SILVIO LUIZ PLOTEGHER

PROPOSTA DE MÉTODO DE REFERÊNCIA APLICADO A *RETROFITTING* DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

Tese apresentada ao Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Área de Concentração:
Processos Avançados e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

São Carlos - SP

2012

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

P729p

Plotegher, Silvio Luiz
PROPOSTA DE MÉTODO DE REFERÊNCIA APLICADO A RETROFITTING DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS / Silvio Luiz Plotegher; orientador Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho . São Carlos, 2012.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012.

1. Máquinas-Ferramentas. 2. CNC. 3. Obsolescência. 4. Sustentabilidade. 5. Modelos. 6. Retrofitting. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **SILVIO LUÍS PLOTEGHER**.

Título da tese: "Proposta de método de referência aplicado a *retrofitting* de máquinas-ferramentas".

Data da defesa: 18/12/2012

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Eraldo Jannone da Silva** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Milton Vieira Junior** (Universidade Nove de Julho/UNINOVE)	APROVADO
Prof. Dr. **Eduardo Carlos Bianchi** (Universidade Estadual "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-campus de Bauru)	APROVADO
Prof. Dr. **Jacson Machado Nunes** (Universidade Federal do Recôncavo da Bahia/UFRB)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Prof. Titular **Henrique Rozenfeld**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

DEDICATÓRIA

À minha esposa e aos meus filhos com amor e eterna gratidão pela compreensão, pelo carinho de cada um, pela presença nas ausências, pela torcida e pelo incansável apoio ao longo do período das aulas e da elaboração deste trabalho e por tantos outros desafios que, juntos, lutamos e vencemos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho, pelas aulas e orientações. Por acreditar no trabalho e no acolhimento das idéias. Pela partilha de todos os momentos nesta instituição, contribuindo enormemente para com meu crescimento científico, profissional e humano.

Aos Professores da EESC, pelas aulas, pelo conhecimento, pela amizade.

Ao Prof. Dr. Eraldo pelas aulas sobre monitoramento, plataformas de CNC e *MT Connect*, contribuindo ainda mais para alavancar meu conhecimento técnico.

Aos colegas do Departamento de Engenharia de Produção por partilharmos também momentos juntos, mesmo que muitas vezes não tenham sido tão intensos. Especial agradecimento aos colegas Eduardo, Arai, Clayton, Aldo, Cláudia, Mary, Vanda, Adolfo e Juliana. Trago-os todos no meu coração.

Aos Professores Dr. Jeferson Gomes e Dr. Jacson Machado pelos diversos trabalhos e discussões que juntos pudemos desenvolver em outros tempos, no cenário técnico da máquina-ferramenta.

Ao Prof. Dr. Milton Vieira pelo apoio e incentivo.

Ao Prof. Dr. Ivan Toro, Dra. Karina Cuziol e a toda equipe de Cirurgia Torácica da UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas -, pelo verdadeiro amor e sacerdócio com que desempenham a medicina.

Ao meu irmão e colega de profissão Eduardo Miller, profissional competente e dedicado ao seu trabalho. Obrigado pelas dicas, auxílio, sugestões e tantos outros projetos partilhados.

A vocês, Téjere e Márcia. Amigos de fé, irmãos camaradas. Amigos de tantos caminhos e tantas jornadas. Corações como uma casa de portas abertas.

“Enquanto estiver vivo, sinta-se vivo.
Se sentires saudades do que fazia, volte a fazê-lo.
Não vivas de fotografias amareladas...
Continues, quando todos esperam que desistas.
Não deixe que enferruje o ferro que existe em você.
Faça com que em vez de pena, tenham respeito por você.
Quando não conseguir correr atrás dos anos, trote.
Quando não conseguir trotar, caminhe.
Quando não conseguir caminhar, use uma bengala.
Mas nunca se detenha!”
(Madre Teresa de Calcutá)

A Sabedoria é luminosa e nunca murcha. Facilmente é contemplada por aqueles que a amam, é encontrada por aqueles que a procuram. O principio da Sabedoria é o mais sincero desejo da instrução; a preocupação pela instrução é o amor; o amor é a observância de suas leis; a observância de suas leis é garantia de incorruptibilidade, e a incorruptibilidade faz estar junto de Deus.
(Sabedoria 6,12-17,19)

RESUMO

PLOTEGHER, Silvio Luiz. **Proposta de Método de Referência Aplicado a *Retrofitting* de Máquinas-Ferramentas**. 2012. 162 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

A obsolescência das Máquinas-Ferramentas (MFs) é um processo natural de envelhecimento neste tipo de equipamento. Esse processo compreende uma série de degradações tecnológicas, os quais se instalam e ocorrem em toda estrutura física de uma MF, independentemente da tecnologia utilizada. As degradações podem, no entanto, ser resultantes de vários fatores, como uso, aplicação, regime de trabalho, dentre outros. Os aspectos tecnológicos ficam mais evidentes quando se analisam as máquinas a Comando Numérico Computadorizado (CNC). Por sua vez, o CNC é um equipamento que apresenta uma evolução constante, mas que muitas vezes não pode ser facilmente incorporado às máquinas já existentes sem um processo de *retrofitting* anteriormente definido. Um processo de *retrofitting* pode ser considerado como um processo que permite aplicar incrementos tecnológicos em uma MF. Mais recentemente, diversos estudos têm apresentado tendências que fazem uma ligação entre MFs e sustentabilidade, sem, no entanto, definir ou propor modelos. Estudar os aspectos do comportamento das MFs existentes e poder aplicar recursos das novas tecnologias pode contribuir para melhorar os aspectos de sua produtividade e, por conseguinte, contribuir para uma produção mais sustentável. No entanto, isso deve ser feito a partir de uma metodologia que oriente um processo de tomada de decisão. Dessa forma, este trabalho propõe um método de referência aplicado a *retrofitting* de máquinas a partir da definição de coeficientes e de índices numéricos cujos resultados atuam como ferramenta orientativa a um processo de tomada de decisão. O método é aplicado a diversos tipos de MFs e os resultados indicam a viabilidade ou não de um *retrofitting*.

PALAVRAS-CHAVE: Máquinas-Ferramentas, CNC, Obsolescência, Sustentabilidade, Modelos, *Retrofitting*.

ABSTRACT

PLOTEGHER, Silvio Luiz. ***Proposal for a Reference Method Applied to the Retrofitting of Machine Tools***. 2012. 162 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Produção da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

The obsolescence of Machine Tools (MT) may be defined is a natural process of aging in this type of equipment. This process comprises a series of technological degradation, which settles and occurs across the entire and physical structure of a MT, regardless of the technology used. The degradations may, however, be due to several factors such as usage, application, machining process and so on. The technology aspects are more evident when analyzing the machines Computerized Numerical Control (CNC). By the other hand the CNC is an equipment which naturally contributes with a constant evolution, but they often can't be easily incorporated into an existing machine without a procedure for retrofitting previously defined. A process of retrofitting can be defined and considered as a process incorporates technology resulting in increments of technology to a MT. However, the addressing of such process is usually applied without any models or tools within a process of decision making. More recently, several studies have shown trends making a connection between MT and sustainability without, however, defining templates for such process. The studies of all aspects of the behavior of an existing MT, even with its limitations, suggest the resources of new technologies can help to improve in general all aspects of their productivity and therefore contribute to a more sustainable production. However, this must be done from a methodology that guides the process of decision making. This decision process represents a process that results from a technological gain in a MT or not. Thus, this work proposes a reference method applied to retrofitting machines by defining a series coefficients and numerical indices whose results intends to be used as a tool for helping a decision-making process.

KEYWORDS: *Machine tool, CNC, Obsolescence, Sustainability, Models, Retrofitting.*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CURVA FUNDAMENTAL DISCUTIDA POR WINFREY,1967 14
FIGURA 2 – UMA TIPICA CURVA DE SOBREVIVÊNCIA E CURVAS DERIVADAS..... 15
FIGURA 3 – CURVA DA OBSOLESCÊNCIA TECNOLÓGICA. 16
FIGURA 4 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DA FREQUÊNCIA 18
FIGURA 5 – CURVA DE SOBREVIVÊNCIA 19
FIGURA 6 – CURVA DE SOBREVIVÊNCIA PARA 20 ANOS..... 20
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA MECATRÔNICO SEGUNDO (NEUGEBAUER;DENKENA;WEGENER,2007) 26
FIGURA 8 – ILUSTRAÇÃO DE UM PROCESSO GÉNERICO DE REMANUFATURA DESCRITO PELA VDI 1993. 37
FIGURA 9 – ILUSTRAÇÃO DO PROCESSO ADAPTADO POR (BRAS;HAMMOND,1996) 38
FIGURA 10 – ESTRUTURAÇÃO HIERÁRQUICA DO MÉTODO AHP DISCUTIDO POR (SANTOS;VIAGI,2009) 40
FIGURA 11 – ILUSTRAÇÃO DA SELEÇÃO DE CRITÉRIO PROPOSTO POR (JIANG,JHANG;SUTHERLAND,2011) 42
FIGURA 12 – MODELO DE GMF PROPOSTO POR (DEIF,2011). 50
FIGURA 13 – MODELO DE ECQFD BASEADO NA MATRIZ AKAO 51
FIGURA 14 – NÍVEL HIERÁRQUICO DO CONSUMO DA ENERGIA NA PRODUÇÃO 52
FIGURA 15 – SISTEMA DE PERDA ENERGÉTICA – ADAPTADO DO MODELO DE (NEUGEBAUER ET AL., 2010) 54
FIGURA 16 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DE REMANUFATURA SEGUNDO (ZHOW ET AL.,2008)..... 57
FIGURA 17 – ESQUEMA SIMPLIFICADO DO FLUXO DE ENERGIA EM UM SERVO DRIVE (KLENKE; MULLER; HOFMANN, 2011)..... 62
FIGURA 18 – REPRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO POR (AVRAM;XIROUCHAKIS,2011) 63
FIGURA 19 – OBSERVAÇÃO DO CICLO DE TROCA DE FERRAMENTA. 65
FIGURA 20 – ESQUERDA – REFERENTE AO EIXO ÁRVORE – DIREITA – EIXOS COORDENADOS XY 66

FIGURA 21 – CICLOS DE USINAGEM SELECIONADOS PARA O MODELAMENTO..... 67
FIGURA 22 – REPRESENTAÇÃO DA FRONTEIRA DE ESTUDOS ADOTADA POR (DOHMUS;GUTOWSKY,2004). 68
FIGURA 23 - ESQUEMA SIMPLIFICADO DO CONSUMO DE ENERGIA EM PRODUÇÃO. ... 69
FIGURA 24 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMATICA E FLUXO DO MÉTODO. 77
FIGURA 25 - ILUSTRAÇÃO DA ATUAÇÃO NA FORMAÇÃO DO C_{IM}. 81
FIGURA 26 – ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO COEFICIENTE C_{IM} DENTRO DO NIVEL 1. 82
FIGURA 27 - ILUSTRAÇÃO DA FORMAÇÃO DAS ÁREAS PARA COMPOSIÇÃO DO C_{MN}.... 83
FIGURA 28 – ELEMENTOS DE FORMAÇÃO DA ÁREA DENOMINADA CABEÇOTE. 84
FIGURA 29 – ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO COEFICIENTE C_{MN} DENTRO DO NÍVEL 1. 89
FIGURA 30 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DAS FAIXAS INDICATIVAS DA DEGRADAÇÃO TECNOLÓGICA. 93
FIGURA 31 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA CONTRIBUIÇÃO DOS ITENS NA FORMAÇÃO DO COEFICIENTE C_{DT} 94
FIGURA 32 – ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DO COEFICIENTE C_{DT} DENTRO DO NÍVEL 1. 95
FIGURA 33 – SUMÁRIO DOS COEFICIENTES – NÍVEL 1. 96
FIGURA 34 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA ANÁLISE DA DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA. 99
FIGURA 35 – ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO ÍNDICE DE DOCUMENTAÇÃO TÉCNICA I_{DTT} DENTRO DO NÍVEL 2..... 102
FIGURA 36 – VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DO I_{CM} E SEUS VALORES LIMITES. 110
FIGURA 37 – ILUSTRAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO ÍNDICE DA COMPLEXIDADE DE MÁQUINA I_{CM} DENTRO DO NÍVEL 2. 111
FIGURA 38 – SUMÁRIO DOS ÍNDICES – NÍVEL 2..... 112
FIGURA 39 – VISUALIZAÇÃO GRÁFICA DO I_{MDT}. 113
FIGURA 40 – ANÁLISE DOS CUSTOS DENTRO DO NÍVEL 3..... 114
FIGURA 41 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ANÁLISE DE CUSTOS - NÍVEL 3. .. 116
FIGURA 42 – MANDRILADORA UNION BT-125..... 120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – RAZÕES PARA A OBSOLESCÊNCIA. 12
TABELA 2 – DADOS PARA A CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DA FREQÜÊNCIA. 17
TABELA 3 – DADOS PARA A CURVA DE SOBREVIVÊNCIA 18
TABELA 4 – RESULTADO DAS MEDIÇÕES NO EIXO-ÁRVORE..... 34
TABELA 5 – CATEGORIA E ÍNDICES 38
TABELA 6 – RESULTADO DO PERFIL DE CONSUMO DE ENERGIA NOS CENTROS DE USINAGEM 71
TABELA 7 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS APÓS 1000HORAS/TRABALHO..... 73
TABELA 8 – DEFINIÇÃO DAS ÁREAS PARA FORMAÇÃO DO COEFICIENTE DE MANUTENÇÃO..... 85
TABELA 9 - DIVISÃO DO CNC EM ÁREAS E RESPECTIVOS PESOS..... 91
TABELA 10 – VALORES INDICATIVOS PARA TOMADA DE DECISÃO – NÍVEL 1 97
TABELA 11 – DOCUMENTAÇÕES TÉCNICAS – ATRIBUTOS DE ANÁLISE E PESOS 100
TABELA 12 – ATRIBUTOS PARA CLASSIFICAÇÃO DO PERFIL DE USO DE UMA MF 104
TABELA 13 – ATRIBUTOS PARA CONFIGURAÇÃO DO ÍNDICE DA COMPLEXIDADE DE MÁQUINA. 106
TABELA 14 – SUMÁRIO DA SELEÇÃO DE MÁQUINAS 107
TABELA 15 – VARIAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO DE MÁQUINAS 108
TABELA 16 – VALORES INDICATIVOS PARA TOMADA DE DECISÃO – NÍVEL 3 117
TABELA 17 – VALORES NUMÉRICOS RESULTANTES - UNION BT-125. 119
TABELA 18 – VALORES NUMÉRICOS RESULTANTES – PFAUTER 800..... 122
TABELA 19 – VALORES NUMÉRICOS RESULTANTES – RETIFICA LANDIS 124
TABELA 20 – VALORES NUMÉRICOS RESULTANTES – TRAUB TNA480 126

SÍMBOLOS

F	= Força axial em (N);
Fc	= Força aplicada na direção axial do movimento em N;
Fo	= Força aplicada sobre o eixo na direção da carga em N;
g	= Aceleração da gravidade (9,8m/s2);
N	= Rotação do motor (RPM);
TF	= Torque de fricção na seção de movimento (Nm);
TL	= Torque da Carga (Nm);
TL0	= Torque refletido no eixo da carga (Nm);
V	= Velocidade do Eixo Coordenado (mm/min);
W	= Peso total da mesa (Kg);
W1	= Massa do Eixo (Kg);
W2	= Massa do Sistema de Contra Peso (Kg);
Z1, Z2	= Razão da desaceleração na relação de acoplamento;
η	= Eficiência do sistema de acionamento;
n	= Razão da desaceleração;
ΔS	= Deslocamento do eixo por giro do motor (mm);
π	= Constante numérica 3,141592654.
μ	= Coeficiente de atrito;

LISTA DE EQUAÇÕES

M = [Σ(N*f)] / Σf **(1)**

Área = ½* Base * Altura **(2)**

No. Operação = ½*(Qte. de Anos Restantes)*(% Sobre viventes) **(3)**

$_{\mu}$cleaning + $_{\mu}$testing + $_{\mu}$inspection + $_{\mu}$disassembly + $_{\mu}$assembly = Índice$_{R}$ **(4)**

$_{\mu}$remanufacturing = $\left(\Sigma_j W_j / \mu_j \right)^{-1}$, onde W é o peso; **(5)**

cs(q) - cr(q) ≥ 0; e assintoticamente: lim (cs(q) - cr(q)) = 0: **(6)**

$$q_i \rightarrow \infty$$

$$\boldsymbol{A} = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

aij = 1 / aji **(8)**

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j}^{n} a_{ij}} \Big/ \sum_{i=1}^{n} \sqrt[n]{\prod_{j-1}^{n} a_{ij}}, \quad (i,j = 1,2,\ldots,n), \quad (9)$$

S = sij **(10)**

$$s_i = u_i \sum_{j=1}^{n} x_j s_{ij}. \quad (11)$$

$$U = \sum_{i=1}^{n} x_i (u_i + s_i). \quad (12)$$

$$Ta = TAsp + Trun \quad (13)$$

$$Trun = Tfr\ fb + Tfr\ rb + Tshear \quad (14)$$

$$PaS = Ta * \omega \quad (15)$$

$$Prun = Trun * \omega \quad (16)$$

$$Pcutting = Prun + Pc \quad (17)$$

$$Pc = Fc * Vc \quad (18)$$

$$Td = -TAsp + Trun \quad (19)$$

$$EDE = Eay + ESy + Edy + Erun + Ecut \quad (20)$$

$$E_{DE} = \int_{t_0}^{t_1} P_{ay} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_{sy} dt + \int_{t_2}^{t_3} P_{dy} dt + \int_{t_0}^{t_3} P_{run} dt + \int_{t_1}^{t_2} P_c dt \quad (21)$$

$$0 < t \leq 1000 \quad (22)$$

$$C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-t)} \quad (23)$$

$$M = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + ... A_7 \quad (24)$$

$$M = \sum_{k=1}^{7} Ak \quad (25)$$

$$C_A^k = C_{mo}^k + C_I^k + C_H^k \quad (26)$$

$$C_{mt} = \sum_{k=1}^{7} (CMOk + CIk + CHk) \quad (27)$$

$$C_{AI} = N_{IA} * T_{MI} * C_I \quad (28)$$

$$C_{Mp} = T_{mp} * C_{mh} \quad (29)$$

$$C_{mt} = \sum_{k=1}^{7} (CAIk + CMPk) \quad (30)$$

$$C_{mn\ (\%)} = [C_{mt} / K] * 100 \quad (31)$$

$$K = [Valor\ de\ Referência * C_{im}] \quad (32)$$

$$C_{mn\ (\%)} = [C_{mt} / Valor\ de\ Referência * C_{im}] * 100 \quad (33)$$

$$C_{dt} = \sum_{k=1}^{10} [MG(\mu_{[k]} * \varepsilon_k^{x})]\ (k = 1,2,3,4,...10) \quad (34)$$

$$NC_d = \sum_{k=1}^{10} [MG(\mu_{[k]} * \varepsilon_k^{1})]\ (k = 1,2,3,4,...10) \quad (35)$$

$$FNC_d = (100 * C_d) / NC_d \quad (36)$$

$$I_{dtt} = \frac{x1p1 + x2p2 + x3p3 + ... + x10p10}{p1 + p2 + p3 + ... + p10} \quad (37)$$

$$M_P\ [K,J] \quad (38)$$

$$M_G\ (K) = \sum_{i=1}^{10} [Mp[K,i] \quad (39)$$

$$N_R\ (K) = 1 - \mathbf{I}\ M_G\ (K) / V_{REF}\ \mathbf{I} \quad (40)$$

$$F\ (K) = Log_{10}\ K \quad (41)$$

$$LS = F(K) / 0,9 \quad (42)$$

$$LI = F(K) / 1,1 \quad (43)$$

$$I_{cm} = F\ (K) \quad (44)$$

$$0 = Icm \leq 1 \quad (45)$$

$$I_{mdt} = 10^{I_{cm}} \quad (46)$$

$$C_{Ret} = \Sigma\,(\text{CNC + Insumos + projeto + instalação + montagem + start up}) \quad (47)$$

$$V_{mn} = \textit{Custo de máquina nova similar} \quad (48)$$

$$\%\text{Valor Retrofitting} = [C_{Ret} / V_{mn}] \times 100 \quad (49)$$

$$\%\text{Tempo} = [T_{Ret} / T_{Lt}] \times 100 \quad (50)$$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Objetivo 4
1.2. Justificativa 4
1.3. Escopo do Trabalho 6
1.4. Estrutura de Apresentação do Trabalho 6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 8
2.1. Terminologias e Definições 11
2.2. Obsolescência 12
2.3. Desenvolvimento do Produto 23
2.4. A Mecatrônica 25
2.5. Degradação Tecnológica 29
2.6. Remanufatura e Retrofitting 36
2.7. Consumo de Energia em MF. 60
3. PROPOSTA DO TRABALHO 74
3.1. Motivação e Definições Iniciais. 74
3.2. Descrição do Método Proposto. 76
3.3. Nível 1 - Definição dos Coeficientes Principais. 79
3.4. Índice da Documentação Técnica de Máquina $I_{dtt.}$ 98
3.5. Índice da Complexidade de Máquina $I_{cm.}$ 103
3.6. Análise de Custos. 114
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 118
4.1. Caso 1 - Mandriladora UNION BT-125. 119
4.2. Caso 2 – Geradora de Perfil de Engrenagem PFAUTER 800. 122
4.3. Caso 3 – Retifica Cilíndrica LANDIS. 124
4.4. Caso 4 – Torno Paralelo Horizontal TRAUB TNA480. 126
5. CONTRIBUIÇÃO FUTURA 128
6. CONCLUSÕES 129
APÊNDICE – Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina. 131
APÊNDICE – Coeficiente de Manutenção. 132
APÊNDICE – Coeficiente da Degradação Tecnológica. 133
APÊNDICE – Complexidade da Máquina. 135
REFERÊNCIAS 136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS 143

1. INTRODUÇÃO

O universo da aplicação do método proposto neste trabalho se insere numa realidade que pode ser verificada na pratica em diversas instalações industriais que aplicam e usam Máquinas-Ferramentas (MFs). Foi uma necessidade constatada pela experiência do autor no desenvolvimento de arquiteturas de CNC, no desenvolvimento e na proposta de vários modelos de automação para os quais tem feito contribuições. Mais recentemente ainda contribuiu na apresentação de propostas de configuração de plataformas de CNC que pudessem ser aplicadas em máquinas com potencial para reformas.

