



## Estudo de um Sistema de Monitoramento de Condição de Máquina Através da Simulação por Redes de Petri

Francisco P. A. da Silva<sup>1</sup>, Francisco D. L. Moreira<sup>2</sup>, Geraldo L. B. Ramalho<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduando em Tecnologia de Manutenção Industrial – IFCE. Campus Maracanaú. e-mail: petruciokeybo@gmail.com

<sup>2</sup>Curso Técnico em Automação Industrial - IFCE. Campus Maracanaú. e-mail: diegumorera@gmail.com

<sup>3</sup>Professor efetivo – IFCE. Campus Maracanaú. e-mail: gramalho@ifce.edu.br

**Resumo:** A construção de modelos tem fundamental importância para o estudo e simulação de processos. As Redes de Petri são uma ferramenta de modelagem que possibilitam uma visualização gráfica do processo, a análise da qualidade do modelo e fornecem meios para identificar gargalos, bloqueios e apresentar otimizações. Este trabalho apresenta um modelo em Redes de Petri utilizado para simular algumas funções de um Sistema de Monitoramento de Condição de Máquina. Os resultados obtidos possibilitarão a economia de tempo e recursos na implementação do sistema em um dispositivo embarcado microcontrolado.

**Palavras-chave:** Simulação, Redes de Petri, Monitoramento de Condição de Máquina

### 1. INTRODUÇÃO

Sistemas de monitoramento de falhas desempenham um papel importante na manutenção preditiva (KARDEC; NASCIF, 2001). Em geral, estes sistemas monitoram uma máquina através de sinais que possam indicar mudanças significativas na sua condição de operação. Um método comum de monitorar a condição de uma máquina é através da análise do sinal de vibração obtido por meio de um ou mais acelerômetros do tipo piezoresistivo (PR) ou piezoelétrico (PE) (NEPOMUCENO, 1989). Nestes sistemas, o sinal de vibração é decomposto em componentes de frequência através da Transformada de Fourier (TF). O espectro de frequências contém harmônicas de diferentes amplitudes, as quais representam padrões característicos de determinadas falhas. Além da análise de vibração clássica, baseada na TF, trabalhos recentes têm mostrado bons resultados com a análise multiescala (SHEEN, 2004; CHEN; CHUA; LIM, 2006; CHEN; ZUO, 2009), dimensão fractal (NUGRAHA; LANGI, 2002) e reconhecimento de padrões (SU; XI; CHONG, 2007; YILMAZ; AYZ, 2009; FUERTES *et al.*, 2010).

O desenvolvimento de sistemas embarcados para este tipo de aplicação é bastante complexo por envolver um número grande de etapas a serem controladas, por exemplo: a coleta de sinal, a adequação e processamento do sinal, a extração de características, o armazenamento, a transmissão e a inferência para diagnóstico. Cada uma dessas etapas possui seu próprio grau de complexidade e, portanto, devem ser planejadas cuidadosamente para que não interfiram umas nas outras evitando prejudicar o desempenho do sistema. O estudo prévio através da simulação de um modelo representativo deste sistema é etapa fundamental para minimizar não conformidades durante a implementação do mesmo. Estudo de análise de desempenho podem ser realizados através de técnicas formais ou através de simulação, desde que o modelo se aproxime o suficiente do sistema real (GUDIÑO-MENDOZA, B.; LÓPEZ-MELLADO, E.; ALLA, H., 2012).

As Redes de Petri (RP) têm sido utilizadas na modelagem de diversos tipos de processos orientados a eventos discretos na automação industrial e também na área de gestão. Além disso, possui emprego também na implementação de sistemas de diagnóstico de falhas (FUERTES *et al.*, 2010; JARDINE; LIN; BANJEVIC, 2006; MIYAGI; RIASCOS, 2006). No trabalho de Yang *et al.* (2004), as RP foram utilizadas em um sistema de auxílio ao diagnóstico de falhas em motores de indução. Além de ser uma técnica formal de modelagem e análise, uma vantagem das RP em relação a outras ferramentas é a possibilidade de simulação do modelo para diferentes condições, o que permite a avaliação do comportamento dinâmico do sistema segundo as restrições necessárias para sua implementação. No estudo de Bizarria *et al.* (2010) um modelo em RP foi utilizado para simular



diversos controladores de um sistema de automação para mistura de propelentes sólidos. Os autores concluíram que a simulação foi útil para evitar não conformidades além de facilitar a detecção e correção prévia de potenciais conflitos.

