

ANÁLISE QUALITATIVA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÕES DOS SISTEMAS
DE UM PWR TÍPICO POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Victor Hugo Moreno Lourenço

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA DE REATORES.

Orientadores: Prof. Antônio Carlos de Abreu Mól (PPGIEN/CNEN)
Prof. Celso Marcelo Franklin Lapa (PPGIEN/CNEN)

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

Fevereiro de 2010

LOUR

Lourenço, Victor Hugo Moreno.

Análise qualitativa da política de manutenções dos sistemas de um PWR típico por redes neurais artificiais /
Victor Hugo Moreno Lourenço – Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2010.

XII, 77f.: il.; 29,7 cm

Orientadores: *Antônio Carlos de Abreu Mol e Celso Marcelo Franklin Lapa*

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Reatores) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2010.

1. Política de Manutenções. 2. Redes Neurais 3. PWR 4. Análise de Segurança. I. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Reatores. II. Título.

CDD

CDU

ANÁLISE QUALITATIVA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÕES DOS SISTEMAS
DE UM PWR TÍPICO POR REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS

Victor Hugo Moreno Lourenço

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
CIÊNCIA E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA
NUCLEAR DA COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR – ÊNFASE PROFISSIONAL EM
ENGENHARIA DE REATORES.

Aprovada por:

Prof.: Antônio Carlos de Abreu Mol, D.Sc
(Orientador)

Prof.: Celso Marcelo Franklin Lapa, D.Sc
(Orientador)

Prof.: Cláudio Márcio do N.A. Pereira, D.Sc

Prof.: João Jorge da Cunha, D.Sc

Dedicatória:

A Deus por me amparar nos momentos difíceis, que ocorreram e que estão por vir.

Ao povo brasileiro por custear meus estudos, mesmo não tendo consciência muitas vezes de tal fato.

A Adriano, Hugo, Maria e Nadir, meus queridos avós, que já se foram, mas que, sem os quais eu não poderia chegar aqui até hoje.

E a todos que ajudaram e não ajudaram, por mexer com meus brios e que não me recordo no momento. Inestimável a ajuda “invisível” de todos vocês.

Agradecimentos:

À minha família por me forjar da maneira como sou – para qualquer lado que possamos encarar.

Aos bons amigos de trabalho na Eletrobrás Termonuclear S.A. – ELETRONUCLEAR, com os quais aprendi, e venho aprendendo muito.

Aos bons amigos de diversões, por alegrar a vida, quando a mesma pareceu tão triste.

Aos bons amigos do PPGIEN, pelo companheirismo e por dividirmos a luta pelo objetivo a ser alcançado.

A todos os professores do curso de Mestrado do IEN/CNEN por sua inestimável contribuição intelectual para a minha formação.

Aos meus orientadores, em especial, Professores Antônio Carlos de Abreu Mól e Celso Marcelo Franklin Lapa, por terem me conduzido pacientemente pelo caminho para construir o trabalho que aqui se apresenta.

E por fim, mas não menos, a todos, cujos nomes não me recordo no momento, que puderam dar sua contribuição durante o turbulento processo de construção do conhecimento que aqui se apresenta materialmente.

Resumo da dissertação apresentada ao PPGIEN/CNEN como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Ciências (M. Sc.)

ANÁLISE QUALITATIVA DA POLÍTICA DE MANUTENÇÕES DOS SISTEMAS DE UM PWR TÍPICO POR REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Victor Hugo Moreno Lourenço

Fevereiro/2009

Orientadores: Antônio Carlos de Abreu Mól

Celso Marcelo Franklin Lapa

Programa: Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do IEN

Procedimentos e técnicas para maximizar a confiabilidade e a disponibilidade de plantas industriais têm sido usados ao longo das últimas décadas por especialistas e profissionais de manutenção. Contudo, a extensão dos modernos sistemas industriais e a crescente complexidade e interdependência entre seus componentes vêm tornando o planejamento desta atividade uma tarefa cada vez mais difícil. Considerando este contexto, o objetivo do presente trabalho é oferecer uma ferramenta computacional que possa auxiliar na tomada de decisão e no planejamento das políticas de manutenção praticadas em plantas term nucleares. A ferramenta desenvolvida baseia-se na utilização de redes neurais artificiais (RNA) para o reconhecimento de padrões e estabelecimento de correlações entre eventos ocorridos nos componentes de sistemas típicos de reatores pressurizados refrigerados a água leve (PWR). As RNA atuam como mineradoras de dados nos bancos de eventos de falhas e são capazes de identificar ligações e estabelecer inferências imperceptíveis até para os mais experientes especialistas em manutenção de sistemas nucleares. Os resultados foram obtidos a partir de dados realistas e são confrontados com as clássicas políticas de manutenção

atualmente praticadas em centrais tipo PWR. Estes resultados demonstram a solidez da técnica em avaliar e prever falhas em uma planta real, podendo vir a ser utilizada como ferramenta de suporte a decisão no planejamento das políticas de manutenção de um PWR típico.

Abstract of the dissertation presented to PPGIEN/CNEN as part of the necessary requirements for obtaining of Master's degree in Sciences (M. Sc.)

QUALITATIVE ANALYSIS OF THE MAINTENANCES' POLITICS OF THE
SYSTEMS OF A TYPICAL PWR BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS

Victor Hugo Moreno Lourenço

Fevereiro/2010

Advisor: Antônio Carlos de Abreu Mol
Celso Marcelo Franklin Lapa

Program: Program of Master's degree in Science and Technology Nuclear of IEN

Proceedings and techniques in order to maximize the reliability and the availability of industrial plants have been used along the last decades by specialists and professionals of maintenance. However, the modern industrial systems' sizing, and the increasing complexity and interdependence among its components have become this activity's planning a more and more difficult task. Considering this scenario, the objective of the present work is to provide a computational tool which is able to help about the taking decision's task, and about planning policies of maintenance practiced in thermonuclear plants. The tool developed is based on the artificial neural networks (ANN) for the recognition of standards and establishment of correlations among events occurred in the components of pressurized water reactor (PWR) typical systems. The ANN work as miners of database of failure events, and are able to identify connections and to establish imperceptible inferences even for the most experienced specialists in maintenance of nuclear systems. The results were attained from realistic data and are confronted against the maintenance's classic policies which are practiced nowadays on PWR thermonuclear plants. These results show the solidity of the technique in valuing and predicting failures in a real powerplant, and is able to be used as a tool for supporting decisions about planning maintenance policies on a typical PWR.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contextualização do Problema	13
1.2. Contribuições e Objetivos	17
2. MANUTENÇÃO EM SISTEMAS ELETROMECAÑICOS	18
2.1. Introdução	18
2.2. Histórico	19
2.3. Conceitos e Objetivos	20
2.4. Serviços de rotina e serviços periódicos	20
2.5. Manutenção	22
2.5.1. Manutenção planejada	22
2.5.1.1. Manutenção preventiva	22
2.5.1.2. Manutenção preditiva	24
2.5.1.3. Manutenção produtiva total	25
2.5.1.3.1. A origem da Manutenção produtiva total	25
2.5.1.3.2. Objetivos da Manutenção produtiva total	27
2.5.1.3.3. Manutenção autônoma	30
2.5.1.3.4. Efeitos da manutenção produtiva total na melhoria dos recursos humanos	31
2.5.1.4. Terotecnologia	31

2.5.2. Manutenção não planejada	32
2.5.2.1. Manutenção corretiva	32
2.5.2.2. Manutenção de ocasião	32
2.5.3. Evolução do conceito de manutenção	32
2.5.4. Manutenção centrada em confiabilidade	33
2.5.4.1. Definições	33
2.5.4.1.1. Componente	33
2.5.4.1.2. Trecho funcional	33
2.5.4.1.3. Sistema	33
2.5.5. Engenharia de confiabilidade	36
3. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	38
3.1. Introdução	38
3.2. Histórico	39
3.3. Neurônio biológico	41
3.4. Neurônio artificial	43
3.5. Topologia das Redes Neurais Artificiais	44
3.5.1. Redes não-recursivas	44
3.5.1.1. Redes alimentadas com camada única	44
3.5.1.2. Redes alimentadas com múltiplas camadas	45
3.5.2. Redes recursivas	45
3.5.3. Redes totalmente conectadas e parcialmente conectadas	46

3.6. Aprendizado de redes neurais artificiais	46
3.6.1. Treinamento supervisionado	47
3.6.2. Treinamento não-supervisionado	47
3.7. Treinamento <i>backpropagation</i>	48
3.8. Redes Neurais de regressão genérica	49
4. METODOLOGIA	52
4.1. Introdução	52
4.1.1. Definições	52
4.1.2. Informações para o treinamento da rede neural artificial	54
4.2. Dependência e inter-relação entre componentes	55
4.3. Implantação do método no sistema	60
5. ESTUDO DE CASO E RESULTADOS OBTIDOS	62
5.1. Introdução	62
5.1.1. Critério de escolha	62
5.1.2. Informações para aplicação no problema	63
5.2. Informações para o treinamento da rede neural artificial	64
5.3. Aplicação de dados à rede neural artificial	69
5.3.1. Convenções para aplicação e compreensão de dados de entrada e saída	74
5.4. Dependência e inter-relação entre componentes	75
5.4.1. Identificação dos componentes em seus trechos	78
5.5. Interpretação de resultados e conclusões	83

6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	84
6.1. Conclusões	84
6.2. Recomendações e perspectivas futuras	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Neste capítulo, é apresentada, inicialmente, uma breve descrição do problema a ser estudado, bem como uma revisão bibliográfica das contribuições técnicas e científicas na área de interesse nos últimos anos. À luz da contextualização do problema, são apresentados os objetivos da tese e, finalmente, são destacadas as contribuições do trabalho.

1.1. Contextualização do Problema:

Componentes industriais eletromecânicos ativos experimentam durante sua vida operacional um padrão de comportamento no que se refere à evolução de sua taxa de falha. Imediatamente após sua entrada em operação, tais componentes apresentam elevadas taxas de falhas, porém, estes valores caem rapidamente com o tempo de operação. Este período é conhecido como faixa de mortalidade infantil. Um amaciamento, freqüentemente executado pelo fabricante, elimina esta fase da vida operacional do componente. Posteriormente, estes adentram uma etapa na qual a taxa de falha é constante com o tempo. Esta etapa compreende o momento ideal para o início da utilização destes componentes. Finalmente, em decorrência do uso, a taxa de falha destes componentes tende a apresentar um crescimento. Este processo decorre do desgaste operacional e do envelhecimento físico e estrutural da utilização de qualquer componente industrial. Nesta etapa diz-se que o componente (peça, motor, bomba, etc.) está envelhecendo.

As centrais nucleares de potência estão repletas de componentes eletromecânicos ativos e estes, apresentam logo após a fase de mortalidade infantil um padrão de crescimento

progressivo da taxa de falha que pode levar a não-confiabilidade destas instalações a níveis proibitivos. Portanto, medidas que minimizem as conseqüências dos efeitos do envelhecimento decorrente do uso são muito importantes para o bom e seguro funcionamento da instalação. Para tal, nas últimas décadas têm-se estabelecido políticas de manutenção preventiva centrada em confiabilidade para cada um dos componentes integrantes dos sistemas pertencentes a centrais nucleares, com o objetivo de se minimizar, tanto quanto possível, o seu desgaste operacional.

Visando dar suporte teórico, minimizar custos e melhorar os efeitos operacionais das políticas de manutenção preventivas praticada pelas centrais nucleares, as comunidades científicas nacional e internacionais têm atuado intensamente na elaboração de métodos e ferramentas computacionais. As principais iniciativas neste sentido são destacadas nos parágrafos seguintes.

Após um breve período de propostas teóricas sem maior aplicabilidade prática na indústria, com o desenvolvimento da capacidade de processamento dos computadores, a partir de meados dos anos 90, pesquisadores e engenheiros fizeram aplicações de técnicas tradicionais oriundas da análise probabilística de segurança, até então modestamente aplicadas na indústria petroquímica e aeroespacial, para tratar o problema da otimização da política de manutenção preventiva considerando as peculiaridades de outras instalações industriais (HILSMEIER e ALDEMIR, 1995; VAURIO, 1997), apesar de pioneiros, estes modelos apresentavam apenas uma comparação entre os modelos empregados e testes entre algumas políticas padrão (MARTORREL *et alii*, 1996 e DUTHIE *et alii*, 1998). Outra vertente, como a proposta por VAN NOORTWIJK *et alii* (1992) aplicava o conhecimento especialista para a

determinação de políticas de manutenção. Outros, para fugir das dificuldades de otimização em um grande espaço de busca abordavam problemas de intervenção para manutenções ou testes em sistemas com poucos componentes (HARUZZAMAN e ALDEMIR, 1996; BILLINTON e PAN, 1998). RAJE *et alii* (2000) seguiram a mesma linha abordando problemas envolvendo sistemas em *stand-by*, sujeitos a testes periódicos. PARK *et alii* (2000) contribuíram para a solução desta classe de problemas incluindo componentes com baixíssimo grau de degradação. CHIANG e YANG (2001), recentemente, trataram problemas de otimização de manutenção obtendo a disponibilidade dos sistemas por métodos markovianos. Finalmente, DIJKHUIZEN e HEIJDEN (1999) optaram por otimizar a distribuição de intervalos de disponibilidade em substituição à otimização da política de manutenção preventiva. Todos estes autores, contudo, em decorrência da opção por casos exemplos envolvendo sistemas muitos pequenos ou métodos probabilísticos menos complexos não tiveram maiores dificuldades do ponto de vista da otimização. Na verdade, entretanto, os sistemas nucleares, especialmente aqueles ligados à segurança, são repletos de redundâncias e possuem uma grande quantidade de componentes com várias alternativas de combinação e alinhamento entre si. Como já comentado, o estabelecimento de uma política de manutenção considerando um sistema com estas características é um problema extremamente complexo. Neste momento, estava clara a necessidade da utilização de técnicas de otimização mais poderosas e adequadas para se chegar a uma combinação ótima entre todos os parâmetros do problema. No final dos anos noventa, foi publicado o primeiro trabalho que propunha a utilização dos algoritmos genéticos (AG) como ferramenta de otimização em problemas de agendamento de manutenções (MUÑOZ *et alii*, 1997). Algum tempo depois, foram publicados trabalhos com avanços na modelagem probabilística (LAPA *et alii*, 2000) e genética (LAPA *et alii*, 2002 *et*

Lapa *et alli*, 2006) no tratamento de problemas de otimização de políticas de manutenção. Estes trabalhos propunham que o objetivo das buscas para a otimização não seria mais a obtenção das frequências ótimas de reparos, mas permitiam agora, que a ferramenta de otimização procurasse quantas, e em que instantes livres no tempo, dever-se-iam realizar manutenções preventivas.

Não obstante as vantagens destas novas modelagens e seus inequívocos ganhos para o desempenho e a confiabilidade dos sistemas nucleares, todas, sem exceção, desconsideram um importante fenômeno comum em sistemas complexos. A não operabilidade de um sistema ou componente não necessariamente tem suas causas raízes ligadas a este componente específico, e, portanto de nada adianta uma ótima política de manutenções centrada na confiabilidade daquele componente. Por exemplo: seja uma bomba, que esteja inserida em um determinado trecho funcional complexo. Obviamente, para que a bomba realize sua função (que é a de transferir energia para o fluido que por ela passa), é necessária a existência de vários outros equipamentos no mesmo trecho funcional. O motor elétrico que aciona a bomba, por exemplo. Equipamentos de instrumentação para medição de temperatura, vazão, pressão ou outras grandezas, no motor, na bomba, nos mancais onde os mesmos estão apoiados. Eventualmente, a bomba pára de realizar a função para qual foi projetada. Posteriormente, ao analisar-se a bomba, verifica-se que a mesma estava em perfeito estado. Mas com um estudo mais profundo, verificou-se que um dos instrumentos de medição de temperatura falhou e foi determinante para que todo o trecho funcional deixasse de efetuar sua função (no caso, a bomba realizar a sua própria função como equipamento). Neste caso, todas as técnicas até então propostas atuariam diretamente na melhoria da política de manutenções preventivas do componente que falhou, o que

como podemos pressupor, de nada adiantaria. Pode-se acrescentar, a esse exemplo, outras situações diversas de falhas cruzadas, sistemas redundantes sujeitos a falhas de causa comum, não operabilidade de um componente que sobrecarrega, de forma incógnita, outro, etc...

1.2. Contribuições e Objetivos:

Considerando o supracitado, este trabalho propõe uma nova metodologia que seja capaz de identificar relações e interdependências entre componentes que possam propiciar falhas não diretamente relacionadas, e relações cruzadas de causa e efeito entre componentes de um mesmo sistema.