Pode ser compreendida ainda a proposta como uma contribuição para melhorar as questões de obsolescência de equipamentos, mas que os estudos apontaram para uma falta de padronização destas nomenclaturas e da quase inexistência de estudos nesse sentido. Algumas das nomenclaturas parecem dificultar o entendimento, sobretudo pela falta de termos em português que as definam mais claramente. O termo *retrofitting,* no escopo deste capítulo introdutório aparece como reforma. Uma definição mais clara, no entanto, será abordada na parte de revisão bibliográfica.

A proposta está também fundamentada nos diversos estudos acadêmicos sobre o tema, e estes a partir das várias literaturas que foram objetos das pesquisas deste trabalho. A realidade que se verifica em muitas das instalações industriais visitadas, sugere que são áreas em potencial para aplicação dos recursos de automação, sobretudo em instalações industriais formadas por um parque de máquinas que podem ser recuperadas ou restauradas, melhorando ou incrementando os aspectos da tecnologia com condições funcionais e operacionais mais bem elaboradas.

No entanto, considerando as diversas realidades do uso, da aplicação e das diversas aplicações em automação das MFs, é possível verificar que a proposta deste trabalho não poderá abordar todos os tipos de MFs, devido à sua grande abrangência de formas e características, mas também pelas suas dimensões físicas variadas. Assim, esta proposta vai encontrar uma realidade diversa em função das várias dimensões e características de máquinas e ainda dos atributos econômicos, e estes verificados na prática, sem, no entanto aprofundar-se nesta questão.

Máquinas de pequeno a médio porte, sem pretender defini-los aqui, podem não ser economicamente atraentes para aplicação do método proposto ou de um processo de reforma. Máquinas a partir de certas dimensões, características e funções, por sua vez, podem ser atrativas a um processo de reforma.

Estas afirmações surgem das verificações feitas pelo autor em visitas técnicas e aplicação de várias soluções para uso de plataformas de CNC, sobretudo pela abertura de mercado à entrada de produtos de menor custo oriundos de China, Taiwan e Índia. As questões de aspecto econômico, da concorrência, ou mesmo de tecnologias oriundas de outros mercados, não fazem parte do escopo deste trabalho, apesar de serem também importantes.

Outro aspecto que está inserido no método, é a falta de domínio nas áreas do conhecimento onde uma MF se aplica e onde o conhecimento da aplicação de uma plataforma de CNC se faz necessário. Não obstante, nota-se também desconhecimento dos diversos gestores, de modo geral, em relação aos aspectos de degradação, envelhecimento, tendências, dentre outros. Nesta realidade é que a proposta do método pretende contribuir com o processo de tomada de decisão quando se instala um processo de reforma de máquinas.

Adicionalmente, a abrangência da realidade de mercado, focando-se principalmente no binômio máquina-ferramenta e automação, muitas vezes, se aproxima no que o autor convencionou definir como limite inferior da automação, ou seja, em máquinas com o mínimo de automação ou mesmo quase nenhuma automação. Máquinas que mantém uma estrutura física robusta nas quais se pode aplicar uma automação. Aquilo que era puramente mecânico, pode se tornar assim, dentro de certos limites, uma máquina a CNC.

Dentro do processo de revisão bibliográfica, não foram encontradas literaturas nem mesmo estudos específicos que abordassem métodos ou modelos, sugerindo aplicações em reformas de máquinas ou que pudessem sugerir um modelo de tomada de decisão mais direto.

Poucas referências abordam superficialmente o tema. Há sim um universo considerável de investigações em medições, por exemplo, das mais diversas grandezas, como se demonstrará na revisão bibliográfica, o que contribuiu e deu fundamento a muitas das questões, mas quase sempre não discutem métodos nem propõem métricas que possam ser aplicadas como métodos de reformas de máquinas.

No contexto do método proposto neste trabalho, não estão descritos meios de medição de grandezas elétricas nem mecânicas das máquinas. Apesar de entender que diversos resultados, provenientes destas medições poderiam também contribuir como fator de decisão

para um processo de reforma de máquinas, sua aplicação demandaria o uso de instrumentos e de pessoal habilitado, o que na prática não se verifica. Esta é, no entanto, uma linha interessante que poderia sugerir uma continuidade deste trabalho como contribuição futura. Mas entende-se que este assunto precisa ser abordado de modo a atingir a realidade prática das instalações com as MFs.

Com relação aos aspectos de produtividade, manutenção e degradação da tecnologia, podem existir diversas maneiras de abordá-los, mas na proposta deste método, optou-se por adotar as formulações que serão discutidas posteriormente. Uma das premissas que norteou a proposta do método é de ser facilmente aplicado como forma de contribuir para sua fácil assimilação na forma de uma ferramenta de tomada de decisão.

Assim, a proposta do trabalho consiste na discussão dos coeficientes de produtividade, manutenção, degradação tecnológica e dos demais índices e seus atributos como ferramenta orientativa a um processo de decisão de *retrofitting* de máquinas.

O escopo do trabalho consiste na apresentação e discussão do método numérico. Futuramente, como evolução do método, pode ser descrito um modelo computacional. O método computacional objetivaria facilitar ao usuário o detalhamento e entendimento das questões propostas pelo método, sugerindo ser uma forma mais no sentido tutorial e de aplicação direta.

Por fim, o trabalho não se esgota nesta proposta e pode ser continuamente implementado como contribuição a um processo de melhoria contínua. O universo da aplicação do CNC na automação de máquinas pode ser compreendido como relativamente extenso e permite criar novas metodologias em seu entorno.

1.1. Objetivo

Fundamentando-se na revisão bibliográfica e na experiência do autor sobre o projeto de MFs e de reformas nas mesmas, objetiva-se propor um método de referência baseado em diversos coeficientes e índices como contribuição num processo de decisão em *retrofitting* de MFs. Este método orienta o processo de *retrofitting* e será aplicado em Torno, Retíficas, Geradora de Perfil de Engrenagem e Mandriladora.

1.2. Justificativa

As motivações e justificativas foram fundamentadas a partir do processo natural de obsolescência e envelhecimento das MFs e da oferta de novas tecnologias na aplicação das plataformas de CNC com novos sistemas de motorização totalmente digitais e de plataformas com maior capacidade computacional e operacional, como elementos principais no processo de automação de máquinas.

Fundamenta-se também na necessidade de se estabelecer processos cada vez mais sustentáveis, dentre outros aspectos, e que constituem uma fonte de pesquisa interessante e atual, as quais podem ser resumidamente definidas a partir dos seguintes casos:

- Uma contribuição para mais bem definir a fronteira de comportamento de uma máquina nova em relação a uma máquina reformada (*retrofitting*);
- Não foram encontrados estudos acadêmicos que diretamente abordassem os processos de *retrofitting* de MFs. As literaturas quase sempre abordam as questões sobre obsolescência, desgastes, sustentabilidade, mas muito raramente focam em modelos que possam sugerir ou indicar uma metodologia de *retrofitting* aplicada diretamente às MFs;
- Literaturas e publicações com concentração nos estudos de sistemas de monitoração de máquinas. A maioria das literaturas estudadas está focada em investigações de modelos sobre manutenção preditiva, modelos para medição do consumo de energia, segundo (Moreira et al, 2004), ou ainda de sistemas de apoio a decisão de manutenção (Batista et al, 2003), com reflexos praticamente nulos em uma modelagem para um processo de *retrofitting*;

- Estudos mais recentes apresentam os conceitos em *green machining*, *green manufacturing*, sustentabilidade e impacto ambiental dentro do ciclo de vida do produto, mas somente com alguns reflexos na reengenharia de máquinas. Alguns autores mencionam superficialmente a reengenharia. Estes conceitos sugerem uma preocupação crescente com relação ao comportamento, aspectos e impactos da MFs em relação ao meio ambiente;
- Aumento na demanda por máquinas pesadas, sobretudo na área de produção de insumos para energia, a partir de um parque de máquinas obsoleto e muitas com grau de automação praticamente nulo. Considerável *lead time* e valores de investimentos altos quando se consideram as disponibilidades por máquinas novas. Máquinas consideradas de dimensões físicas maiores sugerem apresentar potencial atraente para um processo de *retrofitting* e a um custo menor em relação a um equipamento novo;
- Diversas instalações industriais visitadas apresentam máquinas com porte físico de médio a grande, porém, sem recurso de automação aplicada. Neste caso, máquinas puramente mecânicas, ou denominadas de máquinas convencionais[1], podem ser transformadas em máquinas a CNC. Máquinas também de dimensões físicas menores, porém, com potencial de recuperação notadamente significativo;
- Surgimento de novas tecnologias das plataformas de CNC com sistemas mais eficientes (controle, motorização) e com custos mais acessíveis sugerem se tornar também atraentes quando considerados dentro de um processo de *retrofitting*;
- Falta de uma metodologia que oriente um processo de *retrofitting*, com dificuldades em modelar um sistema que oriente este processo;
- Necessidade de se propor métricas que orientem e que possam contribuir como uma ferramenta dentro de um processo de tomada de decisão no escopo de *retrofitting* de MFs.

[1] Máquinas-Ferramenta denominadas de puramente mecânica ou máquinas convencionais denotam as máquinas que não possuem nenhum elemento de automação a CNC. Podem, no entanto, apresentar alguns elementos de leitor de posição de eixo, mas não permitem a programação e definição de perfis de peças a partir de uma unidade de controle.

1.3. Escopo do Trabalho

A proposta do trabalho fundamenta-se na definição de três coeficientes principais, definidos como Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina, Coeficiente de Manutenção e Coeficiente de Degradação Tecnológica. Adicionalmente, fundamenta-se na formação do Índice de Complexidade da Máquina e Índice da Documentação Técnica, resultando em índices numéricos que permitem orientar um processo de *retrofitting*.

Mesmo considerando-se a abrangência dos aspectos de automação de uma MF e suas implicações de ordem mecânica, elétrica, hidráulica, dentre outros, a proposta do trabalho não foca nas questões em nível de aprofundamento técnico até o reprojeto de uma máquina. As questões de projeto técnico, dimensionamentos, redimensionamentos, dentre outros, são considerados atributos de projeto de *retrofitting.*

1.4. Estrutura de Apresentação do Trabalho

O trabalho apresenta a seguinte estrutura e está organizado em capítulos.

O capítulo 2 apresenta os resultados da revisão bibliográfica, iniciando-se com uma introdução às terminologias e definições como forma de mais bem situar as diversas nomenclaturas encontradas nas literaturas sobre o tema.

A seguir, apresenta uma contextualização sobre a obsolescência e suas razões, descrevendo de forma preliminar as curvas de sobrevivência, curvas derivadas e curva da obsolescência tecnológica e uma introdução conceitual sobre a definição da degradação tecnológica.

Contextualiza os aspectos introdutórios sobre o desenvolvimento de produtos, observando-se que o desenvolvimento de produto está focado em novos produtos e em ações quase nunca voltadas aos aspectos da remanufatura e do *retrofitting*.

Apresenta ainda uma abordagem introdutória à mecatrônica e uma abordagem resumida sobre os modelos de prototipação virtual, observando-se que alguns benefícios da mecatrônica podem ser utilizados e considerados num eventual processo de *retrofitting*.

Discute a conceituação sobre remanufatura e *retrofitting* a partir de alguns modelos e estudos que puderam ser identificados como resultados das pesquisas nos diversos textos e publicações.

Aborda as definições introdutórias sobre *green manufacturing* e *green machine* a partir de uma contextualização centrada na necessidade de propor equipamentos e mesmo instalações industriais com preocupações nos aspectos e impactos ambientais.

Finalmente, a partir da preocupação com as questões dos impactos, sumariza diversos modelos definidos por diversos autores e que são aplicados ao mapeamento do consumo de energia de uma MF.

O capítulo 3 apresenta a proposta do trabalho, iniciando-se com a discussão dos coeficientes principais e seus índices numéricos.

O capítulo 4 apresenta a validação do modelo a partir da aplicação do processo de *retrofitting* em vários tipos de máquinas de características e funções distintas.

O capítulo 5 sumariza a contribuição futura do trabalho.

Finalizando, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais.

Os apêndices contêm as diversas planilhas que ilustram os trabalhos de coleta de dados e demonstrativos dos valores e seus gráficos correspondentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Parece haver quase uma unanimidade nos vários textos consultados sobre uma crescente necessidade de se aprimorar os aspectos produtivos relacionados com as Máquinas-Ferramentas (MFs), sobretudo aquelas configuradas com plataformas a Comando Numérico Computadorizado (CNC), além de vários outros aspectos da automação industrial.

Os processos de usinagem, também definidos como processos de remoção de material, compreendem uma gama considerável de atividades dentro da cadeia produtiva e podem ser definidos como um sistema formado por máquinas, matéria prima, ferramentas, processos, pessoas, produtos químicos, dentre outros. Da definição contextualizada por (DOHMUS; GUTOWSKY, 2004), o processo de usinagem é um processo particularmente útil devido aos aspectos de precisão dimensional, flexibilidade, custos e capacidade de produzir lotes de peças variadas.

Além de todos os elementos que formam um processo de usinagem, podem ainda ser incluídos os aspectos da sustentabilidade, que normalmente envolvem questões da relação com o meio ambiente, consumo de energia, descartes, reciclagem, dentre outros, os quais, sobretudo nos tempos atuais, assumem um papel importantíssimo e podem ter impacto direto na produtividade e nos custos de produção. O desenvolvimento sustentável dos processos de manufatura tornou-se um problema global, sobretudo pela escassez dos recursos naturais, cujo resultado têm contribuído como agente de agressão ao meio ambiente segundo também abordam (ZHOW et al., 2008).

Uma das principais razões para uma máquina começar a apresentar sinais de falhas é o desgaste, segundo (ZHOW et al.,2008) que aborda superficialmente esta questão, enfatizando, no entanto, que uma máquina pode ter seus aspectos estruturais e funcionais agravados com o uso, reduzindo-se os tempos de máquina em operação. A tecnologia, dentro de uma abordagem clássica da automação industrial, também sofre evoluções e recebe uma série de incrementos ao longo do tempo. Estes incrementos, no entanto, nem sempre abordam soluções em equipamentos já em operação, como por exemplo, as MFs, por diversas razões.

Estas podem estar limitadas aos aspectos de modularidade do equipamento ou mesmo limitadas pela sua estrutura física ou arquitetura construtiva, de tal forma que a simples transferência da tecnologia atual pode se tornar um processo complexo, exigindo uma revisão

quase que completa da máquina. Nesse sentido, por exemplo, (DOHMUS; GUTOWSKY, 2004), discutem que, para os processos de usinagem, em adição aos aspectos relacionados com o consumo de energia, é importante considerar os consumos adicionais necessários para os dispositivos auxiliares como sistemas de fixação de peças, manuseio e transporte, sistemas de refrigeração, coleta de cavacos e sistemas de troca de ferramentas.

Estes equipamentos são normalmente encontrados no meio produtivo, segundo ainda discutido por (DOHMUS; GUTOWSKY, 2004), mas que certamente muitos já estão obsoletos. Este distanciamento da tecnologia e um conseqüente envelhecimento natural das máquinas apresentam-se como fatores que podem contribuir para os aumentos dos custos de produção, diminuição da disponibilidade de máquinas, aumento nos custos de manutenção, aumento no consumo de energia, dentre outros, com conseqüente perda da produtividade.

(UHLMANN; HOLWIELER; GEISERT, 2006), a partir de investigações realizadas em uma retífica a CNC, vai observar o processo de fadiga mecânica em várias partes da máquina, sobretudo nos eixos coordenados, concluindo, além de outros aspectos, que o processo de degradação depende da forma como o equipamento é usado e do tipo de produto fabricado.

Dessa forma, quando se investigam estas questões contextualizadas em uma MF, por exemplo, é possível destacar os aspectos da obsolescência, degradação das superfícies de contato, incrementos no tempo de máquina parada, aumento dos custos das peças de reposição e mesmo dificuldades em se obter peças de reposição.

Nos sistemas de controle das MFs, mais especificamente no caso das plataformas de CNC, por exemplo, quando se estudam os recursos atuais destas plataformas, observa-se uma perda dos aspectos da operacionalidade das máquinas, sobretudo quando comparado aos recursos de operação e programação das plataformas de CNC com soluções tecnológicas não tão recentes.

Uma das citações clássicas no campo de estudos da degradação de uma MF refere-se à de Ernest Rabinowicz – MIT -, na qual afirma que o processo de degradação de uma MF fundamenta-se em três causas principais: Obsolescência, Degradação das Superfícies e Acidentes.

A degradação natural, acelerada ou não, das superfícies de contato dos eixos de movimentação, rolamentos, mancais, etc. são notadas em quase toda estrutura mecânica. Esta degradação mostra conseqüências imediatas nos resultados geométricos finais nos produtos da usinagem e são também fatores observados à medida que a MF envelhece.

Como conseqüência observam-se incrementos nos tempos de máquina parada, com reflexos nos custos de peças de reposição, aumento na indisponibilidade de peças ou componentes. A obsolescência também contribui para o aumento do consumo de energia, sobretudo quando se comparam as soluções existentes na MF com novos produtos, como por exemplo, servos motores, eixos-árvore (*spindles)* e seus correspondentes acionamentos, estes cada vez mais compactos e mais eficientes mecânica e eletricamente além da eficiência energética.

Sistemas de lubrificação e de refrigeração também evoluem constantemente, mas podem não ser facilmente abordados na maioria das máquinas por razões estruturais e de arquitetura também.

Numa abordagem mais atual (DIAZ; HELU; DORNFELD, 2010) discutem as várias estratégias na área do planejamento do processo, projeto de máquinas, operações, dentre outros, os quais existem para desenvolver as chamadas *green machine-tools*, evidenciando a preocupação com as questões do consumo de energia dentro do ciclo de vida do produto.

Portanto, é possível compreender que os mais recentes avanços nesta área podem não estar atingindo os equipamentos já em operação, o que significa um passivo considerável de máquinas com possível potencial de reengenharia ou de atualização tecnológica.

Outro aspecto que pode ser classificado como importante, sobretudo quando se comparam as questões de *design* das MFs fabricadas em anos anteriores em relação às mais atuais, aparecem os aspectos de segurança operacional. As normas técnicas aplicadas, nas mais recentes publicações, exigem uma série de medidas e práticas de projetos, que nem sempre foram abordadas nos equipamentos produzidos em datas anteriores não tão recentes. No entanto, muito além dos aspectos da questão da idade do equipamento, os aspectos de segurança podem e devem ser sempre observados. Ocorre que nem sempre aspectos de segurança são facilmente aplicáveis nos equipamentos existentes devido às dificuldades de interfaceamento com as tecnologias empregadas, sobretudo às relacionadas à Emissão Eletromagnética.

