



APLICAÇÃO DO MÉTODO DE TOMADA DE DECISÃO AHP PARA SELEÇÃO DA POLÍTICA DE MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS MECÂNICOS

Idélcio Alexandre Palheta Cardoso

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
Av. Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900, São Paulo – SP, Brasil, idelcio@usp.br

Gilberto Francisco Martha de Souza

Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos
Av. Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900, São Paulo – SP, Brasil, gfmsoouza@usp.br

Renato Vairo Belhot

Escola de Engenharia de São Carlos – Departamento de Engenharia de Produção
Av. do Trabalhador São-carlense 400, 13560-100, São Carlos–SP, Brasil, rvbelhot@prod.eesc.sc.usp.br

***Resumo.** Este trabalho descreve a aplicação do método de análise de decisão AHP (Analytic Hierarchy Process) na seleção entre duas alternativas de práticas de manutenção corretiva e preventiva para a composição da política de manutenção, inicialmente elaborando o cenário das operações, verificando o aspecto dos riscos associados às falhas nos equipamentos e suas implicações sobre a qualidade, a segurança e os custos. Após definir as prioridades relativas entre cada um dos aspectos relatados, o método AHP será efetivamente aplicado e, de modo a verificar sua eficácia, uma análise de sensibilidade (qualitativa) é apresentada, sendo possível verificar que a manutenção preventiva, quando indicada, constitui-se na melhor política de manutenção para sistemas mecânicos de máquinas-ferramenta CNC.*

***Palavras-chave.** manutenção, sistemas mecânicos, tomada de decisão, maquinas-ferramenta.*

1. INTRODUÇÃO

A manutenção é uma atividade cujas atribuições estão relacionadas à estratégia da organização como um todo, indo além da tarefa de manter as condições operacionais dos equipamentos. Por esta razão, aspectos como qualidade do bem produzido, segurança - internamente e externamente falando – na execução não só das atividades de manutenção, mas na operação dos equipamentos do sistema produtivo e dos produtos entregues aos clientes, fatores ambientais e custos passaram a fazer parte do Planejamento e Controle da Manutenção, constituindo-se em fatores de influência na determinação da melhor política de manutenção a ser adotada em níveis tão importantes quanto os aspectos puramente técnicos.

No entanto, esta quantidade de atribuições tornou a escolha entre possíveis alternativas para a manutenção dos equipamentos uma tarefa bastante complexa, pois a prioridade entre os aspectos citados acima depende da percepção particular e do contexto onde está inserida cada organização, exigindo o emprego de métodos de decisão dos quais se destaca o AHP (Analytic Hierarchy Process), bastante útil na definição da melhor alternativa em um ambiente sujeito à subjetividades com relação ao grau de importância entre itens de decisão, como custo ou segurança operacional.

2. O AMBIENTE DAS OPERAÇÕES DA ORGANIZAÇÃO

As informações utilizadas para elaborar o procedimento de decisão apresentado neste trabalho foram obtidas junto a uma empresa do setor metalúrgico que produz implementos agrícolas, destacando-se aspersores para irrigação, sendo que o maior deles é composto por um tubo de 100 mm de diâmetro, tendo o fluido impelido por um motor Diesel de aproximadamente 100 HP. Esta empresa possui apenas uma unidade do modelo de torno enfocado neste trabalho e, devido a capacidade desta máquina, o mesmo realiza operações de rosqueamento e desbaste no diâmetro dos tubos dos aspersores. Assim, esta máquina se constitui num gargalo para a produção, pois sua falha representa a paralisação completa de várias linhas de produtos. Além disso, sua falha operacional aumenta o potencial dos produtos por ela usinados causarem acidentes graves. Isto porque, a remoção de material a mais do que o especificado reduz a resistência mecânica dos aspersores, aumentando a chance de ocorrência de explosões e acidentes com risco de morte de pessoas num raio de 10 metros de distância do local de aplicação. Felizmente, as ocorrências mais comuns estão ligadas ao retrabalho e ao descarte, havendo algum risco de devolução de produtos já vendidos. Esta conjuntura justifica a atribuição de prioridades para a elaboração do procedimento de decisão para a seleção da melhor prática de manutenção aplicável aos componentes mecânicos de um torno CNC.