A técnica desenvolvida poderá contribuir de forma distintiva para o planejamento das políticas de manutenção preventiva em centrais nucleares por acrescentar ao cenário de eventos, informações que poderiam permanecer incógnitas numa análise tradicional centrada no componente específico.

Além da contribuição tecnológica citada no parágrafo anterior, do ponto de vista acadêmico científico, a aplicação de redes neurais artificiais (RNA) nos bancos de dados de eventos de falhas com o objetivo de garimpar informações não evidentes e estabelecer inferências que nem mesmo os especialistas mais treinados poderiam enxergar, é uma típica aplicação das técnicas da inteligência artificial e constitui-se numa contribuição original no contexto da engenharia nuclear.

CAPÍTULO 2 – MANUTENÇÃO EM SISTEMAS ELETROMECCÂNICOS

2.1. Introdução:

A competição econômica acirrada que o mundo vem experimentando, em vários campos, tem levado à busca da qualidade total em serviços, produtos, gerenciamento ambiental e segurança, que passaram a ser a meta de todas as empresas. Vários exemplos podem ser expostos, tais como: disponibilidade de máquina, aumento da competitividade, aumento da lucratividade, satisfação dos clientes, produtos com defeito zero, segurança nas instalações fabris, de processo, de geração de potência, entre outras. E para atingir a qualidade total em serviços, produtos, gerenciamento ambiental e segurança, se faz necessário estabelecer um rigoroso cronograma de fabricação (no caso de plantas fabris), de processamento (no caso de plantas de processo), de disponibilidade de geração (no caso de plantas de geração de potência), entre outras (FILHO, 2001). E se não houver um bom programa de manutenção, os prejuízos serão inevitáveis, pois máquinas e equipamentos com defeitos ou quebradas causarão:

- Diminuição ou interrupção da produção;
- Atrasos nas entregas;
- Perdas financeiras;
- Aumento dos custos;
- Indisponibilidade da planta para sua função;
- Insatisfação dos clientes;
- Perda de mercado.

Para evitar o colapso da instalação industrial, deve-se, obrigatoriamente, definir um programa de manutenção com métodos preventivos a fim de obter os produtos ou

serviços nas quantidades previamente estabelecidas e com qualidade. Também se deve incluir, no programa, as ferramentas a serem utilizadas e a previsão da vida útil de cada elemento das máquinas. Todos esses aspectos mostram a importância que se deve dar à manutenção (FILHO, 2001).

2.2. Histórico:

A manutenção, embora tenha passada despercebida, sempre existiu, mesmo nas épocas mais remotas. Começou a ser conhecida com o nome de manutenção por volta do século XVI na Europa central, juntamente com o surgimento do relógio mecânico, quando surgiram os primeiros técnicos em montagem e assistência. Tomou corpo ao longo da Revolução Industrial e firmou-se, como necessidade absoluta, na Segunda Guerra Mundial. No princípio da reconstrução pós-guerra, Inglaterra, Alemanha, Itália e principalmente o Japão alicerçaram seu desempenho industrial nas bases da engenharia e manutenção (FILHO, 2001).

Nos últimos anos, com a intensa concorrência, os prazos de entrega dos produtos passaram a ser relevantes para todas as empresas. Com isso, surgiu a motivação para se prevenir contra as falhas de máquinas e equipamentos. Essa motivação deu origem à manutenção preventiva (FILHO, 2001).

Em suma, nos últimos vinte anos é que tem havido preocupação de técnicos e empresários para o desenvolvimento de técnicas específicas para melhorar o complexo sistema Homem/Máquina/Serviço.

2.3. Conceito e objetivos:

Pode-se entender manutenção como o conjunto de cuidados técnicos indispensáveis ao funcionamento regular e permanente de máquinas, equipamentos, ferramentas e instalações. Esses cuidados envolvem a conservação, a adequação, a restauração, a substituição e a prevenção. Por exemplo, quando se mantêm as engrenagens lubrificadas, está-se por conservá-las. Se se estiver retificando uma mesa de desempenho, estar-se-á a restaurá-la. Se se troca o conector de um cabo elétrico, estar-se-á a substituí-lo (FILHO, 2001).

De modo geral, a manutenção em uma empresa tem como objetivos (EPRI TR-1000806):

- Manter equipamentos e máquinas em condições de pleno funcionamento para garantir a produção normal e a qualidade dos produtos e serviços;
- Prevenir prováveis falhas ou quebras dos elementos das máquinas.

Alcançar esses objetivos requer manutenção diária em serviços de rotina e de reparos periódicos programados.

A manutenção ideal de uma máquina é a que permite alta disponibilidade para a produção durante todo o tempo em que ela estiver em serviço e a um custo adequado (MOUBRAY, 2001).

2.4. Serviços de rotina e serviços periódicos:

Os serviços de rotina constam de inspeção e verificação das condições técnicas das unidades das máquinas. A detecção e a identificação de pequenos defeitos dos

elementos das máquinas, a verificação dos sistemas de lubrificação e a constatação de falhas de ajustes são exemplos dos serviços da manutenção de rotina (LAFRAIA, 2001).

A responsabilidade pelos serviços de rotina não é somente das equipes de manutenção, mas também de todos os operadores de máquinas (a operação de uma planta de processo ou de geração de potência, por exemplo) (MOUBRAY, 2001).

Os serviços periódicos de manutenção consistem de vários procedimentos que visam manter máquinas e equipamentos em perfeito estado de funcionamento.

Esses procedimentos envolvem várias operações (LAFRAIA, 2001):

- Monitorar as partes da máquina sujeita a maiores desgastes;
- Ajustar ou trocar componentes em períodos predeterminados;
- Examinar componentes antes do término de suas garantias;
- Re-planejar, se necessário, o programa de prevenção;
- Testar os componentes elétricos etc.

Os serviços periódicos de manutenção podem ser feitos durante paradas longas das máquinas, quando da ocasião de paradas planejadas da planta, ou durante a parada programada das máquinas para a execução de manutenção preventiva.

As paradas programadas visam à desmontagem completa da máquina para exame de suas partes e conjuntos. As partes danificadas, após exame, são recondicionadas ou substituídas. A seguir, a máquina é novamente montada e testada para assegurar a qualidade exigida em seu desempenho (MOUBRAY, 2001).

O acompanhamento e o registro do estado da máquina, bem como dos reparos feitos, são fatores importantes em qualquer programa de manutenção (PINTO e XAVIER, 2001).

2.5. Manutenção:

Há dois tipos de manutenção: a planejada e a não planejada.

A manutenção planejada classifica-se em quatro categorias: Preventiva, Preditiva, Manutenção Produtiva Total (MPT) (*Total Productive Maintenance - TPM*) e Terotecnologia (FILHO, 2001).

A manutenção não planejada classifica-se em duas categorias: a corretiva e a de ocasião.

2.5.1. Manutenção planejada:

Como dito, a manutenção planejada divide-se em 4 categorias, a saber:

2.5.1.1. Manutenção preventiva:

A manutenção preventiva consiste no conjunto de procedimentos e ações antecipadas que visam aumentar a disponibilidade da máquina em funcionamento e minimizar a probabilidade de falhas na mesma (FILHO, 2001).

A manutenção preventiva (na história da engenharia de manutenção, pode-se dizer que foi um salto “quântico” para a indústria em termos de produtividade, mas mostrou também seus pontos fracos – quando empregada de maneira equivocada): é estruturada com base no tempo, ou seja, a intervenção em períodos regulares pré-estabelecidos para

se evitar uma falha catastrófica, especialmente em equipamentos cuja segurança, confiabilidade e disponibilidade não podem e nem devem ser afetados (FILHO, 2001).

Historicamente, a manutenção preventiva teve sua origem nos Estados Unidos e foi introduzida no Japão em 1950.

Até então, a indústria japonesa trabalhava apenas com o conceito de manutenção corretiva, após a falha da máquina ou equipamento. Isso representava um custo e um obstáculo para a melhoria da qualidade (PINTO e XAVIER, 2001).

A primeira indústria japonesa a aplicar e obter os efeitos do conceito de manutenção preventiva, também chamada de PM (*preventive maintenance*) foi a Toa Nenryo Kogyo, em 1951. São dessa época as primeiras discussões a respeito da importância da manutenibilidade e suas conseqüências para o trabalho de manutenção.

Na busca de maior eficiência da manutenção produtiva, por meio de um sistema compreensivo, baseado no respeito individual e na total participação dos empregados, surgiu a MPT, em 1970, no Japão (SIQUEIRA, 2005).

Nessa época era comum:

- Avanço na automação industrial;
- Busca em termos da melhoria da qualidade;
- Aumento da concorrência empresarial;
- Emprego do sistema “just-in-time”;
- Maior consciência de preservação ambiental e conservação de energia;

- Dificuldades de recrutamento de mão-de-obra para trabalhos considerados sujos, pesados ou perigosos;
- Aumento da gestão participativa e surgimento do operário polivalente.

Todas essas ocorrências contribuíram para o aparecimento da MPT.

2.5.1.2. Manutenção preditiva:

A manutenção preditiva é um tipo de ação preventiva baseada no conhecimento das condições de cada um dos componentes das máquinas e equipamentos. Esses dados são obtidos por meio de um acompanhamento do desgaste de peças vitais de conjuntos de máquinas e de equipamentos. Testes periódicos efetuados para determinar a época adequada, ou monitoramento constante para detecção de anormalidades no funcionamento, para substituições ou reparos de peças. Exemplos: análise de vibrações, monitoramento de mancais e termografia de partes elétricas (FILHO, 2001).

Aprofundando no conceito de manutenção preditiva (mais outro salto – baseado em alta tecnologia): monitoramento *on line* de equipamentos; acompanhamento de tendências, análises (termográfica, de vibração, de lubrificantes – e particulados existentes nos mesmos), equipamentos e programas de computador para diagnósticos de falhas, para tentar se evitar ao máximo uma intervenção equivocada – mas também esbarra na problemática da escassez de dados, aleatoriedade dos mesmos, e, principalmente, no fator humano de julgamento daqueles dados. Entretanto, em que pese parecer essa forma de manutenção ser o estado da arte em matéria de manutenção, e de certa forma o é, pois é aplicada em equipamentos em que, tanto a segurança, quanto a disponibilidade, a confiabilidade e o custo operacional de parada, e de manutenção corretiva do mesmo

serem elevados, a não aplicação correta da mesma, pode levar a resultados desastrosos. (FILHO, 2001).

2.5.1.3. Manutenção produtiva total (MPT):

A MPT (manutenção produtiva total) foi desenvolvida no Japão. É um modelo calcado no conceito “de minha máquina, cuidado eu” (MOUBRAY, 2001). Como durante muito tempo as indústrias funcionaram com o sistema de manutenção corretiva, isso resultava em desperdícios, re-trabalhos, perda de tempo e de esforços humanos, além de prejuízos financeiros.

A partir de uma análise desse problema, passou-se a dar ênfase na manutenção preventiva. Com enfoque nesse tipo de manutenção, foi desenvolvido o conceito de manutenção produtiva total, conhecido pela sigla, em língua inglesa, TPM (*Total Productive Maintenance*), que inclui programas de manutenção preventiva e preditiva (MOUBRAY, 2001).

2.5.1.3.1. A origem da MPT:

Em 1960, ocorre o reconhecimento da importância da manutenibilidade e da confiabilidade como sendo pontos-chave para a melhoria da eficiência das empresas. Surgiu, assim, a manutenção preventiva, ou seja, o enfoque da manutenção passou a ser o de assegurar a confiança no setor produtivo quanto à qualidade do serviço de manutenção realizado (PINTO e XAVIER, 2001).

A empresa usuária da máquina se preocupava em valorizar e manter o seu patrimônio, pensando em termos de custo do ciclo de vida da máquina ou equipamento. No mesmo período, surgiram outras teorias com os mesmos objetivos (SIQUEIRA, 2005).

Os cinco pilares da MPT são as bases sobre as quais se construiu um programa de manutenção produtiva total, envolvendo toda a empresa e habilitando-a para encontrar metas, tais como defeito zero, falhas zero, aumento da disponibilidade de equipamento e lucratividade (SLACK, 1997).

Esquemáticamente:

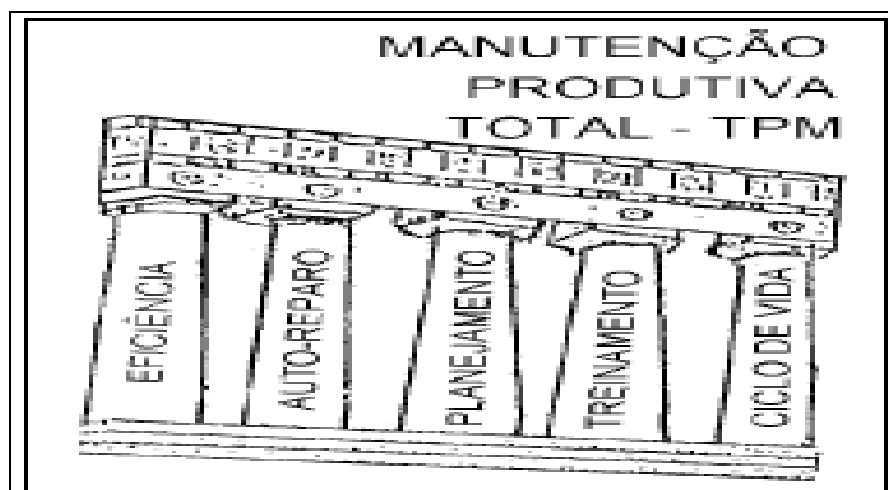


Figura 2.1 – Base da manutenção produtiva total

A MPT está baseada nos seguintes princípios:

- Atividades que aumentam a eficiência do equipamento (eficiência).
- Estabelecimento de um sistema de manutenção autônomo pelos operadores (auto-reparo).
- Estabelecimento de um sistema planejado de manutenção (planejamento).

- Estabelecimento de um sistema de treinamento objetivando aumentar as habilidades técnicas do pessoal (treinamento).
- Estabelecimento de um sistema de gerenciamento do equipamento (ciclo de vida).

2.5.1.3.2. Objetivos da MPT:

O objetivo global da MPT é a melhoria da estrutura da empresa em termos materiais (máquinas, equipamentos, ferramentas, matéria-prima, produtos etc.) e em termos humanos (aprimoramento das capacitações pessoais envolvendo conhecimentos, habilidades e atitudes). A meta a ser alcançada é o rendimento operacional global (SLACK, 1997).

As melhorias devem ser conseguidas por meio dos seguintes passos:

- Capacitar os operadores para conduzir a manutenção de forma voluntária.
- Capacitar os mantenedores a serem polivalentes, isto é, atuarem em equipamentos mecatrônicos.
- Capacitar os engenheiros a projetarem equipamentos que dispensem manutenção, isto é, o “ideal” da máquina descartável.
- Incentivar estudos e sugestões para modificação dos equipamentos existentes a fim de melhorar seu rendimento.
- Aplicar o programa dos oito S:
 1. *Seiri* = organização; implica eliminar o supérfluo.
 2. *Seiton* = arrumação; implica identificar e colocar tudo em ordem .
 3. *Seiso* = limpeza; implica limpar sempre e não sujar.

4. *Seiketsu* = padronização; implica manter a arrumação, limpeza e ordem em tudo.

5. *Shitsuke* = disciplina; implica a autodisciplina para fazer tudo espontaneamente.

6. *Shido* = treinar; implica a busca constante de capacitação pessoal.

7. *Seison* = eliminar as perdas.

8. *Shikari yaro* = realizar com determinação e união.

- Eliminar as seis grandes perdas:

1. Perdas por quebra.

2. Perdas por demora na troca de ferramentas e regulagem.

3. Perdas por operação em vazio (espera).

4. Perdas por redução da velocidade em relação ao padrão normal.

5. Perdas por defeitos de produção.

6. Perdas por queda de rendimento.

- Aplicar as cinco medidas para obtenção da “quebra zero”:

1. Estruturação das condições básicas.

2. Obediência às condições de uso.

3. Regeneração do envelhecimento.

4. Saneamento das falhas do projeto (terotecnologia).

5. Incremento da capacitação técnica.

A idéia da “quebra zero” baseia-se no conceito de que a quebra é a falha visível. A falha visível é causada por uma coleção de falhas não visíveis.



Figura 2.2 – Fatores contribuintes para a falha

Logo, se os operadores e mantenedores estiverem conscientes de que devem evitar as falhas não visíveis, a quebra deixará de ocorrer.

As falhas não visíveis normalmente deixam de ser detectadas por motivos físicos e psicológicos.

- Motivos físicos:

As falhas não são visíveis por estarem em local de difícil acesso ou encobertas por detritos e sujeiras.

- Motivos psicológicos:

As falhas deixam de ser detectadas devido à falta de interesse ou de capacitação dos operadores ou mantenedores.