Os estudos conduzidos a partir do processo de revisão das bibliografias permitiram, dentro de certos limites, estabelecer, orientar e definir as fronteiras observadas no universo da aplicação e uso das MFs, sobretudo nas inserções em remanufatura, no processo de degradação da tecnologia, *retrofitting*, dentre outros. O que as investigações concluíram, no entanto, foi uma escassez de estudos e propostas no campo do *retrofitting* de MFs. Isso de certa forma pode ser interpretado como um desafio maior na elaboração de uma proposta que pudesse abordar

estes aspectos. Existem diversos textos abordando o tema remanufatura, novas tecnologias e suas tendências, mas somente alguns pontuais que poderiam sugerir estarem mais centrados em MFs.

Mesmo assim, considerando a abrangência dos diferentes tipos de MFs, aplicações, ambientes, tecnologias e diversos outros atributos, foi possível estabelecer uma conexão entre a proposta deste trabalho e as diversas abordagens encontradas.

2.1. Terminologias e Definições

Diversas nomenclaturas, terminologias e definições são encontradas na literatura e que podem não ser tão usuais quando se busca relacioná-las aos estudos aqui propostos, ou podem ainda se apresentar de forma relativamente inovadora e se aplicariam ainda ao processo de desenvolvimento de novos produtos. As considerações sobre as terminologias e definições verificadas nas pesquisas podem de certa forma, apresentar-se com significados diferentes, sobretudo quando se busca aproximar e conjugar suas definições para os quais os estudos procuraram focar neste trabalho. De forma mais genérica focam-se no ambiente industrial e com algumas implicações com a obsolescência das MFs, passando pela concepção do produto, ciclo de vida do produto, impactos dos mais diversos, tecnologias, dentre outros.

Os estudos, dentro da proposta deste trabalho procuram focar e propor um modelo que busque orientar um processo de *retrofitting* a ser aplicado em um equipamento existente.

2.2. Obsolescência

Segundo (BANERJEE,2006) a obsolescência é a perda do valor de um ativo ou de um bem devido à superação antecipada de sua vida do que tinha sido previsto. Ainda segundo o autor, esta terminologia define-se como uma medida da perda do valor do bem devido aos avanços na tecnologia ou ainda devido às várias alterações ou mudanças nas condições de mercado para aquele produto. A obsolescência, conforme aborda (BANERJEE,2006), pode ocorrer em diferentes tipos de produtos, materiais, ferramentas, fábricas, máquinas, dentre outros, motivados por várias razões como mudanças de projeto, processo, demanda, métodos de produção e ainda novos modelos de máquinas, conforme se observam sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Razões para a Obsolescência.

Materiais	Ferramentas e Equipamentos	Plantas e Máquinas
Alteração de Projeto	Alteração no Produto	Descontinuação do Produto
Alteração de Processo	Alteração no Método de Produção	Mudança nos métodos de produção, processos ou técnicas
Descontinuidade do Produto	Disponibilidade de sistemas mais eficientes	Mudança no produto, inovação ou novas máquinas
Substituição		

O processo de obsolescência pode contribuir para que os equipamentos ou máquinas em produção percam rapidamente seu valor de mercado. Os resultados de produção, por exemplo, devem ser alcançados antes que os equipamentos percam esse valor. Neste sentido (NONAKA; NISHIGUCHI, 2001) apresentam o termo "*speed-based competition*", o qual sugere uma busca acelerada de meios para se manter a competitividade frente à obsolescência natural dos equipamentos.

A introdução cada vez maior de insumos eletrônicos, por exemplo, como meio de se aumentar a produtividade das máquinas, fez acelerar os processos de alterações tecnológicas, mas contribuiu, por outro lado para a diminuição de seu ciclo de vida. As fábricas se vêem frente a uma extraordinária pressão para operar constantemente devido à sua depreciação física e não

se atentam para nenhuma relação com a obsolescência, segundo ainda observam (NONAKA; NISHIGUCHI, 2001).

Os aspectos e as várias formas da depreciação são abordadas por (CATTY,2010), definindo depreciação como a perda do valor de uma propriedade no tempo. A depreciação acumulada de uma propriedade é a diferença entre seu valor original e o seu valor atual.

Os estudos conduzidos para elaboração da proposta do método neste trabalho, no entanto, dentro da linha de degradação tecnológica ou obsolescência não irá se preocupar com as questões da depreciação dos bens, mas concentrará suas investigações nas questões da obsolescência de um equipamento, mais especificamente das MFs. Entretanto, mesmo assim e para fundamentar as questões da obsolescência, é interessante ainda observar como (CATTY,2010) aborda e define as várias formas de depreciação, porém, resumidas e classificadas em três categorias a saber: Deterioração Física, Obsolescência Funcional e Declínio Econômico.

a) **Deterioração Física.** Definida como a perda do valor de um bem devido à exposição de seus elementos, cujas causas incluem desgastes, fadigas, deterioração pela idade, destruição acidental, falta de manutenção;

b) **Obsolescência Funcional**. Definida com a perda do valor resultante da deficiência de um dado equipamento em manter sua capacidade ou habilidade desejada. Os requisitos funcionais de um dado equipamento se alteram devido às expectativas projetadas sobre este ao longo do tempo. Novos requisitos, por exemplo, podem requerer novas funcionalidades as quais já não podem ser executadas pelo equipamento obsoleto. Por outro lado, os novos recursos tecnológicos presentes nos novos equipamentos podem permitir um aumento da sua eficiência, contribuindo para atender as novas necessidades de produção;

c) **Declínio Econômico.** Normalmente estão relacionados aos aspectos de redução da demanda, novos concorrentes, alteração no fornecimento de matéria prima, aumento nos custos dos materiais, mão-de-obra, manutenção, regulamentos governamentais, incentivos, dentre outros.

Da mesma forma, (PANNERSELVAM,2001) contextualiza o processo de deterioração de um equipamento sob dois pontos principais. O primeiro refere-se à incapacidade física de alguns de seus elementos ou componentes. O segundo é a própria obsolescência. A incapacidade física se refere diretamente às alterações das condições físicas por uso, fadiga, desgastes, dentre

outros, implicando em declínio da produção e aumento nos custos de manutenção. O segundo refere-se somente à obsolescência tecnológica. Sob estas condições, considera-se a instalação de um processo antieconômico e não produtivo, com impactos diretos nos produtos resultantes das operações com equipamentos neste estágio.

(WINFREY,1967) aborda e apresenta os modelos estatísticos que fundamentam as questões de depreciação e obsolescência em sua analise estatística das propriedades industriais. Propriedades industriais podem ser compreendidas, neste caso, como todos os insumos que compõem certa atividade industrial, tais como máquinas, equipamentos, dispositivos, dentre outros. Os custos de produção, lucros ou perdas de uma operação em qualquer atividade e a qual fazem uso de equipamentos físicos, não podem ser determinados sem se considerar os custos da depreciação, a qual segundo (WINFREY,1967), depende diretamente da vida útil daquela propriedade utilizada na produção. Conhecer a vida útil de uma determinada propriedade é especialmente importante, juntamente com outras variáveis que compreendem toda a dimensão daquela atividade industrial, tais como, custos, taxas, manutenção, tecnologias, aspectos regulatórios. A curva da Figura 1 é a curva fundamental discutida por (WINFREY,1967), na qual a vida provável de uma propriedade é representada pela área escura do gráfico dividida pela % de sobreviventes na idade estudada.

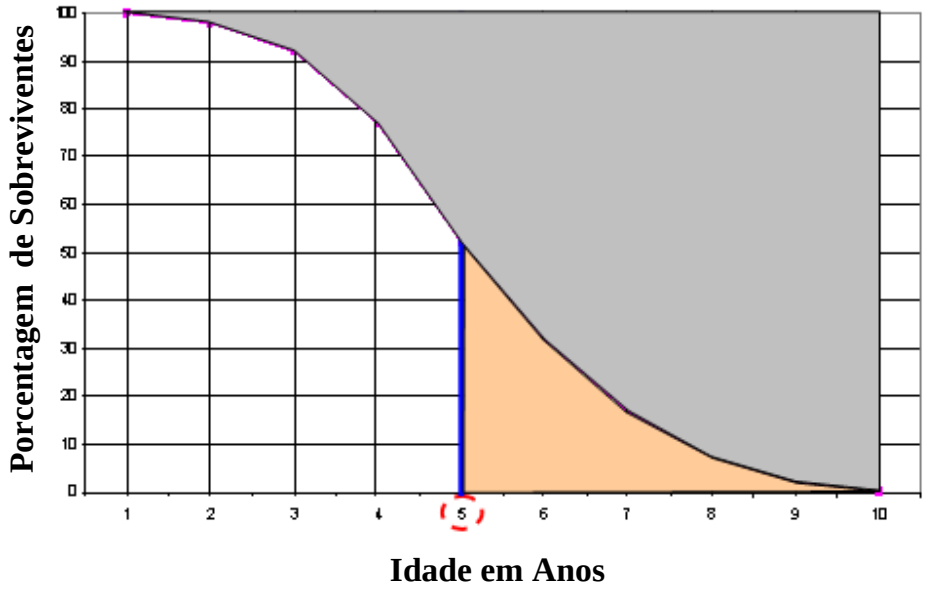


Figura 1 – Curva Fundamental discutida por WINFREY,1967

Por outro lado, os que permanecem em operação ou funcionamento em qualquer idade podem ser representados pela área sob a curva para a direita da ordenada a partir daquela idade. A deterioração física e a obsolescência ordinária podem ser modeladas, segundo (CATTY,2010) por meio da técnica definida como *Mortality Analysis Actuarial Techniques*. Isto resulta na curva denominada de Curva de Sobrevivência (*survivor curve*) e Curva da Vida Útil (*useful service life*). Juntas, eles refletem o processo de deterioração de um equipamento resultante da deterioração física e obsolescência.

Estatisticamente, a aplicação do método para verificação da vida média em serviço de um dado equipamento implica que vários equipamentos em um determinado grupo apresentam vidas diferentes. Dessa forma, a vida média pode ser obtida determinando-se a vida útil de cada equipamento separadamente ou construindo uma curva de sobrevivência a partir do número de unidades, ou equipamentos, que permaneceram em operação a partir de idades (tempos) diferentes.

Na Figura 2, observa-se uma curva de sobrevivência e as curvas derivadas desta.

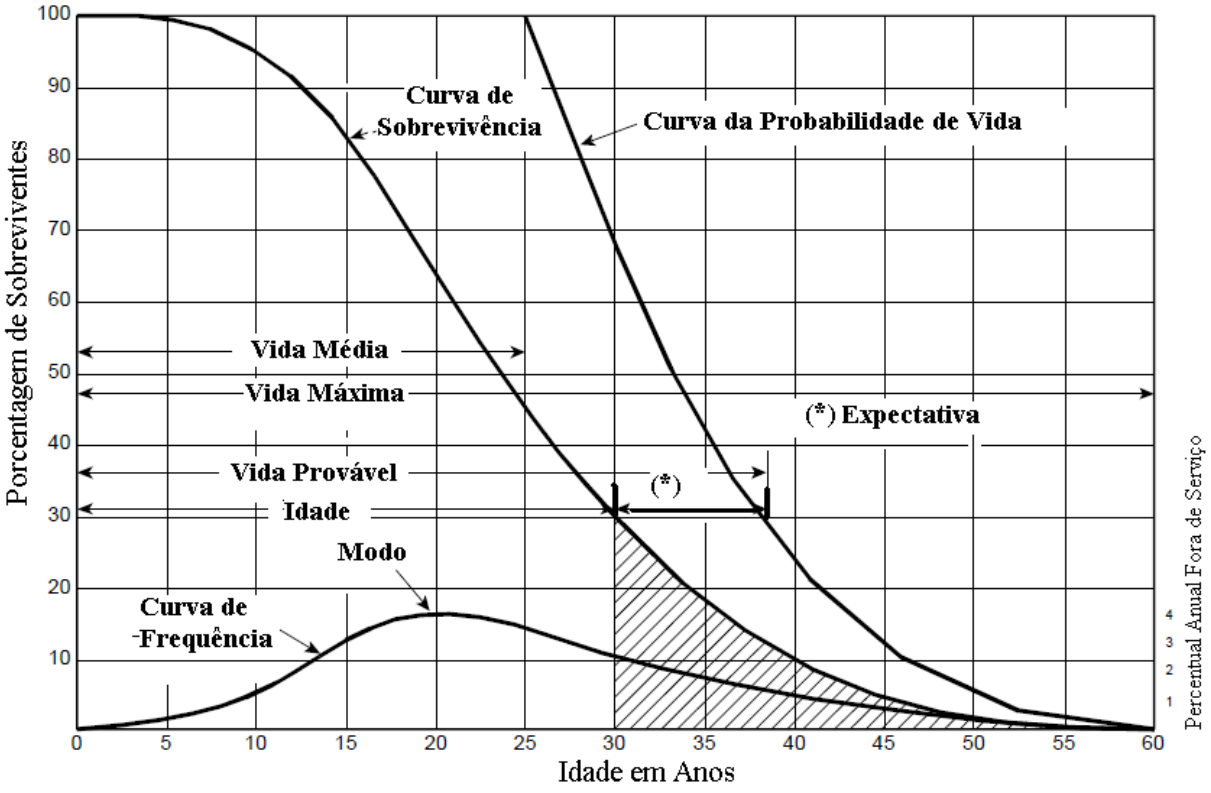


Figura 2 – Uma tipica Curva de Sobrevivência e Curvas Derivadas.

A curva de sobrevivência representa graficamente a quantidade de propriedades existentes em cada idade ao longo da vida em um grupo original. A partir da curva de sobrevivência, a vida média do grupo, a expectativa de vida, a vida provável e curva de freqüência podem se calculadas. A vida média é obtida a partir do cálculo da área sob a curva de sobrevivência, partindo-se da idade zero até a idade máxima e dividindo esta área pela ordenada na idade zero.

A expectativa de vida restante em qualquer idade pode ser calculada obtendo-se a área sob a curva, a partir da idade de observação até a idade máxima, e dividindo esta área pelo percentual de sobrevivência na idade observada. Por exemplo, na Figura 2, a expectativa de vida restante na idade de 30 anos é igual à área hachurada plotada abaixo da Curva de Sobrevivência dividido por 30%. A curva de freqüência apresenta o número de unidades que se encontram fora de serviço em cada intervalo de idade e deriva-se a partir da obtenção das diferenças entre a quantidade de propriedades sobreviventes no inicio e no fim de cada intervalo.

A análise da mortalidade, segundo aborda (CATTY,2010), usa dados históricos de elementos que se colocaram fora de serviço como forma de estabelecer a Curva de Sobrevivência a qual reflete o passado e antecipa um padrão de deterioração física. Um número de famílias padrão de Curvas de Sobrevivência pode incluir ainda as chamadas *Iowa Curves, Bell Curves e H-Curves,* não demonstradas aqui. A Figura 3 permite observar a curva da obsolescência quando se refere a uma tecnologia mais antiga por exemplo.

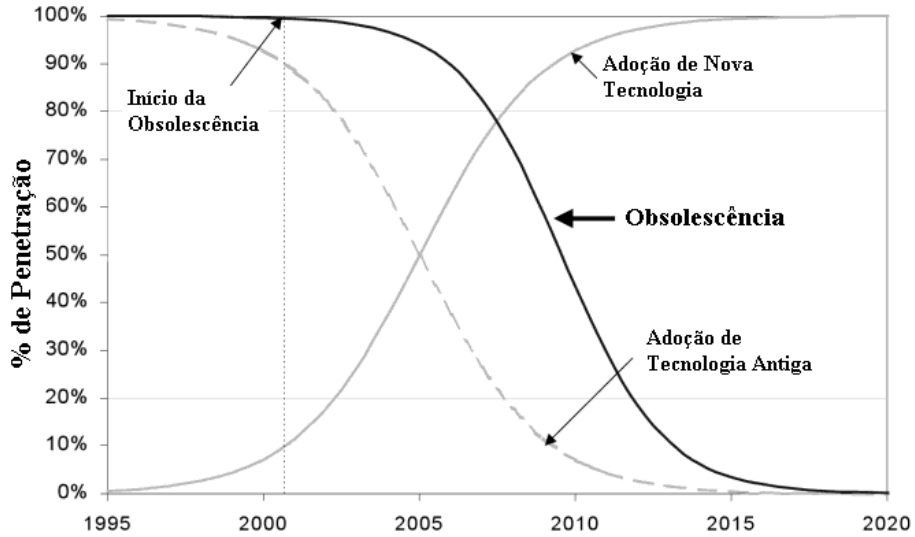


Figura 3 – Curva da Obsolescência Tecnológica.

Uma vez que o padrão tenha sido estabelecido, a curva pode ser calculada em termos de uma taxa anual, a qual reflete a probabilidade de depreciação e que seja diretamente resultante na obsolescência tecnológica.

Dessa forma, a conexão entre depreciação e obsolescência, segundo (NONAKA; NISHIGUCHI, 2001) podem se tornar mais ou menos intensas e influenciadas pelos fatores de mercado, isto é, momento de baixa pressão por mudanças ou pressão por competitividade mais enfática, forçando uma decisão mais aguda, levando a investimentos mais significativos em bens de capital, isto é, em máquinas.

(DATTA,2011) apresenta um caso com valores numéricos que permite uma visualização prática da aplicação dos fundamentos de (WINFREY,1967). Tomando-se um caso com os seguintes valores históricos de acordo com a Tabela 2, pode-se gerar a Curva de Distribuição da Freqüência.

Tabela 2 – Dados para a Curva de Distribuição da Freqüência.

Idade em Anos	Unidades fora de Serviço
0	0
2	2
5	6
10	15
15	25
20	20
25	15
30	10
35	5
40	2

O gráfico da Figura 4 ilustra a Curva da Distribuição da Freqüência gerada a partir dos dados da Tabela 2.

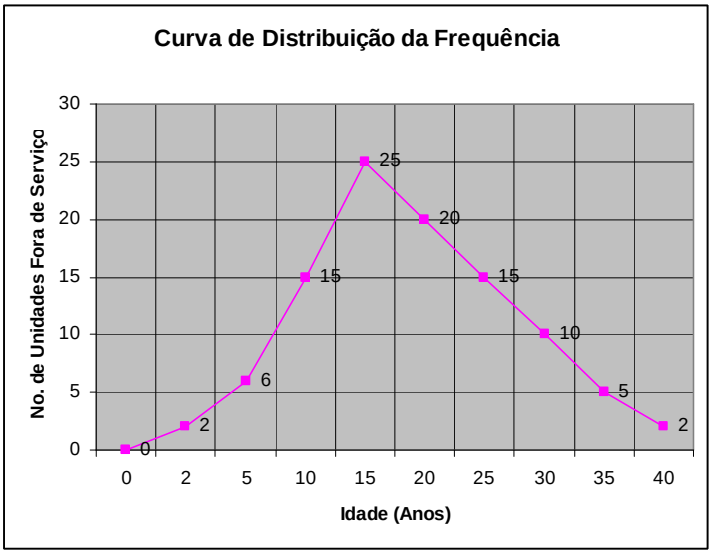


Figura 4 – Curva de Distribuição da Frequência

Os dados para construção da Curva de Sobrevivência estão sumarizados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados para a Curva de Sobrevivência

Idade em Anos **(N)**	Unidades Fora de Serviço **(f)**	No. Acumulativo de Unidades Fora de Serviço	No. de Sobreviventes	% de Sobreviventes	**N*f**
0	0	0	100	100	0
2	2	2	98	98	4
5	6	8	92	92	30
10	15	23	77	77	150
15	25	48	52	52	375
20	20	68	32	32	400
25	15	83	17	17	375
30	10	93	7	7	300
35	5	98	2	2	175
40	2	100	0	0	80
SOMA	**Σf = 100**	-	-	-	**Σ(N*f)] = 1889**

Tomando-se os dados definidos na Tabela 3, a coluna denominada Idade em Anos (N) mostra que para uma idade inicial de 0 (zero) anos, tem-se que o No. Acumulativo de Unidades Fora de Serviço é igual a 0. À medida que a Idade em Anos (N) avança, nota-se um aumento do No. Acumulativo de Unidades Fora de Serviço. Conseqüentemente, a coluna denominada de No. de Sobreviventes também diminui e, conseqüentemente a % de Sobreviventes. Logo, para o tempo de Idade em anos considerado para 40 anos, neste caso, tem-se que as 100 unidades colocadas em funcionamento no tempo de Idade em Anos (N) igual a 0 (zero), não estão mais em operação.