Este trabalho apresenta os resultados de simulação obtidos para um modelo simplificado de um sistema de monitoramento de condição de máquina utilizando Redes de Petri Coloridas Hierárquicas (RPCH). O modelo permite simular o comportamento dinâmico do sistema e foi construído para possibilitar uma avaliação prévia à sua implementação em um sistema microcontrolado, tendo por objetivo:

- Definir um arranjo lógico para a arquitetura do sistema;
- Garantir limites no uso de memória;
- Garantir a inexistência de bloqueios decorrente do compartilhamento de recursos.

Na próxima seção é apresentada uma breve introdução às Redes de Petri Colorida e à abordagem *Top-Down* utilizada na construção de modelos. Na seção 3 são apresentados o modelo em Redes de Petri Colorida Hierárquica (RPCH) e os resultados da análise. As conclusões e perspectivas de trabalhos futuros são apresentados na seção 4.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Para este estudo foi adotada a modelagem por Redes de Petri Coloridas Hierárquicas (RPCH) (JENSEN; KRISTENSEN, 2009) a partir de uma abordagem *Top-Down*. Utilizou-se a ferramenta gratuita CPNTOOLS<sup>1</sup> para auxiliar na construção do modelo, análise e geração de relatórios.

A Rede de Petri (RP) é uma ferramenta empregada na descrição e análise de processos de diversos tipos, dentre eles os concorrentes, paralelos, assíncronos, determinísticos ou estocásticos (CARDOSO; VALETTE, 1997). Na RP clássica, inicialmente apresentada por Carl Adam Petri em 1962 como um arcabouço matemático para descrever processos a eventos discretos. A RP clássica recebe a classificação Lugar-Transição, os dois principais elementos da rede. O terceiro elemento, a ficha, ocupa um espaço chamado de lugar e é transportada de um lugar para outro através do disparo de uma transição. Nesta RP, existe apenas um tipo de ficha para representar todo e qualquer recurso presente nos lugares. Uma transição somente pode disparar se estiver habilitada, ou seja, se cada lugar de entrada contém o número de fichas correspondente ao número de arcos que o conecta a esta transição.

Devido à sua natureza gráfica, as RPs podem ser utilizadas para a visualização do processo modelado substituindo o diagrama de blocos ou o gráfico de fluxo. Os elementos gráficos de uma RP são apresentados na Figura 1 (a). Na Figura 1 (b) são ilustradas algumas estruturas básicas das RPs as quais, combinadas entre si, possibilitam a construção de modelos tão complexos quanto desejado.

A partir da necessidade de representar diferentes tipos de recursos na mesma rede, desenvolveu-se o conceito de Redes de Petri Coloridas (RPC) (JENSEN, 1981). Na RPC, as fichas representam diferentes entidades identificadas por cores distintas ou, simplesmente, números inteiros distintos. Um lugar pode conter fichas de diferentes cores. O conceito de habilitação e disparo de uma transição é idêntico ao das RP clássicas. Contudo, essa regra deve ser satisfeita para cada cor de ficha.