3. PARTICULARIDADES DA MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA TIPO CNC

A manutenção tem experimentado, ao longo da evolução tecnológica dos últimos trinta anos, um notável desenvolvimento das técnicas de intervenção em um equipamento, tais como as técnicas preditivas ou as operações automatizadas como o emprego de robôs para realizar tarefas de precisão. Entretanto o mesmo não pode ser dito sobre a evolução da estrutura de decisão destinada a selecionar as práticas de manutenção mais adequadas a cada caso, pois no momento da escolha da prática referida, aspectos como custo e segurança, além dos fatores técnicos, se apresentam dissociados entre si, tornando a decisão deficiente em um aspecto se contemplar um outro em sua orientação. Em termos técnicos, a seleção de uma dada prática de manutenção requer conhecimentos sobre a natureza dos componentes/sistemas (mecânicos, elétricos, pneumáticos, etc.), seus modos de falhar e o comportamento probabilístico da falha e as ligações funcionais entre os. Levando-se em conta estes fatores, propõe-se a seguinte estrutura para seleção das práticas de manutenção, como na Tab. 3.1, adaptada de BLANCO (1996).

Tabela 3.1. Critérios Preliminares para Tomada de Decisão em Manutenção

TDF/Estatística	Aleatórias	Não Aleatórias
Com TDF	Preditiva	Preditiva/Preventiva
Sem TDF	Só Corretiva	Preventiva

Esta estrutura não contempla, entretanto, a ponderação entre os aspectos de custo e segurança, cada vez mais requisitados das ações de manutenção.

Para compreender como a natureza dos componentes de um sistema orienta a seleção da(s) prática(s) de manutenção mais adequada, impõe-se a necessidade do emprego de alguns conceitos de confiabilidade, sobretudo a evolução temporal da taxa de falhas, os modos de falhas e como estes se relacionam com o comportamento da taxa de falhas. Falhas originadas por fadiga e desgaste, típicas de componentes mecânicos, correspondem a taxas de falhas crescentes ao longo do tempo, pois a deterioração deste tipo de elemento é progressiva. Componentes eletrônicos tendem a apresentar taxas de falhas constantes ao longo do tempo – denotando modos de falha aleatórios - e quando montados em sistemas, estes tendem a apresentar taxa de falhas decrescente, pois as falhas iniciais são oriundas de problemas de montagem ou da qualidade dos componentes montados, como citado por O'CONNOR (1985).

Com relação ao modo de falha, este conceito é definido como o mecanismo pelo qual um item atinge o fim de sua vida útil, em operação normal, conforme previsto em projeto. Um detalhe

interessante é que modos de falhas de componentes mecânicos em geral apresentam sintomas, ou seja, a falha consome um certo tempo, denominado TDF ou Tempo de Desenvolvimento da Falha (como na Tab. 3.1), possibilitando seu monitoramento preditivo. Além disso, são falhas que ocorrem basicamente devido à operação normal do equipamento, possibilitando antecipar a intervenção da manutenção antes da falha (preventivamente). Este fato não é observado em componentes elétricos e eletrônicos pois, em geral, suas falhas são aleatórias, causadas pelos problemas apontados acima ou por problemas operacionais imprevisíveis, como sobrecarga ou superaquecimento, tornando ineficaz a ação da manutenção preventiva sobre itens desta natureza, sobretudo no caso de sistemas que apresentam taxas de falhas decrescentes. Com exceção de elementos de estado sólido, falhas em componentes eletro-eletrônicos não apresentam sintomas e, por esta razão, a manutenção preditiva não é indicada, restando apenas a manutenção corretiva. Como componentes eletrônicos estão presentes em equipamentos sofisticados e são responsáveis pelo seu controle (como em aviões e mesmo em máquinas-ferramenta CNC), não se pode simplesmente tolerar a falha e agir corretivamente. Porém, é possível lançar mão de recursos como a redundância, ou seja, a presença de outras unidades alternativas as quais, no impedimento da unidade principal, assumem sua função, tal como usualmente empregado na indústria aeronáutica.

A análise de um equipamento exige mais elaboração que a realizada para os componentes individuais, pois estes estão montados na forma de um sistema, ou seja, são interligados, de modo que sua operação resulte no objetivo para o qual a máquina foi concebida. Assim, é recomendado o emprego de uma ferramenta de análise de confiabilidade, a qual visa identificar não apenas a fonte primária da falha, mas a forma como esta afeta os demais componentes do sistema, sendo que as mais utilizadas são a FTA (do inglês *Fault Tree Analysis* ou Análise da Árvore de Falhas) e o FMEA (do inglês *Failure Modes and Effects Analysis* ou Análise de Modos e Efeitos das Falhas). Este trabalho faz opção pelo FMEA em razão de haver pouca informação disponível sobre as falhas de elementos mecânicos de máquinas-ferramenta, impossibilitando a construção de uma FTA completa. Também são analisados apenas os componentes mecânicos pois, de acordo com WANG et al. (1999), apesar destes serem responsáveis pelo menor número de falhas em comparação com os componentes eletrônicos, são responsáveis pelos efeitos mais graves e pelos maiores custos de reparos e de perda de produção, além do fato do desempenho destes componentes definir a qualidade do produto usinado. Assim sendo, levando-se em conta os modos de falha apresentados por componentes mecânicos presentes em tornos tipo CNC, montou-se o FMEA simplificado exposto na Tab. 3.2, a partir das informações do diagrama de blocos que representa o torno em questão, como na Fig. 3.1.