Tomando-se novamente os dados disponibilizados e sumarizados pela Tabela 3, tem-se a Curva da Sobrevivência ilustrada pela Figura 5.

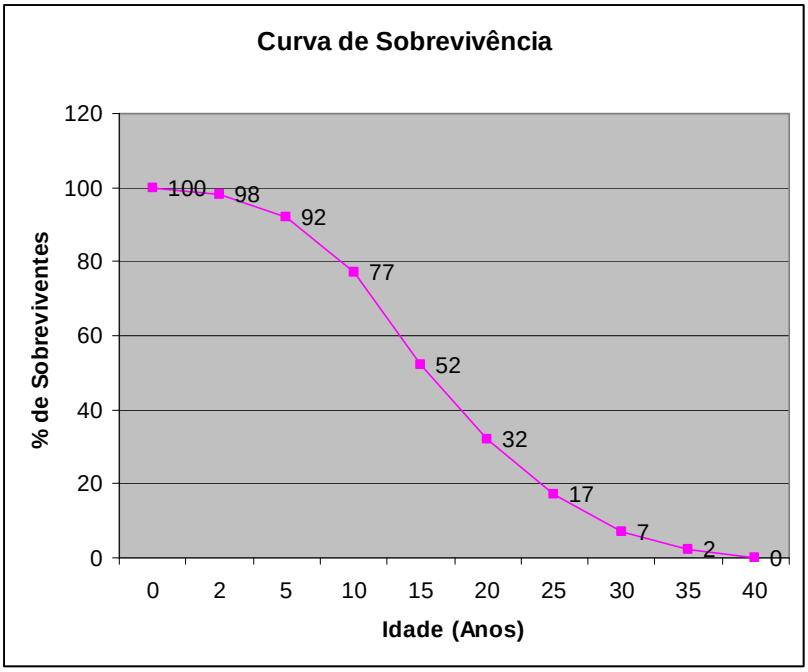


Figura 5 – Curva de Sobrevivência

Assim, o denominado Valor Médio da Vida Útil, a partir das definições descritas por (DATTA, 2011), tem-se que:

$$M = [\Sigma(N*f)] / \Sigma f \qquad (1)$$

Onde, **M** = Valor Médio da Vida Útil. **N** denota a idade em anos e **f** denota o número de unidades fora de serviço.

Aplicando-se os valores da Tabela 3 na equação **(1)**, tem-se que:

Σ(N*f)] = 1889 e **Σf =** 100,

Assim,

M = [Σ(N*f)] / Σf ⇒ M = 1889 / 100 **⇒ M =** 18,89.

Portanto, o Valor Médio da Vida Útil neste caso é de 18,89 anos.

O número total de equipamentos que permanecem em operação ou serviço em valores % / Ano pode ser calculado para qualquer idade considerando um triângulo aproximado sob a Curva de Sobrevivência - Figura 6 - à direita da idade desejada ou selecionada.

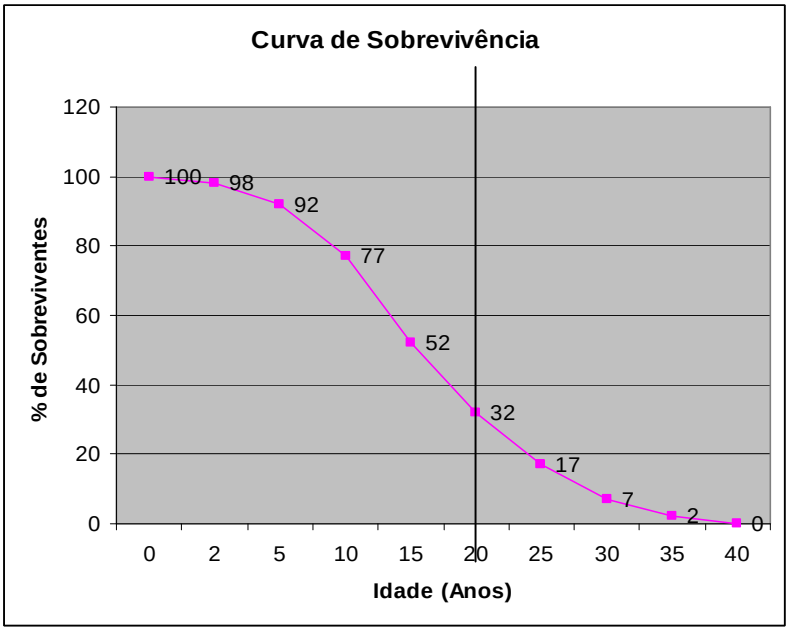


Figura 6 – Curva de Sobrevivência para 20 anos.

Tomando-se a idade de 20 anos, por exemplo, tem-se:

$$\text{Área} = \tfrac{1}{2} * \text{Base} * \text{Altura} \qquad (2)$$

Disso resulta que o número total de equipamento em operação por ano é dado pela expressão:

$$\text{No. em Operação} = \tfrac{1}{2} * (\text{Qte. de Anos Restantes}) * (\text{\% Sobreviventes}) \qquad (3)$$

Aplicando a expressão **(3)** para a idade de 20 anos, tem-se:

$$\text{No. em Operação} = \tfrac{1}{2} * (40-20) * 32 = \tfrac{1}{2} * 20 * 32 = 320.$$

Aplicando-se a mesma expressão **(3)** para a idade máxima de 40 anos, tem-se:

$$\text{No. em Operação} = \tfrac{1}{2} * (40-40) * 0 = 0$$

A partir das discussões sobre a obsolescência, neste capítulo, é possível estabelecer e situar as questões da perda de valor de um bem, o que também deve permitir melhor orientar a perda do valor tecnológico.

Dessa forma, tomando-se uma MF e considerando suas características físicas construtivas, freqüência de uso, características dos trabalhos empregados como os aspectos da usinabilidade, tipo e qualidade da manutenção empregada e ainda a tecnologia, é possível verificar sua potencialidade dentro do conceito da obsolescência.

Uma MF é um tipo de equipamento que sofre todo tipo de deterioração e desgastes, sobretudo o da tecnologia, sugerindo ser assim uma linha potencial de aplicação de meios que atuem em sua recuperação, adequando-a mais fortemente às necessidades atuais de produção, a partir das novas tecnologias que possam permitir um incremento em seus recursos operacionais e funcionais.

Dentro do processo de obsolescência das MFs, (UHLMANN;HOLWIELER;GEISERT,2006), apresentam uma abordagem sobre o monitoramento das condições progressivas de desgaste e deterioração em uma retífica.

As abordagens discutidas por (UHLMANN;HOLWIELER;GEISERT,2006), servem para fundamentar que toda MF sofre seu processo de deterioração e estes processos podem ser inerentes ao seu uso, características estruturais e funcionais e mesmo de tecnologia. De certa forma, nos parece interessante ainda evidenciar as preocupações com sistemas de monitoramento, sem se preocupar, no entanto, com métricas de *retrofitting*. Os estudos

conduzidos por (UHLMANN;HOLWIELER;GEISERT,2006) estão, portanto, fundamentados em uma série de monitorações aplicadas a partir de uma massa de dados disponibilizados pela própria arquitetura do controle usado, onde é possível a aplicação de testes de circularidade e outros testes a partir dos dados obtidos dos sistemas de acionamentos dos eixos, por exemplo.

O conhecimento do perfil da corrente elétrica de um determinado servo motor pode indicar a condição funcional de um fuso de esferas, permitindo estabelecer uma curva de degradação ao longo do tempo de uso.

Neste caso, um programa teste é colocado em funcionamento na máquina que deve estar sob determinadas condições. A monitoração dos sinais são normalmente os de corrente elétrica, rotação dos eixos e rotação do eixo árvore.

Para estimar a condição de um determinado eixo, um modelo matemático foi construído. A partir de equações diferenciais, as quais descrevem os processos, características de diagnósticos são então geradas, permitindo estabelecer os parâmetros de degradação de um sistema de fuso de esferas.

A aplicação do modelo adotado por (UHLMANN;HOLWIELER;GEISERT,2006) é possível a partir de uma arquitetura de CNC que já disponibiliza tal tecnologia e cujos resultados podem ser de certa forma, revertidos para a própria máquina.

Entretanto, a aplicação de modelos deste tipo não parece nem sugere ser praticável em máquinas com tecnologias obsoletas. Portanto, é possível afirmar que à medida que uma máquina se torna obsoleta, a aplicação de tais modelos podem ficar também comprometidos. Porém, se uma máquina, em seu processo de reforma, tem incorporada uma nova tecnologia, esta pode usufruir de modelos como aqueles discutidos por (UHLMANN;HOLWIELER;GEISERT,2006).

2.3. Desenvolvimento do Produto

Inúmeros autores abordam e focam seus estudos e investigações no desenvolvimento do produto e toda sua dimensão holística, contextualizando que a chave para o sucesso da manufatura consiste em desenvolver produtos novos ou mesmo com incrementos de melhorias objetivando um *time to market* cada vez menores, antecipando-se à concorrência. E isso tem sugerido ser cada vez mais objeto de investigações e estudos, passando pela mecatrônica, a qual abordará a seguir, os diversos modelos virtuais de prototipação, dentre outros, sempre focando em novos produtos. Há uma corrida em função de uma demanda maior e com maior apelo tecnológico, provocando um distanciamento entre os equipamentos em operação e os novos.

A sobrevivência num mercado cada vez mais competitivo, de acordo com (KRAR;GILL,2003) reside basicamente em duas habilidades criticas. Foco no Produto e Disponibilidade do Produto no tempo. Desta afirmação, advém uma série de outras considerações, já que os requisitos em novos produtos sofrem alterações ao longo do tempo.

A competitividade no campo da manufatura já não é mais definida dentro dos limites geográficos de um local ou mesmo país. Ao contrário, já atingiu a globalização. Os meios produtivos buscam constantemente a melhoria de seus processos e buscam se inserir num mercado que exige cada vez mais qualidade, exigindo a revisão de métodos e dos equipamentos obsoletos, endereçando novas tecnologias.

Dentro de todo esse processo de criação de novos produtos, verificam-se o surgimento de várias ferramentas de desenvolvimento, resultantes das novas tecnologias que emergem neste campo, quase sempre abordando soluções no processo de criação e não no processo de incremento de soluções para equipamentos já em operação.

(ELMARAGHY;ELMARAGHY,2006) discutem a criação de novos produtos em colaboração direta com os fabricantes OEM (*original equipment manufacturer*). Segundo esta abordagem, os autores consideram um meio indispensável para criar soluções mais atrativas e contribuir para a melhoria da qualidade do produto. Dessa forma, antes se podia entender que o desenvolvimento estava centrado no conhecimento do proprietário do produto, agora se pode entender que os conhecimentos do produto são partilhados entre as diversas áreas do

conhecimento. Daí advém então uma série de ferramentas, métodos, processos e tecnologias que permitem incrementar os processos de criação.

Considerando os efeitos e impactos sobre o ambiente, por exemplo, (MAZHAR;KARA;KAEBERNICK,2007) entendem que os produtos precisam ser considerados em todo seu ciclo de vida, desde o projeto, manufatura e venda, uso e fim de vida de modo a otimizar os processos de produção. Os fabricantes enfrentam aumento da pressão de órgãos reguladores, principalmente os focados em reduzir, reciclar e reutilizar os restos industriais, segundo (LINTON;YEOMANS;YOOGALINGAM,2002).

A introdução de novas legislações em nível nacional e internacional sobre os impactos da produção industrial tem provocado uma mudança de cultura. Novas exigências tornam o OEM responsáveis pelo fim de vida do produto (SELIGER,CONSIGLIO,ZETTL,2004).

Assim, resumidamente, dentre vários outros aspectos, os textos são de certa forma abrangentes e vastos dentro do processo de criação e desenvolvimento do produto. Há uma enorme preocupação em se otimizar o ciclo de desenvolvimento de novos produtos, mas com pouca referência ao processo de degradação intrínseca dos produtos e quais direcionamentos poderiam ser dados a estes produtos.

Consideram-se obviamente todos estes aspectos positivos e necessários, mas parece possível e interessante também focar as investigações no processo natural de envelhecimento, sobretudo nas MFs. E entende-se que também nesse sentido reside um novo aspecto motivacional para a proposta deste método. Quando muitas abordagens focam em novos produtos, a proposta aqui vai na direção de se permitir um incremento tecnológico em um equipamento já existente.

O processo de obsolescência, a ser abordado nos capítulos que se seguem, pode ser também denominado de degradação tecnológica num sentido mais amplo, não somente da obsolescência, mas entendendo o fenômeno de uma forma holística, sobretudo quando entende existir aspectos intrínsecos entre uma MF e o ambiente em que se encontra inseridos.

2.4. A Mecatrônica

Considerando que este trabalho trata de uma proposta para *retrofitting* de MFs, logo, a partir de um produto que já atingiu seu limite operacional, funcional e tecnológico, mas que pode apresentar uma possibilidade de ser inserido nas mais recentes tecnologias é possível antecipar algumas das conclusões sobre os benefícios operacionais e funcionais que podem ser incorporados a um MF fundamentando-se nos aspectos conceituais da mecatrônica. Estes benefícios podem ser traduzidos em velocidades, ganhos de posicionamento dos eixos coordenados, acelerações dentre outros.

Não se aplicam aqui os conceitos de prototipação, obviamente, posto se tratar de um equipamento em uso, mas que se pode entender que a introdução de uma nova tecnologia, notadamente a de CNC, sugere diversos ganhos à MF.

Numa contextualização atual e abrangente do desenvolvimento do produto e dos incrementos em automação notadamente observados nas MFs, os sistemas mecatrônicos, por exemplo, podem ser definidos, segundo abordam (NEUGEBAUER;DENKENA;WEGENER,2007) como sistemas complexos e interdisciplinares, sumarizado pela Figura 7, mostrando uma grande densidade funcional quando comparados a sistemas elétricos e mecânicos tradicionais, sugerindo uma extensão das funções de elementos mecânicos intrinsecamente relacionados com o funcionamento de elementos elétricos.

Sistemas mecatrônicos são essencialmente caracterizados por funções orientadas e pela expansão de sistemas mecânicos por meio da integração de sensores, atuadores e o modelamento de sistemas de controle que permitem incrementar os aspectos funcionais globais (funções) de uma MF.

Essas funções, ou módulos, podem de certa forma, ser arranjadas em diversos níveis hierárquicos de forma a produzir diversos resultados, como, por exemplo, sistemas de diagnósticos de falhas, sistemas de compensação de temperatura, otimização das curvas de aceleração e desaceleração dos eixos coordenados, otimização dos perfis de velocidade, parametrização das constantes de máquina, dentre vários outros.

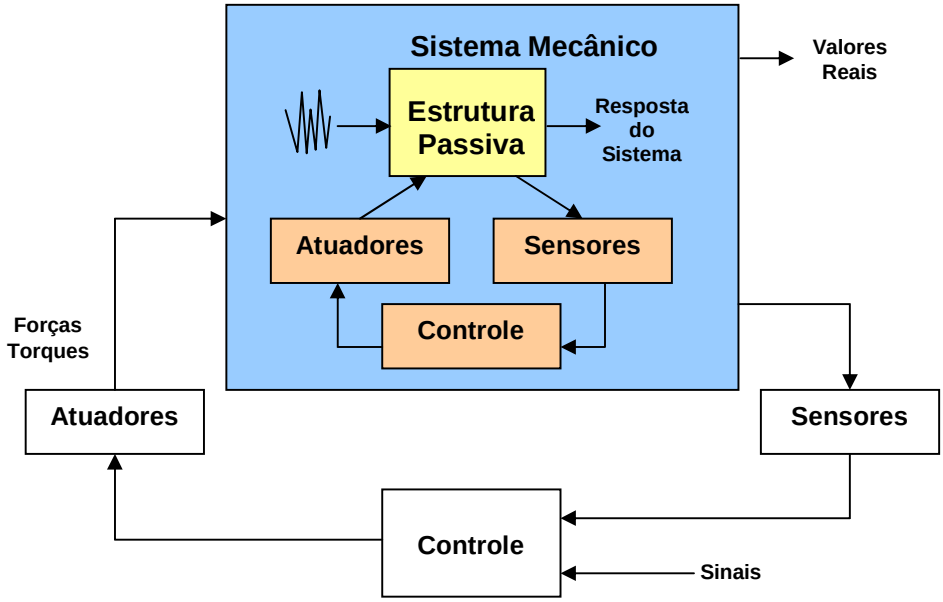


Figura 7 – Representação de um sistema mecatrônico segundo (NEUGEBAUER;DENKENA;WEGENER,2007)

De certa forma, todo sistema tecnológico onde elementos mecânicos, elétricos, eletrônicos e de controle concorrem mutuamente, compreendendo uma integração de funcionalidade e comportamento funcional estático e dinâmico de uma MF, pode ser definido como um sistema mecâtronico (FERRETI;MAGNANI:ROCCO,2004).

Numa relação preliminar com os métodos de desenvolvimento do produto, é possível verificar que num sistema convencional de desenvolvimento não se observa uma interação significativa e estreita entre projetos de sistemas mecânicos e sistemas eletrônicos. Mais recentemente, no entanto, com a mecatrônica, o desempenho dinâmico de uma MF somente pode ser melhorado se estudado e configurado holisticamente, ou seja, numa estreita relação e interação de todos os elementos mecânicos, elétricos, hidráulicos e pneumáticos que a compõem.

Dessa forma, diversos textos abordam e contextualizam a mecatrônica no campo da prototipação virtual e dos modelamentos comportamentais de máquinas, portanto, na fase de desenvolvimento do produto e não em produtos já existentes.

Os benefícios da aplicação das tecnologias de simulação e o desenvolvimento de protótipos virtuais discutidos por (ALTINTAS et al.,2005) mostram que, variando-se os dados de projeto, um grande número de passos do desenvolvimento podem ser reduzidos, produzindo um produto com características mais bem definidas e otimizando-se o ciclo de vida deste.

A partir das definições que emergem da mecatrônica, diversos modelos de prototipação surgem objetivando conhecer, antecipadamente, os comportamentos estáticos e dinâmicos de uma MF. Dessa forma, modelos como o denominado de MECOMAT discutidos por (VAN BRUSSEL at al.,2001) fazem a integração de módulos de software que permitem sintetizar, analisar e otimizar diversas classes de MFs, por meio dos quais diversos elementos estruturais de máquinas são incorporados ou alterados virtualmente numa estreita relação com alterações de diversos parâmetros dos sistemas de acionamentos (motores e seus elementos de controle), sintetizando um comportamento funcional de uma MF.

O método discutido por (ZAEH;POERNBACHER,2005) permite agrupar as diversas funções de uma MF, normalmente definidos nos ciclos denominados de PLC (*programmable logic controller*) via UML[2]. Assim, os atributos dependentes do status da máquina e das restrições de tempo são modelados pelas leis do movimento. A interação entre os elementos são estabelecidos num diagrama seqüencial a partir do qual o programa de PLC é derivado.

A fase de definição do projeto, por exemplo, (JEDRZEJEWSKI,2005) modela o balanceamento térmico e estrutural de uma MF, orientando a distribuição de calor ao longo da estrutura física da máquina produzida por elementos girantes, como por exemplo, os rolamentos.

(ALTINTAS;ERKORHMAZ,2003) apresentam um modelo para atingir a velocidade-ótima e controlada em uma trajetória de movimento de um eixo coordenado, considerando a sua não linearidade, contribuindo significativamente para a redução do tempo quando comparado a sistemas convencionais de definição de velocidades. (DENKENA;HOLZ,2006) demonstram o modelo para geração das forças e momentos de uma máquina, expandindo o conceito de geração de parâmetros que permitem adaptar as máquinas às diversas solicitações dinâmicas de aceleração dos sistemas de controle.

Segundo (FERRETI;MAGNANI:ROCCO,2004), uma das atuações mais comuns observadas em sistemas mecatrônicos, robótica e MFs está relacionada com a aplicação de servo motores *brushless* (motores AC sem escovas) conectados a cargas das mais diversas e por meio de sistemas de transmissões também de características variadas.

A partir dessa premissa e fundamentado nos diversos modelos desenvolvidos no sistema denominado de DYMOLA, os autores propõem o modelamento do comportamento de um motor *brushless*. A partir desse modelamento, seu comportamento pode ser estendido ao

[2] UML (*unified modeling language*) é uma notação para sistemas orientados a objeto – OO – descritos por Grady Booch, James Rumbaugh e Ivar Jacobson;

modelamento dos eixos coordenados de uma MF, o que permite analisar virtualmente seu comportamento a partir do modelo proposto.