---

<sup>1</sup> <http://cpntools.org/>

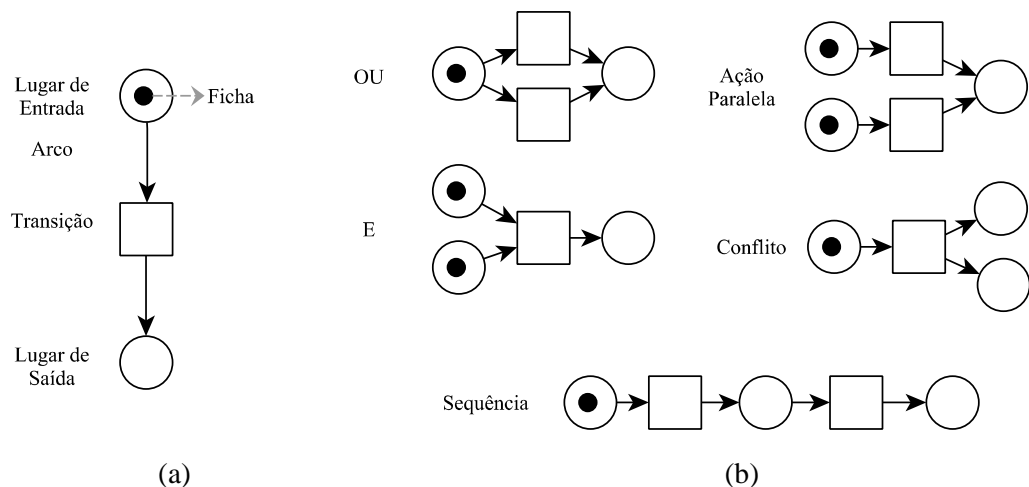


Figura 1 – (a) Elementos gráficos básicos de uma Rede de Petri. (b) Estruturas básicas de uma Rede de Petri

A RP hierárquica é uma extensão das RPs clássicas do tipo Lugar-Transição. A hierarquia é um conceito fortemente relacionado às transições. Cada transição é uma ação que pode ser representada uma RP completa contendo detalhes da tarefa que uma transição modela. Este conceito torna a estratégia de modelagem *Top-Down* uma escolha natural. Neste tipo de abordagem, o modelo inicial é, em geral, abstrato, possuindo apenas significado semântico. O detalhamento de cada transição do modelo abstrato é feito na forma de uma nova rede-filho que depende dos lugares de entrada e de saída da transição-pai. Em geral, é possível aumentar essa hierarquia para vários níveis, aumentando o detalhamento do modelo, mas mantendo a sua interpretação viável para humanos.

Na ferramenta CPNTOOLS (JENSEN E KRISTENSEN, 2009), o conceito de cores possui uma implementação em alto nível. Um conjunto de cores pode representar vários tipos de estruturas de dados, desde números inteiros a literais ou até registros. Além disso, o CPNTOOLS também incorpora uma versão da linguagem de programação ML (do inglês, *Markup Language*) que permite incluir subrotinas, expressões lógicas nos arcos e transições. O resultado é uma combinação versátil do potencial de modelagem gráfica e validação de modelos através das propriedades matemáticas das RPs com a flexibilidade de modelagem de sistemas complexos e a capacidade de simulação de diversos cenários.

Para garantir os requisitos definidos para o sistema proposto, propriedades comportamentais e estruturais (CARDOSO; VALETTE, 1997; MACIEL; LINS; CUNHA, 1996; PETERSON, 1982) foram avaliadas sobre o modelo em RPCH. Especificamente, três propriedades fundamentais para o sistema são avaliadas no modelo: vivacidade, repetitividade e limitação (MURATA, 1989).

Na seção seguinte são apresentados os resultados obtidos com a criação de um modelo em RPCH auxiliado pelo CPNTOOLS.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos conceitos das RPCHs, foram construídos modelos para um sistema de monitoramento de condição de máquina. Utilizando a abordagem *Top-Down*, em primeiro lugar foi construído um modelo genérico contendo apenas uma representação abstrata do sistema. Posteriormente, algumas ações foram desmembradas até atingir o nível de detalhamento desejado para este estudo.

