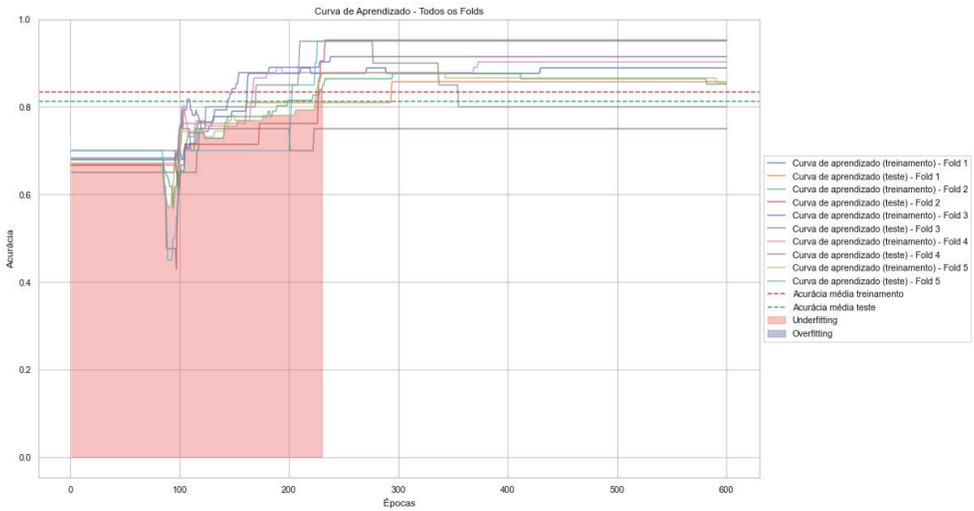
Tabela 1 - Resultado das acurácias médias para cada fold

<i>Fold</i>		1	2	3	4	5
Acurácia Média	Treinamento	0.8693	0.8572	0.8961	0.8686	0.8592
	Teste	0.8510	0.9154	0.8377	0.8386	0.9095
	Status	Modelo adequado				

Fonte: produzido pelo autor

Considerando o *underfitting* e o *overfitting*, limiares foram estabelecidos em 0,85 e 0,95, respectivamente, para garantir um equilíbrio entre a simplicidade e complexidade do modelo. A Figura 7 ilustra a curva de aprendizado para K-Fold com esses limiares, evidenciando a progressão do modelo em relação aos dados reais.

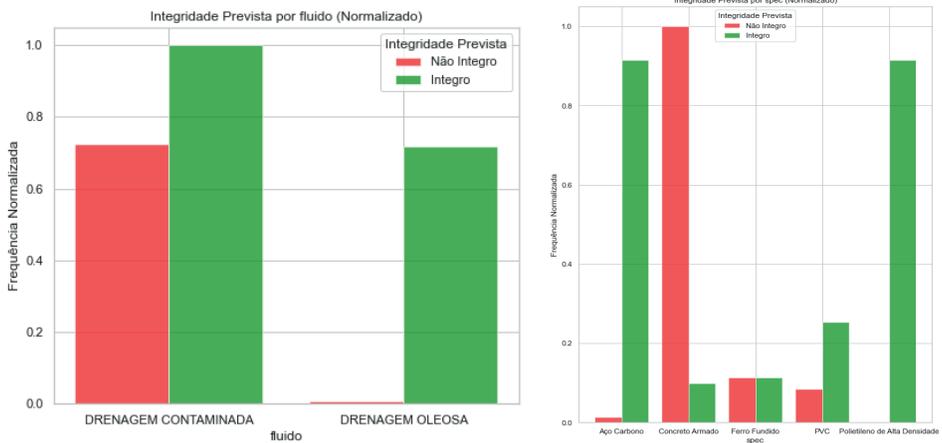
Figura 7 – Curva de aprendizado para Kfold com limiares de *under* e *overfitting*



Fonte: produzido pelo autor

A análise das previsões realizadas pela RNA revelou tendências interessantes, como o alto número de tubulações previstas como não íntegras para o material concreto armado, conforme mostrado na Figura 8. Do mesmo modo, as previsões indicaram um maior número de tubulações previstas como íntegras para as tubulações de drenagem oleosa, comparadas às de drenagem contaminada, como evidenciado na Figura 9.