2.5.1.3.3. Manutenção autônoma (MT):

Na MT os operadores são treinados para supervisionarem e atuarem como mantenedores em primeiro nível. Os mantenedores específicos são chamados quando os operadores de primeiro nível não conseguem solucionar o problema.

Assim, cada operador assume suas atribuições de modo que, tanto a manutenção preventiva, como a de rotina, esteja constantemente em ação (SLACK, 1997).

Segue uma relação de suas principais atividades:

- Operação correta de máquinas e equipamentos.
- Aplicação dos oito S.
- Registro diário das ocorrências e ações.
- Inspeção autônoma.
- Monitoração com base nos seguintes sentidos humanos: visão, audição, olfato e tato.
- Lubrificação.
- Elaboração de padrões (procedimentos).
- Execução de regulagens simples.
- Execução de reparos simples.
- Execução de testes simples.
- Aplicação de manutenção preventiva simples.
- Preparação simples (*set-up*).
- Participação em treinamentos e em grupos de trabalho.

2.5.1.3.4. Efeitos da MPT na melhoria dos recursos humanos:

Na forma como é proposta, a MPT oferece plenas condições para o desenvolvimento das pessoas que atuam em empresas preocupadas com manutenção. A participação de todos os envolvidos com manutenção resulta nos seguintes benefícios:

- Realização (autoconfiança).
- Aumento da atenção no trabalho.
- Aumento da satisfação pelo trabalho em si (enriquecimento de cargo).
- Melhoria do espírito de equipe.
- Melhoria nas habilidades de comunicação entre as pessoas.
- Aquisição de novas habilidades.
- Crescimento através da participação.
- Maior senso de posse das máquinas.
- Diminuição da rotatividade de pessoal.
- Satisfação pelo reconhecimento.

2.5.1.4. Terotecnologia:

A Terotecnologia é uma técnica inglesa que determina a participação de um especialista em manutenção desde a concepção do equipamento até sua instalação e primeiras horas de produção. Com a terotecnologia, obtêm-se equipamentos que facilitam a intervenção dos mantenedores (MOUBRAY, 2001).

Modernamente há empresas que aplicam o chamado *retrofitting*, que são reformas de equipamentos com atualização tecnológica. Por exemplo, reformar um torno mecânico convencional transformando-o em torno por controle numérico computadorizado (CNC) é um caso de *retrofitting* (FILHO, 2001).

2.5.2. Manutenção não planejada:

Pode-se afirmar que é a mais clássica das manutenções – se baseia em rodar o equipamento até a falha do mesmo propriamente dita – aplicável principalmente em equipamentos nos quais a segurança e indisponibilidade não são críticos (NUMARC 93-01).

A manutenção não planejada comporta 2 categorias:

2.5.2.1. Manutenção corretiva:

A manutenção corretiva tem o objetivo de localizar e reparar defeitos em equipamentos que operam em regime de trabalho contínuo (EPRI TR-106857-R1).

2.5.2.2. Manutenção de ocasião:

A manutenção de ocasião consiste em fazer consertos quando a máquina se encontra parada (EPRI TR-106857-R1).

2.5.3. Evolução do conceito de manutenção:

Tabela 2.1 – Cronologia da evolução do conceito de manutenção

PERÍODOS	ATÉ DÉCADA DE 1950	DÉCADA DE 1950	DÉCADA DE 1960	DÉCADA DE 1980
Estágio Conceitos	Manutenção corretiva	Manutenção preventiva	Manutenção do sistema de produção	Manutenção produtiva total (TPM)
Reparo corretivo	x	x	x	x
Gestão mecânica da manutenção		x	x	x
Manutenções preventivas		x	x	x
Visão sistemática			x	x
Manutenção corretiva com incorporação de melhorias			x	x
Prevenção de manutenção			x	x
Manutenção preditiva				x
Abordagem participativa				x
Manutenção autônoma				x

2.5.4. Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC):

É um processo usado para determinar os requisitos de manutenção para modos de falha que possam causar falhas funcionais de quaisquer itens físicos em seu ambiente operacional (MOUBRAY, 2001).

2.5.4.1. Definições:

2.5.4.1.1. Componente:

Equipamento ou máquina que tem a função de realizar alguma tarefa específica e que o seu não funcionamento ou mau funcionamento, afeta diretamente a função para o trecho funcional no qual está inserido.

2.5.4.1.2. Trecho Funcional:

Dado um determinado sistema de uma planta industrial, uma ótima forma de abordagem é a separação de conjuntos de equipamentos que podem influenciar suas falhas uns nos outros em trechos funcionais. Trechos funcionais são agrupamentos de componentes que podem, ao falharem, comprometer a função daquele trecho de realizar a função para a qual ele foi projetado (ou seja, se um dos equipamentos falhar, pode vir a comprometer o trecho, fazendo assim com que o trecho não desempenhe sua função de projeto - o que é preconizado pela MCC). E quando se separa em trechos, é possível saber que uma falha não influenciou em nada a função do trecho, por simplesmente não ter correlação com o mesmo (INPO AP-913).

2.5.4.1.3. Sistema:

É o conjunto de trechos funcionais, que por sua vez são compostos por componentes, que tem a função de realizar uma dada tarefa na planta industrial. O processo de

identificação do que vem a ser um sistema passa pelas seguintes fases (NUMARC 93-01):

- Visão, em forma de diagrama, global, que representa os elementos importantes e notáveis de processo da planta, e suas inter-relações;
- Fluxograma de processo que aplica sobre o diagrama acima citado e inclui as atividades detalhadas para alcançar os objetivos do processo.

Dessa forma pode-se definir os objetivos da MCC como (INPO AP-913):

- Preservar as funções dos equipamentos, com a segurança requerida;
- Restaurar sua confiabilidade e segurança projetada, após a deterioração;
- Otimizar a disponibilidade;
- Minimizar o custo do ciclo de vida (*LCC – Life Cycle Cost*);
- Atuar conforme os modos de falha;
- Realizar apenas as atividades que precisam ser feitas;
- Agir em função dos efeitos e conseqüências da falha;
- Documentar as razões para escolha das atividades.

O conceito de MCC expõe claramente uma dualidade saudável entre o antigo e o novo.

Entre a visão sobre o “equipamento” e visão sobre “função”.

A figura abaixo demonstra uma comparação da Manutenção Tradicional versus a Manutenção Centrada em Confiabilidade (INPO AP-913):

Característica	Manutenção Tradicional	MCC
Foco	Equipamento	Função
Objetivo	Manter o equipamento	Preservar a função
Atuação	Componente	Sistema
Atividades	O que pode ser feito	O que deve ser feito
Dados	Pouca ênfase	Muita ênfase
Documentação	Reduzida	Obrigatória e sistemática
Metodologia	Empírica	Estruturada
Combate	Deterioração do equipamento	Conseqüências das falhas
Normalização	NÃO	SIM
Priorização	Inexistente	Por função

Figura 2.3 – Quadro comparativo: Manutenção Tradicional versus MCC

Uma vez aplicado o processo de MCC, definem-se as funções do sistema e as funções importantes para aquele sistema. Aplica-se então uma análise de modo e efeito de falha (FMEA) (deve-se ter uma lista de componentes do sistema nessa etapa). Daí parte-se para avaliação se o componente é significativo para o risco (INPO 98-001).

Se dado que sim, deve-se desenvolver manutenção preventiva apropriada e detalhada.

Tentar impedir todas as falhas quanto possíveis;

Se dado que não, deve-se determinar:

Se o componente não significativo pode funcionar até falhar; Ou se manutenção preventiva é permitida por significado econômico ou outro impacto.

Se for dado que o componente pode falhar, temos duas decisões:

Se sim, classificar o mesmo como funcionar até falhar: o componente funcionará até que a manutenção corretiva seja requerida. A falha é aceitável sem qualquer manutenção preventiva (INPO AP-913);

Se não, classificado como não significativo: desenvolver manutenção preventiva com base no custo efetivo. Tentar impedir as falhas prováveis utilizando manutenção preventiva detalhada (MOUBRAY, 2001).

Explanando-se essa parte, fica claro o grande trunfo da MCC, o seu objetivo: PRESERVAR A FUNÇÃO (INPO AP-913). E como foi mostrado acima, para tanto, é necessária uma heurística diferente da manutenção tradicional.

2.5.5. Engenharia de Confiabilidade:

Atualmente, os processos para se assegurar a eficácia em trabalhos de manutenção em plantas industriais seguem modelos amplamente divulgados, especialmente em ramos industriais que necessitam de confiabilidade, segurança, disponibilidade, eficácia, sustentabilidade e eficiência, tais como a indústria aeroespacial, petroquímica, nuclear ou aeronáutica.

No concernente ao setor nuclear, e mesmo fora dele, instituições como o INPO (Institute for Nuclear Power Operators), a WANO (World Association of Nuclear Operators) e a parte nuclear do EPRI (Electric Power Research Institute), elaboram as metodologias e apresentam aos seus membros, e daí recebem retroalimentação sobre a eficácia e eficiência das mesmas, e começam a adotá-las ou não, com base nas

informações colhidas. Em resumo, é um programa de engenharia de confiabilidade de grandes proporções coletivas.

E esses programas de engenharia de confiabilidade de grandes proporções coletiva são baseados em diversos estudos e postulados, que devem ser seguidos, e se não forem seguidos não atingem adequadamente os seus objetivos (RAMAKUMAR, 1993). Os postulados seriam como os descritos abaixo (INPO AP-913):

- Assegurar que Estruturas, Sistemas e Componentes (ESC) sejam capazes de cumprir suas funções previstas por projeto;
- Monitorar a eficácia da manutenção, mediante a análise do comportamento dos ESC e o equilíbrio entre confiabilidade e disponibilidade;
- Tomar ações corretivas quando o comportamento dos ESC não for adequado, monitorando a efetividade destas ações mediante o cumprimento dos objetivos pré-fixados;
- Monitorar o impacto sobre a segurança e as atividades de manutenção.

Notoriamente, os programas de engenharia de confiabilidade utilizam uma simbiose com a MCC para atingir os seus objetivos (NUMARC 93-01).

CAPÍTULO 3 – REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

3.1. Introdução:

Redes Neurais Artificiais são ferramentas de inteligência artificial que possuem um modelo matemático inspirado no comportamento, na estrutura cerebral e na maneira como o cérebro humano realiza suas tarefas (HAYKIN, 1999). Fazendo uma analogia de redes neurais artificiais (RNA) com o cérebro humano, as RNA possuem características de armazenar e aplicar o conhecimento, assim como adaptação e generalização, com a capacidade de aprender e tomar decisões baseadas na aprendizagem.

A aprendizagem que é a premissa básica da inteligência, nas redes neurais ocorre durante o treinamento, que é a fase onde um conjunto de dados (exemplos) é apresentado como entrada da rede, que os absorve e modifica os seus parâmetros. Isto acontece para que a RNA possa adquirir uma boa capacidade de resposta para o maior número de situações possíveis (OSÓRIO e BITTENCOURT, 2000).

RNA são processadores maciçamente paralelos constituídos por unidades básicas de processamento, chamados de neurônios. A conexão existente entre os neurônios é chamada de sinapse, onde são atribuídos os valores, que são chamados de pesos sinápticos. Os pesos sinápticos são utilizados para armazenar o conhecimento (OSÓRIO e BITTENCOURT, 2000). No processo de aprendizagem das RNA, ocorrem diversas modificações significantes nas sinapses, que acontecem de acordo com os ajustes dos neurônios.

3.2. Histórico:

Os primeiros passos sobre RNA foram na década de 40, com os artigos de McCulloch e Pitts, que descreviam um cálculo lógico das redes neurais associadas aos estudos neurofisiológicos, e lógica matemática (MCCULLOCH e PITTS, 1943). No modelo proposto, eles assumiram que um neurônio seguiria uma lei “tudo ou nada”. Utilizando os neurônios conectados entre si com conexões sinápticas ajustadas, operando de forma paralela para resolver qualquer função computável.

Em 1949, Donald Hebb publicava o livro “The Organization of Behavior”, apresentando uma formulação da regra de aprendizagem para o ajuste das conexões dos neurônios, propondo que as sinapses seriam continuamente modificadas conforme a aprendizagem de tarefas por parte do organismo (HEBB, 1949). Ele apresentou no famoso **postulado de aprendizagem**, que a eficiência das sinapses seria aumentada pela ativação repetida de um neurônio. Seu livro tem sido uma fonte de inspiração para o desenvolvimento de modelos computacionais, influenciando vários modelos de RNA em destaque na atualidade.

Marvin Minsky, em 1951, desenvolveu o SNARK, o primeiro neuro-computador, que serviu como inspiração para as idéias de estruturas que o sucederam (MINSKY e PAPER, 1969). Em 1961 Minsky publicou um excelente artigo sobre IA (Inteligência Artificial), intitulado “Steps Toward Artificial Intelligence”, que continha uma seção sobre o que agora é RNA. Em 1967 publicou um livro “Computation: Finite and Infinite Machines” estendendo os resultados de McCulloch e Pitts colocando no contexto das teorias dos autômatos e da computação.

Rosenblatt, em 1958 criou o PERCEPTRON, o primeiro neuro-computador a obter sucesso, desenvolvendo uma nova abordagem para o problema de reconhecimento de padrões. Com o chamado **Teorema da Convergência do PERCEPTRON** (1960) demonstrou um método inovador de aprendizagem supervisionada (ROSENBLATT, 1959), que posteriormente deu origem ao MLP (*Multi-Layer Perceptron*). Em 1960, Widrow e Hoff formularam o algoritmo do mínimo quadrado médio, usado para desenvolver o Adaline (*Adaptive Linear Element*), e mais tarde o Madaline (*Multiple-Adaline*) que foi uma das primeiras RNA em camadas treináveis com elementos adaptativos (WIDROW, 1962).

Na década de 1960, parecia que as RNA poderiam resolver qualquer tipo de problema, porém em 1969, Minsky e Papert demonstraram que existiam limitações fundamentais para aquilo que uma RNA pudesse calcular (MINSKY e PAPERT, 1969). No final dos anos 60, já havia sido formulada a maioria das idéias e conceitos que fundamentam as RNA. Poucas pesquisas foram realizadas na década de 70, que foi considerada a período de adormecimento para as RNA.

Em 1980 Grossberg, estabeleceu a teoria da ressonância adaptativa, que envolvia uma camada de reconhecimento e uma camada de generalização, onde se aplicava um princípio de auto-organização (GROSSBERG, 1980). Em 1982 Hopfield, formulou um novo modo de entendimento da computação executada nas RNA. Estabeleceu uma analogia entre redes recorrentes e modelo **Ising**, que desencadeou um grande interesse na área da Física. As redes de Hopfield, como ficaram conhecidas as RNA com realimentação não baseadas em PERCEPTRON, atraíram atenção nos anos 80 pelo

princípio de armazenamento de informação em redes dinamicamente estáveis (HOPFIELD, 1982).

Em 1983, Cohen e Grossberg estabeleceram o teorema Cohen-Grossberg que em seu contexto mostrava que a característica que distingue uma rede neural de atratores é a sua forma normal manifestada na dinâmica não-linear da rede (COHEN e GROSSBERG, 1983). Ainda em 1983, Kirkpatrick, Gelatt e Vecchi estabeleceram um procedimento conhecido como **recozimento simulado**, com o objetivo de solucionar problemas de otimização combinatória (KIRKPATRICK *et alli*, 1983). Essa idéia foi utilizada mais tarde por Ackley, Hinton e Sejnowski em 1985, para desenvolver a **máquina de Boltzmann**, que foi a primeira rede neural de múltiplas camadas bem-sucedida (ACKLEY *et alli*, 1985).

Em 1986, foi desenvolvido o algoritmo de *backpropagation* por Rumelhart, Hinton e Williams. Neste mesmo período foi editado por David Rumelhart e James McClelland o livro PDP (*Parallel Distributed Processing*) que teve um grande impacto na época (RUMELHART *et alli*, 1986). Nos anos 90, publicações de autores como Boser, Guyon, Vapnik e Cortes, contribuíram também no desenvolvimento das redes neurais que certamente continuará com o seu crescimento em aplicações e projetos.

3.3. Neurônio Biológico:

O cérebro humano precisa de uma enorme rede de circuitos neurais conectando suas principais áreas sensoriais, isto é, neurônios capazes de armazenar, interpretar e emitir respostas eficientes a qualquer estímulo. Existem aproximadamente quinze bilhões de

neurônios no cérebro humano, responsáveis por todas as funções do sistema (HAYKIN, 1999).