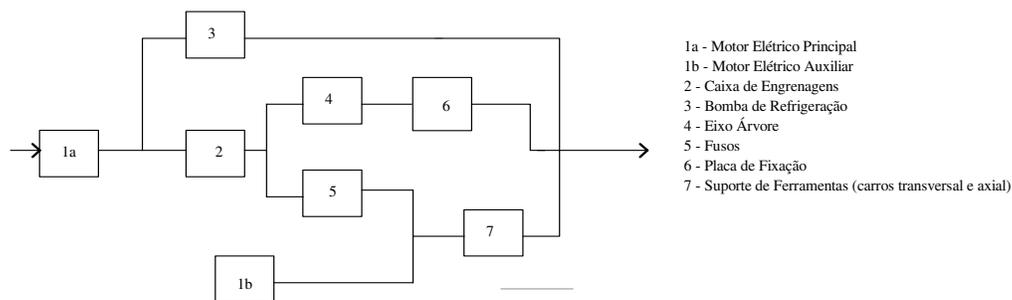


Figura 3.1. Diagrama de Blocos dos Componentes Mecânicos de um Torno Equipado com CNC

Tabela 3.2. FMEA Simplificado para Torno CNC Modelo TND-160

Componente	Modo de Falha	Causas	Sintomas	Medidas Preventivas	Medidas Corretivas em caso de Falha Parcial
Mancais de Rolamento	- Fadiga - Desgaste - Trincas nas pistas dos anéis	Operação normal Sobrecarga e superaquecimento	Ruídos, produtos incorretamente usinados, vibração excessiva, travamento	Lubrificação, Substituição Periódica, Limpeza Inspeção Periódica Limpeza e reposição periódicas de fluido, filtros, vedações e o rings	Substituição e ajuste das unidades afetadas
Engrenagens	- Fadiga - Desgaste - Ruptura	Operação normal, má lubrificação, sobrecarga	Vibração, impossibilidade de controlar a usinagem, descarte de peças usinadas, acabamento superficial deficiente	Verificação e reabastecimento de óleo, verificação das condições das engrenagens, substituição de mancais de rolamento e engrenagens ao fim de sua vida útil.	Substituição e ajuste das unidades afetadas
Eixo do Fuso	- Fadiga - Desgaste	Operação normal, má lubrificação,	impossibilidade de controlar a usinagem, descarte de peças usinadas, acabamento superficial deficiente, perda da capacidade do processo	Limpeza e lubrificação diárias (se esta operação não for automática), medição das dimensões do eixo (passo, diâmetros e alinhamento), substituição periódica dos mancais de rolamento.	Substituição do fuso (máquinas CNC possuem pelo menos dois deles) e ajuste e alinhamento cuidadosos da unidade.
Eixo Árvore	- Fadiga - Desgaste - Deformação Permanente - Corrosão	Operação normal, falha dos mancais de rolamento, falha de lubrificação (em geral, as falhas neste elemento estão relacionadas a falhas nos mancais ou caixa de engrenagens, exceto nos casos de falhas por fadiga do eixo)	Vibração excessiva, folga excessiva nos mancais, perda de capacidade do processo, desbalanceamento e desalinhamento	Cheque periódico das condições dos rolamentos, limpeza periódica, balanceamento e alinhamento, desmontagem e medição de cilindridade, dimensões e demais desvios geométricos. Manutenção preditiva pode ser adotada (monitoração de vibrações).	Substituição e ajuste das partes afetadas. O eixo árvore é o componente mais importante para a qualidade dos produtos usinados em um torno.
Sistema de Refrigeração	Falha da Bomba de circulação ou Ar condicionado	-----	Falhas na baia de eletrônicos, superaquecimento, má operação, falhas nos mancais por vazamento de lubrificante.	Inspeção periódica da bomba e unidade de ar condicionado, limpeza e substituição de vedações, o rings e filtros.	-----

4. ALTERNATIVAS PARA A MANUTENÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC E LEVANTAMENTO DOS ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS COMO CRITÉRIOS DE DECISÃO