A partir dos vários modelos presentes nas literaturas e sumarizados neste capítulo, foi possível sintetizar e mostrar uma visão das mais recentes tecnologias disponíveis no desenvolvimento de novos produtos, sem, no entanto aprofundar em cada uma das questões, mas objetivando localizar, quase que numa estrutura *top-down*, a realidade de um produto novo frente a um produto obsoleto.

É preciso deixar claro que os aspectos de prototipação e seus diversos modelamentos apresentam um avanço importantíssimo no desenvolvimento de novos produtos, logo não diretamente aplicados aos produtos já existentes.

Notam-se, dessa forma, um vasto elenco de discussões, estudos, modelos e propostas altamente válidos para as concepções do ponto de vista de desenvolvimento do produto. Dentro da abordagem sobre mecatrônica, é possível contextualizar as tecnologias de simulação, aplicação de modelos comportamentais de máquinas, desenvolvimento virtual de PLC, incorporação de elementos estruturais estáticos e dinâmicos. Adicionalmente, encontram-se ainda diversas abordagens sobre aplicação de balanceamento térmico, sistema ótimo de controle da malha de velocidade, modelamento para servo motores *brushless*, mas todos estes aplicados em uma máquina conceitualmente nova e não a um processo de *retrofitting*.

Mesmo antes de ter sido claramente definidas e abordadas as diferenças conceituais entre remanufatura e *retrofitting*, mas ainda pela força do termo, é possível considerar que um processo de *retrofitting*, considerando-se as diversas variáveis limitantes, consiste em aplicar, ou mesmo conciliar os recursos da mecatrônica num equipamento obsoleto, considerando que o *retrofitting* implica em prover a MF de um incremento tecnológico considerável, sobretudo ao endereçar os aspectos de automação com as plataformas de CNC.

Parece que aqui reside uma das contribuições do *retrofitting* ou mesmo um desafio maior, traduzindo-se em benefícios para um equipamento que passou por este processo. Em síntese, pode-se afirmar preliminarmente que um processo de *retrofitting* consiste em agregar, ou melhor, permite incrementar tecnologia em um dado equipamento onde a tecnologia anterior já não mais corresponde aos aspectos funcionais, operacionais e de manutenção da MF, lembrando-se sempre da várias restrições que se aplicam.

2.5. Degradação Tecnológica

Dentro dos processos de envelhecimento natural de uma MF, conforme as mais diversas abordagens dentre as quais algumas foram inclusive discutidas em tópicos anteriores, parece interessante uma breve discussão sobre o que o autor convencionou chamar de degradação tecnológica. Este capítulo não tem a pretensão de esgotar o tema, mas apenas contribuir para situar ou posicionar as questões de envelhecimento de uma MF.

Notadamente, os diversos textos contemplam os aspectos de desgastes mecânicos, por exemplo, como resultantes de atritos mecânicos, dentre vários outros. Considerando que o tema central neste trabalho é poder incorporar uma plataforma de CNC em uma MF, quer seja ela já concebida ou não com esta tecnologia, parece possível que propor o termo degradação tecnológica seja mais apropriado. Em diversos trabalhos onde o autor teve a oportunidade de atuar, sobretudo em projetos de arquiteturas de CNC, com sistemas em tempo real, quer sejam sistemas mono processados ou multi processados, baseados em sistemas operacionais proprietários ou mesmo um misto entre sistema operacional proprietário e DOS ou WINDOWS, sempre se podia rapidamente atingir os limites daquele sistema. E, atingir os limites poderia significar que aquele sistema já não mais poderia responder aos novos dados de entrada. Muitas vezes, ganhos tecnológicos adquiridos e incorporados nos sistemas não podiam ser compartilhados por sistemas semelhantes. Estes normalmente adivinham de tecnologias diferentes ou de tecnologias que não embarcavam ou não contemplavam os incrementos que um determinado sistema possuía. Na prática, ao se aplicar tal sistema, ou mesmo motivados por aspectos econômicos, transferia-se para uma determinada máquina uma tecnologia de menor incremento ou menor ganho tecnológico. De forma análoga, uma máquina com tecnologia embarcada com uma versão de desenvolvimento também não poderia usufruir, dentro de certos limites, dos resultados conseguidos com os novos sistemas, constatando-se assim a degradação tecnológica. Entende-se, pois, que uma MF é um elemento potencial que sofre de vários tipos de degradação. O processo de *retrofitting*, dentro de certos limites, deve procurar restabelecer os aspectos funcionais e operacionais de uma MF a partir das tecnologias existentes.

Diversos outros autores ainda definem tecnologia como uma organização do conhecimento para fins de alcançar algo prático. Uma definição mais abrangente do termo compreende o uso de dispositivos e padrões sistematizados de pensamentos e atividades para controlar os fenômenos físicos e biológicos como forma de servir aos desejos do homem com um mínimo de recursos e máxima eficiência. Ainda segundo aborda (DORF,2001), muitos afirmam que a

tecnologia pode ser descrita como a aplicação da ciência para objetivos industriais e comerciais. Outros ainda consideram tecnologia como máquinas, equipamentos, processos, métodos, materiais, ferramentas, componentes e dispositivos e ambientes. Portanto, a abordagem que se quer contextualizar em relação à tecnologia, sobretudo às aplicadas nas MFs, não pretende afirmar que a tecnologia se degrada, mas que um determinado equipamento, que pode ser compreendido a partir de uma dada tecnologia empregada, se torna obsoleto. Logo, aquela tecnologia empregada já não mais atende os requisitos ou desempenho esperado do equipamento.

Dentro do ciclo de desenvolvimento de produto, novos produtos são disponibilizados a partir de novas tecnologias. A reflexão que se faz, a partir deste contexto, é o que se pode fazer com os equipamentos que já existem, isto é, se encontram em operação e podem, de certa forma, permitir incrementos de tecnologia em uma estrutura física já existente.

A obsolescência das MFs, dentro do processo natural de envelhecimento deste tipo de equipamento, compreendendo toda sua dimensão, ou seja, desgastes das partes móveis, recursos operacionais, nível de automação, comprometimento da disponibilidade do equipamento, custos, consumo de energia dentre outros, permite estabelecer alguns parâmetros comparativos entre equipamentos de diferentes gerações, sobretudo àqueles diretamente ligados à tecnologia.

Tomando-se algumas variáveis básicas, como por exemplo, a tecnologia embarcada no CNC, a qual configura uma determinada máquina e se compara com um CNC de tecnologia mais atual, pode-se claramente observar as diferenças tecnológicas entre essas duas plataformas. Normalmente o que se observa quando se analisam as plataformas de CNC mais recentes, é que estas apresentam incrementos tecnológicos ao nível do hardware, ou seja, tipo de processador utilizado na configuração de sua arquitetura, espaço físico ocupado por bancos de memórias, capacidade computacional gráfica, interfaces de operação e recursos de programação. Incrementos mais enfáticos podem ser observados nos sistemas de motorização e seus correspondentes servos drives e acionamentos. Adicionalmente, notam-se também recursos de software, e estes descritos na forma de funções ou programação e ainda de recursos operacionais, sobretudo os de apelo gráfico. Somando-se a estes aspectos pode-se sugerir que outros, não menos importantes, contribuem para a instalação de um processo natural de degradação tecnológica. A partir destas observações, é possível concluir que o processo de degradação tecnológica é, portanto, função da tecnologia, a qual evolui constantemente, e do desgaste natural de uma maquina. Ambas contribuem de certa forma, e

tem impacto direto com a eficiência do equipamento ao longo de seu ciclo de vida. Os aspectos da tecnologia podem tornar o equipamento menos eficiente. Estes podem ter impactos em grandezas como velocidades de avanço, tempo de processamento de blocos de um programa, impactos nos recursos operacionais da máquina, incompatibilidade com novas funções de usinagem, dentre outros. Já os referentes aos desgastes apresentam impactos diretos no produto final tais como os geométricos, compreendendo os aspectos dimensionais, acabamento superficial, tempo de fabricação dentre outros.

Quando se analisam ainda estes dois aspectos principais da degradação tecnológica, vê-se que também os impactos na manutenção de uma MF são fortemente influenciados. Estes contribuem para impactar os custos, posto que a disponibilidade de peças de reposição começa a ser comprometida à medida que o equipamento envelhece e as disponibilidades de insumos de reposição tornam-se escassos.

Novas plataformas de CNC, novos sistemas de motorização com acionamentos totalmente digitais (*full digital)*, redução dos custos destas novas tecnologias e a necessidade de se estabelecer processos cada vez mais sustentáveis, dentre outros aspectos, constituem uma fonte de pesquisa interessante, podendo contribuir para mais bem definir a fronteira de comportamento de uma máquina nova em relação a uma máquina remanufaturada (*retrofitting*).

Outro aspecto fundamental, ainda dentro da sustentabilidade, é a questão do consumo de energia cuja preocupação foi possível verificar, nos vários trabalhos pesquisados, apesar de não ser observadas propostas que tratem de métodos de modificações ou alterações em máquinas usadas. Entende-se, assim, que esta coletânea de variáveis, contribuintes na formação da degradação tecnológica, apresenta uma influência cada vez maior dentro do processo produtivo, com reflexos no ciclo de vida do produto. Novas configurações de CNC, com custos cada vez mais acessíveis, por exemplo, contribuem para, mantendo-se a estrutura física original da máquina, alavancar seu desempenho em termos de produtividade.

Por outro lado, quando se trata de observar uma máquina em funcionamento, tem-se que a degradação é uma manifestação natural no uso de uma MF e pode se instalar em processo acelerado ou não como uma função de seu uso.

Além dos desgastes por abrasão ou fricção, por exemplo, em qualquer sistema mecânico esta degradação também pode estar relacionada a choques físicos ou colisões. Eventos desta natureza podem contribuir para a diminuição da produtividade de uma MF com impactos nos

custos dos reparos ou mesmo na indisponibilidade de insumos como peças de reposição, sobretudo à medida que o processo de obsolescência se inicia.

Adicionalmente, as diversas literaturas pesquisadas apresentam investigações em sistemas de monitoramento. Os diversos autores pesquisados, conforme mencionados a seguir, não estão interessados propriamente no processo de envelhecimento das tecnologias empregadas, por exemplo, mas sim em prever uma determinada falha.

Nesse sentido, considerando que uma falha eventual pode ocorrer em um equipamento, sobretudo pela sua idade, (JANG et al.,2008) propõem um sistema baseado no que os autores denominam de ART2 (*adaptive resonance theory2*) rede neural e o ART-Kohonen *neural network* e ainda um método para monitoramento e diagnóstico remoto de falhas em CNC.

Basicamente, o modelo descrito por (JANG et al.,2008) fundamenta-se na aquisição de alguns dados de máquina associados com a disposição de alguns sensores externos e, por meio de um modelo definido, indicam uma curva de tendência comportamental de um determinado elemento ou sub-sistema da máquina.

No campo da monitoração, (JARDINE;DAMING;BANJEVIC, 2006) abordam um sistema denominado de CBM (*Condition Based Maintenance*), o qual descreve um programa de manutenção que recomenda decisões de manutenção baseados nos dados coletados de uma máquina. Consiste de três passos: Aquisição de Dados, Processamento dos Dados e Tomada de Decisão.

As pesquisas nas diversas literaturas apresentam várias aborgadens no campo da monitoração em MF, evidenciando a aplicação dos mais diferentes sensores. As técnicas de monitoração podem ser descritas ou contextualizadas basicamente em sistema direto e sistema indireto.

Casos de medição direta, por exemplo, podem ser aplicados em medição de desgaste de ferramenta com o uso de sensores de medição por contato. Uma medição indireta pode ser empregada para medir a condição de uma dada ferramenta por meio da monitoração do consumo da corrente elétrica do motor, por exemplo. Neste sentido, (TETI et al., 2010) abordam uma série de questões com a aplicação de sensores em MF objetivando a monitoração das condições de uma MF.

A monitoração dos dados produzidos pelo sistema de controle ou outro meio disponível em uma MF, compreende uma série de dados numéricos, os quais podem ser descritos como eventos que podem ocorrer em um determinado instante, ou ao longo de um determinado tempo. Nos

sistemas de manufatura um evento numérico, por exemplo, pode indicar um consumo instantâneo de energia naquele determinado instante ou pode ainda indicar um alarme que permanece em estado ligado ou desligado por um determinado intervalo de tempo. Já os eventos complexos podem ser descritos como uma abstração de eventos que são criados a partir de eventos simples. Neste sentido, (VIJAYARAGHAVAN;DORNFELD, 2010) demonstram a aplicação de um sistema de monitoramento de consumo de energia aplicado a um eixo-árvore a partir da conexão com o *MTConnect*, cujos resultados estão sumarizados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado das medições no Eixo-Árvore

Evento	Descrição	No Instante T em Segundos	Observação
1	Máquina em repouso	242s	Consumo menor que 1Kw. RPM = 0. Considerar sistema de ventilação pode estar ligado
2	Pico de energia	243s	Pico de energia observado para acelerar o spindle de 0 ~ 8KRPM. Aproximadamente 3,5Kw
3	Pico de energia	464s	Pico de energia observado para acelerar o spindle de 8KRPM ~ 16KRPM. Aproximadamente 4Kw
4	Mantido em operação	1457s	Consumo aproximado de 2,5Kw
5	Observação de picos anormais	1679s	Picos anormais observados sem causa aparente. Provável indicação de falha do spindle
6	Mantido em operação	2612s	Consumo aproximado de 2,5Kw
7	Mantido em operação	3074s	Consumo aproximado de 3Kw devido a alteração das grandezas de corte no perfil sob teste
8	Mantido em operação	3309s	Consumo aproximado de 2,5Kw
9	Fim		Consumo menor que 1Kw. RPM = 0.

Os estudos conduzidos foram baseados em um perfil usinado em um Centro de Usinagem, produzindo-se várias peças por ciclo, observando-se o comportamento do consumo de energia

sobre um determinado período de tempo. O ciclo determinado para o eixo-árvore foi fundamentado em três estágios: 0RPM, 8000RPM e 16000RPM. O estado operacional da máquina considerou os seguintes: Início (*Start-Up)*, Desligamento, Parado e Usinando. Os resultados obtidos, a partir do modelo proposto, demonstram o perfil do consumo de energia do eixo-árvore em diversas rotações.

O estudo conduzido por (VIJAYARAGHAVAN;DORNFELD, 2010) também permitem analisar a máquina sob o aspecto do perfil de comportamento do eixo-árvore, elemento importante dentro da constituição física de uma MF e sua importância no perfil do consumo de energia.

Assim, a partir dos vários modelos apresentados neste capítulo, objetivou-se mostrar que existem estudos no sentido de se conhecer o perfil de consumo de energia de uma MF inserida nas mais diversas condições e isso nos parece válido.

Entretanto, quando se contextualiza o que foi possível observar nas literaturas pesquisadas, é possível concluir que existe uma preocupação com os aspectos de medição do consumo de energia, com as questões de impactos de diversas formas e natureza, com sistemas de monitoramento das condições de corte, dentre outras, com o propósito de se conhecer este perfil.

Porém, não se observam aspectos mais diretos que poderiam discutir e abordar as questões de *retrofitting* de máquinas, endereçando modelos ou propondo meios de adaptar os recursos tecnológicos atuais, dentro de suas limitações, nas MFs em operação.

Finalmente, isso pode ser também um indicativo de que há um vasto campo que pode ser explorado neste sentido, propondo formas e modelos que contribuam para a redução dos impactos dos mais diversos.

Os poucos estudos acadêmicos verificados sobre os processos de *retrofitting* de uma MF, dentro de uma dimensão mais global, também sugere ser fonte de motivação para poder contribuir neste cenário. Dessa forma, uma vez estabelecido o ambiente operacional de uma MF, entendidas as novas tendências e necessidades de equipamentos com características que cada vez mais se ajustem às questões ambientais e compreendido o processo de degradação tecnológica natural deste tipo de equipamento frente às novas tecnologias, é possível elaborar um cenário conceitual de remanufatura ou *retrofitting* de uma MF.

2.6. Remanufatura e *Retrofitting*

Dentro das diversas terminologias e nomenclaturas investigadas, o termo *remanufacturing*, ou remanufatura, parece de certa forma conflitar com o termo *retrofitting*, sobretudo pela quase inexistência de estudos e trabalhos editados originalmente na língua portuguesa. Inicialmente deve-se conceituar a remanufatura aplicada a equipamentos e os diversos modelos apresentados como resultados dessas investigações e, posteriormente o *retrofitting*.

Máquinas são estruturas constituídas de diversos tipos de equipamentos com certa complexidade e com alta freqüência de uso (ZHOW et al., 2008) e uma das principais razões de falhas nas máquinas está relacionada ao desgaste. Equipamentos, ou máquinas, operando sob certas circunstâncias, ciclos ou condições de trabalho, apresentam maior ou menor velocidade de agravamento de suas condições de operação e com conseqüência em seu ciclo de vida.

(WINIFRED;IJOMAH,MCMAHON,2004) definem remanufatura como um processo de colocar novamente em operação os produtos para um estado de “quase novo”, garantindo seu funcionamento. A remanufatura, busca assim recuperar uma proporção substancial dos recursos incorporados no produto quando de sua primeira manufatura, a um custo adicional baixo, reduzindo o custo final do produto acabado.

Para (AMEZQUITA et al, 1995) a remanufatura consiste em restaurar um produto para a condição de “quase-novo”, reutilizando, recondicionando e substituindo suas peças. Nesta definição, novos termos são adicionados à definição principal. Reuso relaciona-se com o uso de componentes bons e que não eram mais aproveitados. Recondicionamento relaciona-se com a restauração ou recuperação de peças para um estado funcional satisfatório.

Um produto remanufaturado é freqüentemente o termo utilizado para produto fora de operação, quebrado ou usado o qual foi restaurado para a condição de sua especificação original ou foi modernizado e atualizado para uma nova especificação. Ainda, segundo (ZHOW et al.,2008), o termo engenharia da remanufatura pode ser compreendido como a industrialização da manutenção da alta tecnologia *versus* uma produção do desperdício.

Produtos ou componentes remanufaturados, em principio, apresentam as mesmas funções com praticamente a mesma qualidade. Restaurar as funções originais de um equipamento pode ser mais rápido do que fabricar um novo. A aplicação da remanufatura fundamenta-se, sob certas

condições, num menor consumo de energia, redução do uso da matéria prima e menor impacto ambiental (ZHOW et al., 2008).

Dessa forma, o termo remanufatura não somente promove o reuso do produto ou material, mas também permite um incremento de qualidade e funcionalidade do produto. Assim, produtos usados dentro do processo de remanufatura são chamados de "*core*" de acordo com (LUND,1996) (SMITH;KEOLEIAN,2004).

As investigações conduzidas por (BRAS;HAMMOND,1996) permitiram criar uma métrica para o que o autor convencionou chamar de DfR (*design for remanufacturing*)[3]. Estas foram fundamentadas na proposta de Boothroyd e Dewhurst que em 1991 apresentaram o modelo DfA (*design for assembly*)[4].

A métrica proposta por (BRAS;HAMMOND,1996) procura ser objetiva e está restrita à uma lista de critérios, diferentemente de outros que a apresentam de modo mais abrangente. Foca o modelo nos itens afetados pelos aspectos mecânicos somente. Conseqüentemente, todas as outras questões de mercado, disponibilidade de peças, dentre outros, não foram considerados neste modelo, apesar de ter relação com a remanufatura.

Genericamente, vários processos da remanufatura podem ser identificados, inclusive normalizados e citados na NORMA Alemã VDI 1993, também referenciadas por diversos autores nas literaturas pesquisadas. Estes podem ser classificados, resumidamente, de acordo com a Figura 8, mas não necessariamente nesta ordem.

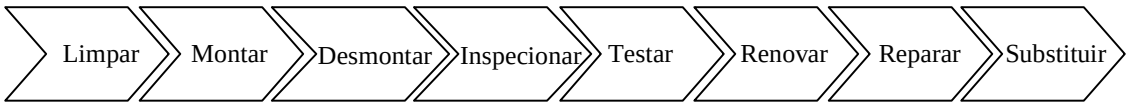


Figura 8 – Ilustração de um Processo Génerico de Remanufatura descrito pela VDI 1993.