O modelo simplificado está ilustrado na Figura 2. Este modelo parte do princípio de que existe uma máquina a ser monitorada que está energizada (ficha MAQ no lugar “Maquina Energizada”) e em operação, com ou sem falhas. Em intervalos de tempo pré-definidos, é realizada a análise do sinal de vibração da máquina para determinar se ela opera normalmente, dentro de níveis aceitáveis de vibração, ou se apresenta um nível de vibração acima do esperado. Uma vez definido o estado de

operação da máquina, uma ficha do tipo MAQ é armazenada nos lugares “Operacao Normal” ou “Operacao Anormal”.

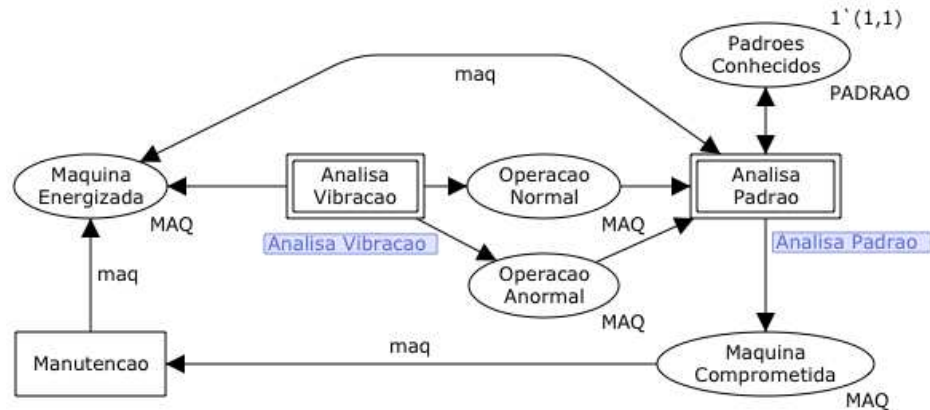


Figura 2 – Modelo genérico de um sistema de monitoramento de condição de máquina utilizando sinal de vibração

Na etapa seguinte é avaliado o padrão de vibração utilizando métricas específicas, baseadas em análise multiespectral e dimensão fractal ao contrário da abordagem convencional que utiliza a Transformada de Fourier. Caso este padrão não seja previamente conhecido, um novo padrão é armazenado no lugar “Padros Conhecidos”. O padrão é então analisado para definir se a máquina deve ser desligada ou se pode continuar em operação. Caso seja colocada uma ficha MAQ no lugar “Máquina Comprometida”, somente a transição “Manutencao” ficará habilitada, até que a falha seja corrigida.

As transições “Analisa Vibração” e “Analisa Padrao” são detalhadas hierarquicamente em duas subredes. A transição “Analisa Vibração” está representada na subrede da Figura 3. Esta subrede consiste basicamente do modelo de um módulo microcontrolado para a coleta do sinal de vibração e processamento digital de sinais visando filtragem e o cálculo de alguns parâmetros como a intensidade de vibração (valor RMS). O sinal coletado é filtrado para minimizar efeitos como *aliasing* e ruídos (OPPENHEIM, 2010), sendo armazenado em uma memória local (lugar “Sinal Vibração”). As transições de coleta e de processamento de sinais não foram detalhadas porque são irrelevantes neste estudo. O critério de decisão adotado neste modelo assume que 90% do tempo a máquina trabalha dentro de condições normais de operação. Este critério, entretanto, pode ser ajustado conforme forem obtidas mais informações em ensaios de validação. Uma expressão lógica (if-then-else) nos arcos de entrada dos lugares “Operacao Normal” e “Operacao Anormal” garante que somente um deles receberá a ficha, segundo um número aleatório (armazenado no lugar RAND) que aproxima uma probabilidade uniforme.