A estrutura básica do neurônio é composta por: corpo celular (soma), axônio (fibra nervosa) e dendritos. O corpo celular é o centro do processo metabólico da célula. A partir do corpo celular projetam-se extensões filamentosas, os axônios e os dendritos. O axônio é um dispositivo de saída que transmite o sinal do corpo celular para suas extremidades. Os dendritos são dispositivos de entrada que conduzem os sinais das extremidades para o corpo celular (KOVACS, 1996).

O neurônio biológico é um dispositivo elementar do sistema nervoso, que possui múltiplas entradas e somente uma saída. As entradas são dadas através das sinapses, que fazem a conexão entre os dendritos e os axônios. Os axônios transmitem sinais que são pulsos elétricos também conhecidos como impulsos nervosos, que são responsáveis pela informação que o neurônio processa, com o objetivo de produzir como saída o impulso nervoso nesse axônio.

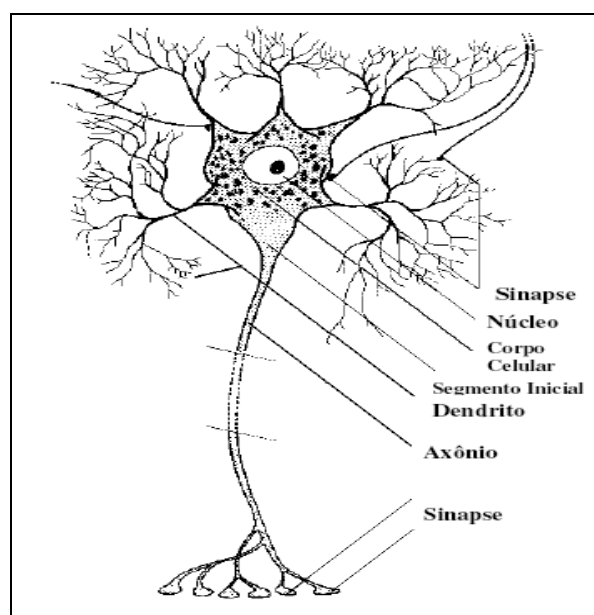


Figura 3.1 – Neurônio Biológico

3.4. Neurônio Artificial:

O modelo lógico-matemático desenvolvido por McCulloch e Walter Pitts propõe simular a forma, o comportamento e as funções de um neurônio biológico. A estrutura básica do neurônio artificial é composta por: peso, função somatório e função de transferência (KOVACS, 1996). Os pesos são coeficientes que se adaptam no interior da rede determinando a intensidade do sinal de entrada, as intensidades podem ser alteradas de acordo com as regras de aprendizado e a topologia da rede. A função somatória é o produto dos pesos pelas entradas, importante no processamento dos elementos. A função de transferência é um processo algorítmico que transforma o resultado da função somatório em saída funcional.

Em uma analogia com o neurônio biológico, os dendritos são equivalentes às entradas, cujas ligações com o corpo celular artificial são realizadas através de elementos chamados de peso (simulando as sinapses). Os estímulos captados pelas entradas são processados pela função de soma, e o limiar de ativação do neurônio biológico será substituído pela função de transferência. O resultado será um modelo com inúmeras entradas, que representam os dendritos e apenas uma única saída, que representa o axônio. (TAFNER, 2005).

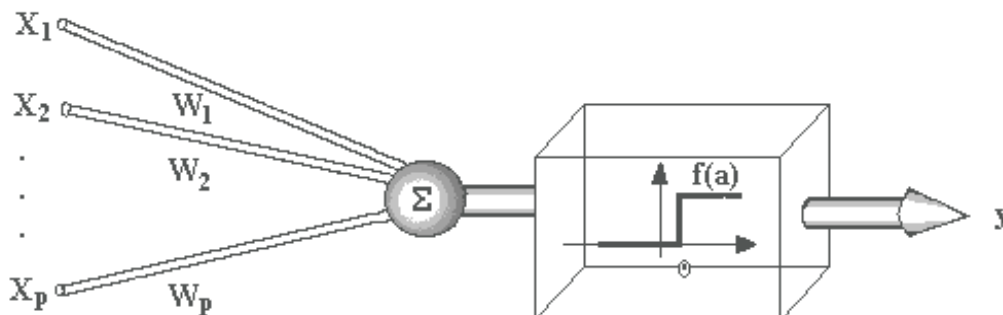


Figura 3.2 – Neurônio Artificial

3.5. Topologias das Redes Neurais Artificiais:

O modo como os neurônios de uma rede neural estão estruturados está estritamente ligado ao algoritmo de aprendizado usado para treinar a rede. (HAYKIN, 1999).

De modo abrangente, as redes neurais são subdivididas em função de como são dispostos os neurônios nas camadas e as conexões entre as mesmas. As redes podem ter uma ou mais camadas, podem ser não-recursivas ou recursivas, e ainda podem ser totalmente conectadas ou parcialmente conectadas. (ASSEF, 1999).

3.5.1. Redes Não-Recursivas (*feedforward*):

As redes *feedforward* são aquelas cujo grafo não tem ciclos. São frequentemente representadas em camadas e, neste caso são chamadas redes em camadas. O fluxo de dados flui somente na direção da entrada para saída, propagando-se unidirecionalmente (AZEVEDO, 2000).

3.5.1.1. Redes Alimentadas Adiante com Camada Única:

Em específico essa topologia, possui uma camada de entrada de nós de fonte que se projeta sobre uma camada de saída de neurônio de acordo com seus pesos. Sendo definida como redes de camada única, pois têm o mesmo número em camadas de saída e de entrada (HAYKIN, 1999).

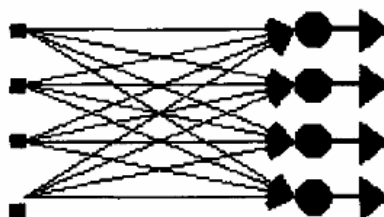


Figura 3.3 – Rede de Camada Única

3.5.1.2. Redes Alimentadas Adiante com Múltiplas Camadas:

Em relação a essa rede, ela possui uma ou mais camadas entre as unidades de entrada e a camada de saída. Essas camadas recebem o nome de camadas ocultas e são os principais pontos na distinção dessa classe de redes. A função das camadas ocultas é intervir entre a entrada externa e a saída da rede de uma maneira útil, adicionando-se uma ou mais camadas ocultas, tornando a rede capaz de extrair estatísticas de ordem elevada. A habilidade dos neurônios ocultos, de extrair estatísticas de ordem elevada, é particularmente valiosa quando o tamanho da camada de entrada é grande (HAYKIN, 1999).

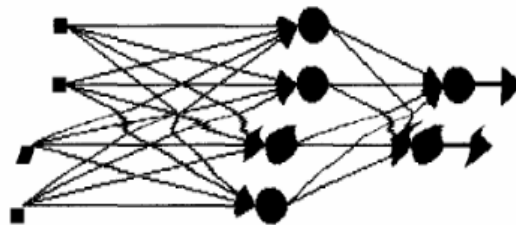


Figura 3.4 – Rede de Camadas Múltiplas

3.5.2. Redes Recursivas:

As redes recursivas se distinguem das redes alimentadas adiantes por possuírem pelo menos um laço de realimentação, ou seja, a informação que o neurônio da rede recursiva processa é utilizada por ele posteriormente. A presença dos laços de realimentação tem o impacto na capacidade de aprendizagem da rede e no seu desempenho.

Em determinadas configurações, as redes de retropropagação (*backpropagation*), suas saídas são determinadas pela entrada corrente e pela saída anterior, ou seja, direcionam a saída anterior de volta para as entradas.

Na fase de treinamento, o erro é calculado com a diferença entre a saída gerada pela rede e o resultado esperado. Tipicamente o erro dos neurônios artificiais é então propagado para trás, para uma camada anterior. Normalmente, esse valor retropropagado é multiplicado por cada um dos pesos das conexões de chegada para modificá-los antes do próximo ciclo de aprendizagem.

3.5.3. Redes Totalmente Conectadas e Parcialmente Conectadas:

Nas redes parcialmente conectadas ficam faltando algumas conexões, ou seja, nem todos os neurônios se conectam a todos simultaneamente. Em uma rede totalmente conectada cada neurônio de uma camada é conectado a todos os outros neurônios (AZEVEDO, 2000).

3.6. Aprendizado de Redes Neurais Artificiais:

O Aprendizado em RNA é um processo extremamente importante que vem sendo estudado até hoje. Ele é um processo gradual e iterado onde os pesos são modificados e ajustados varias vezes, aos poucos, de acordo com uma regra de aprendizado que possibilita a rede se auto-organizar e adquirir o conhecimento específico para solucionar um determinado problema (OSÓRIO e BITTENCOURT, 2000).

O treinamento de uma RNA acontece quando, aplicando-se um conjunto de entradas resulta em um conjunto desejado de saídas. As entradas e saídas são referenciadas como

sendo vetores diferentes. O treinamento é obtido através de aplicação sucessiva de vetores na entrada enquanto se ajustam os pesos das sinapses de acordo com o procedimento pré-estabelecido.

As principais formas de treinamento são: o treinamento supervisionado e o treinamento não-supervisionado.

3.6.1. Treinamento Supervisionado:

Nesse método de aprendizado, pares de entrada e saída são apresentados a RNA, e essa toma a cada par e produz uma resposta na saída. Essa resposta é comparada com o sinal de saída desejado, caso sejam diferentes, a RNA gera um sinal de erro que será usado para calcular o ajuste que deve ser feito nos pesos sinápticos da rede e o erro é minimizado (AVEZEDO, 2000).

Neste modelo, o algoritmo usado nos cálculos para minimização do erro é uma poderosa ferramenta matemática derivada de técnicas de otimização. Um fator importante para ressaltar é o processo de modelagem dos sinais de entrada, que em sua codificação determina o sucesso do treinamento nas RNA. Geralmente, os dados apresentados às entradas são valores numéricos, que são convertidos, em valores quantificáveis, a partir de estímulos oriundos do mundo real, o que é extremamente necessário, para que os dados possam ser trabalhados pelas RNA.

3.6.2. Treinamento Não-Supervisionado:

Ao contrário do aprendizado supervisionado, no aprendizado não-supervisionado não há uma saída desejada. O treinamento é realizado somente com um conjunto de vetores de

entrada. O algoritmo de treinamento modifica os pesos da rede e fornece uma resposta de saída indicando a classe a qual a entrada pertence. Se uma classe não é identificada para o padrão de entrada, uma nova classe é gerada.

3.7. Treinamento *backpropagation*:

O treinamento *backpropagation* é um dos mais comuns e, utilizado em RNA, o seu funcionamento é realizado da seguinte maneira: após serem apresentadas as variáveis de entrada, o valor final será gerado após a propagação das saídas por todas as camadas. Esse valor é comparado com o outro desejado (treinamento supervisionado) e caso exista erro, são transmitidos para as camadas anteriores, fazendo um movimento contrário. Os pesos sinápticos são ajustados em todas as camadas e isso será feito de um modo recursivo até que a rede obtenha uma resposta satisfatória.

A estrutura básica do algoritmo *backpropagation* está dividida nas seguintes etapas:

- 1- Inicialização dos pesos sinápticos e dos *bias* aleatoriamente;
- 2- Apresentação dos exemplos de treinamento;
- 3- Propagação do sinal para frente (Figura 3.5);
- 4- Cálculo do sinal de erro;
- 5- Retropropagação do sinal (Figura 3.6);
- 6- Iteração ou atualização dos pesos.

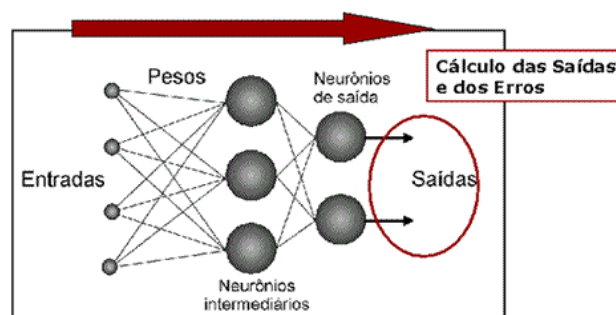


Figura 3.5 – Propagação

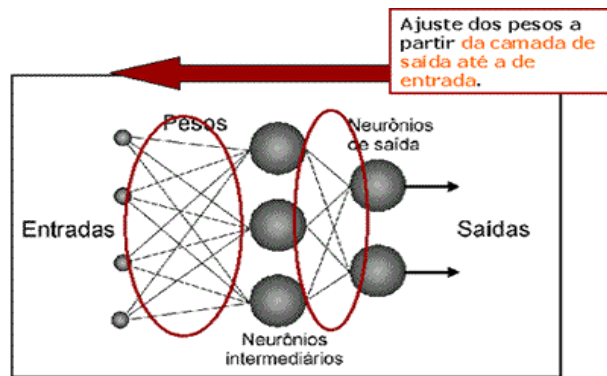


Figura 3.6 – Retropropagação

3.8. Redes Neurais de Regressão Genérica (GRNN):

As Redes Neurais de Regressão Genérica (GRNN) são uma variação das redes neurais de bases radiais (*Radial Basis Function – RBF*), formadas por uma camada de neurônios não-lineares cujas funções de ativação são do tipo gaussiana em vez de sigmoidais, e são usadas principalmente para aproximar funções ou relações. Por essa característica, também podem ser utilizadas como um classificador por semelhança.

As redes GRNN foram propostas em 1991 por Specht, como uma generalização das redes de funções de bases radiais (RBFN) e das redes neurais probabilísticas (PNN). As GRNN são geralmente usadas para problemas de regressão, fazendo o treinamento quase que instantaneamente. Enquanto PNN são usadas para problemas de classificação com um treinamento, que tende a ser grande e lento. Ela é uma rede de treinamento supervisionado e possui normalmente quatro camadas (MACHADO *et alli*, 2009).

A camada de entrada é usada para normalizar os dados. A primeira camada escondida na GRNN contém as unidades de base radial, uma unidade oculta centrada em todos os casos de treinamento, onde cada neurônio processa os sinais recebidos, gerando uma saída pela média ponderada dos valores-alvo de casos de treinamento. Uma segunda

camada oculta contém unidades que ajudam a estimar a média ponderada, para o grau de influência das informações deste neurônio nos neurônios subseqüentes. Quanto mais o conjunto de dados de entrada for parecido com os dados de seu treinamento, maior será a ponderação desse neurônio.

A camada de saída, em seguida, executa as divisões reais (com unidades de divisão especial) dos neurônios relativos a cada saída com o somatório das ponderações de todos os neurônios, efetuando uma normalização na saída da rede. Assim, a segunda camada escondida sempre tem exatamente uma unidade mais do que a camada de saída. Em problemas de regressão, normalmente apenas uma única saída é estimada, e assim a segunda camada escondida geralmente tem duas unidades.

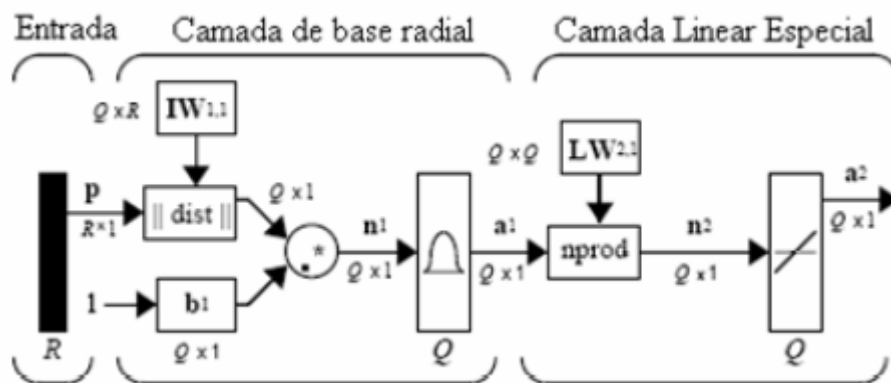


Figura 3.7 – Arquitetura da rede GRNN

Após apresentar à rede os dados de treinamento, cada neurônio calcula a distância entre o vetor de entrada e o exemplo a ele associado. A distância obtida é multiplicada por um valor de *bias* e aplicada à função radial. Assim, quando a distância entre o vetor de pesos e o vetor de entrada for próxima a zero o valor de saída do neurônio será próximo à unidade. O valor de *bias* aplicado tem a finalidade de ampliar ou reduzir a área da função radial. Assim, para cada neurônio é associado um vetor peso, que pode ser visto

como o centro de uma superfície gaussiana no espaço multidimensional, sendo ajustado seu raio pelo valor de *bias*.