[3] Tradução livre para Projetado para ser Remanufaturado;
[4] Tradução livre para Projetado para ser facilmente Montado;

Já no modelo proposto por (BRAS;HAMMOND,1996), estes processos foram concatenados, sendo reclassificados a partir de uma definição mais genérica, conforme se observa na Figura 9.

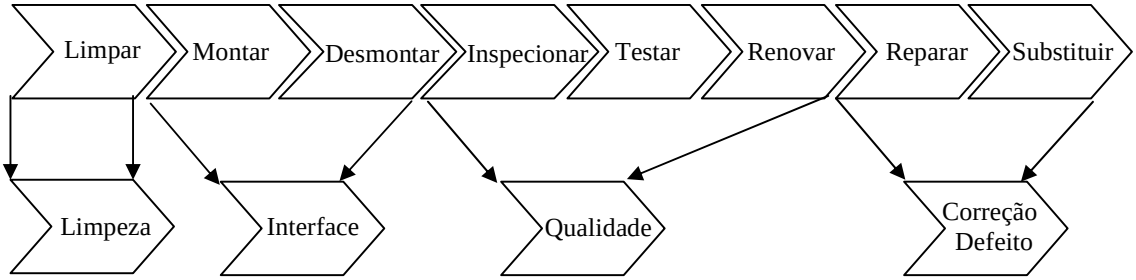


Figura 9 – Ilustração do Processo adaptado por (BRAS;HAMMOND,1996)

De forma resumida, a estrutura organizacional do modelo proposto assinala valores percentuais e pesos para os atributos, convergindo para um índice numérico de remanufatura. Isto pode ser sumarizado conforme descreve a Tabela 5.

Tabela 5 – Categoria e Índices

Métricas	Peso	Categoria	Peso	$Índice_1$	$Índice_2$	Nível	$Índice_R$
Substituição		Substituição	100%	x	-	1	$Indice_1$
Desmontagem	30%	Interface	30%	-	x	2	$Indice_2$
Remontagem	70%						
Teste	80%	Qualidade	5%	-	x	2	$Indice_2$
Inspeção	20%						
Substituição (básica)	20%	Correção de Defeito	40%	-	x	2	$Indice_2$
Renovar	80%						
Limpeza		Limpeza	25%		x	2	$Indice_2$

$$_{\mu}\text{cleaning} + {}_{\mu}\text{testing} + {}_{\mu}\text{inspection} + {}_{\mu}\text{disassembly} + {}_{\mu}\text{assembly} = \text{Índice}_{\mathbf{R}} \quad \textbf{(4)}$$

Logo, tem-se que:

$$_{\mu}\text{remanufacturing} = \left(\Sigma_j \, Wj \, / \, \mu_j \right)^{-1,} \text{ onde W é o peso;} \quad \textbf{(5)}$$

Para (BERNARD,2011), remanufatura é um tipo especifico de reciclagem por meio do qual um bem durável é posto numa condição próxima ao novo. Tanto a remanufatura como a reciclagem evita o desperdício pós-consumo, contribuindo para a redução do uso de matéria prima. No entanto, o processo de reciclagem é um processo de uso intensivo de energia, conservando-se somente o material.

(BERNARD,2011) propõe um modelo teórico de remanufatura considerando o duopólio de fabricantes originais (OMs) que produzem um determinado componente. Este componente específico que precisa ser substituído durante seu ciclo de vida cria um mercado secundário onde fabricantes independentes entram na competição. Assim, os dois fabricantes originais produzem um produto ***m***, o qual entra como um produto final de consumo em um bem, constituindo o mercado primário. A vida útil do componente e do produto final de consumo são definidos, respectivamente, como ***l*** e ***L***, sendo ***l*** < ***L***. Conseqüentemente, usuários do produto final de consumo terão que substituir o componente defeituoso por um período ***b***, onde $b = L / l - 1$. Isto cria um mercado de reposição com o surgimento dos chamados *Independent Remanufactures*[5] (IRs).

Em relação à tecnologia, cada OM ***i***, ***i*** E{1,2} controla seu nível de remanufaturabilidade $\mathbf{q}_i$, a tecnologia com que cada produto pode ser remanufaturado e os custos Cr ($\mathbf{q}_i$) e Cs ($\mathbf{q}_i$), para o OMs e IRs, respectivamente. Porém, para (CARLTON,WALDMAN,2009) os OMs se beneficiam da economia de escala entre um produto novo e um produto remanufaturado e para qualquer valor de ***q*** apresentam um custo menor do que os custos de um IRs. A vantagem tecnológica do OMs sobre o IRs, pode ser expressa pela seguinte propriedade:

$$cs(q) - cr(q) \geq 0; \text{ e assintoticamente: } \lim_{q_i \to \infty} (cs(q) - cr(q)) = 0: \qquad (6)$$

O modelo de (BERNARD,2011) aborda também as questões de demanda, otimização, preços e volumes e seleção da tecnologia, mas que não serão discutidos neste trabalho.

Para (JIANG,JHANG;SUTHERLAND,2011) remanufatura representa, em muitos casos, uma oportunidade de negócios que permite promover a sustentabilidade ambiental. Basicamente na mesma linha de investigação de vários outros pesquisadores, estes apresentam um modelo

[5] Tradução livre para Novos Fabricantes Independentes.

para seleção de tecnologia da remanufatura denominado de *multi-criteria decision making* (MCDM).

O modelo considera o portfólio de tecnologias em remanufatura. Segundo (JIANG,JHANG;SUTHERLAND,2011) os benefícios associados com cada um dos portfólios, incluindo benefícios econômicos e ambientais, são avaliados usando seis critérios principais: Custo; Qualidade, Tempo, Serviço, Consumo de Recursos e Impacto Ambiental. O *analytic hierarchy process* (AHP) foi discutido por (SAATY,1980) e é freqüentemente empregado em modelamento de processos de tomada de decisão. Aplicado, neste caso, para seleção do portfólio de tecnologia e definido por uma matriz de atributos, permite a definição de pesos para cada critério analisado.

Para (SANTOS;VIAGI,2009), o processo de tomada de decisão em um ambiente empresarial é usualmente complexo e de difícil estruturação. O método do valor esperado, por ser de mais fácil compreensão, acaba sendo o mais utilizado no meio empresarial, porém este método pode levar à miopia nas soluções propostas principalmente em casos de problemas multicritério que caracteristicamente representam quase que a totalidade dos casos empresariais. Uma das principais fases da uma solução de um problema consiste no seu entendimento e estruturação. O método AHP divide o problema em níveis hierárquicos e no topo deste tem-se o objetivo principal.

A figura 10 esquematiza esta estrutura hierárquica do AHP na discussão apresentada por (SANTOS;VIAGI,2009).

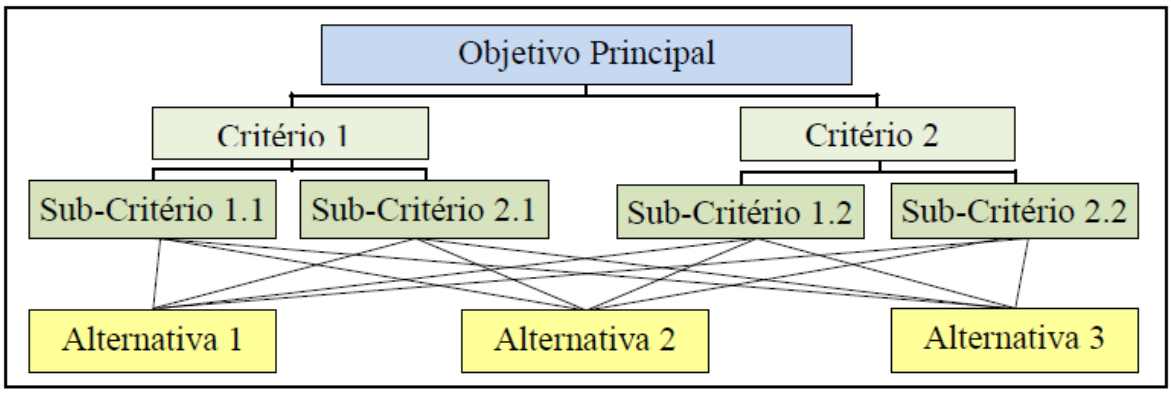


Figura 10 – Estruturação Hierárquica do Método AHP discutido por (SANTOS;VIAGI,2009)

No primeiro nível hierárquico, conforme sumarizado na Figura 11 tem-se um único objetivo, isto é, caracterizar o desempenho do sistema de remanufatura. No nível hierárquico seguinte, o desempenho é dividido em critérios. Já no nível hierárquico mais baixo, o desempenho, dentro de cada critério, é descrito por medidas específicas. É neste nível onde o desempenho pode ser avaliado para cada uma das alternativas em tecnologia.

Durante a fase de planejamento da tecnologia as informações estão muitas vezes incompletas, de precisão desconhecida, imprecisa, e com base ainda em suposições múltiplas. Assim os valores obtidos para cada medida estão sujeitas às incertezas significativas. Dessa forma, como os valores apresentam muitas outras variáveis, (JIANG,JHANG;SUTHERLAND,2011) sugerem ainda mais dez pontos de análise para cada critério, sugerindo a aplicação da escala Likert[6].

[6] Escala *Likert* é definido como um método de atribuir valor quantitativo aos dados qualitativos, para torná-lo passível em análise estatística. Um valor numérico é atribuído a cada escolha potencial e um valor médio para todas as respostas é calculado no final da avaliação ou da pesquisa.

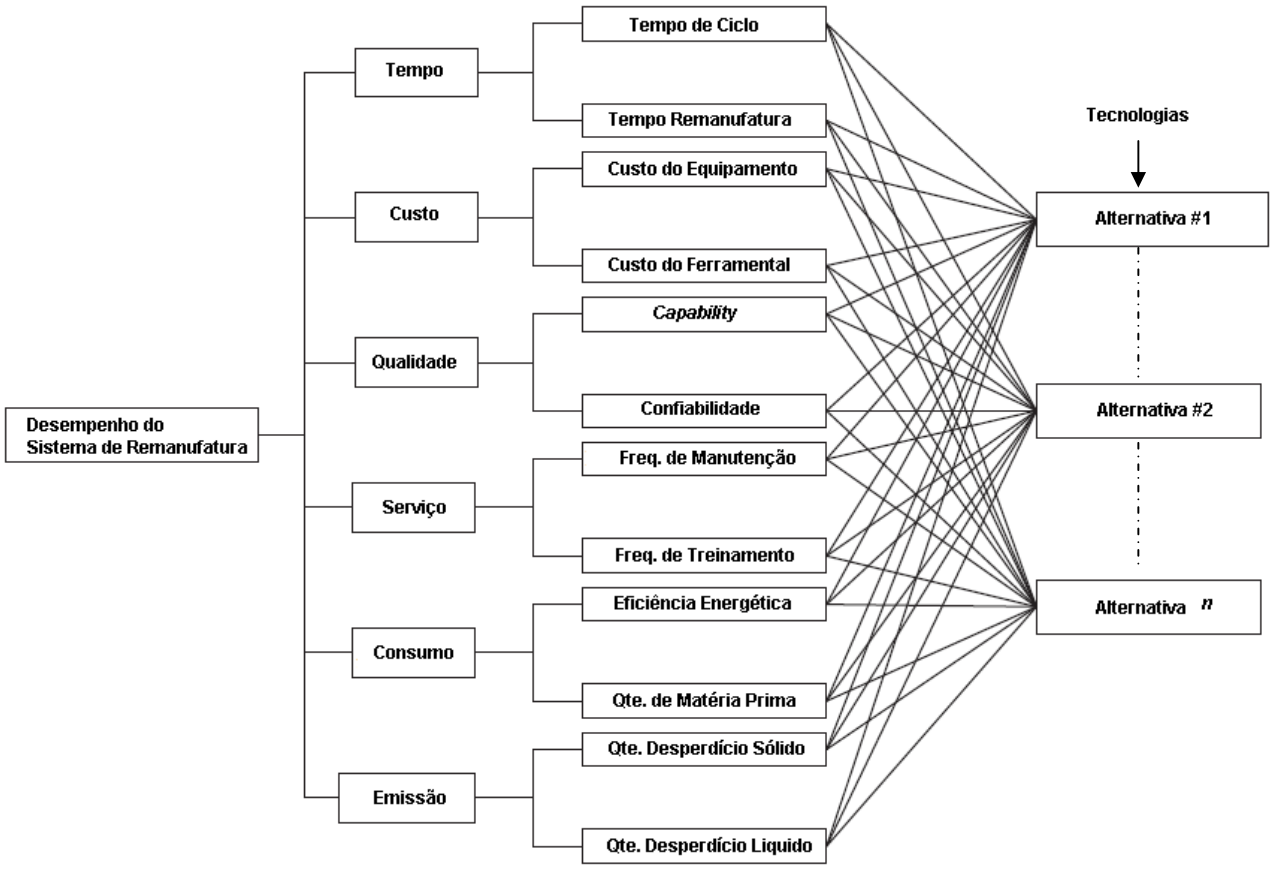


Figura 11 – Ilustração da Seleção de Critério proposto por (JIANG,JHANG;SUTHERLAND,2011)

Ao se avaliar a importância relativa de um critério em relação a outro, freqüentemente o método AHP usa um valor numérico de 1 a 9. Se os dois critérios apresentam valor de importância igual, então é atribuído o valor de importância relativa igual a 1. Se o critério ***j*** apresenta o dobro da importância de ***i***, então é atribuído um valor de importância relativa ***aji*** igual a 2. Caso o critério ***j*** apresente um valor 1/5 da importância do critério ***i***, é atribuído um valor de importância relativa ***aji*** igual a 0.2. Dessa forma, a importância relativa de cada uma das combinações forma o par de comparação definida pela matriz $\mathcal{A}$.

$$\boldsymbol{A} = \{a_{ij}\} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \cdots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \qquad \textbf{(7)}$$

Observe-se que, caso o critério ***J*** seja duas vezes mais importante que o critério ***i (aij = 2),*** então o critério ***i*** deve ser metade da importância do critério ***j (aji = 0.5)***, logo, tem-se:

$$aij = 1 / aji \qquad (8)$$

Uma vez que a Matriz $\mathcal{A}$ tenha sido definida, os valores numéricos dos pesos ***W*** podem ser determinados para cada um dos critérios por meio o método da média geométrica.

$$w_i = \sqrt[n]{\prod_{j}^{n} a_{ij}} \Big/ \sum_{i=1}^{n} \sqrt[n]{\prod_{j-1}^{n} a_{ij}}, \quad (i,j = 1,2,\ldots,n), \qquad (9)$$

Os benefícios de uma sinergia bilateral podem ser expressos, no modelo, pela Matriz $\mathcal{S}$, onde

$$S = sij \qquad (10)$$

Nesta matriz, os elementos ***sij*** representam o grau no qual a tecnologia ***j*** contribui com a tecnologia ***i***, onde ***sij*** ficam nos intervalos 1 e -1. Por definição, ***sii*** = 0.

Os benefícios desta sinergia podem ser expressos por:

$$s_i = u_i \sum_{j=1}^{n} x_j s_{ij}. \qquad (11)$$

Com a identificação dos benefícios da tecnologia, o benefício total da tecnologia da remanufatura, pode ser expresso por:

$$U = \sum_{i=1}^{n} x_i (u_i + s_i). \qquad (12)$$

Várias abordagens e investigações podem ser encontradas nas publicações sobre remanufatura. É necessário, no entanto, observar atentamente as abrangências dessas tratativas, podendo ser focadas num âmbito mais genérico. O que se observa, no entanto, é que existem diversos outros estudos, porém, mais focados em produtos e equipamentos de outra

natureza, diferentemente da natureza das MFs. Aqui também nota-se uma escassez do tema quando se refere à MFs.

Adicionalmente os estudos sugerem que quase sempre o modelamento ou outras investigações tendem para casos pontuais, como por exemplo, sua empregabilidade nos bens de consumo como eletro-domésticos, computadores, copiadoras, lavadoras ou mesmo os automobilísticos. Talvez pela complexidade ou características, raramente se encontram abordagens mais diretas como às que poderiam ser aplicadas nas MFs. Mesmo assim, as abordagens neste capítulo permitiram contextualizar e localizar a remanufatura dentro de alguns atributos tais como: A remanufatura como conceituação da promoção do reuso de um produto ou material e a remanufatura como incremento da qualidade e funcionalidade de um produto. Adicionalmente, foi possível observar ainda a discussão de algumas métricas que objetivam orientar e medir a remanufatura.

As investigações sobre a remanufatura não permitiram identificar um ponto focal onde se pudessem estabelecer métricas para melhor definir o quando uma remanufatura deve ser implementada. No entanto, é possível sugerir que esta apresenta sua contribuição como forma de melhor relacionar os conceitos entre remanufatura e *retrofitting*.

Há certa dificuldade quando se procura definir mais claramente os termos remanufatura e *retrofitting*, quando se buscam definições nas publicações, ficando difícil estabelecer uma fronteira mais clara entre uma e outra. Parece haver certa miscigenação entre os termos remanufatura e *retrofitting*.

A palavra *RETROFIT*[7] pode ser empregada como verbo e substantivo. Quando empregada como verbo, pode apresentar três significados a saber:

- Fornecer peças, dispositivos ou equipamentos que não estavam disponíveis ou em uso no momento da manufatura original do equipamento;
- Adaptar a uma estrutura já existente;
- Substituir por um novo ou modernizar partes de um equipamento.

Quando empregada como substantivo, pode apresentar dois significados a saber:

- Um componente ou acessório adicionado a algum equipamento depois de já ter sido fabricado;

[7] De acordo com http://www.audioenglish.net/dictionary/retrofit.htm

- O ato de adicionar um componente ou acessório a algum equipamento o qual não existia quando originalmente fabricado.

(CHATURVEDI et al.,1998) definem *retrofitting* como um meio de se adicionar um determinado acessório a um dado objeto, neste caso uma MF, e tem sido aplicado em MFs já há alguns anos e entendem que este processo permite um incremento de tecnologia na máquina, conferindo uma série de vantagens operacionais, funcionais e de processos, sem no entanto apresentarem uma classificação ou definição sobre quais seriam os benefícios, nem tampouco procuram descrever definições precisas de como e quando este processo poderia ser implementado. No entanto, é preciso observar que os estudos conduzidos por (CHATURVEDI et al.,1998) foram fundamentados em uma máquina convencional, mais precisamente uma Furadeira Radial convencional, o que não invalida suas conclusões, mas sugere uma delimitação do campo de aplicação de um CNC neste tipo de máquina. Mesmo assim, as conclusões dos autores foram basicamente as seguintes:

- Introdução do CNC alterou a disciplina do chão de fábrica;
- Meio de menor custo, rápido e eficiente de se modernizar uma máquina convencional;
- Redução das horas de produção, com conseqüente aumento da produtividade e redução de refugos;
- Padronização do ferramental de usinagem;
- Melhoria na ergonomia;
- Incremento do conhecimento dos operadores após treinamento;
- Aumento da competitividade;
- Melhora no acabamento superficial e na precisão das peças.
- Média de 50% na redução do tempo de fabricação de peças de tipos diferentes.

O termo *retrofitting,* segundo (RAJPUT,2008) é definido como a adição de acessórios para um dado objeto de modo a melhorar seu desempenho e acrescenta que os investimentos iniciais necessários para uma MF com CNC está restrito às aplicações nas industrias de média e pequena escala para obter benefícios desta tecnologia.

Em países em desenvolvimento, sugere que é possível modernizar as máquinas convencionais existentes adicionando CNC. Porém, afirma que máquinas que passaram pelo processo de *retrofitting* com CNC não apresentam desempenho comportamental igual ou semelhante quando comparadas a uma máquina CNC original. Neste caso, é preciso observar atentamente esta afirmação, pois sugere a aplicação de uma plataforma CNC em uma máquina que não foi

originalmente concebida com esta tecnologia. Logo, é natural que os desempenhos não sejam itens diretamente comparáveis, posto que uma MF a CNC engloba todo um conjunto de elementos, que juntos, devem contribuir para este desempenho com maior ou menor intensidade.

Não é objetivo do trabalho se aprofundar nestas questões, mas resumidamente é imperioso observar que podem existir limites de ordem estrutural de uma máquina. A simples introdução de uma plataforma de CNC em uma máquina essencialmente mecânica não pode garantir retirar do conjunto todos os benefícios. Alguns de ordem funcional e de programação, por exemplo, podem ser incorporados, mas outros de ordem de otimização e respostas do sistema de acionamentos, por exemplo, podem ficar comprometidos. Assim, da afirmação abordada por (RAJPUT,2008) é possível sugerir que o autor considerou outras variáveis além do CNC, tais como sistemas de guias, fusos, motorização, acoplamentos, dentre outros. Quando se analisa um sistema de CNC aplicado em uma MF, obviamente todas estas questões devem ser esclarecidas, posto que o desempenho de uma MF baseia-se em um conjunto complexo de variáveis.