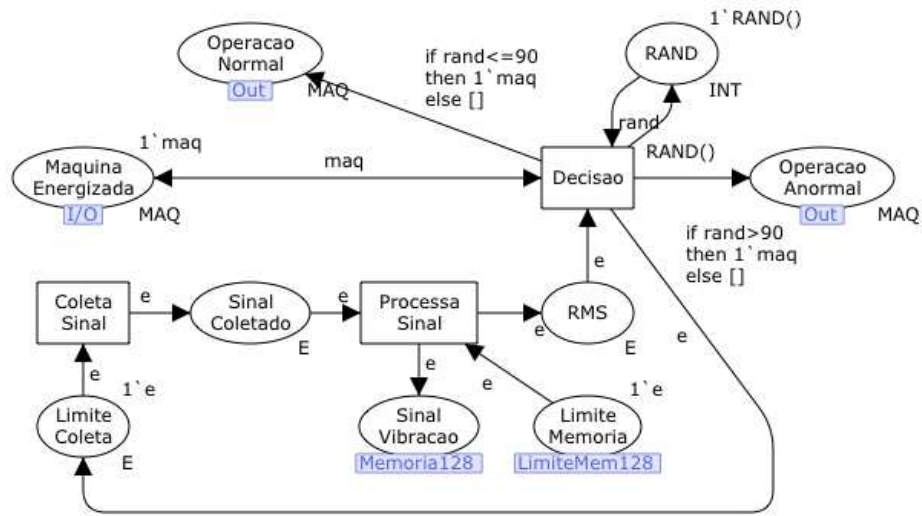


Figura 3 – Modelo da subrede de análise de vibração contendo os módulos de coleta e processamento de sinal

Para a subrede de análise do padrão de vibração, foi criado um modelo simplificado, pois as operações de cálculo do padrão (transição “Calcula Padrao”) ainda não foram completamente especificadas nesta etapa da pesquisa. Ainda assim, o modelo permite avaliar o fluxo do processo de monitoramento, permitindo identificar possíveis bloqueios.

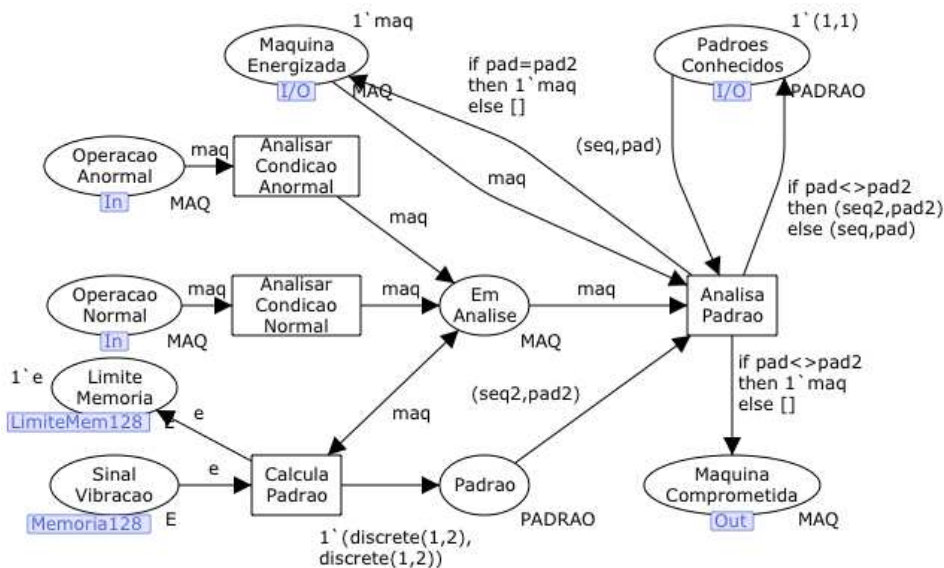


Figura 4 – Modelo da subrede de análise do padrão de vibração contendo os módulos de cálculo do padrão e análise do padrão

O modelo da Figura 2 foi submetido a diversas simulações, em primeiro lugar para a realização de ajustes buscando a eliminação de bloqueios e otimizações na lógica e sequência do processo. Nesta fase de análise, foram gerados diagramas do espaço de estados (SS, do inglês *State Space*) com auxílio do CPNTTOOLS. A análise do SS permitiu identificar e remover bloqueios e, por fim, classificar a rede, segundo suas propriedades em:

- Limitada: nenhum lugar tende a conter um número ilimitado de fichas;
- Reversível: eventualmente a marcação inicial é sempre alcançada;
- Viva: todas as transições são disparadas pelo menos uma vez.