O ajuste do parâmetro espalhamento (*spread*) é realizado de maneira heurística, sendo este geralmente um valor entre a mínima e máxima distância entre os vetores que correspondem aos padrões armazenados. Caso o parâmetro espalhamento seja muito grande, várias unidades poderão ser excitadas quando uma entrada for apresentada à rede. Nesse caso a rede apresenta uma demasiada capacidade de generalização. De outra forma, se o valor for muito pequeno, implica em uma excitação única e exclusiva da unidade que possuir o exemplar mais próximo ao vetor apresentado à rede, sendo esta incapaz de generalizar. Um conjunto de dados é utilizado para treinamento da rede, outro conjunto é utilizado para regulagem do espalhamento e por fim são testados os dados em questão (MAEDA *et alli*, 2008).

A GRNN prediz o valor de uma ou mais variáveis dependentes a partir do valor de uma ou mais variáveis independentes. A saída predita será a média de todas as saídas armazenadas. Um grande problema da GRNN é que, como métodos de Kernel, em geral, sofre problemas referentes à sua dimensão, não podendo ignorar as entradas irrelevantes sem modificar o algoritmo básico.

CAPÍTULO 4 - METODOLOGIA

4.1. Introdução:

Utilização de RNA para a concepção de um sistema especialista de identificação de inter-relacionamentos de equipamentos sujeitos a falhas, ou seja, que equipamento efetivamente veio a falhar, em um determinado conjunto de equipamentos que é responsável por executar uma dada função, uma vez que, eventualmente, o equipamento que deixou de executar sua função, no conjunto supracitado, não venha a ser, explicitamente, aquele que causou a falha de função do conjunto, exatamente pelas inter-relações entre os vários entes envolvidos.

4.1.1. Definições:

A aplicação metodológica consiste em utilizar uma RNA para desenvolver um sistema especialista de identificação de falhas nos componentes e como a falha nos mesmos afeta um determinado sistema, a partir de dados históricos de manutenção para que o sistema especialista possa aprender e identificar a inter-relação entre os componentes e as conseqüências da falha em cadeia para levar o sistema à não execução para o qual foi projetado.

Os componentes que serão objetos de análise da RNA são os componentes que sofreram manutenção e possuem histórico reportado para alimentar a RNA. Segundo o INPO AP-913 - Equipment Reliability Process Description - (Dezembro 2007 - Revisão 02), se faz necessário definir os trechos funcionais que formam o sistema em análise.

É possível estruturar qualquer planta que utiliza sistemas eletromecânicos para sua operação de acordo com a definição do INPO AP-913.

Por fim, a variável de intervalo de tempo que será definida para o treinamento da RNA é importante para a qualidade do aprendizado do sistema especialista, e conseqüentemente, pelos resultados apresentados por ele.

Para a interpretação correta dos resultados, também é necessário conhecer o histórico de manutenção do trecho funcional ao qual será aplicada a RNA (EPRI TR-106857-R1), e definir a forma de codificação das falhas e de equipamentos que sofreram tais falhas.

A manutenção é uma atividade dinâmica, e mesmo a não-manutenção, por estranho que possa parecer, é fator de influência para assegurar que determinado componente cumpra sua função, portanto, após a fase de se dividir o sistema em trechos funcionais, se faz necessária a divisão do tempo, isto é, o intervalo de tempo que a RNA terá para si para avaliar as falhas ocorridas nos componentes de um trecho funcional. Para tanto, torna-se imperativo que se defina uma base de tempo e intervalos de tempo que serão utilizados para parametrizar o período razoavelmente ideal para a RNA ser treinada com os dados de falhas que lhe serão informados (INPO 98-001).

Tal fase é de suma importância, pois o intervalo de tempo não pode ser tão grande que a RNA encontre tantas falhas para os equipamentos de determinado trecho funcional e não consiga estabelecer alguma relação entre eles, e, por outro lado, também não pode ser tão pequeno, que a RNA não consiga encontrar nem mesmo uma falha naquele pequeníssimo intervalo. Há de se ter o bom senso de, ao se fazer a divisão do tempo,

que o intervalo que a RNA se utilizará para extrair da base de dados (ou seja, o histórico de manutenção do trecho funcional que a mesma está analisando), seja condizente com o número de falhas por intervalo de tempo.

4.1.2. Informações para o treinamento da RNA:

Obviamente, para ser possível alcançar algum resultado a partir da RNA aplicada ao trecho funcional, deve-se observar se o mesmo em questão possui falhas em seus componentes em número suficiente para a RNA vir a estabelecer alguma relação de falhas entre os mesmos, ou seja, se há histórico de informações suficiente nos componentes para poder ser treinada a RNA. Uma vez identificados os trechos que possuem quantidade suficiente e os que não possuem, pode-se aplicar a RNA nos mesmos para obter a inter-relação entre os mesmos, quando falham.

Deve-se organizar todos os dados recolhidos dos componentes, de cada trecho funcional, atribuindo um código de falha, inteligível e condizente para os componentes em questão. Feito isso, organiza-se em uma “linha do tempo”, a base de tempo com seus intervalos, como citado anteriormente. Esse conjunto de dados é organizado em uma tabela de Equipamentos/Códigos de Falhas x Tempo.

A partir de então, cria-se, em função da primeira tabela, para se estabelecer a precisão da rede (em não indicar falsos positivos e conseguir estabelecer falhas de causa comum, por exemplo), uma tabela “verdade”, onde no lugar do código de falha se coloca uma simbologia que demonstra que há falha, e quando não, uma simbologia para tanto.

A tabela abaixo exemplifica o explanado anteriormente.

Tabela 4.1 - Definição da simbologia para falha ou não-falha do componente

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	001	002	003	004	005	006	007	TEMPO
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	1	0	0	0	0	0	3
6	0	0	0	0	1	0	0	4
7	0	0	0	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	0	0	1	8
11	0	0	0	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	0	0	11
14	1	0	0	0	0	0	0	12
15	0	0	0	0	0	0	0	13
16	0	0	0	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	0	0	0	16
19	0	1	0	0	1	0	0	17
20	0	1	0	0	0	0	0	18
21	0	0	0	0	1	0	0	19

Trecho funcional YY - demonstração da codificação de falha/não falha, número de componentes e intervalos no tempo – figura acima.

4.2. Dependência e inter-relação entre componentes:

A divisão do sistema por trechos funcionais se mostra extremamente útil no que tange à eficácia da abordagem de se utilizar uma RNA para poder prever com precisão a falha ou não, de um equipamento no trecho funcional, onde a RNA foi treinada a partir de dados reais de falhas anteriores. Com efeito, ao impedir que qualquer falha, em qualquer componente, venha a comprometer a função do trecho funcional, no qual o componente

está inserido, o índice de eficácia obtido pela RNA, após seu treinamento, é extremamente alto (INPO AP-913).

A exemplificar, toma-se o caso de uma bomba, que esteja inserida em um determinado trecho funcional “Y”. Obviamente, para que a bomba realize sua função (que é a de transferir energia para o fluido que por ela passa), é necessária a existência de vários outros equipamentos no mesmo trecho funcional “Y”. O motor elétrico que aciona a bomba, por exemplo. Ou equipamentos de instrumentação para medição de temperatura, vazão, pressão ou outras grandezas, no motor, na bomba, nos mancais onde os mesmos estão apoiados. Eventualmente, a bomba pára de realizar a função para qual foi projetada. Posteriormente, ao analisar-se a bomba, verifica-se que a mesma estava em perfeito estado. Mas com um estudo mais profundo, verificou-se que um dos instrumentos de medição de temperatura falhou e foi determinante para que todo o trecho funcional “Y” deixasse de efetuar sua função (no caso, a bomba realizar a sua própria função como equipamento).

Uma RNA treinada pode, com os dados corretos, predizer que tal ente de entrada (o instrumento de medição de temperatura), pelos históricos de vezes que falhou, impediu o trecho funcional “Y” de realizar sua própria função, e que não foi a bomba que falhou.

Essa descoberta pode levar a várias soluções, como por exemplo: uma mudança na política de manutenção daquele trecho como um todo; ou uma mudança no programa de manutenção preventiva para o instrumento que vem falhando; ou uma monitoração por programa de manutenção preditiva, para avaliar a vida útil do instrumento; ou mesmo chegar a situações mais drásticas, como um maior controle de qualidade junto ao

fornecedor do instrumento e/ou uma mudança de projeto para aquele instrumento, ou seja, o instrumento de medição pode ser ótimo, mas naquelas condições, o mesmo não apresenta o desempenho que é necessário para se ter confiabilidade necessária para o funcionamento do trecho como projetado.

Ou seja, como o exposto acima, se trata de identificar os componentes mais ou menos inter-relacionados.

Essa relação de influência das falhas de componentes sobre componentes é tomada como a definição de quais são os equipamentos que podem, com suas falhas, comprometer o trecho funcional todo. Ora, uma vez que se têm os trechos funcionais, o intervalo de tempo adequado e as tabelas [falha]/[não-falha] para cada um dos trechos funcionais, treinar-se-á as RNA e verificar-se-á quais são os equipamentos que influenciam, quando falham, na falha do trecho funcional.

Isso será feito com a alternância de todas as combinações possíveis (inclusive da variável TEMPO – daí a importância da escolha do intervalo de tempo apropriado para a avaliação pela RNA), em todos os trechos funcionais, de todos os equipamentos.

Exemplificando: dado um trecho funcional em que os entes de entrada são a válvula, o atuador elétrico da válvula, o indicador de temperatura da linha, o indicador de pressão da linha, o indicador de fluxo da linha, filtros, motor (da bomba), disjuntor, a bomba, e a variável temporal; e o ente de saída é o trocador de calor. Esse conglomerado é eleito para treinar a RNA. Ao final do treinamento, se observa que os valores apresentados pela RNA treinada apresentam um grande erro em relação ao valor de saída, para a

maioria dos casos. Isso implica que quando algum dos entes de entrada falha, não provoca falha no ente de saída.

Por outro lado, tomando-se um outro trecho funcional, em que os entes de entrada são a válvula, o atuador elétrico da válvula, filtros, motor (da bomba), disjuntor e o trocador de calor, e a variável temporal; e o ente de saída é a bomba. Mais uma vez, toma-se esse conjunto para treinar a RNA. Ao final do treinamento, observa-se que os valores apresentados pela RNA treinada apresentam um erro muito baixo em relação ao valor de saída, para a maioria dos casos. Isso implica diretamente que, quando algum dos entes de entrada falha, aí sim, provoca falha no ente de saída.

Basicamente é a correlação entre entes de entrada que afetam, com suas falhas, na falha do ente de saída, que a RNA vai conseguir chegar a um padrão para identificação de falhas. Para, enfim, poder predizer os resultados do seu treinamento.

A figuras abaixo exemplificam o que foi explicado nos parágrafos anteriores, inclusive demonstrando os parâmetros para a confiabilidade das inter-relações obtidas pela RNA, ou seja, a verificação da taxa de acerto:

Trecho XYZ	
Elementos de Entrada	Elemento de Saída
Ente 01	Ente 03
Ente 02	
Ente 04	
Ente 05	
Ente 06	
Ente 07	

Figura 4.1

Valor Real	Valor RNA	Erro (Valor Real - Valor RNA)
0	0,099462561	-0,099462561
0	0,02830836	-0,02830836
0	0,097894773	-0,097894773
0	0,097233556	-0,097233556
0	0,096649669	-0,096649669
0	0,096139997	-0,096139997
0	0,095701158	-0,095701158
0	0,095330417	-0,095330417
0	0,015624502	-0,015624502
0	0,09477976	-0,09477976
0	0,094593719	-0,094593719
0	0,094463147	-0,094463147
0	0,094385087	-0,094385087
0	0,09435644	-0,09435644
0	0,038038019	-0,038038019
0	0,094435528	-0,094435528
0	0,094537191	-0,094537191
1	1	0
0	0,094850428	-0,094850428
0	0,095056027	-0,095056027
0	0,095290519	-0,095290519
0	0,001635728	-0,001635728
0	0,095834576	-0,095834576
1	0,096138544	0,903861456
0	0,100731194	-0,100731194
0	0,101046987	-0,101046987
0	0,10134618	-0,10134618
0	0,101626679	-0,101626679
0	0,101886757	-0,101886757
0	0,102124356	-0,102124356
0	0,102337889	-0,102337889
0	0,102525569	-0,102525569
0	0,102685891	-0,102685891
1	1	0
0	0,102918312	-0,102918312
0	0,102987729	-0,102987729
0	0,078178898	-0,078178898
0	0,07219094	-0,07219094
1	0,102993898	0,897006102
1	0,102925055	0,897074945
0	0,102819145	-0,102819145
0	0,102675401	-0,102675401
0	0,102493033	-0,102493033
0	0,10227149	-0,10227149
0	0,102010235	-0,102010235
1	0,988079369	0,011920631
0	0,101366483	-0,101366483
0	0,100983284	-0,100983284

Figura 4.2

As figuras 4.1 e 4.2 exemplificam a extração das inter-relações por meio de RNA (o treinamento da RN) e verificação da taxa de acerto da RNA. Primeiramente, é demonstrado um exemplo de trecho funcional XYZ com seus elementos de entrada, (cujos comportamentos influenciam no comportamento do elemento de saída), e, em seguida, uma tabela de comparação entre os valores obtidos pela RNA e o erro entre esses e os valores reais.

4.3. Implantação do método no sistema:

Uma vez treinadas as RNA de acordo com as variações explanadas nos tópicos acima, deve-se separar as RNA que obtiveram, após treinamento, bons resultados para implantar em um dado sistema escolhido.

Como dito anteriormente, a precisão dos resultados obtidos após o treinamento da RNA para um trecho funcional, de um sistema, é dada pelo conjunto de fatores como: histórico de falhas para os equipamentos do trecho funcional, a definição do intervalo de tempo para a avaliação da RNA em capturar falhas, a seleção correta do que compõe realmente um trecho funcional (isto é, se os equipamentos avaliados para o treinamento da RNA realmente formam um trecho funcional), e o conjunto de trechos funcionais que compõem de forma real um sistema.

Dado isso, e feita de forma criteriosa tal metodologia, os resultados apresentados pela RNA serão realmente confiáveis, e apresentarão uma forma de predição para as falhas que virão ocorrer.

O sistema especialista de auxílio à tomada de decisão, para modificação da política de manutenção, reside exatamente no conjunto de informações fornecidas à RNA, e seu treinamento, tendo a mesma sido adequadamente treinada. Assim, a RNA está em condições de ser ferramenta poderosa para alcançar a melhor decisão no concernente às decisões acerca das políticas de manutenção em cadeia de componentes-trechos funcionais-sistemas.

CAPÍTULO 5 – ESTUDO DE CASO E RESULTADOS OBTIDOS

5.1. Introdução:

O objeto de estudo, no qual aplicar-se-á a metodologia já apresentada, será o sistema de controle químico e volumétrico, de uma planta de geração de potência, mais precisamente, uma usina núcleo-elétrica, que utiliza combustível nuclear enriquecido, e dotada de um reator de água leve pressurizada (PWR), como fonte de geração térmica.

A planta em questão é uma usina de 04 redundâncias, PWR típica KWU/SIEMENS, e o ciclo termodinâmico que é utilizado para levar a energia calorífica da fonte térmica até as turbinas de baixa e alta pressão, que por sua vez estão solidárias ao gerador elétrico principal da usina, é o ciclo Rankine. A eficiência do processo é de aproximadamente 1/3, ou seja, de toda energia térmica gerada, 1/3 é convertido efetivamente em energia elétrica, sendo esse valor de, aproximadamente, 1300 MWe.

5.1.1. Critério de escolha:

De acordo com o INPO AP-913 - Equipment Reliability Process Description - (Dezembro 2007 - Revisão 02), o sistema escolhido foi o de controle químico e volumétrico, basicamente por oferecer farta documentação em seu histórico de falhas e, evidentemente, por ser um sistema de controle de inventário, no que concerne à segurança nuclear; pelos parâmetros de relação do inventário com a termo-hidráulica e com a criticalidade do reator nuclear; e pelos componentes dos trechos funcionais que compõem o sistema apresentarem configuração para a aplicação da RNA com esperado sucesso.

5.1.2. Informações para aplicação no problema:

Uma vez escolhido o sistema, como exposto anteriormente, é necessária uma diagramação criteriosa do mesmo no espaço (trechos funcionais que o compõem) e no tempo (intervalo de tempo entre intervenções de manutenção) que serão insumos para o treinamento da RNA.

Na diagramação dos trechos funcionais, no caso em estudo, o sistema de controle químico e volumétrico, de acordo com os critérios metodológicos, resultou em 11 trechos funcionais notáveis, ou seja, que falhas que ocorrem em seus componentes, comprometem a função de cada trecho. Tais trechos serão descritos mais adiante, assim como os componentes do mesmo.

Da mesma forma, como explanado no capítulo dedicado à metodologia, a base de tempo e o intervalo de tempo que serão utilizados no treinamento da RNA, devem ser razoáveis dentro do que se pode considerar ideal para tanto, e é tão importante quanto a divisão do sistema em trechos funcionais. Ou seja, deve-se atentar para a racionalidade na divisão tanto do espaço, quanto do tempo.