A elaboração do FMEA simplificado presente na Tab. 3.2 permite identificar não apenas os modos de falha dos principais componentes mecânicos, mas as conseqüências das falhas nestes componentes em relação às operações da máquina. Assim, mancais de rolamento e engrenagens constituem-se nos componentes mecânicos mais importantes para a operação desta máquina, pois podem falhar por desgaste e/ou fadiga e influem na qualidade do produto final, na segurança do ambiente de trabalho e na própria segurança da operação do produto (aspersores). Além disso, o tempo gasto para troca destes componentes costuma ser elevado, apresentando, segundo WANG et al. (1999), as mais altas taxas de falhas dentre os componentes mecânicos. Este fato indica que a disponibilidade do equipamento e por conseguinte a produtividade da linha são seriamente afetadas por estas falhas. Eixos-árvore e fuso também influem bastante sobre o aspecto qualidade do produto final, mas, em função das solicitações geralmente baixas, como é característica de máquinas-ferramenta, e da qualidade dos materiais empregados em sua fabricação, a taxa de falhas costuma ser bastante baixa quando comparada a taxas de falhas de rolamentos e engrenagens. Assim, são selecionados como preferenciais para análise os mancais de rolamento e as engrenagens, sendo considerados como modos de falha dominantes a fadiga e o desgaste. No caso dos mancais de

rolamento, o efeito tanto da fadiga, quanto da falha é o dano nas pistas dos anéis, ocasionando vibração e perda da precisão de giro do eixo-árvore ou dos eixos da caixa de engrenagens. No caso das engrenagens, o efeito do desgaste é a deformação dos flancos, ocasionando erros no passo circular e irregularidade na rotação (trancos). A fadiga pode se manifestar de duas formas : a superficial provoca arrancamento de material dos flancos dos dentes e provoca sintomas semelhantes ao desgaste, e a fadiga na raiz do dente provoca fissuras perpendiculares aos flancos na base do dente e, nos casos extremos o arrancamento de um ou mais dentes. Os efeitos são um aumento pronunciado de ruídos, trancos fortes durante a rotação e impossibilidade de se usar roscas, entre outros. Então, a inspeção do estado destes componentes e sua substituição periódica, principalmente no caso dos rolamentos, é essencial à manutenção das condições operacionais da máquina. Além disso, deve-se atentar para o cuidado óbvio, mas por vezes negligenciado, de controlar a lubrificação destes elementos.

Os modos de falha relatados conduzem a falhas sintomáticas, como pode ser visto pelo exame da Tab. 3.2 e, conforme LEWIS (1986), a dispersão em torno do tempo médio até a falha (TMF) é baixa para tais componentes, se respeitadas as condições de utilização estabelecidas pelo fabricante. Portanto, como se espera que tais componentes atinjam o fim de sua vida útil em torno do TMF, pode-se considerar que estas falhas são não-aleatórias. Pela consulta à Tab. 3.1, nota-se que tanto a manutenção preventiva como a manutenção preditiva, além obviamente, da manutenção corretiva pura e simples, podem ser selecionadas. Porém, como a empresa não possui um registro confiável das falhas do equipamento, nem uma estrutura de planejamento de manutenção, é de se esperar que haja dificuldades em se adotar a manutenção preditiva dado seu custo inicial, sua especificidade técnica em termos de instrumentação para análise e complexidade no tratamento dos dados coletados, mesmo considerando que as tarefas de instrumentação e análise possam ser terceirizadas. Portanto, face às questões levantadas, a manutenção preditiva está, por hora descartada, comparando-se as alternativas de manutenção corretiva e manutenção preventiva.

Diversos critérios podem ser levados em consideração para julgar cada um das alternativas de decisão, em conversas com o gerente de produção da empresa foram escolhidos três, que procuram abranger as considerações expostas na caracterização do cenário, embora em uma empresa deste porte seja freqüentemente difícil determinar a abrangência dos níveis operacional, tático (gerencial) e estratégico, até porque esta empresa é familiar. No levantamento de quais características devem ser tomadas como critério de decisão, fica evidente a influência das preferências do administrador, que julga as alternativas com base mais em suas impressões e experiências anteriores que em dados quantitativos, exigindo reflexão por parte dos autores e da empresa no momento de atribuir prioridades a estes critérios, pois o algoritmo do AHP, embora permita testar a consistência deste ordenamento, não elimina erros grosseiros na construção do modelo relacionados ao escopo de cada critério.

5. A APLICAÇÃO DO MÉTODO DE DECISÃO AHP AO CENÁRIO PESQUISADO

Segundo BRAGLIA e BEVILACQUA (2000) e SHIMIZU (2001), o método de decisão AHP é bastante poderoso quando se deseja analisar as implicações da tomada de decisão a respeito de alternativas julgadas com base em vários critérios, constituindo um cenário complexo onde aspectos quantitativos e qualitativos devem ser considerados, especialmente se informações precisas estiverem disponíveis para caracterizar a relação das alternativas apresentadas com os critérios relevantes, como no caso da manutenção na empresa citada, cujo cenário não pode ser representado fielmente de modo quantitativo, quer seja pela ausência de controle sobre os dados da manutenção, quer seja pela falta de informações sobre as exatas implicações das falhas das máquinas sobre o produto final. Neste caso, embora o cenário seja complexo, algumas simplificações podem ser introduzidas, segundo CAGNO et al. (2000) desde que não causem inconsistência no modelo, (observação um tanto difícil de ser comprovada). Algumas das informações e mesmo o valor das prioridades atribuídas aos critérios apresentados são resultado das impressões e experiências anteriores da gerência da organização, eliminando a utilização de métodos como a Teoria da