Todas essas características são desejáveis em um sistema automático microcontrolado, já que este contém memória limitada, deve poder repetir o mesmo processo um número indeterminado de



vezes e não deve travar. Portanto, o modelo corresponde aos requisitos definidos para o seu correto funcionamento.

Durante as simulações, repetidas 10 vezes para um SS de tamanho 10000, foi realizado o monitoramento das transições listadas na Tabela 1, tendo registrado suas respectivas contagem de disparos das transições principais. Os números foram arredondados para o valor inteiro mais próximo. Pode-se observar que as contagens são bastante próximas para as diferentes transições. Isto se deve ao modo como a rede foi construída. Analisando as Figuras 3 e 4, percebe-se que estas transições dispararam sequencialmente, embora com pequenas variações na ordem em que são disparadas.

Tabela 1 – Medidas estatísticas do modelo proposto – média do número de disparos para 100 simulações

Elemento	Média	Mínimo	Máximo
(1) “Coleta Sinal”	1540	1531	1545
(1) “Processa Sinal”	1539	1531	1544
(1) “Decisao”	1539	1530	1544
(2) “Analisa Padrao”	1538	1530	1542
(2) “Calcula Padrao”	1539	1530	1544

(1) subrede “Analisa Vibração”; (2) subrede “Analisa Padrao”

Os números da Tabela 1 possuem duas interpretações. A primeira é a de que a natureza sequencial adotada no modelo beneficia o uso de um sistema microcontrolado simples. Como as tarefas mais relevantes são executadas apenas uma vez, torna-se mais fácil a implementação sequencial dessas tarefas, principalmente em dispositivos com pouca memória.

Por outro lado, os mesmos números mostram que pode haver a necessidade de tornar paralelas algumas etapas do processo caso se deseje otimizar o tempo de resposta. No caso da coleta do sinal da Figura 3, por exemplo, se for detectado algum tipo de ruído que inviabilize a interpretação correta do sinal, haverá a necessidade de repetir o processo de coleta gerando um grande atraso nas etapas seguintes.

Entretanto, a definição de qual o melhor método a ser adotado depende de uma análise envolvendo restrições de tempo, a qual não faz parte do escopo deste trabalho.

## 6. CONCLUSÕES

Apesar de ser um estudo preliminar, dois resultados significativos foram obtidos com este trabalho. O primeiro deles foi a avaliação da arquitetura do sistema de monitoramento de condição de máquina através da simulação de diversos modelos buscando a otimização de processo, otimização de recursos e a eliminação da possibilidade bloqueios. Além disso, o modelo obtido é propriamente um elemento de documentação e de referência, o que é muito importante na gestão de projetos de sistemas embarcados.

Outro aspecto importante é a possibilidade de geração automática de diferentes versões de código a partir de uma biblioteca de subrotinas implementadas previamente. Os dados da estrutura do modelo RP são armazenados em um arquivo no padrão XML. Isto torna possível desenvolver um programa para automaticamente criar versões de código fonte ou, simplesmente, determinar diferentes lógicas de funcionamento do sistema a partir de distintas versões do modelo.

Entretanto, o modelo estudado ainda não leva em consideração as restrições de tempo inerentes à coleta, processamento e transmissão dos dados. Este é um aspecto importante que precisa ser investigado visando definir parâmetros para a implementação do sistema de monitoramento em microcontroladores. Em trabalhos futuros pretende-se construir uma nova versão do modelo



considerando as restrições de tempo e utilizar melhor o potencial da ferramenta CPNTOOLS nesta análise.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro através de bolsa de incentivo à pesquisa PROAPP/PRPI Edital 02/2012 do IFCE e bolsas PFRH-PB 28 da PETROBRÁS.