Um dado a ser notado no trabalho aqui apresentado, é que está a se trabalhar com dados reais, e não com estimativas ou simulações. Tais dados foram colhidos dos históricos de manutenção de uma usina PWR típica, KWU/SIEMENS, muito comum na Europa e condizem perfeitamente com a realidade dos fatos de operação e manutenção de uma planta nuclear, tanto em seus períodos de trabalho em potência, quantos em seus períodos de parada para reabastecimento com combustível nuclear.

5.2. Informações para o treinamento da RNA:

O universo escolhido para base de tempo foi o período que engloba os quatro últimos ciclos de operação da planta, e o intervalo de tempo para a apreciação, pela RNA, das intervenções nos diversos equipamentos constantes nos arquivos, informado à RNA, foi o de uma quinzena.

Vale ressaltar que cada ciclo não equivale a um ano, mas sim ao tempo de consumo do combustível nuclear até a próxima troca, que atualmente faz com que cada ciclo dure, se não houver nenhum problema que faça atrasar ou adiantar a parada para reabastecimento, 14 meses. E essa base de tempo que foi escolhida, quando discretizada, em intervalos de quinzenas, apresentou um total de 121 quinzenas. Como explicado na metodologia: o intervalo não deve ser tão longo que a RNA encontre tantas falhas para os equipamentos de determinado trecho funcional, e assim, não consiga estabelecer relação alguma entre eles; nem tão curto que a RNA não encontre nem mesmo uma falha em um intervalo muito curto.

Parte-se para a divisão dos trechos funcionais do sistema. No sistema de controle químico e volumétrico, observaram-se 11 trechos funcionais notáveis, ou seja, que falhas que ocorrem em seus componentes, comprometem a função do trecho. A divisão do sistema em questão, o de controle químico e volumétrico, nos 11 trechos mencionados, seguiu a metodologia apresentada no INPO AP-913 - Equipment Reliability Process Description - (Dezembro 2007 - Revisão 02), ou seja, agrupar os componentes tais que estejam encadeados, fisicamente ou não, para realizar uma específica função determinante para que o sistema como um todo possa efetuar a sua própria função fim, e de modo que as falhas que ocorram nos componentes de cada

trecho comprometam somente o trecho no qual os componentes sejam do mesmo trecho funcional, sem interferir, assim, em falhas de outros trechos.

Assim, são apresentados os trechos funcionais do sistema de controle químico e volumétrico:

Trecho funcional 01: trecho da válvula da linha de aspersão do pressurizador (1);

Trecho funcional 02: trecho da válvula da linha de aspersão do pressurizador (2);

Trecho funcional 03: trecho de componentes associados à injeção de refrigerante no sistema de refrigeração do reator;

Trecho funcional 04: trecho de componentes associados à extração de refrigerante no sistema de refrigeração do reator (1);

Trecho funcional 05: trecho de componentes associados à extração de refrigerante no sistema de refrigeração do reator (2);

Trecho funcional 06: trecho de componentes associados à extração de refrigerante no sistema de refrigeração do reator (3);

Trecho funcional 07: trecho de componentes associados à extração de refrigerante no sistema de refrigeração do reator (4);

Trecho funcional 08: trecho de componentes associados à extração de refrigerante no sistema de refrigeração do reator (5);

Trecho funcional 09: trecho dos componentes incluídos na linha de sucção/descarga da bomba de carregamento de alta pressão (1) e seus equipamentos auxiliares;

Trecho funcional 10: trecho dos componentes incluídos na linha de sucção/descarga da bomba de carregamento de alta pressão (2) e seus equipamentos auxiliares;

Trecho funcional 11: trecho dos componentes incluídos na linha de sucção/descarga da bomba de carregamento de alta pressão (3) e seus equipamentos auxiliares.

Como é possível perceber, os trechos funcionais 01 e 02 são redundantes entre si, assim como os trechos funcionais 04, 05, 06, 07 e 08, também são redundantes entre si, bem como os trechos funcionais 09, 10 e 11, que por sua vez também são redundantes entre si.

Abaixo segue a pormenorização dos componentes que formam cada trecho funcional:

Trecho funcional 01: válvula, atuador elétrico da válvula e gaveta de alimentação elétrica;

Trecho funcional 02: válvula, atuador elétrico da válvula e gaveta de alimentação elétrica;

Trecho funcional 03: 13 válvulas (2 válvulas de segurança), 11 atuadores elétricos, 1 cubículo de alimentação e força, 10 gavetas de alimentação elétrica, 2 trocadores de calor, 3 indicadores de fluxo, 6 indicadores de temperatura e 2 dispositivos de lógica de proteção;

Trecho funcional 04: 3 válvulas, 3 atuadores elétricos, 2 gavetas de alimentação elétrica, 1 cubículo de alimentação e força, 3 indicadores de pressão, 3 indicadores de temperatura, 2 indicadores de fluxo e 1 trocador de calor;

Trecho funcional 05: 3 válvulas, 3 atuadores elétricos, 2 gavetas de alimentação elétrica, 1 cubículo de alimentação e força, 3 indicadores de pressão, 4 indicadores de temperatura e 2 indicadores de fluxo e 1 trocador de calor;

Trecho funcional 06: 6 válvulas (2 válvulas de segurança), 4 atuadores elétricos, 2 gavetas de alimentação elétrica, 1 cubículo de alimentação e força, 3 indicadores de pressão, 1 indicador de fluxo, 2 indicadores de temperatura e 3 indicadores de nível;

Trecho funcional 07: 2 válvulas (1 válvula de segurança), 1 atuador elétrico e 1 gaveta de alimentação elétrica;

Trecho funcional 08: 3 válvulas, 3 atuadores elétricos, 2 gavetas de alimentação elétrica e 1 cubículo de alimentação;

Trecho funcional 09: 3 filtros, 4 válvulas (2 válvulas de segurança), 1 atuador elétrico, 1 bomba de carregamento de alta pressão, 1 motor elétrico (para a bomba de carregamento de alta pressão), 2 trocadores de calor, 3 gavetas de alimentação elétrica, 1 disjuntor, 1 dispositivo de proteção de falha de aterramento, 1 dispositivo de proteção de falha no estator, 10 indicadores de temperatura, 3 indicadores de nível e 3 indicadores de pressão;

Trecho funcional 10: 3 filtros, 4 válvulas (2 válvulas de segurança), 1 atuador elétrico, 1 bomba de carregamento de alta pressão, 1 motor elétrico (para a bomba de carregamento de alta pressão), 2 trocadores de calor, 3 gavetas de alimentação elétrica, 1 disjuntor, 1 dispositivo de proteção de falha de aterramento, 1 dispositivo de proteção

de falha no estator, 10 indicadores de temperatura, 3 indicadores de nível e 3 indicadores de pressão;

Trecho funcional 11: 3 filtros, 4 válvulas (2 válvulas de segurança), 1 atuador elétrico, 1 bomba de carregamento de alta pressão, 1 motor elétrico (para a bomba de carregamento de alta pressão), 2 trocadores de calor, 3 gavetas de alimentação elétrica, 1 disjuntor, 1 dispositivo de proteção de falha de aterramento, 1 dispositivo de proteção de falha no estator, 10 indicadores de temperatura, 3 indicadores de nível e 3 indicadores de pressão.

Abaixo são apresentados diagramas do sistema de controle químico e volumétrico, com a identificação dos trechos funcionais por numeração (001, 002, 003, etc...) e pelas cores nos diagramas pode-se observar quais componentes fazem parte de quais trechos funcionais:

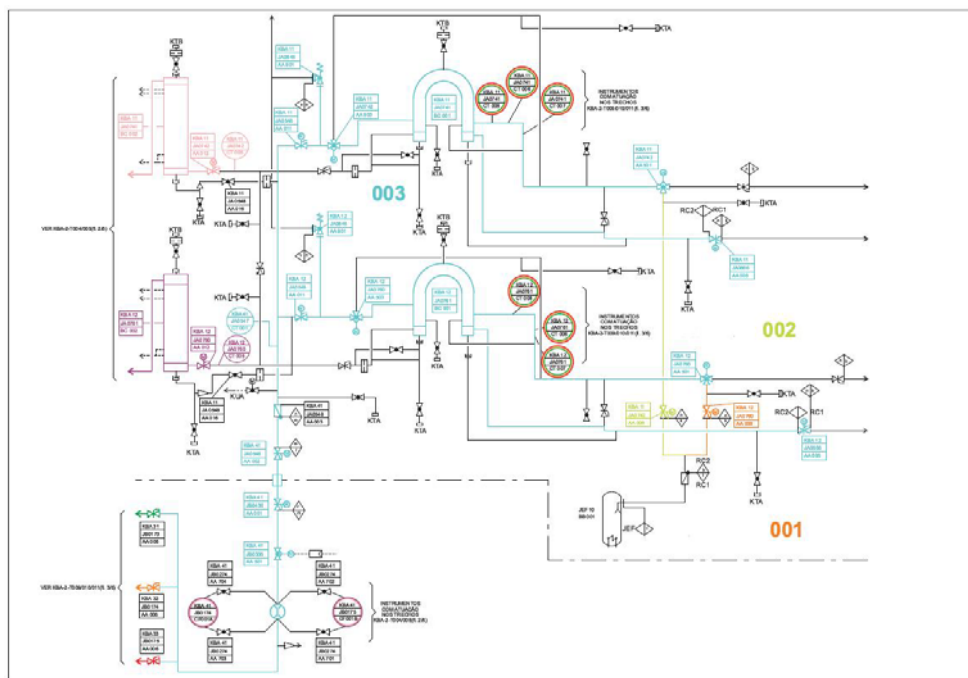


Diagrama 5.1 – Sistema de Controle Químico e Volumétrico

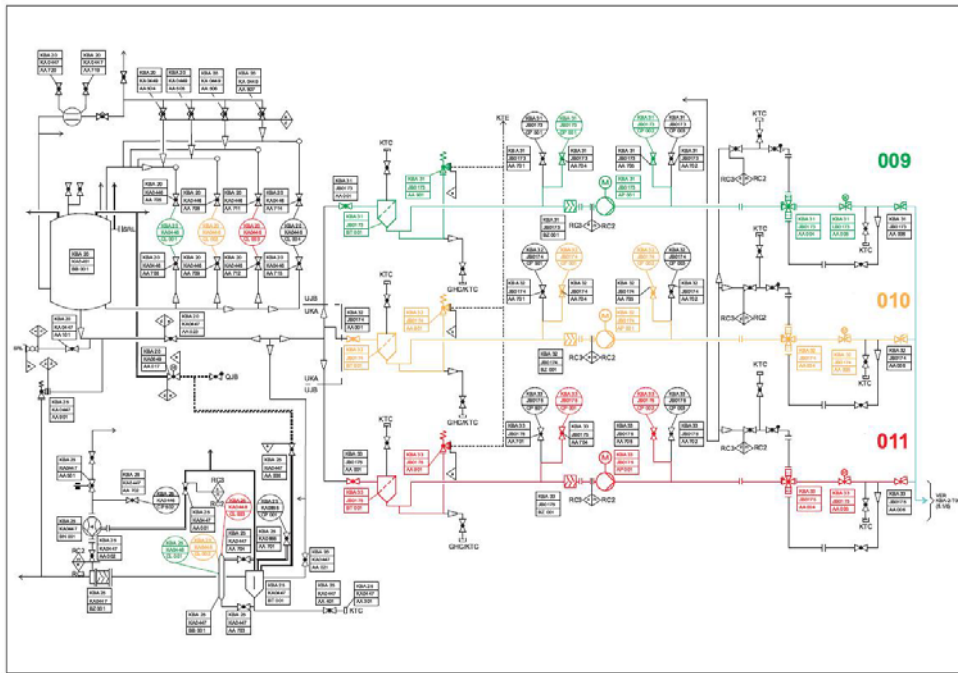


Diagrama 5.2 – Sistema de Controle Químico e Volumétrico

5.3. Aplicação de dados à RNA:

De posse das informações, faça-se como instruído na parte metodológica: uma vez que os trechos funcionais estão divididos e organizados (e os componentes que os compõem) e a base de tempo (e seu intervalo), organiza-se isso de forma inteligível, para ser criada a tabela Código de Equipamentos/Códigos de Falhas x Tempo.

Há uma inter-relação dos códigos para poder ser feita a identificação de cada equipamento e de cada falha, como será mostrada em tabelas posteriores.

Tabela 5.1– Nomenclatura para composição de códigos de equipamentos

Codificação para os equipamentos	
10	Atuador elétrico de válvula
20	Válvula
30	Bomba
40	Trocador de Calor
50	Indicador de temperatura
60	Indicador de nível
70	Indicador de fluxo
80	Indicador de pressão
90	Lógica de Proteção
100	Filtros, Separadores físicos
110	Motor Elétrico (Bomba)
120	Proteção de Falha de Aterramento (F51)
130	Proteção de Falha no Estator (F56)
140	Disjuntor
150	Gaveta de Alimentação Elétrica
160	Cubículo de Alimentação e Força

Tabela 5.2 – Nomenclatura para composição de códigos de falha

Codificação para os modos de falha	
10	Completar nível de lubrificante
11	Troca de lubrificante
20	Vazamentos
30	Relubrificação do mancal do motor com pino graxeiro
31	Relubrificar
40	Calibração
50	Implementação da SMT 108.02 - Mudança de SET-POINT
51	Alteração de SET-POINT - Revisão da SMT 108.02
60	Inspeção em serviço da bomba
61	Inspeção em serviço do motor
70	Atuação de desarme da bomba
71	Alarme de alta temperatura
72	Falha em indicadores eletrônicos
73	Indicação de falha
74	Geração de alarme
80	Execução de testes
81	Execução de monitorações
90	Degradação de Confiabilidade: válvula não fecha
91	Degradação de Confiabilidade: aumento de vibração
92	Degradação de Confiabilidade: válvula dando passagem gerando alarme
93	Degradação de Confiabilidade: ruído anormal
94	Degradação de Confiabilidade: temperatura alta no motor da bomba
100	Preventivas por estado: ácido bórico cristalizado
101	Preventivas por estado: válvula travada
102	Preventivas por estado: eletrodos dos cabos solto no piso
103	Preventivas por estado: remoção de motor
104	Preventivas por estado: manutenção preventiva da gaveta
105	Preventivas por estado: problemas com o SIPLUG
106	Preventivas por estado: limpeza interna da bomba
107	Preventivas por estado: inspeção nos mancais do motor
108	Preventivas por estado: ajuste das chaves limites
109	Preventivas por estado: substituição da válvula
110	Preventivas por estado: conferir ligações
200	Implantação de Projetos: implementação da SIT 511 - Instalação de Resistores
201	Implantação de Projetos: instalação de dispositivo para teste hidrostático