À medida que as plataformas de CNC inovam suas arquiteturas (ARNOLD,2003), o controle eletrônico passa a ser capaz de corrigir, dentro de certos limites, problemas mecânicos. Os controles digitais são capazes de controlar com maior precisão e velocidade do que os próprios sistemas mecânicos.

Assim, o termo remanufatura e *retrofitting*, apesar das definições clássicas apresentadas sugerirem certas divergências, parecem, com algumas limitações, convergir para um ponto em comum, ou seja, permitir um incremento de tecnologia em um dado equipamento por meio da adição do que talvez pudesse ser chamado de ganho tecnológico.

Dessa forma, observa-se nos textos pesquisados certa confusão ou miscigenação de sinônimos com a terminologia *retrofitting*, dificultando sua compreensão na abrangência do termo, sobretudo pela notada escassez de investigações neste sentido. Nenhuma investigação sobre metodologias ou técnicas de *retrofitting* nas literaturas resultou em modelos propostos que sugerisse sua aplicação, o que sugere ser mais um motivador para as discussões e propostas deste trabalho.

Portanto, finalmente, define-se então que a aplicação do termo remanufatura implica e está relacionado a reformas mais a nível de componentes ou mesmo sistemas, enquanto que o termo *retrofitting* engloba reforma e atualização tecnológica e que pode ser aplicado às MFs.

2.7. Aspectos da Sustentabilidade.

Interessante observar que em diversos textos, principalmente os que diretamente relacionam o termo remanufatura, parecem focar e enfatizar uma preocupação com as questões ambientais. Daí resultando em dois novos termos: *Green Manufacturing* (Gmf) e *Green Machining* (Gm).

Os processos industriais, sobretudo os processos que implicam no uso de MFs, portanto de usinagem, sofrem assim uma constante evolução. Mais notadamente em estudos recentes, surgem as preocupações com as questões de consumo de energia e processos que causem menor impacto ambiental, dando espaço às chamadas *green machine tools*[8] e ainda as *green manufacturing*[9]. Por isso é possível sugerir ser esta uma tendência, quer motivado por aspectos econômicos, pressão por insumos de menor impacto ambiental, competitividade, mercado, dentre outros atributos.

Diversas publicações abordam e contextualizam os impactos de uma MF no ambiente. Estes estabelecem critérios de consumo de energia, produtividade, dentre outros. E, a partir destes, é possível observar que estas nomenclaturas começam a aparecer mais enfaticamente, o que sugere que a relação deste tipo de equipamento e toda sua atividade secundária apresentam-se com uma preocupação cada vez maior e parece abrir novos campos de estudos e até de conceito em novos projetos.

Notadamente, os processos de usinagem são processos que demandam consumo de energia e produzem resíduos como os cavacos de diversos materiais. Dependendo do processo de usinagem a que uma MF se destina, quase sempre se observa o uso de fluídos refrigerantes de corte. Todos estes elementos produzem efeitos considerados impactantes ao meio ambiente.

(DEIF,2011) estabelece que o termo Gmf foi estabelecido para refletir um novo paradigma na manufatura, empregando estratégias, por meio de objetivos, princípios e técnicas, como forma de se tornar eco-eficiente. Isso significa criar sistemas e produtos que reflitam em menor consumo de energia e material, substituindo, por exemplo, os tóxicos pelos não tóxicos, os não renováveis pelos renováveis, convertendo os insumos produzidos em materiais de entrada, isto é, os recicláveis.

---

[8] Tradução livre para Máquinas-Ferramenta Verde;
[9] Tradução livre para Fábrica Verde;

É preciso estabelecer claramente as praticas e princípios em nível operacional, considerando-se, sobretudo a complexidade de um ambiente em que se insere uma MF.

Pesquisadores e mesmo os que estão na indústria argumentam que os valores de investimentos em *green tecnology*[10] e *green transformation*[11] devem criar um movimento de mudança de gerenciamento ambiental para estratégia ambiental (HOFFMAN,2000). Esta mudança irá criar uma situação que permitirá os fabricantes melhorarem seu desempenho ambiental e ainda conseguir ganhos econômicos.

(MOHNTY;DESHMUKH,1998) enfatizaram a importância dos aspectos produtivos dentro do conceito do "*green*" sob a ótica da competitividade. Os autores definiram a abordagem dentro dos conceitos do verde como toda atividade que busca a redução do desperdício, mostrando vários estudos com diferentes produtos e desperdícios.

(NADERJ,1996) contextualizou que a Gmf está fortemente relacionada ao gerenciamento de desperdício por meio da eliminação de suas causas, enquanto as discussões abordadas por (JOVANE et al.,2003), enfatizam que o novo paradigma será responder às expectativas dos clientes com produtos produzidos ecologicamente corretos.

(WANG;LIN,2007) apresentam um modelo de informação para classificar e categorizar os índices de sustentabilidade, incorporando aspectos de custos ambientais, sociais e valores econômicos que dão suporte às tomadas de decisões gerenciais, denominadas de decisões gerenciais "verdes". O modelo foi baseado no método denominado TBL (*Triple Bottom Line*) usando método quantitativo aplicado em nível de corporação, orientando decisões estratégicas no desenvolvimento de novos produtos. Outros métodos baseados em observações de diversos fabricantes, sobretudo os certificados pela Norma ISO-14001, foram discutidos por (BURK;GOUGHRAM,2007).

Um sistema de MRP (*material requirements planning*), porém modificado para incluir considerações e atributos de aspecto ambiental foi discutido por (MELNYK et al.,2001), o qual permite indicar o grau de potencial impactante de um dado produto ou componente ao ser selecionado dentro da cadeia produtiva. Ferramentas que consideram o a Análise do Ciclo de Vida (LCA), *Design for Environment* (DfE) e análise de riscos foram discutidos por (FIKSEL,1996).

---

[10] Tradução livre para Tecnologia Verde. Métodos ou outros meios que contribuam na redução do impacto ambiental;

[11] Tradução livre para Transformação Verde. Atividade que gere insumos recicláveis.

Outro modelo proposto, o qual aborda os riscos ambientais na manufatura foram discutidos por (HUI et al.,2002), Neste modelo, um método analítico foi empregado para analisar o impacto de cada categoria criada por diferentes tipos de resíduos dentro do processo de manufatura considerado.

Assumindo-se esta diversidade de abordagens dentro da conceituação de Gmf, (DEIF,2011) propõe o desenvolvimento de um modelo com o objetivo de compreender melhor esta terminologia observando-se os seguintes atributos:

- Adquirir as várias atividades consideradas necessárias na avaliação do nível Gmf do sistema;
- Delinear as várias atividades necessárias na avaliação dos níveis atuais do sistema de manufatura;
- Descrever como sustentar as melhorias atingidas e manter o sistema eco-eficiente.

Basicamente, o modelo proposto para projeto e controle de um sistema de Gmf pode ser representado pela Figura 12.

A arquitetura é composta de dois módulos. O primeiro módulo descreve o projeto e processo de planejamento. O segundo módulo descreve o controle do processo. O módulo de controle está baseado em medidas de desempenho que refletem as estratégias, objetivos e restrições indicado por um nível de decisão.

(FRANCIS,2009) apresenta uma métrica incorporada dentro do sistema de qualidade QFD, sugerindo uma proposta de um ECQFD (*Environmentally Conscious QFD*), como critério de avaliação para os requisitos técnicos aplicados antes que qualquer conceito de projeto seja aplicado, sugerindo que sua aplicação contribui para o desenvolvimento de produtos ecologicamente corretos.

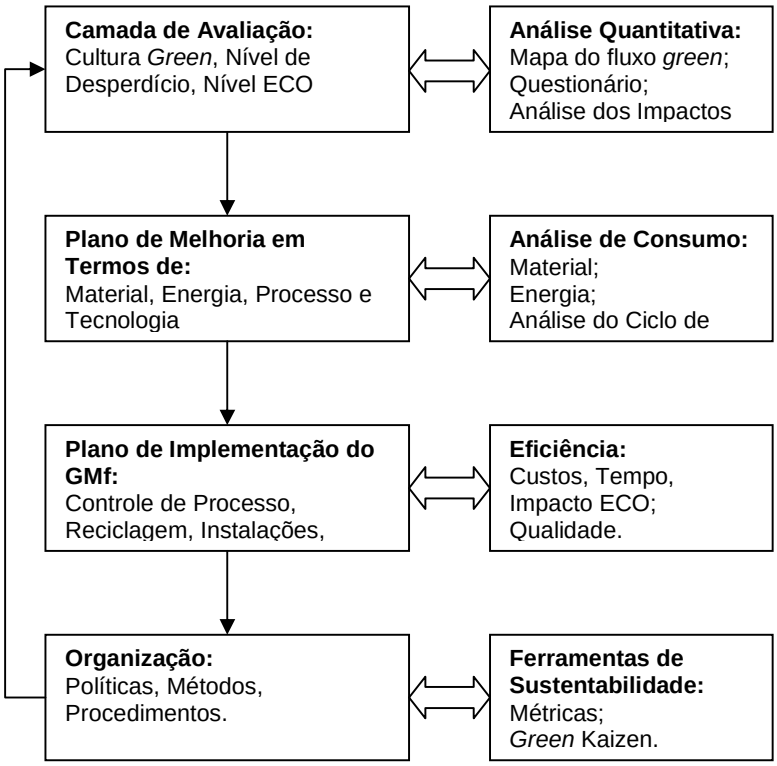


Figura 12 – Modelo de Gmf proposto por (DEIF,2011).

A introdução dessas métricas no ECQFD pode ser demonstrada pelo gráfico 3D conforme sumarizado na Figura 13. Dois dos eixos da matriz mostram os requisitos do cliente (CRs), o WHAT, e os requisitos técnicos, o HOW, formando a tradicional matriz Akao[12]. O terceiro eixo mostra a métrica ambiental. Ao longo do terceiro eixo, duas novas matrizes são formadas, representando a relação entre o cliente, projeto e ambiente. Dessa forma, os requisitos do ambiente podem ser vistos como um cliente adicional com suas necessidades.

Segundo (HESSELBACH;HERRMANN,2011), historicamente o desenvolvimento das MFs tem focado seus desenvolvimentos na redução de custos e melhoria no desempenho por meio de várias métricas, incluindo disponibilidade, confiabilidade, precisão e acabamento superficial.

12 (AKAO,1990) QFD é a conversão dos requisitos do consumidor em características de qualidade do produto e o desenvolvimento da qualidade de projeto para o produto acabado através de desdobramentos sistemáticos.

Como meio de se aumentar o desempenho, as MFs tem se tornado cada vez mais complexas e automatizadas, resultando em maior demanda por recursos, os quais, de certa forma têm conflitado com o aumento dos custos dos recursos devido ao aumento da escassez e dos novos requisitos legais e normalização.

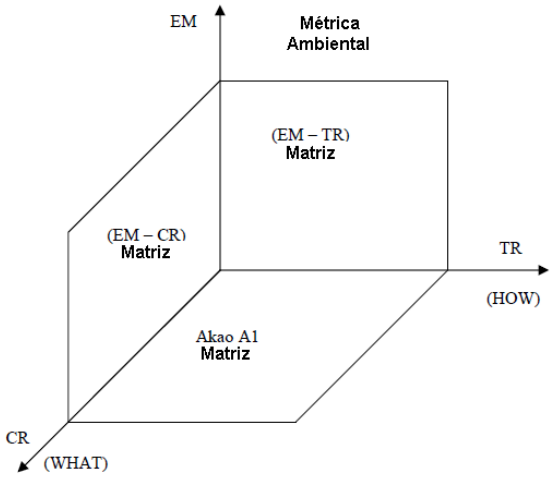


Figura 13 – Modelo de ECQFD baseado na Matriz Akao

Dentro desta óptica, (HESSELBACH;HERRMANN,2011) enfatizam que estas constatações tem encorajado diversos fabricantes e usuários a aplicar as estratégias de Gm aliadas a outras tecnologias, contribuindo para o uso mais eficiente dos recursos.

A tendência na indústria parece sugerir a implementação da Gm como um conceito separado em alguns casos como forma de abordar as reduções de custos, por exemplo. No entanto, o movimento na direção de uma manufatura sustentável é multidimensional, conforme sugerem (ANDERBERG;KARA;BENO,2009), onde diferentes níveis hierárquicos podem ser incorporados, tais como, empresa, ambiente de fábrica e de processos.

Discussão das questões da busca da sustentabilidade energética nos meios produtivos é uma das mais recentes investigações em tecnologia nesse sentido. (NEUGEBAUER et al., 2010), focam seus estudos na busca do aumento da eficiência por meio de uma interação de todos os componentes de uma MFs. Assim, num primeiro nível discutem as influências do consumo de energia na produção, a qual segue um perfil hierárquico. Num segundo nível, abordam as

questões de aspectos gerais da MF e sistemas de produção. Por fim, no terceiro nível, discutem soluções específicas para as MFs, especialmente, sistemas de mobilidade, autonomia e adaptabilidade.

Segundo (NEUGEBAUER et al., 2010), a questão da busca da eficiência compreende um complexo sistema que envolve desde a concepção do produto até o chão de fábrica e isto pode ser representado pela Figura 14. Notadamente, porém, e considerando outras partes deste sistema, é interessante observar a parte relativa de sua abordagem referente à MF, ai compreendendo os dispositivos de máquinas e a própria máquina.

Juntamente com os processos de usinagem, os componentes de máquinas são elementos de conversão de energia e contribuem enormemente para o perfil de consumo de uma máquina. Conseqüentemente, o aumento na eficiência é a principal tarefa em nível de componentes. O desenvolvimento de componentes mais eficientes supõe um enorme potencial de redução do consumo de energia.

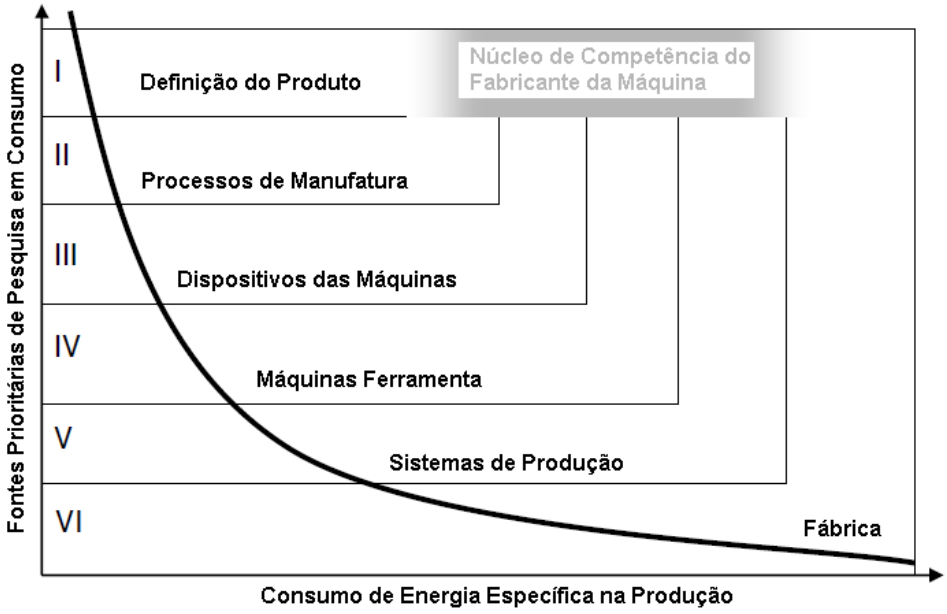


Figura 14 – Nível Hierárquico do Consumo da Energia na Produção

Com relação ao nível da MF, ainda segundo este modelo, existem as considerações do sistema de controle, cinemática e automação, sendo este considerado o núcleo, na contextualização descrita por (NEUGEBAUER et al., 2010). Dessa forma, é possível sugerir que a eficiência

energética de uma MF, conforme demonstrado como o Nível IV na Figura 14 é uma equação que relaciona aspectos da otimização, o que pode compreender desde sua estrutura física até os elementos de controle e movimentação, elementos de máquina, grau de automação, freqüência de uso e desgastes.

A partir das discussões de (NEUGEBAUER et al., 2010) parece possível relacionar esta abordagem às investigações sobre a Gm e a Gmf, sugerindo que, à medida que as MFs são projetadas com novas diretivas, melhor deverá ser seu comportamento e eficiência e como conseqüência um menor impacto ao ambiente.

O que se observa no modelo discutido por (NEUGEBAUER et al., 2010) é que os autores descrevem as diversas fontes de perda de energia ao longo da arquitetura de uma MF, o que é possível de se visualizar na Figura 15. Assim, apesar dessa modelagem mais recente, as delimitações destas áreas parecem corroborar com abordagens similares de diversos outros autores.

No entanto, não fica clara a preocupação, por exemplo, com os aspectos da tecnologia em relação ao CNC, quer seja na contribuição direta e indireta do comportamento do perfil de consumo de energia, quer seja nas funções tecnológicas ou recursos operacionais da plataforma de CNC aplicada, apesar de abordarem os aspectos de comportamento cinemático da MF.

Assim, tomando-se o modelo discutido por (NEUGEBAUER et al., 2010), o resultado deste trabalho insere uma nova área – indicada como área pontilhada Figura 15 - objetivando indicar e definir que o elemento CNC tem contribuição direta e indireta sobre o comportamento energético de um MF, lembrando ainda que a plataforma de CNC tem relação direta também com as soluções em tecnologia aplicada nos servo motores e também no eixo árvore, elementos estes de contribuição significa no perfil energético de uma MF.

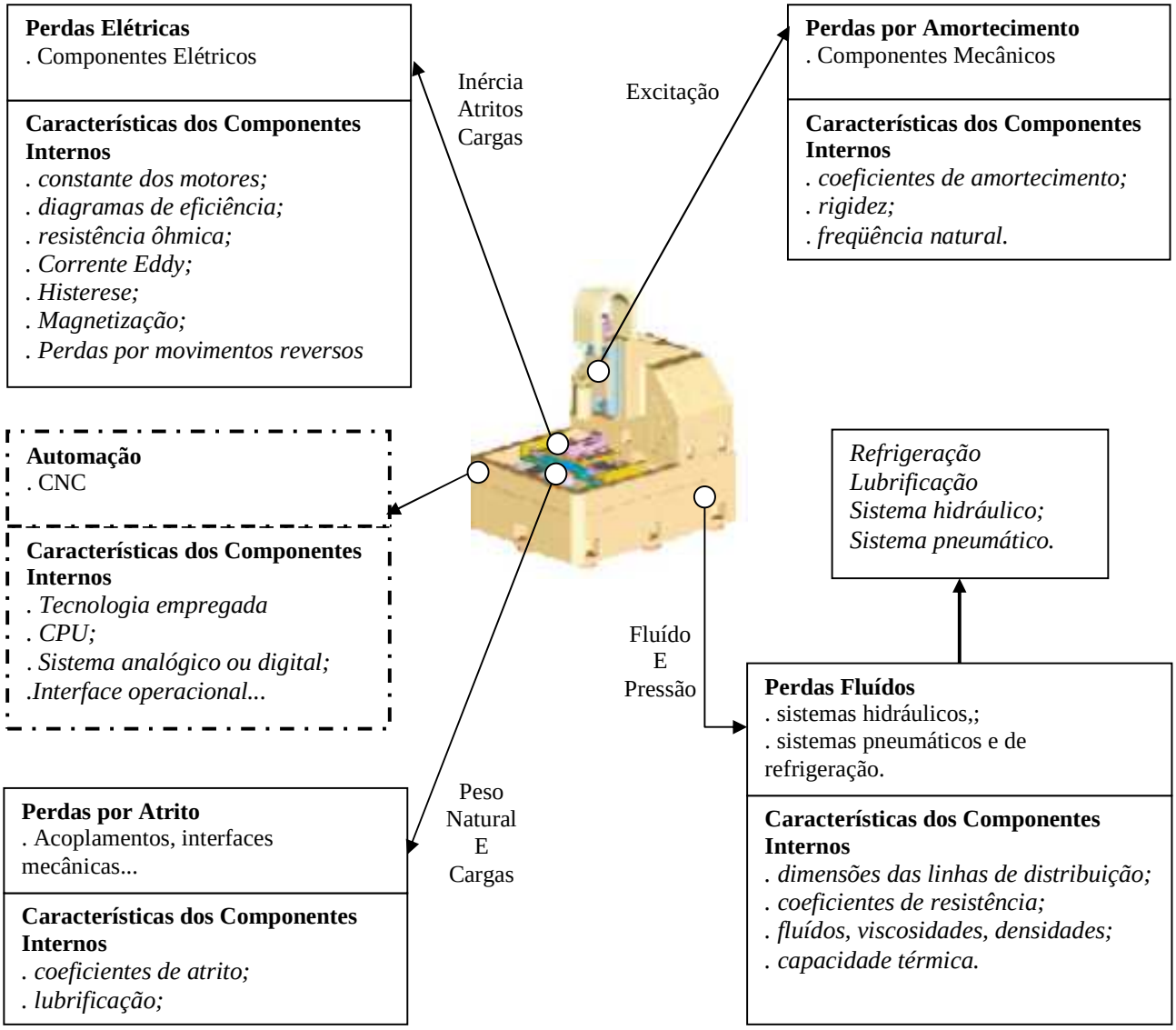


Figura 15 – Sistema de Perda Energética – Adaptado do Modelo de (NEUGEBAUER et al., 2010)

Resumidamente, a partir das discussões apresentadas sobre as Gm e Gmf, foi possível verificar as questões ambientais, sobretudo as de consumo de energia. São fatores altamente positivos, mas estas discussões parecem não tocar mais diretamente os equipamentos já em operação. Assim, a partir das várias definições e dentro da conceituação de Gmf e por meio das várias publicações pesquisadas, é possível sugerir que os termos estão quase que diretamente relacionados às questões estratégicas aplicadas ao ambiente produtivo de usinagem.