Utilidade, que exigem conhecimento mais profundo sobre os critérios. De modo a manter a aplicação do método tão didática quanto possível, sem perder sua aplicabilidade prática, foram selecionados três critérios contra os quais serão confrontadas as duas alternativas de manutenção possíveis mediante o emprego da Tab. 3.1:

- C1 : Custo Inicial da Manutenção, levando-se em consideração o montante de recursos financeiros necessários para a alocação de mão-de-obra, gestão de estoques de peças sobressalentes e da própria atividade de planejamento da manutenção, sem contar os custos decorrentes das falhas nos equipamentos;
- C2 : Minimização dos Riscos e das Conseqüências Associadas às Falhas não Tratadas : este critério é julgado levando-se em consideração as implicações qualitativas das falhas nas máquinas-ferramenta sobre a qualidade do produto final, possibilidade de ocorrência de acidentes de trabalho devidos única e exclusivamente a falhas dos componentes passíveis de serem tratados por meio da manutenção preventiva e conseqüências das falhas no produto final, decorrentes de defeitos de fabricação originados em falhas das máquinas-ferramenta;
- C3 : Controle da Deterioração do Equipamento : visa assegurar que a manutenção possibilite a operação do torno conforme suas especificações de projeto, respeitadas as condições de utilização, durante toda sua vida útil.

No método AHP, os graus não são atribuídos isoladamente a cada um dos critérios, ao invés disto, é considerada a comparação paritária entre a importância de cada critério com relação aos demais, construindo-se a Matriz de Comparação Paritária, o que possibilita o julgamento das alternativas apresentadas sob um grande número de critérios, sem dúvida um dos maiores benefícios da aplicação deste método. As prioridades atribuídas aos critérios são inteiros ue variam de 1 a 9, sendo graus mais baixos atribuídos aos critérios fracamente preferíveis e graus maiores aos critérios mais fortemente preferíveis, logo, a prioridade de um critério em relação a ele mesmo é 1. Esta escala de valores é também válida no momento da comparação entre as alternativas, atribuindo graus baixos às alternativas que pior atendam a determinado critério e graus altos às alternativas que melhor o atendam. No passo 5.1 é apresentada a matriz com a comparação das prioridades entre os três critérios considerados.

5.1. Construção da Matriz de Comparação Paritária

Tabela 5.1 – Matriz de Comparação Paritária

Critérios	C1	C2	C3
C1	1	0.2	0.3333...
C2	5	1	2
C3	3	0.6	1
Totais	9	1.8	3.3333...

5.2. Matriz de Prioridades Relativas

O passo seguinte consiste na determinação das prioridades relativas de cada critério, onde cada elemento da matriz de comparação paritária é dividido pela soma dos elementos da coluna à qual pertence. Efetuada esta operação, a prioridade relativa de cada critério é a média aritmética de cada linha, como abaixo :

Tabela 5.2 – Matriz de Prioridades Relativas

Critérios	C1	C2	C3	Prioridade Relativa
C1	0.1111...	0.1111...	0.101	0.108 [PRC1]
C2	0.5555...	0.5555...	0.6	0.570 [PRC2]
C3	0.3333...	0.3333...	0.3	0.322 [PRC3]

5.3. Determinação do Vetor dos Pesos

Este passo consiste na determinação do vetor dos pesos relativos para cada critério, através da Eq. 5.1

$$VP = PRC1.[1 \quad 5 \quad 3]^T + PRC2.[0.2 \quad 1 \quad 0.6]^T + PRC3.[0.3333 \quad 2 \quad 1]^T = [0.329 \quad 1.754 \quad 0.988]^T \quad (5.1)$$

5.4. Determinação do Vetor de Consistência (VC)

Esta fase é de crucial importância na checagem da consistência das prioridades atribuídas aos critérios, o que resultará em resultados significativos e livres de incoerências, como atribuir prioridades muito diferentes para critérios ou comparações equivocadas. O vetor de consistência (VC) é obtido dividindo-se cada elemento de VP pela respectiva prioridade relativa. Assim :

$$VC = [0.329/0.108 \quad 1.754/0.570 \quad 0.988/0.322]^T = [3.046 \quad 3.077 \quad 3.068]^T.$$