Tabela 5.3 – Código de Equipamentos/Código de Falhas x Tempo

A	B	C	D	E	F	G	H
COMPONENTE	CODIGO COMPONENTE	CODIGO DE FALHA	DATA DA FALHA EMISSÃO	TEMPO	INICIO REAL	TEMPO REAL	TEMPO TOTAL
1	RECI-ABR	20108	04/02/18 08	8	24/02/18 12:27	24/02/18 19:19	89:52:00
2	RECI-ABR	20108	04/02/18 09:13	173	24/02/18 14:23	24/02/18 19:19	42:56:00
3	RECI-ABR	20108	04/02/18 11:08	248	24/02/18 16:01	24/02/18 19:19	88:18:00
4	RECI-ABR	20108	04/02/18 14:47	323	18/02/18 08:16	18/02/18 12:28	101:34:00
5	RECI-ABR	20108	04/02/18 15:31	371	14/02/18 15:19	14/02/18 19:12	108:27:00
6	RECI-ABR	20108	04/02/18 15:53	333	12/02/18 09:58	12/02/18 12:52	105:09:00
7	RECI-ABR	20108	04/02/18 11:57	514	24/02/18 09:05	24/02/18 14:45	104:40:00
8	RECI-ABR	20108	04/02/18 08:42	861	17/02/18 15:07	17/02/18 18:58	110:51:00
9	RECI-ABR	20108	04/02/18 12:17	1136	24/02/18 14:17	24/02/18 18:58	104:41:00
10	RECI-ABR	20108	04/02/18 10:37	1279	18/02/18 10:24	18/02/18 14:42	115:01:00
11	RECI-ABR	20108	04/02/18 10:40	1279	18/02/18 10:41	18/02/18 15:19	115:38:00
12	RECI-ABR	20108	04/02/18 11:46	1387	24/02/18 10:41	24/02/18 14:42	119:01:00
13	RECI-ABR-MOT	11030	14/02/18 16:44	1613	27/02/18 09:18	27/02/18 11:46	124:28:00
14	RECI-ABR-MOT	11030	14/02/18 16:41	1613	27/02/18 09:18	27/02/18 11:58	124:40:00
15	RECI-ABR-MOT	11030	14/02/18 16:41	1613	27/02/18 09:18	27/02/18 12:19	124:51:00
16	RECI-ABR-MOT	11030	24/02/18 14:27	2077	18/02/18 14:41	24/02/18 18:58	139:17:00
17	RECI-ABR	20108	15/02/18 16:15	2107	26/02/18 11:38	26/02/18 17:06	117:28:00
18	RECI-ABR	20108	18/02/18 16:21	2107	18/02/18 14:41	18/02/18 18:58	111:17:00
19	RECI-ABR	20108	18/02/18 16:21	2107	24/02/18 14:41	24/02/18 18:58	111:17:00
20	RECI-ABR	20108	24/02/18 20:39	3227	24/02/18 14:41	24/02/18 19:17	176:40:00
21	RECI-ABR	40108	23/02/18 09:57	3864	18/02/18 17:02	18/02/18 21:16	202:19:00
22	RECI-ABR	40108	23/02/18 09:59	3865	18/02/18 17:02	18/02/18 21:14	202:16:00
23	RECI-ABR-MOT	10301	14/02/18 11:55	4274	24/02/18 14:47	24/02/18 19:17	202:30:00
24	RECI-ABR	20108	18/02/18 20:21	4627	11/02/18 09:58	11/02/18 11:37	128:39:00
25	RECI-ABR	20108	18/02/18 20:21	4627	12/02/18 15:18	12/02/18 12:12	128:39:00
26	RECI-ABR	20108	18/02/18 20:26	4627	18/02/18 15:08	18/02/18 20:11	128:39:00
27	RECI-ABR	20108	04/02/18 16:40	5061	24/02/18 11:35	24/02/18 14:46	151:11:00
28	RECI-ABR	20108	24/02/18 17:38	5290	24/02/18 14:41	24/02/18 18:58	162:17:00
29	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 18:24	5296	18/02/18 10:01	18/02/18 11:33	170:26:00
30	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 18:24	5296	20/02/18 14:38	20/02/18 19:15	170:26:00
31	RECI-ABR	20108	27/02/18 18:25	5296	18/02/18 10:01	18/02/18 11:37	170:26:00
32	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 18:25	5296	20/02/18 14:38	20/02/18 19:17	170:26:00
33	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 18:25	5296	24/02/18 14:38	24/02/18 19:15	170:26:00
34	RECI-ABR	20108	24/02/18 19:15	5469	24/02/18 11:38	24/02/18 14:46	181:38:00
35	RECI-ABR	20108	19/02/18 16:44	6174	19/02/18 10:01	19/02/18 14:41	179:40:00
36	RECI-ABR	20108	22/02/18 16:48	6874	22/02/18 10:01	22/02/18 14:46	181:38:00
37	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	18/02/18 09:58	18/02/18 20:16	182:18:00
38	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	18/02/18 09:58	18/02/18 20:16	182:18:00
39	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	24/02/18 14:47	24/02/18 19:15	182:18:00
40	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	24/02/18 14:47	24/02/18 19:15	182:18:00
41	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	24/02/18 14:47	24/02/18 19:15	182:18:00
42	RECI-ABR-MOT	11030	27/02/18 16:42	7607	24/02/18 14:47	24/02/18 19:15	182:18:00
43	RECI-ABR	20108	02/03/18 11:38	7922	06/03/18 11:37	06/03/18 16:22	216:45:00
44	RECI-ABR	20108	02/03/18 11:38	7924	18/02/18 11:35	18/02/18 17:02	216:45:00
45	RECI-ABR	20108	02/03/18 11:35	7924	20/02/18 11:35	20/02/18 16:46	216:45:00
46	RECI-ABR	20108	02/03/18 11:35	7924	20/02/18 11:35	20/02/18 17:09	216:45:00
47	RECI-ABR-MOT	11030	13/03/18 17:21	8140	26/02/18 11:31	26/02/18 14:24	216:45:00
48	RECI-ABR	20108	02/03/18 16:24	8201	26/02/18 09:58	26/02/18 14:46	216:45:00
49	RECI-ABR	20108	24/02/18 16:41	8899	24/02/18 09:58	24/02/18 14:42	216:45:00
50	RECI-ABR	20108	24/02/18 16:41	8901	27/02/18 09:58	27/02/18 14:46	216:45:00

A combinação das nomenclaturas para código de equipamentos e código de falhas resulta na Tabela 5.4, que apresenta uma relação mais sintética de equipamentos e de falhas:

Tabela 5.4 – códigos de componente, de falhas e ocorrência de falhas no tempo.

	DU	DV	DW	DX	DY	DZ	EA	EB	EC	ED	EE	EF	EG
1	Componente 125	Componente 126	Componente 127	Componente 128	Componente 129	Componente 130	Componente 131	Componente 132	Componente 133	Componente 134	Componente 135	Componente 136	Componente 137
2	KBA31AA005.V01	KBA31AA901	KBA31AA902	KBA31AF001	KBA31AF001.F01	KBA31AF001.F06	KBA31AF001.H01	KBA31AF001.Q0	KBA31EC002	KBA31EC003	KBA31ET001	KBA31ET002	KBA31ET003
3	1031005	2031901	2031902	3031001	12031001	13031001	11031001	14031001	4031002	4031003	10031001	10031002	10031003
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	3093	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	3010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	3060	0	0	1069/1030	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	3010	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	10107	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
25	0	0	0	3060	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	3060	0	0	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
36	0	0	0	3093	0	0	0	0	0	0	0	0	0
37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
39	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	0	0	0	3060	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
44	0	0	0	0	12040	13040	0	0	0	0	0	0	0
45	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
47	0	0	0	3060	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
52	0	0	0	0	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
54	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
56	0	0	0	3071	0	0	0	0	0	0	0	0	0
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
62	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
64	0	0	0	0	0	0	1030	0	0	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A tabela 5.4 é interpretada da seguinte forma:

➔ Demonstração dos componentes do sistema de controle químico e volumétrico, da seguinte forma:

- Linha 01 – ordenação numérica genérica dos componentes;
- Linha 02 – identificação dos componentes pelo sistema de identificação padronizado em plantas do tipo KWU/SIEMENS;
- Linha 03 – vinculação dos códigos dos componentes (como explicado anteriormente) à ordenação numérica genérica.

➔ Demonstração dos códigos de falhas que ocorreram nos componentes:

- Linha 04 em diante;

A partir da linha 04, é contado o tempo, ou seja, o momento em que ocorreu a falha e em qual componente – obtém-se a informação cruzando a informação das colunas pelas linhas. Para ficar mais claro: a variável temporal é informada da linha 04 em diante, de acordo com o seguinte critério: linha 04 – quinzena 00; linha 05 – quinzena 01; linha 06 – quinzena 02, e segue até a última linha que representa a quinzena 121 – como explicado anteriormente.

Assim, em função da tabela 5.4, com o objetivo de se estabelecer a precisão da rede (objetivando em não indicar falsos positivos e conseguir estabelecer falhas de causa comum, por exemplo), uma tabela “verdade” é desenvolvida (Tabela 5.5), onde no lugar do código de falha se coloca uma simbologia que demonstra que há falha, e quando não, uma simbologia para tanto, como já foi dito.

O próximo passo é o cerne do trabalho: o treinamento das RNA para cada trecho funcional de modo a estabelecer um padrão de reconhecimento de falhas para aquele trecho funcional dado, a partir dos dados fornecidos.

5.3.1. Convenções para aplicação e compreensão de dados de entrada e saída:

As convenções abaixo demonstradas são para compreensão de como os dados são rotulados para serem usados nas RNA, seguindo a metodologia de criação das “tabelas verdade” para cada um dos trechos funcionais, como exposto no item 5.3:

- VRTFXX – “VRTF” significa “VARIÇÕES DO TRECHO FUNCIONAL”, que é o nome atribuído para as variações de dados de saída quando na definição dos dados de saída da rede neural artificial usada. Cada VRTFXX é uma “tabela verdade” para cada variação do trecho funcional XX, como dito anteriormente;
- Para cada TRECHO FUNCIONAL, haverá VRTF01, VRTF02, etc, o que significa que no TRECHO FUNCIONAL “Y”, VRTF01 o dado de saída (“A”) foi colocado na primeira posição (componente), e todos os outros (tempo inclusive) foram dados de entrada (“I”); VRTF02 o dado de saída (“A”) foi colocado na segunda posição (componentes), e todos os outros (tempo inclusive) foram dados de entrada (“I”), e assim por diante;
- TREFUNYY – “TREFUN” significa “TRECHO FUNCIONAL” e o consecutivo YY varia de 01 a 11, pois no sistema escolhido e dividido, há 11 trechos funcionais. Cada TREFUNYY é, também, uma “tabela verdade” para cada trecho funcional YY, como já explicado.

A RNA utilizada é do tipo *feedforward* com treinamento de retropropagação (*backpropagation*).

5.4. Dependência e inter-relação entre componentes:

Os trechos funcionais 01, 02, 03, 06 e 07 foram desprezados, pois, ou não apresentavam falhas alguma, ou apresentavam tão somente falhas desprezíveis para cálculo de treinamento das redes neurais. Apesar de isso parecer uma informação de não muito grande valia, ela o é, pois mostra que a RNA necessita de um histórico de falhas nos componentes dos sistemas para poder ser treinada, e assim descobrir um padrão de falha para poder prever qual falha ocorrerá, que é o propósito do trabalho que se apresenta.

Por outro lado, apesar de serem apresentados dados (falhas) para os trechos funcionais 05 e 08, os mesmos não contribuíram em muita coisa, ou mesmo em quase nada, para chegar a qualquer tipo de conclusão, dado principalmente à escassez de dados de falhas para a rede laborar sobre os mesmos, ou por não terem realmente nenhuma inter-relação entre as falhas de seus componentes, pelos mesmos motivos ditos anteriormente.

Os trechos funcionais 04, 09, 10 e 11 foram os que contribuíram efetivamente para chegar às conclusões, pois são os trechos que geraram planilhas que incluem os componentes dos trechos funcionais (trechos 09, 10 e 11) onde estão as bombas de carregamento de alta pressão, e seus motores e todos os outros dispositivos, que sempre se mostraram mais suscetíveis à indisponibilidade devido às paradas não programadas de alguns dos seus três trens.

Como nesses três trechos funcionais (09, 10 e 11), as bombas são de dois modelos diferentes (sendo duas de um, e uma de outro – a saber: centrífuga e deslocamento positivo), é de se esperar que existam variações nos modos de falha, ou pelo menos, no “caminho” do modo de falha.

Como se pode analisar no trecho funcional 11, houve uma grande convergência da rede em VRTF03, ou seja, quando a bomba estava na posição de saída – o que faz sentido, dado o alto número de falhas na bomba como pode ser observado. A RNA para esse trecho funcional, com essa configuração, ou seja, com a bomba com elemento de saída, apresentou aproximadamente 72% de acertos.

Já analisando os trechos funcionais 09 e 10, vemos que VRTF02 (que é o da bomba como saída) não converge tanto. Apesar do grande número de falhas. Mas deve-se atentar para algo mais importante: tanto no trecho Funcional 09, como no 10, apesar do VRTF03 e VRTF04 (que são os dispositivos de proteção, respectivamente, ao aterramento, e ao estator), serem baixos, VRTF03 e VRTF04 convergem muito bem nos dois trechos funcionais (09 e 10) – o que explica o alto número de falhas no motor elétrico da bomba – já que seus dispositivos de proteção falharam.

A informação dos dois últimos parágrafos mostra, efetivamente, a inter-relação entre os componentes de um trecho funcional para, no caso da falha de um ou mais deles, resultar na indisponibilidade do trecho funcional afetado.

As tabelas abaixo podem elucidar de maneira quantitativa os resultados obtidos para melhor compreensão:

Tabela 5.6 – trecho funcional 04

Trecho 04	
Componente de saída	Índice de acerto
Gaveta de Alimentação Elétrica	100%
Atuador elétrico de válvula (1)	100%
Válvula (1)	0
Atuador elétrico de válvula (2)	0
Válvula (2)	0
Trocador de Calor	0
Indicador de fluxo	0

Tabela 5.7 – trecho funcional 05

Trecho 05	
Componente de saída	Índice de acerto
Gaveta de Alimentação Elétrica	0
Válvula	0
Trocador de Calor	0
Indicador de fluxo	0

Tabela 5.8 – trecho funcional 08

Trecho 08	
Componente de saída	Índice de acerto
Atuador elétrico de válvula	0
Válvula	0

Tabela 5.9 – trecho funcional 09

Trecho 09	
Componente de saída	Índice de acerto
Indicador de Nível	0
Bomba de carregamento de alta pressão	46,67%
Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento	100%
Dispositivo de Proteção de Falha no Estator	100%
Motor Elétrico da Bomba	27,78%
Filtros, Separadores físicos	0
Indicador de Temperatura	0

Tabela 5.10 – trecho funcional 10

Trecho 10	
Componente de saída	Índice de acerto
Indicador de Nível	0
Bomba de carregamento de alta pressão	26,32%
Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento	100%
Dispositivo de Proteção de Falha no Estator	100%
Motor Elétrico da Bomba	0
Disjuntor	0
Filtros, Separadores físicos	0
Indicador de Temperatura (1)	0
Indicador de Temperatura (2)	0
Indicador de Temperatura (3)	0

Tabela 5.11 – trecho funcional 11

Trecho 11	
Componente de saída	Índice de acerto
Indicador de Nível	0
Válvula de segurança	0
Bomba de carregamento de alta pressão	71,43%
Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento	0
Motor Elétrico da Bomba	53,33%
Trocador de calor	0
Indicador de pressão	0
Indicador de Temperatura	0
Indicador de Temperatura	0

5.4.1. Identificação dos componentes em seus trechos:

Abaixo segue a forma de identificação dos componentes tabelados no presente trabalho. Os números diante dos componentes são os rótulos dos trechos funcionais “Y”, e o número após a barra é a identificação do equipamento (componente) na tabela 02 (a tabela “verdade”) inicial (informação de grande valia para pesquisa rápida a posteriori).