## REFERÊNCIAS

ALBARBAR, A. et al. Performance evaluation of MEMS accelerometers. *Measurement*, Elsevier Ltd, v. 42, n. 5, p. 790–795, jun. 2009.

BIZARRIA, F. C. P. et al. Simulação por Redes de Petri da Automação do Sistema Misturador Planetário de Propelentes Sólidos. **VII Simpósio de Excelência em Gestão de Tecnologia**. Resende, out. 2010.

CARDOSO, J.; VALETTE, R. **Redes de Petri**. 1. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 1997. 212 p.

CHEN, H.; CHUA, P.; LIM, G. Adaptive wavelet transform for vibration signal modelling and application in fault diagnosis of water hydraulic motor. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 20, n. 8, p. 2022–2045, nov. 2006.

CHEN, H.; ZUO, M. J. Fault detection of gearbox with vibration signal analysis by a linear combination of adaptive wavelets. **Analysis**, n. July, p. 12–15, 2009.

FUERTES, J. J. et al. Visual dynamic model based on self-organizing maps for supervision and fault detection in industrial processes. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 23, n. 1, p. 8–17, fev. 2010.

GUDIÑO-MENDOZA, B.; LÓPEZ-MELLADO, E.; ALLA, H. Modeling and simulation of water distribution systems using timed hybrid Petri nets. *Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International*, v. 88, n. 3, p. 329–347, mar. 2012.

JARDINE, A.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, out. 2006.

JENSEN, K. Coloured petri nets and the invariant-method. **Theoretical Computer Science**, v. 14, n. 3, p. 317–336, 1981

JENSEN, K.; KRISTENSEN, L. M. **Coloured Petri Nets**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção - Função Estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitmark, 2001. 341 p.

MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. **Introdução às Redes de Petri e Aplicações**. 1. ed. Campinas: Ed. da UNICAMP, 1996.



MARUTHI, G.; VITTAL, K. P. Electrical Fault Detection in Three Phase Squirrel Cage Induction Motor by Vibration Analysis using MEMS Accelerometer. In: **2005 International Conference on Power Electronics and Drives Systems**. v. 2, p. 838–843, 2005

MIYAGI, P.; RIASCOS, L. Modeling and analysis of fault-tolerant systems for machining operations based on Petri nets. **Control Engineering Practice**, v. 14, n. 4, p. 397–408, abr. 2006.

MURATA, T. Petri Net: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of IEEE**. v.77, No. 4, Abril, 1989.

NEPOMUCENO, L. X. **Técnicas de Manutenção Preditiva**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1989. 952 p.

NUGRAHA, H.; LANGI, A. Segmented fractal dimension measurement of 1-D signals: a wavelet based method. In: **Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems**. v. 1, p. 195–198, 2002.

OPPENHEIM, A. V.; SCHAFER, R. W. **Discrete-Time Signal Processing**. 3. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2010. 1120 p.

PETERSON, J. L. **Petri net theory and the modeling of systems**. [S.l.]: Prentice Hall, 1982. 288 p.

SHEEN, Y. Constructing a wavelet-based envelope function for vibration signal analysis. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 18, n. 1, p. 119–126, jan. 2004.

SU, H.; XI, W.; CHONG, K. T. Vibration Signal Analysis for Electrical Fault Detection of Induction Machine Using Neural Networks. **2007 International Symposium on Information Technology Convergence (ISITC 2007)**, IEEE, p. 188–192, nov. 2007.

YANG, B.-S. et al. Case-based reasoning system with Petri nets for induction motor fault diagnosis. **Expert Systems with Applications**, v. 27, n. 2, p. 301–311, ago. 2004.

YILMAZ, M. S.; AYAZ, E. Adaptive neuro-fuzzy inference system for bearing fault detection in induction motors using temperature, current, vibration data. In: **IEEE EUROCON 2009**, p. 1140–1145, 2009.