5.5. Determinação do Índice de Consistência (CI)

Para determinar o índice de consistência é necessário determinar antes o autovalor máximo do vetor de consistência (λ_{max}), o qual, por possuir uma só dimensão, consiste na média aritmética entre os elementos de VC. Desta forma :

$$\lambda_{max} = 3.064 \quad e \quad CI = (\lambda_{max} - n)/(n-1) \quad (5.2)$$

onde n = nº de critérios, que no caso em estudo é igual a 3. Então:

$$CI = (3.064/3)/2 = 0.032.$$

5.6. Determinação da Taxa de Consistência (CR)

A execução do cálculo de CR, de acordo com a equação 5.3, requer consulta à Teoria da Decisão, pois deve-se obter o índice de consistência (ACI), que expressa a consistência em um grande número de comparações paritárias em função do número de critérios de decisão. De acordo com SHIMIZU (2001), para 3 critérios ACI=0.58. O valor de CR, para que as suposições acerca do cenário sejam consideradas consistentes, não deve ser superior a 0.10. Caso contrário, as prioridades atribuídas aos critérios considerados na análise devem ser revistas, pois em geral, no momento da comparação entre um determinado critério e os demais, um erro de avaliação foi cometido. Isto garante a robustez do método AHP em indicar a decisão mais favorável em um ambiente complexo, num contexto de decisão multicriterial. Então :

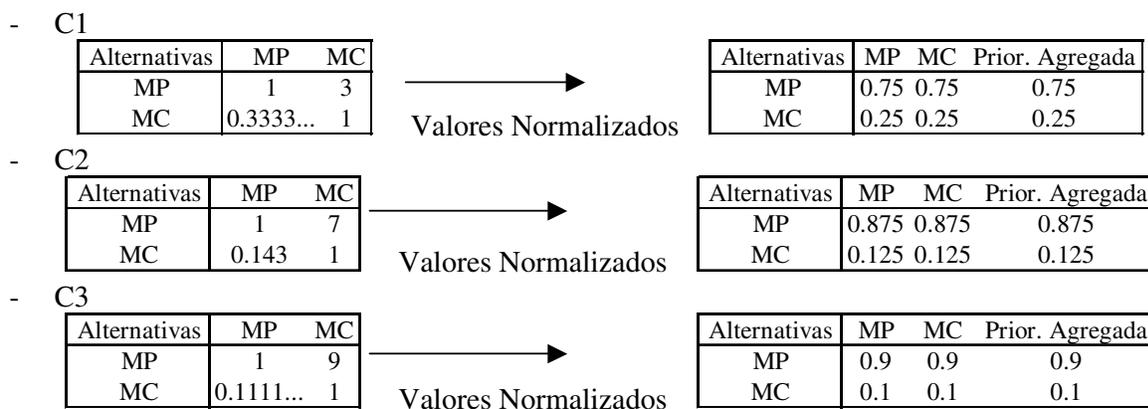
$$CR = CI/ACI = 0.032/0.58 = 0.055 \quad (5.3)$$

Como o valor de CR ficou bem abaixo de 0.10, depreende-se que as prioridades atribuídas aos critérios estão consistentemente comparadas.

5.7. Comparação Entre as Alternativas para a Manutenção sob a Influência de Cada um dos Critérios

Neste passo é necessário estabelecer, quantitativamente, o quanto cada uma das alternativas atende aos requisitos de cada critério. Para tanto, é necessário que esteja bem compreendido o significado de tais critérios para evitar que erros de interpretação causem inconsistência na decisão. No caso deste trabalho, os maiores pesos serão atribuídos à prática de manutenção que menor custo inicial apresentar, com relação a C1, à prática que mantiver em nível mínimo os riscos e gravidade das conseqüências das falhas com relação a C2 e que apresentar o mais alto grau de controle sobre a deterioração das características funcionais do equipamento em C3. Cabe uma observação a respeito da quantidade de alternativas a serem comparadas : SHIMIZU (2001) e SAATY (1980) afirmam

que, embora não haja restrições quanto ao número de critérios a serem comparados, deve-se comparar ao redor de três critérios entre si, o que permite controlar a confiabilidade dos resultados obtidos com relação à consistência das prioridades atribuídas aos critérios (não confundir alternativas com critérios), eliminando os vícios presentes na comparação dois a dois e evitando a enorme dificuldade de se comparar mais critérios, dado o número de combinações possíveis. Felizmente, a manutenção, sob o ponto de vista técnico, não exige tamanha complexidade em seus modelos de análise, pois – sobretudo se utilizados conceitos de confiabilidade e ferramentas como o FMEA – são sugeridas quantidades restritas de práticas de manutenção possíveis de serem aplicadas a cenários específicos. Esta observação perde a validade no caso de serem considerados aspectos financeiros, pois a combinação entre aspectos técnicos e possibilidades de investimentos ou despesas gera um universo bastante amplo de alternativas, com grande quantidade de objetivos. No caso deste trabalho, são comparadas as práticas apontadas pela análise de confiabilidade, sendo estas a Manutenção Corretiva (MC) e a Manutenção Preventiva (MP). Assim, agregando-se as alternativas a cada critério, tem-se :