Trecho Funcional 04

Componentes:

001/018 – Gaveta de Alimentação Elétrica

002/051 – Atuador elétrico de válvula

003/052 – Válvula

004/053 – Atuador elétrico de válvula

005/056 – Válvula

006/062 – Trocador de Calor

007/198 – Indicador de fluxo

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	001	002	003	004	005	006	007	TEMPO
2	0	0	1	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	0	1	0	0	0	0	3
6	0	0	0	0	0	0	0	4
7	0	0	0	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	0	0	0	8
11	0	0	0	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	1	0	11
14	0	0	0	0	0	0	1	12
15	0	0	0	0	0	0	0	13
16	0	0	0	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	0	0	0	16
19	0	0	0	0	0	0	0	17
20	0	0	0	0	0	0	0	18
21	0	0	0	1	0	0	0	19
22	0	0	0	0	0	0	0	20
23	0	0	0	0	0	0	0	21
24	0	0	0	0	0	0	0	22
25	0	0	0	0	0	0	0	23
26	0	0	0	0	0	0	0	24
27	0	0	0	0	0	0	0	25
28	0	0	0	0	0	0	0	26
29	0	0	0	0	0	0	0	27
30	0	0	0	0	0	0	0	28
31	0	0	0	0	0	0	0	29
32	0	0	0	0	0	0	0	30
33	0	0	0	0	0	0	0	31
34	0	0	0	0	0	0	0	32

Figura 5.1 – TREFUN04

Trecho Funcional 05

Componentes:

001/021 – Gaveta de Alimentação Elétrica

002/078 – Válvula

003/088 – Trocador de Calor

004/198 – Indicador de fluxo

	A	B	C	D	E
1	001	002	003	004	TEMPO
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	2
5	0	1	0	0	3
6	0	0	0	0	4
7	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	8
11	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	11
14	0	0	0	1	12
15	0	0	0	0	13
16	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	16
19	0	0	0	0	17
20	0	0	0	0	18
21	0	0	0	0	19
22	0	0	0	0	20
23	0	0	0	0	21
24	0	0	0	0	22
25	0	0	0	0	23
26	0	0	0	0	24
27	0	0	0	0	25
28	0	0	0	0	26
29	0	0	0	0	27
30	0	0	0	0	28
31	0	0	0	0	29
32	0	0	0	0	30
33	0	0	0	0	31
34	0	0	0	0	32
35	0	0	0	0	33
36	0	0	0	0	34
37	0	0	0	0	35
38	0	0	0	0	36
39	0	0	0	0	37
40	0	0	0	0	38
41	0	0	0	0	39
42	0	0	0	0	40
43	0	0	0	0	41
44	0	0	0	0	42
45	0	0	0	0	43
46	0	0	0	0	44

Figura 5.2 – TREFUN05

Trecho Funcional 08

Componentes:

001/105 – Atuador elétrico de válvula

002/110 – Válvula

	A	B	C
1	001	002	TEMPO
2	0	0	0
3	0	0	1
4	0	0	2
5	0	0	3
6	0	0	4
7	0	0	5
8	0	0	6
9	0	0	7
10	0	0	8
11	0	0	9
12	0	0	10
13	0	0	11
14	0	0	12
15	0	0	13
16	0	0	14
17	0	0	15
18	0	0	16

Figura 5.3 – TREFUN08

Trecho Funcional 09

Componentes:

001/115 – Indicador de Nível

002/128 – Bomba de carregamento de alta pressão

003/129 – Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento

004/130 – Dispositivo de Proteção de Falha no Estator

005/131 – Motor Elétrico da Bomba (Bomba de carregamento de alta pressão)

006/136 – Filtros, Separadores físicos

007/143 – Indicador de Temperatura

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	001	002	003	004	005	006	007	TEMPO
2	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	1	0	0	0	0	0	3
6	0	0	0	0	1	0	0	4
7	0	0	0	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	0	0	1	8
11	0	0	0	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	0	0	11
14	1	0	0	0	0	0	0	12
15	0	0	0	0	0	0	0	13
16	0	0	0	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	0	0	0	16
19	0	1	0	0	1	0	0	17
20	0	1	0	0	0	0	0	18
21	0	0	0	0	1	0	0	19

Figura 5.4 – TREFUN09

Trecho Funcional 10

Componentes:

001/116 – Indicador de Nível

002/151 – Bomba (Bomba de carregamento de alta pressão)

003/152 – Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento

004/153 – Dispositivo de Proteção de Falha no Estator

005/154 – Motor Elétrico da Bomba (Bomba de carregamento de alta pressão)

006/155 – Disjuntor

007/159 – Filtros, Separadores físicos

008/165 – Indicador de Temperatura

009/166 – Indicador de Temperatura

010/167 – Indicador de Temperatura

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	001	002	003	004	005	006	007	008	009	010	TEMPO
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1
4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	4
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	8
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
14	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
19	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	17
20	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	18
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
22	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	20
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	21
24	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	22
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	24
27	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	25
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	26
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28
31	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	29
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
33	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	31
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32

Figura 5.5 – TREFUN10

Trecho Funcional 11

Componentes:

001/117 – Indicador de Nível

002/173 – Válvula (de segurança)

003/174 – Bomba (Bomba de carregamento de alta pressão)

004/175 – Dispositivo de Proteção de Falha de Aterramento

005/177 – Motor Elétrico da Bomba (Bomba de carregamento de alta pressão)

006/179 – Trocador de Calor

007/186 – Indicador de Pressão

008/188 – Indicador de Temperatura

009/189 – Indicador de Temperatura

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	001	002	003	004	005	006	007	008	009	TEMPO
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	8
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	14
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
19	0	0	1	0	1	0	0	0	0	17
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	18
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19
22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20
23	0	0	0	0	0	0	0	0	1	21
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22
25	0	0	1	0	0	0	0	0	0	23
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	25
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27
30	0	0	1	0	1	0	0	0	0	28
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	31
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	32
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33
36	0	0	1	0	0	0	0	0	0	34
37	0	0	0	0	0	0	0	0	1	35
38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36

Figura 5.6 – TREFUN11

5.5. Interpretação de resultados e conclusões:

Uma vez treinadas as RNA de acordo com as variações explanadas nos tópicos acima, deve-se separar as RNA que obtiveram, após treinamento, bons resultados para implantar em um dado sistema escolhido.

Como explicado na parte de metodologia, fica claro que os trechos 04, 09, 10 e, principalmente, 11, são aqueles que, devido à riqueza de informações de histórico de manutenção, podem mostrar a inter-relação dos componentes entre si, para predição da falha, e os que podem efetivamente demonstrar a eficácia da RNA, como sistema especialista, para uma mudança na política de manutenção dos componentes, dos trechos funcionais citados, com o objetivo de otimização via RNA como ferramenta para tanto.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. Conclusões:

A partir dos resultados obtidos na aplicação de uma rede neural artificial (RNA) para desenvolver um sistema especialista de predição de falhas em equipamentos de plantas que utilizam sistemas eletromecânicos no seu processo industrial, fica claro que tal técnica proporciona uma ferramenta extremamente valiosa para os profissionais de planejamento de manutenção e, mais ainda, como suporte à tomada de decisão para eventuais mudanças na política de manutenção de tais sistemas.

Com efeito, é possível afirmar que o uso de RNA permitiu que o sistema inteligente, proposto no trabalho presente, fosse capaz de relacionar a falha de um determinado equipamento em função da falha de outros equipamentos de um mesmo trecho funcional. Da mesma forma, o uso de RNA também, permitiu identificar alguns equipamentos que em nada/pouco são afetados pela falha de outros do mesmo trecho funcional.

Assim, especialmente, no que tange à sua precisão, pode ser aplicada em vários tipos de sistemas, das mais variadas formas, uma vez que os passos metodológicos sejam seguidos rigorosamente.

Dessa forma, para os equipamentos, onde foi identificada a relação de falha daqueles com outros equipamentos do mesmo trecho funcional, as respectivas RNA treinadas para este fim, poderão ser utilizadas para predizerem futuras falhas dos mesmos. Essas

descobertas poderão ser determinantes para a mudança na política de manutenções para equipamentos diversos.

E com o constante avanço na área de Inteligência Artificial e nos campos de equipamentos e programas computacionais, a ferramenta apresentada tem um grande trunfo em si mesma: a emulação de sistemas reais (uma vez alimentando a RNA com os dados apropriados e trabalhando-os de maneira meticulosa) e o baixo custo que a técnica oferece, chegando ao final como uma ferramenta especialmente apropriada para indústrias em que programas de engenharia de confiabilidade já usados não podem ser tão eficazes e de baixo custo, tais como a aeroespacial e a nuclear.

No concernente à indústria nuclear, o grau de envelhecimento e de solicitação dos componentes que integram as plantas de potência, o uso de sistemas especialistas baseados em RNA, como descrito nesse trabalho se torna ainda mais relevante, dada a necessidade de manter em alto nível os padrões de segurança das plantas hoje ainda existentes, com alto número de redundâncias, e a própria extensão da vida útil nessas mesmas instalações, que, como dito, por sofrerem degradação e envelhecimento de seus vários sistemas, minimiza o custo para a estender a capacidade de vida da planta para geração de potência, mantendo baixos os índices de inserção de falhas em seus equipamentos já degradados, fazendo somente manutenção naqueles que forem apontados pela RNA, predizendo futuras falhas em potencial.

6.2. Recomendações e perspectivas futuras:

Com o avanço das técnicas computacionais, e mesmo se utilizando técnicas já existentes, tais como, lógica nebulosa, sistemas especialistas, algoritmos genéticos,

entre outras, a metodologia demonstrada no presente trabalho pode ser ainda mais eficaz para a resolução de problemas e apoio à tomada de decisão na modificação de parâmetros para política de manutenção em plantas termonucleares, especialmente para os novos tipos de plantas que o futuro nos espera, com reatores de 4^a geração, em que os objetivos serão, além da geração de energia elétrica, outros diversos, como dessalinização de água do mar, geração de hidrogênio (como nova fonte de energia), plantas integradas de geração de potência e re-processamento de combustível nuclear, entre tantas outras, em que ferramentas baseadas em RNA podem substituir com eficácia as técnicas de programas de confiabilidade em manutenção hoje existentes.

Tais melhorias futuras passam por processos de como identificar mais precisamente qual grau de influência cada equipamento está sujeito em relação a cada um dos demais equipamentos do mesmo trecho funcional, bem a criação de um sistema *neuro-fuzzy*, com a ajuda de especialistas em manutenção, incluindo mais informação ao sistema inteligente, de modo a aumentar a capacidade de predição de falhas.

A emulação de situações reais de manutenção para plantas termonucleares é uma grande e importante contribuição apresentada no trabalho presente, pois, na medida em que os bancos de dados das plantas hoje existentes vão sendo alimentados por dados reais de intervenções em componentes das mesmas, o sistema inteligente poderá cada vez aprender mais e mais com as informações para ele fornecidas, e retornado para os mantenedores, dados cada vez mais realistas para a manutenção dos componentes da planta, aumentando, dessa forma, a segurança de intervenções para manutenção, indicando com alta margem de confiabilidade quando se intervir, e como consequência, tornando a vida útil das plantas cada vez mais longas, e por sua vez, diminuindo o custo

de construção, montagem e instalação de plantas de geração de potência baseadas em reatores nucleares, o que fornece à indústria nuclear argumentos concisos para se apresentar como alternativa viável, do ponto de vista técnico e econômico; sustentável e segura, para investidores, governos e a população em geral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

ACKLEY, D. H., HINTON, G. E., SEJNOWSKI, T. J. *A learning algorithm for boltzmann machines*, *Cognitive Science*, vol. 9, 1985, pp. 147-169.

ASSEF, L. V. *Neurolab: um ambiente de desenvolvimento e aplicação de redes neurais*. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999. 88p.

AZEVEDO, Fernando Mendes; BRASIL, Lourdes Mattos; OLIVEIRA, Roberto Célio Limão. *Redes Neurais com aplicação em controle e em Sistemas Especialistas*. 2.ed. Florianópolis: Visual books, 2000.

BILLINTON, R. AND PAN, J., 1998, “*Optimal Maintenance Scheduling in a Two Identical Component Parallel Redundant System*”, *Reliability Engineering & System Safety*, v.59, pp. 309-316.

CHIANG, J. H AND YANG, J., 2001, “*Optimal Maintenance Policy for a Markovian System under Periodic Inspection*”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.71, pp.165-172.

COHEN, M. A., GROSSBERG, S. *Absolute stability of global pattern formation and parallel memory storage by competitive neural network*, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. SMC-13, 1983, pp.815-826

DIJKHUIZEN, G. AND HEIJDEN, M., 1999 “*Preventive Maintenance and the Interval Availability Distribution of an Unreliable Production System*”, Reliability Engineering and System Safety, v.66, pp.13-27.

DUTHIE, J. C., ROBERTSON, M. I., CLAYTON, A. M. AND LIDBURY, D. P. G., 1998, “*Risk-based Approaches to Ageing and Maintenance Management*”, Nuclear Engineering and Design , v.184, pp.27-38.

EPRI TR-1000806 *Demonstration of Life Cycle Management Planning for Systems, Structures, and Components*, January 2001.

EPRI TR-106857-R1 *Preventive Maintenance Basis Database*, November 1998.

FILHO, G. B. *Dicionário de Termos de Manutenção e Confiabilidade*, Ciência Moderna, 1ª edição (Edição Mercosul - Português/Espanhol) (2001).

GROSSBERG, S. “*How does a brain build cognitive code ?*” Psychological review, vol 87, pp. 1-51, 1980.

HARUNUZZAMAN, M. AND ALDEMIR, T., 1996, “*Optimization of Standby Safety System Maintenance Scheduling in Nuclear Power Plants*”, Nuclear Technology, v.113, pp. 354-367.

HAYKIN, S. *Redes Neurais: princípios e práticas*. Tradução de Paulo Martins Engel. Porto Alegre: Bookman, 2.ed., 2001, Original Ingles 1999.

HEBB, D. O. *The Organization of Behavior: a neuropsychological theory*. New York: Wiley, 1949.

HILSMEIER, T. A., ALDEMIR, T. AND VESELY, W. E., 1995, “*Time-dependent Unavailability of Aging Standby Components Based on Nuclear Plant Data*”, *Reliability Engineering and System Safety*, v.47, pp.199-205.

HOPFIELD, J. J. *Neural Networks and Physical Systems with Emergent Computational Abilities*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Washington, v. 79, p.2554- 2558, Abr 1982.

INPO AP-913 *Equipment Reliability Process Description*, December 2007.

INPO 98-001 *Equipment Performance and Information Exchange System (EPIX) Reporting Requirements*, Revision 3, September 2001.

KIRKPATRICK, S., GELATT, C. D., VECCHI, M. P. *Optimization by simulated annealing*, *Psychological review*, Series B. Vol. 17, 1983, pp. 975-986.

KOVACS, Z. L. *Redes neurais artificiais: fundamentos e aplicações*. 2^a ed. São Paulo: Coilegium Cognition, 1996

LAFRAIA, J. R. B. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*, Qualitymark, 1^a edição (2001).

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND MOL, A. C. A., 2000, “*Maximization of a Nuclear System Availability through Maintenance Scheduling Optimization Using Genetic Algorithm*”, Nuclear Engineering & Design, v.196, pp. 95-107.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND FRUTUOSO, P. F. M., 2002, “*Nuclear Power Plant Surveillance Tests Optimization by Genetic Algorithm: Application to the Brazilian Nuclear Power Plant Angra-1 Auxiliary Feed-Water System*”, International Journal of Intelligent System.

LAPA, C. M. F., PEREIRA, C. M. N. A. AND BARROS, M. P., 2006, “*A Model for Preventive Maintenance Planning Genetic Algorithms Based in Cost and Reliability*”, Reliability Engineering & System Safety.

NUMARC 93-01 *Industry Guideline for Monitoring the Effectiveness of Maintenance at Nuclear Power Plants*, May 1993.

MAEDA J. L. Y., LOTUFO A. D. P., LOPES M. L. M. *Previsão de cargas elétricas através de uma rede neural de base radial (RBF) utilizando a função GRNN do Matlab*, apresentado no 7º Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications (DINCON), FCT, Presidente Prudente – SP, 2008.

MACHADO R.N.D.M, BEZERRA U.H, PELAES E.G., OLIVEIRA R.C.L.D., TOSTES M.E.D.L. *Use of Wavelet Transform and Generalized Regression Neural*

Network (GRNN) to the Characterization of Short-Duration Voltage Variation in Electric Power System. 2009

MARTORELL, S., MUNÓZ, A., AND SERRADELL, V., 1996, “*Age-Dependent Models for Evaluating Risks & Cost of Surveillance & Maintenance of Components*”, IEEE Transactions on Reliability, v.45, n.3, pp. 433-441.

MCCULLOCH, W. S., PITTS, W. *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity.* Bulletin of Mathematical Biophysics, v. 5, p. 115-133, 1943.

MINSKY, M., PAPERT, S. *Perceptrons: an introduction to computational geometry.* Cambridge: MIT Press, 1969

MOUBRAY, J. *Reliability-centered Maintenance*, Industrial Pr, North Carolina - Second Edition (2001).

MUNÓZ, A., MARTORELL, S. AND SERRADELL, V., 1997, “*Genetic Algorithms in Optimizing Surveillance and Maintenance of Components*”, Reliability Engineering & System, v.57, n.2, pp. 107-120.

OSÓRIO, F. S., BITTENCOURT, J. R. *Sistemas Inteligentes baseados em Redes Neurais Artificiais aplicados ao processamento de imagens*, apresentado no I workshop de Inteligencia Artificial, UNISC, Rio Grande do Sul, Jun 2000.

PARK, D. H., JUNG, G. M. AND YUM, J. K., 2000, "Cost Minimization for Periodic Maintenance Policy of a System Subject to Slow Degradation", Reliability Engineering & System, v.68, pp.105-112.

PINTO, A. K., XAVIER, J. A. N. *Manutenção: Função Estratégica*. Rio de Janeiro: Qualitymark, (2001).

RAJE, D. V., OLANIYA, R. S., WAKHARE, P. D. AND DESHPANDE, A. W., 2000, "Availability Assessment of a Two-unit Standby Pumping System", Reliability Engineering & System, v.68, pp. 269-274.

RAMAKUMAR, R., 1993, *Engineering Reliability: Fundamentals and Applications*. New Jersey, Prentice-Hall International.

RUMELHART, D., 1-TINTON, G., WILLIAMS, R. *Learning Internal Representations by Error Propagation*. Cambridge: MIT Press, 1986.

ROSENBLATT, R. *Principles of Neurodynamics*. New York: Spartan Books, 1959.

SIQUEIRA, I. P. *Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação*, Qualitymark, 1ª edição (2005).

SLACK, N., et. al. *Administração da produção*. São Paulo: Atlas, (1997).

TAFNER, M. A. *Plasticidade em Redes Neurais Artificiais*. Disponível em:
<<http://www.cerebromente.org.br/n05/tecnologia/plasticidade2.html>>. Acesso em: 25
Mai. 2009

WIDROW, B. *Generalization and information storage in networks of adaline
'neurons'*, Washington: Spartan Books, 1962.