Figuras 8 e 9 – Relação entre o estado de integridade prevista e o material da tubulação (normalizado) e Relação entre o estado de integridade prevista e o tipo de fluido (normalizado)



Fonte: produzido pelo autor

Em suma, as previsões realizadas pela RNA corroboraram as tendências identificadas na análise exploratória dos dados, validando os padrões observados. Esses resultados destacam a eficácia do modelo desenvolvido para prever a integridade das tubulações, considerando diversos atributos como material e tipo de fluido. O uso da RNA como ferramenta de previsão mostra seu potencial para auxiliar na manutenção e gestão de sistemas de tubulações industriais, possibilitando a tomada de decisões mais informadas e eficazes. Essa abordagem oferece informações para a identificação precoce de problemas de integridade, permitindo a implementação de ações preventivas e estratégias de manutenção baseadas em dados confiáveis e previsões precisas.

3 . CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi abordada a avaliação da integridade das tubulações industriais por meio da aplicação de métodos de teste de estanquidade e vídeo inspeção, com o intuito de contribuir para a gestão eficaz desses sistemas críticos. A classificação das tubulações em “Integras” e “Não Integras” com base em procedimentos internos proporcionou uma base sólida para a análise subsequente.

A construção de uma Rede Neural Artificial (RNA) customizada, desenvolvida pelo autor deste artigo, demonstrou um compromisso em criar uma ferramenta precisa e adaptada às necessidades específicas da avaliação da integridade das tubulações de drenagem industrial. A configuração cuidadosa da RNA, incluindo a definição da arquitetura da rede, a implementação de técnicas de regularização L2 e a seleção de parâmetros, estabeleceram as bases para um modelo robusto e confiável.

A metodologia adotada, que emprega validação cruzada Stratified K-Fold, destacou-se como uma abordagem eficaz para avaliar o desempenho do modelo em um conjunto de dados desequilibrado. Essa técnica garantiu que a distribuição das classes “Integras” e “Não Integras” fosse mantida em cada etapa, evitando vieses na avaliação do modelo.

A análise exploratória dos dados permitiu a identificação de padrões e relações entre os atributos das tubulações e seu estado de integridade, enriquecendo a compreensão do problema. A escolha do Multi-Layer Perceptron (MLP) como arquitetura de RNA, juntamente com a seleção criteriosa dos parâmetros, consolidou a construção de um modelo capaz de capturar complexidades nos dados.

Os resultados obtidos comprovaram a eficácia do modelo, com uma acurácia média de teste variando entre aproximadamente 83,77% a 91,54%. A consistência entre diferentes folds demonstrou a robustez do modelo, indicando sua capacidade de generalização para diferentes subconjuntos de dados. A definição de limiares de *underfitting* e *overfitting* contribuiu para alcançar um equilíbrio entre simplicidade e complexidade do modelo.

As previsões geradas pela RNA corroboraram as tendências identificadas na análise exploratória dos dados, reforçando a importância do material das tubulações, do tipo de fluido e do diâmetro na determinação de sua integridade.

Portanto, a abordagem proposta neste estudo, que combina técnicas de inspeção física, análise exploratória de dados e modelagem com RNA, representa uma contribuição valiosa para a manutenção e gestão de sistemas de tubulações industriais. Esta pesquisa abre caminho para um gerenciamento mais eficaz e seguro das tubulações industriais, sobretudo em avaliar a condição de integridade com diferentes parâmetros envolvidos, contribuindo para a segurança e confiabilidade das operações industriais.

4 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KARDEC, Alan; LAFRAIA, João Ricardo. **Gestão Estratégica e Confiabilidade**. [S. l.]: Qualitymark, 2009. ISBN 978-8573037326.

LAFRAIA, João Ricardo. **Aplicação da análise de sobrevivência ao estudo da confiabilidade do sistema de abastecimento de água de Curitiba**. [S. l.]: Universidade Federal do Paraná, 2001.

A. ELSAYED, Elsayed. **Reliability Engineering**. [S. l.]: Prentice Hall, 1992. ISBN 978-0201634815.

HAYKIN, Simon. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. USA: Macmillan, 1994.

FLOGIATTO, Flavio S.; DA SILVEIRA, Giovani J.C. **Administração da produção e operações: conceitos, modelos e exemplos**. [S. l.]: Bookman Editora, 2006.

DA SILVA, Ivan Nunes; SPATTI, Danilo Hernane; FLAUSINO, Rogerio Andrade. **Redes Neurais Artificiais Para Engenharia e Ciencias Aplicadas: Fundamentos Teoricos e Aspectos Praticos**. [S. l.]: Artliber, 2020.