5.8. Determinação das Prioridades Compostas

O passo final na aplicação do método AHP consiste na determinação das prioridades compostas de cada alternativa para a seleção da decisão mais favorável a qual, em geral, consiste na alternativa que apresentar a maior prioridade. Para alcançar este objetivo, deve-se multiplicar a matriz que contém as prioridades agregadas pelo vetor coluna que contém as prioridades relativas calculadas no passo B, como mostrado a seguir :

Alternativas / Critérios	C1	C2	C3
MP	0.75	0.875	0.9
MC	0.25	0.125	0.1

* [0.108 0.570 0.322]^T e, para cada alternativa

$$MP = (0.75 * 0.108) + (0.875 * 0.570) + (0.9 * 0.322) = 0.185$$

e

$$MC = (0.25 * 0.108) + (0.125 * 0.570) + (0.1 * 0.322) = 0.131.$$

Portanto, estando as prioridades consistentes e sendo as prioridades referentes às práticas de manutenção o resultado da observação das operações da empresa em questão, conclui-se que, com o auxílio do método AHP, a Manutenção Preventiva é a prática mais indicada de modo a atender aos múltiplos critérios estabelecidos como parâmetros de decisão, já que a maior prioridade composta refere-se a tal modalidade de manutenção. Evidentemente, esta análise, embora tenha aplicação prática reconhecida, pode ser muito enriquecida conforme se tenha melhores níveis de informação sobre a empresa, como por exemplo, as implicações das falhas sobre a qualidade do produto final, disponibilidade e gestão da capacidade produtiva, retrabalho e descarte, controle da vida útil do

equipamento e outros critérios pertinentes ao cenário em questão. É muito importante, no entanto, perceber que o método AHP é robusto sim, já que permitiu fazer uma clara distinção entre as consequências da adoção das práticas de manutenção sugeridas a partir de informações pouco detalhadas e de prioridades um tanto próximas, já que não estão disponíveis dados mais acurados sobre custos e registro de parada de máquinas. Porém, esta eficácia na utilização do método de decisão depende das informações fornecidas, do conhecimento que se tem sobre o sistema de operações da organização, do conhecimento do funcionamento do próprio equipamento e, sempre que possível, de um refinamento na atribuição de prioridades relativas aos critérios e alternativas. A manutenção depende cada vez mais de uma abordagem científica de seus problemas para conduzir a soluções eficazes, o que é um conforto não só para esta atividade, mas para todo o ambiente no qual se insere um sistema de operações.

5.9. Análise Qualitativa de Sensibilidade

De modo a avaliar a correção na aplicação do método AHP, torna-se necessária uma análise de sensibilidade, procurando avaliar qual o efeito sobre o resultado de alterações realizadas na atribuição das prioridades. Com relação aos critérios, torna-se difícil avaliar o impacto de alguma modificação, mas de um modo geral, à medida em que melhores informações se tornarem disponíveis, pode-se esperar que a distância entre os critérios C2 (riscos inerentes às falhas) e C3 (controle da deterioração do equipamento) aumentem sua importância com relação a C1 (custo inicial), já que os efeitos das falhas sobre a produção e sobre o produto final passam a ser melhor conhecidos e os efeitos destas sobre as condições operacionais do equipamento também. Assim, as prioridades relativas crescem a favor de C2 e C3, fazendo com que a diferença entre as alternativas se torne cada vez mais nítida, sendo sempre necessário avaliar a consistência do modelo. Com relação às comparações entre as alternativas, em C1 pode-se obter uma melhor definição, pois espera-se que com o tempo, as informações sobre custos sejam mais precisas, permitindo reavaliar a importância deste critério e, principalmente, a importância de cada prática de manutenção segundo C1. Dificilmente a comparação entre manutenção preventiva e corretiva com base em C2 e C3 conduzirá a uma modificação nas prioridades das alternativas, pois estas são mais fáceis de avaliar dada a natureza técnica destes critérios. Logo, espera-se que melhores informações conduzam à preferência pelo uso da manutenção preventiva nos sistemas mecânicos do torno CNC.

6. CONCLUSÕES

O emprego do AHP – um método de análise de decisão multicriterial de execução trabalhosa, mas que permite uma boa resolução na seleção de alternativas de decisão em ambientes permeados por certo grau de subjetividade - se revelou bastante eficaz em indicar, dentre duas alternativas, a manutenção preventiva dos sistemas mecânicos (rolamentos e caixa de engrenagens) como a prática de manutenção mais adequada ao cenário em questão. Entretanto, apesar de sua robustez, o método de decisão não garante uma decisão eficaz isoladamente. Para obter alternativas e mesmo uma decisão que atenda aos objetivos de uma organização, a caracterização do cenário é de primordial importância, pois hipóteses consistentes podem ser feitas a partir de um cenário equivocadamente caracterizado. Desta forma, é necessário compreender e conhecer quais são as operações realizadas pela organização, os equipamentos de que a mesma dispõe para alcançar tal objetivo, quais os equipamentos e subsistemas são os mais importantes ou mais críticos nestas operações e, especificamente sobre o quesito manutenção, pesquisar cuidadosamente a natureza dos componentes dos equipamentos, a relação entre os mesmos (daí a importância da construção do diagrama de blocos), seus modos de falhas, as consequências destas falhas sobre o equipamento e as ações recomendadas. Neste trabalho, o emprego de conceitos de confiabilidade se revelou de capital importância para identificar corretamente quais as alternativas dentre as práticas de manutenção possíveis são adequadas para o tratamento relativo aos componentes mecânicos indicados, confirmando a utilidade de tal ciência para a manutenção, mesmo que não se esteja cogitando a

implementação da RCM, pois em resumo, a função da manutenção é atacar as falhas (se possível evitando-as) e o tratamento da falha - matemático e mesmo técnico com o emprego de ferramentas como o FMEA – é o escopo da confiabilidade. O trabalho aqui desenvolvido pode e deve ser ampliado, discutindo por exemplo a possibilidade do emprego da manutenção preditiva, comparando seus resultados com base nas hipóteses de execução própria ou terceirizada, adicionando mais critérios de comparação e trazendo conceitos de análise de risco para melhorar a compreensão dos efeitos das falhas de modo amplo (não apenas internamente à organização), mantendo o grande objetivo deste trabalho : dotar a manutenção de um caráter científico, não apenas sofisticando-a, mas orientando-a a vencer os desafios do Século XXI.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANCO, F., “Manutenção Classe Mundial”. Manutenção, 1996, set/out, nº60, pp A77-A82.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M., “The Analytic Hierarchy Process Applied to Maintenance Strategy Selection”, Reliability Engineering and System Safety, 2000, nº 70, pp 71-83.
- CAGNO, E.; CARON, F.; MANCINI, M.; RUGGERI, F., “Using AHP in Determining the Prior Distribution on Gas Pipeline Failures in a Robust Bayesian Approach”, Reliability Engineering and System Safety, 2000, nº 67, pp 275-284.
- LEWIS, E., “Introduction to Reliability Engineering”, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- O’CONNOR, P., “Practical Reliability Engineering”, 2ª ed., John Wiley & Sons, Suffolk, 1985.
- SAATY, T., “The Analytic Hierarchy Process : Planning, priority, resource allocation”, McGraw Hill, New York, 1980.
- SHIMIZU, T., “Decisão nas Organizações”, Atlas, São Paulo, 2001.
- WANG, Y; JIA, Y.; YU, J.; ZHENG, Y.; YI, S., “Failure Probabilistic Model of CNC Lathes”, Reliability Engineering and System Safety, 1999, nº 65, pp 307-314.

AHP DECISION MAKING METHOD APPLICATION FOR MECHANICAL EQUIPMENTS MAINTENANCE POLICY SELECTION

Idélcio Alexandre Palheta Cardoso

EPUSP – Mechatronics Engineering and Mechanical Systems Department
Prof. Mello Moraes Av. 2231, 05508-900, São Paulo – SP – Brasil, idelcio@usp.br

Gilberto Francisco Martha de Souza

EPUSP – Mechatronics Engineering and Mechanical Systems Department
Prof. Mello Moraes Av. 2231, 05508-900, São Paulo – SP – Brasil, gmsouza@usp.br

Renato Vairo Belhot

EESC – Production Engineering Department
Av. Trabalhador São-carlense 400, 13560-100, São Carlos – SP – Brasil, rvbelhot@prod.eesc.sc.usp.br

***Abstract.** This paper describes the AHP decision making method application to make a selection between two maintenance practices alternatives, corrective and preventive maintenance, in order to compose a maintenance policy, considering technical and costs features related to that practices. Once defined relative priorities for each main features, AHP method is effectively applied and, in order to verify its applicability, a qualitative sensitivity analysis is performed. Due to the AHP high resolution in terms of identify the best decision in an uncertainty environment or sceneries subjected to personal point of view conditions, it is possible to verify that preventive maintenance, when required, is the best way for for CNC machine-tools.*

***Keywords.** Maintenance, mechanical systems, decision making, machine-tools.*