Numa abordagem, ainda que superficial, é possível verificar constantes evoluções das tecnologias aplicadas nas motorizações das MFs, por exemplo, mas que normalmente não podem ser considerados totalmente compatíveis com versões anteriores, o que em vários casos agrava os processos de remanufatura dentro da conceituação de Gm e Gmf.

Deve haver um universo de MFs que não foram elaboradas, projetadas e fabricadas dentro de toda esta nova conceituação de desenvolvimento do produto, impactos, consumos (energia e outros insumos), descartes, tecnologias, podendo assim ser um potencial interessante a ser explorado e que, dependendo das abordagens, podem ou não contribuir para os aspectos ambientais, produtividade, custos, dentre outros.

Dessa forma, é possível concluir, apesar das preocupações com a Gm, Gmf, remanufatura e retrofitting, que parecem ficar pendentes ainda, nas diversas literaturas pesquisadas, as questões sobre o endereçamento de soluções para as MFs já em operação.

A abordagem discutida por (ZHOW et al.,2008) é contextualizada também na direção das considerações ambientais, sobretudo quando apresenta uma rápida comparação entre o setor automotivo e o setor de bens de capital, como MFs, afirmando que atualmente, com o aumento da produção e a escassez dos recursos naturais, a recuperação dos equipamentos e a sua redistribuição tem que ser abordada dentro do que se convenciona chamar de *Gmf.* Segundo (ZHOW et al.,2008), a abordagem dentro desta visão pode ser mais lucrativa e menos agressiva ao meio ambiente comparado aos meios convencionais de manufatura.

Entretanto, a aplicação da chamada *Gmf* em máquinas parece não ter muitos pontos de atração segundo a abordagem apresentada por (ZHOW et al.,2008). Quando se compara, por exemplo, que um veículo obsoleto pode ter 95% de suas peças reaproveitadas por meio dos processos de reciclagem e reuso. O mesmo conceito deveria ser aplicado às máquinas na visão do autor, possibilitando, dessa forma, a aplicação de métodos de integração de tecnologias as quais deveriam incluir a remanufatura e o reuso de componentes.

Uma máquina estrutural, na definição apresentada por (ZHOW et al.,2008) é um tipo de equipamento com certa complexidade funcional e de alta freqüência de uso ou operação. Uma das principais razões para este tipo de equipamento apresentar falhas pode estar relacionada ao desgaste de suas partes ou obsolescência da tecnologia empregada. A operação deste tipo de equipamento, nestas condições, passa a impor certas restrições ao meio produtivo onde empregado, reduzindo-se a disponibilidade do mesmo. Nestes casos, restaurar as funções originais do equipamento é mais rápido do que fabricar um novo equipamento segundo afirmam (ZHOW et al.,2008). As abordagens mais diretas sobre remanufatura argumentam que, significativamente, existe uma redução do uso da matéria prima e do consumo de energia, dentre outros aspectos ambientais, quando se aplicam os processos de renovação do equipamento e a melhoria de sua capacidade operacional e de sua produtividade.

Assim, a engenharia do *Gmf,* na visão dos autores, é uma designação aplicada a todas as técnicas e tratamentos de engenharia como forma de manter e reconstruir produtos obsoletos, permitindo integrá-los novamente ao meio produtivo, considerando as metas de produtividade, qualidade, consumo de energia, dentre outros.

Apesar das contextualizações discutidas por (ZHOW et al.,2008) não estarem diretamente focadas no processo de obsolescência de uma MF, é preciso analisar cuidadosamente suas abordagens. O termo obsoleto empregado aqui parece refletir um equipamento que já está sem condições de uso e sua aplicação prática de *Gmf* sugere estar dissociado no que se busca dentro dos conceitos do *retrofitting*.

O modelo proposto por (ZHOW et al.,2008) é um misto de reengenharia, quando trata das questões deste modelo, e da remanufatura quando sugere o aproveitamento de componentes. Suas discussões podem ser sumarizadas pelo esquema da Figura 16.

Logo, o que se pretende com um processo de *retrofitting* é incorporar tecnologia ou incrementar tecnologia em um equipamento que se tornou obsoleto, mas que ainda mantém sua estrutura física operante. Por isso, fundamentalmente, apesar de se considerar que um processo de *retrofitting* poderia sugerir a reutilização de peças, está deve ocorrer numa mesma máquina ou equipamento e não num processo que poderia sugerir a simples reutilização de um subsistema em outra máquina. A reutilização de subsistemas ou componentes de uma máquina em outra constitui um processo de canibalização e não de *retrofitting*.

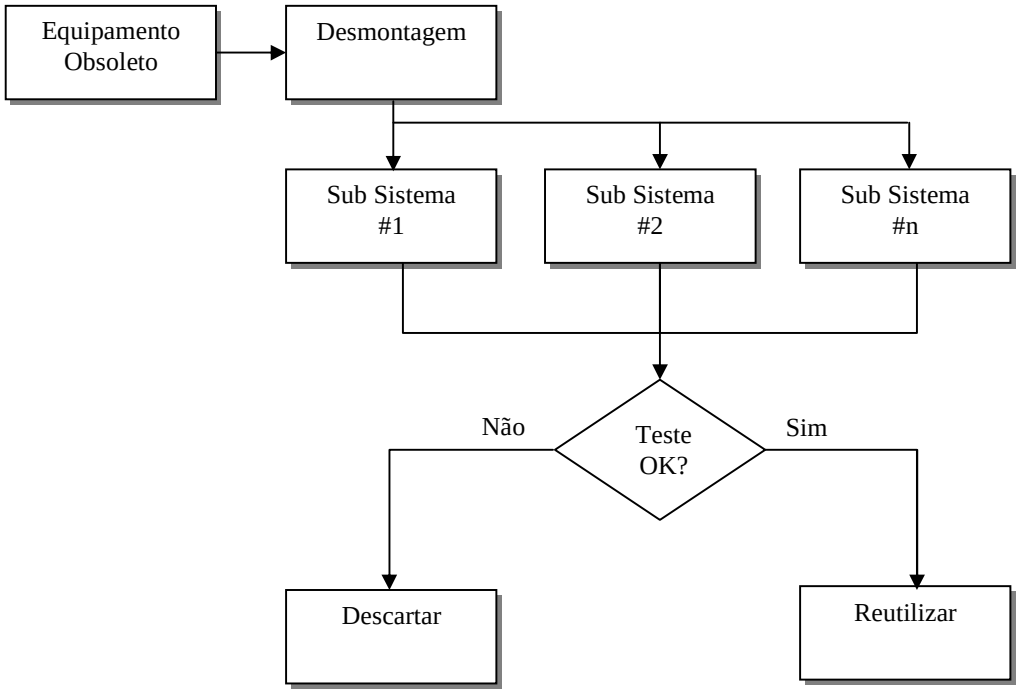


Figura 16 - Esquema simplificado de remanufatura segundo (ZHOW et al.,2008)

O desenvolvimento de uma MF está tipicamente focado na melhoria do desempenho com variáveis ou métricas mensuráveis incluindo disponibilidade, confiabilidade, precisão dimensional e custos na visão discutida por (DIAZ;HELU;DORNFELD, 2010).

Este desafio tem contribuído para um aumento da complexidade das MFs, sobretudo na automação de vários de seus componentes ou dispositivos, de forma quase que massiva como forma de assegurar alto desempenho.

Estas mudanças, segundo (DIAZ;HELU; DORNFELD,2010), têm contribuído, por exemplo, para o aumento do consumo de energia, o que é de certa forma antagônico, ainda segundo se discute, sob o ponto de vista do aumento dos custos de energia, sem abordar ainda outras questões ambientais.

Diversas questões são contempladas neste sentido e alguns números são mencionados para dar sustentação a estas afirmações. Por exemplo, 31% do total de energia usada nos USA, segundo os autores, é devido às atividades industriais, da qual a manufatura, e especificamente

os processos de usinagem, apresenta um papel crucial, indicando que os problemas causados pelo aumento do consumo da energia irá se tornar um problema em potencial no futuro.

Dessa forma, (DIAZ;HELU; DORNFELD,2010; DIAZ et al.,2010) enfatizam que o projeto e a aplicação de estratégias que permitam implementar um *Gmf* em usinagem tem se tornado cada vez mais importante para se manter a competitividade e a redução de custos.

Dentro desta ótica, a abordagem discutida por (DIAZ;HELU;DORNFELD,2010), resumidamente focam em dois pontos principais: O primeiro está relacionado aos aspectos da manufatura da própria MF e seu comportamento no ciclo de vida. O segundo está relacionado com a seleção dos parâmetros de processo.

Os autores, neste modelo, estão preocupados, portanto, com a análise do comportamento da cadeia produtiva e seu comportamento com o perfil de consumo de energia para se produzir um equipamento, mais especificamente, com a emissão de CO_2 e não com o perfil de consumo de energia a nível de máquina. O que difere da visão abordada por diversos autores até este ponto do trabalho, quando o foco estava no consumo de energia da máquina em função de sua obsolescência e ciclo de trabalho e não em seu processo produtivo.

Para a aplicação do primeiro método, o estudo se baseou em dois Centros de Usinagem. Uma de característica para aplicação em baixa produção (*Bridgeport Manual Mill Series*) e outra para aplicação em alta produção (*Mori Seiki DuraVertical* 5060).

O consumo de energia e a emissão de CO_2 foram calculados para cada estágio do ciclo de vida do produto e em diferentes ambientes. Cada uma das máquinas foi dividida a partir de seus componentes primários: Frame, Eixo-Árvore, Fusos de Esfera, Eixos Coordenados, Trocadores de Ferramentas, Carenagem e Controle, procurando determinar o consumo de energia durante o processo de fabricação de suas partes, incluindo manufatura, transporte e posteriormente o uso.

Os estudos conduzidos por (DIAZ;HELU;DORNFELD,2010; DIAZ et al.,2010) permitiram um processo *top down* de todo o processo produtivo. Como resultado, a energia total para se produzir uma *Bridgeport* e uma *Mori Seiki* foi de 18.000MJ[13] e 100.000MJ por máquina, respectivamente.

A emissão de CO_2 também foi medida durante todo o processo produtivo para ambas as máquinas, considerando inclusive a emissão no processo de transporte da máquina pronta para

[13] MJ = Energia em Joule = 1MJ = $1x10^6$Joule

o chão de fábrica, que resultou em 1200kg e 1000kg de CO2 para a Bridgeport e Mori Seiki respectivamente.

Posteriormente, as mesmas máquinas foram submetidas às verificações na produção de peças. O método aplicado para a seleção dos parâmetros do processo se baseou nas questões relativas à programação da máquina, ou seja, por meio do controle empregado. O método consistiu na verificação da taxa de remoção de cavacos, denominada de *Material Removal Rate* (M.R.R) , variando-se as larguras e profundidades de corte, avanços e tipos de ferramentas.

Considerando que os programadores e operadores possuem uma faixa considerável de opções quando definindo os processos de usinagem, a análise procurou se concentrar na redução do consumo de energia por meio da seleção dos parâmetros do processo de usinagem, isto é, das grandezas de corte.

Os valores de potência foram medidos com Wattímetro durante os processos de usinagem. Resumidamente, o estudos conduzidos por (DIAZ;HELU;DORNFELD, 2010; DIAZ et al.,2010) concluíram que a energia específica total, a qual considera o consumo de energia em corte e o consumo de energia em vazio (*cutting air*), tem uma relação inversa com o M.R.R.

A energia em vazio domina a energia específica. A contribuição da energia em corte não ficou evidente na energia total específica, pois pode estar agregada sobre o tempo necessário para cortar, competindo de certa forma com a energia em vazio.

Ainda dentro do método para seleção dos parâmetros do processo, as investigações dos autores abordaram a aplicação das várias estratégias de corte por meio dos sistemas CAM. Estes permitiram produzir diferentes estratégias de aproximação, corte e saída da ferramenta contra a peça, a qual pôde resultar em maior ou menor tempo de usinagem para se produzir um mesmo resultado final na peça. Da mesma forma, as investigações produziram resultados diferentes no perfil de consumo de energia da máquina à medida que se variavam as estratégias de corte.

Das discussões propostas por (DIAZ;HELU;DORNFELD, 2010; DIAZ et al.,2010), conclui-se por uma preocupação com os impactos de energia no meio produtivo a nível de fabricação do equipamento e posteriormente como seu comportamento se dá no chão de fábrica. Apesar do foco daquelas propostas endereçarem as máquinas em processo de fabricação e o escopo das investigações focarem nos impactos de emissão e energia, é possível fundamentar estas preocupações com um processo de *retrofitting*.

O desafio parece então ser como conciliar e abordar todos estes aspectos, sobretudo pelas necessidades atuais de mercado, versus uma obsolescência que se instala nas MFs, o que compreende, sobretudo, os elementos de controle, mais notadamente os CNCs.

2.8. Consumo de Energia em MF.

A usinagem é um processo de remoção de material que tipicamente envolve o corte de metais e a aplicação de ferramentas de corte de diferentes formas, geometrias e dimensões. É um processo particularmente útil devido à sua precisão dimensional, flexibilidade, custos e aplicado em diversos volumes de produção. No entanto, o consumo de energia é um atributo inerente ao processo de remoção de material.

Diversas pesquisas conduzem as investigações na área da usinagem, focando principalmente nas atividades em nível de processos e melhorias. Algumas dessas melhorias incluem o estudo do comportamento da usinagem em diversos materiais com a redução da aplicação de refrigerantes de corte, outros com impactos no perfil de consumo de energia daquele processo especificamente estudado (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), dentre outros.

Parece, entretanto que, fundamentado nos vários modelos observados, começam as pesquisas despertar maior interesse em conhecer o perfil de consumo de energia de uma MF. A identificação ou levantamento de um perfil de consumo de energia de uma MF pode ser ponto importante de comparação entre as diversas tecnologias.

Os benefícios e retornos sobre os impactos dentro dos processos de usinagem foram estudados por (STANFORD;LISTER,2000),(GRAHAM,2000),(SUTHERLAND;KING,2000) e(SREEJITH;NGOI,2000). Seus estudos abordaram os aspectos da usinagem em *dry machining* e MQL (*minimum quantity of lubrication*). A redução significativa do uso do refrigerante de corte nos diversos processos de usinagem estudados apresentou resultado significativo no impacto ambiental e, em vários outros casos, foi possível observar também uma redução do perfil de consumo de energia, fatores importantes dentro do conceito de sustentabilidade.

As investigações conduzidas por (KALPAKJIAN; SCHMID, 2001) focaram o comportamento da energia no processo de usinagem a partir da energia dissipada na área de corte da ponta da ferramenta e a partir daí poder estimar o perfil de consumo de energia de uma MF, resultando num modelo que relaciona energia e eficiência da máquina.

De acordo com (DIAZ et al., 2010) as atividades da manufatura são responsáveis por 19% da emissão de CO_2 e representam 31% do total de energia consumida nos USA. Neste contexto, devido à sua importância e o impacto na manufatura, os processos de usinagem têm sido fortemente estudados e medidas endereçadas para redução do consumo de energia.

Assim, é de considerável importância poder compreender os aspectos relacionados ao comportamento do consumo de energia em uma MF. Dentro do processo de obsolescência, uma MF fatalmente apresenta comportamentos diferentes em termos de consumo de energia à medida que seu processo de degradação se instala.

Estas observações sugerem estar diretamente relacionadas aos processos naturais de desgastes, falta de manutenção, falta de insumos, perda da eficiência dos sistemas de acionamentos, controles, dentre outros fatores.

Máquinas a CNC são um dos fundamentos das tecnologias da manufatura e seu impacto ambiental pode ser atribuído ao perfil do consumo de energia conforme sugerem (DAHMUS;GUTOWSKY,2004).

Muitos dos requisitos e perfil do uso da energia num processo de usinagem estão relacionados também a outras variáveis como parâmetros de máquina, parâmetros de corte, ferramentas, materiais e da própria arquitetura da máquina. (NARITA et al., 2006) contextualizam vários desses parâmetros dentro de modelos de consumo de energia de uma MF, e permitiram correlacionar consumo de energia, consumo de refrigerante de corte, desgastes das ferramentas, além de sugerir alteração nos parâmetros de corte, resultando em maior eficiência e menor impacto ambiental.

Os servos motores e a motorização do eixo árvore, por exemplo, apresentam um potencial significativo de consumo de energia e precisam ser devidamente estudados dentro de qualquer levantamento de perfil deste consumo. Alterações nos valores das acelerações e *jerks* apresentam uma influência direta no comportamento do perfil de consumo de energia, sobretudo em máquinas com diferentes perfis de trabalho de acordo com (KLENKE; MULLER; HOFMANN, 2011).

A Figura 17 ilustra o esquema simplificado a partir do modelo discutido pelos autores, onde E_{in} representa a energia de entrada no sistema. A energia mecânica resultante é o resultado das várias perdas observadas, sem considerar, no entanto, as outras perdas por atritos.

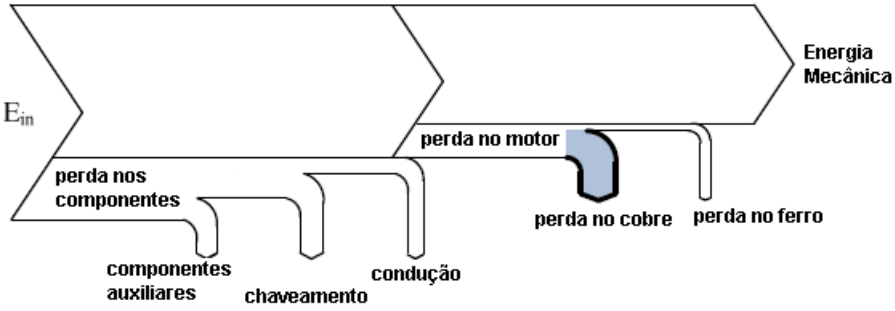


Figura 17 – Esquema simplificado do fluxo de energia em um servo drive (KLENKE; MULLER; HOFMANN, 2011).

(ANDERBERG;KARA;BENO,2009), afirmam que a relação entre economia na usinagem e eficiência do uso da energia não foram ainda profundamente estudados. Estudos anteriores sugerem que a eficiência no uso da energia está relacionada com o aumento da produção e ganhos econômicos. No entanto, mesmo com as considerações sobre os diversos estudos já produzidos nesta linha de investigação, já é possível compreender melhor o perfil de consumo de energia e sua relação com novas tecnologias, por exemplo, aquelas que contribuem para a sua redução.

(AVRAM;XIROUCHAKIS,2011) modelam um sistema, o qual está sumarizado na Figura 18, para estimar o consumo de energia em uma MF por meio da implementação de uma ferramenta de software denominada de GREEM (*Global Reasoning for Eco-Evaluation of Machining*), baseado em *VBA*, abordado por meio de quatro passos principais.

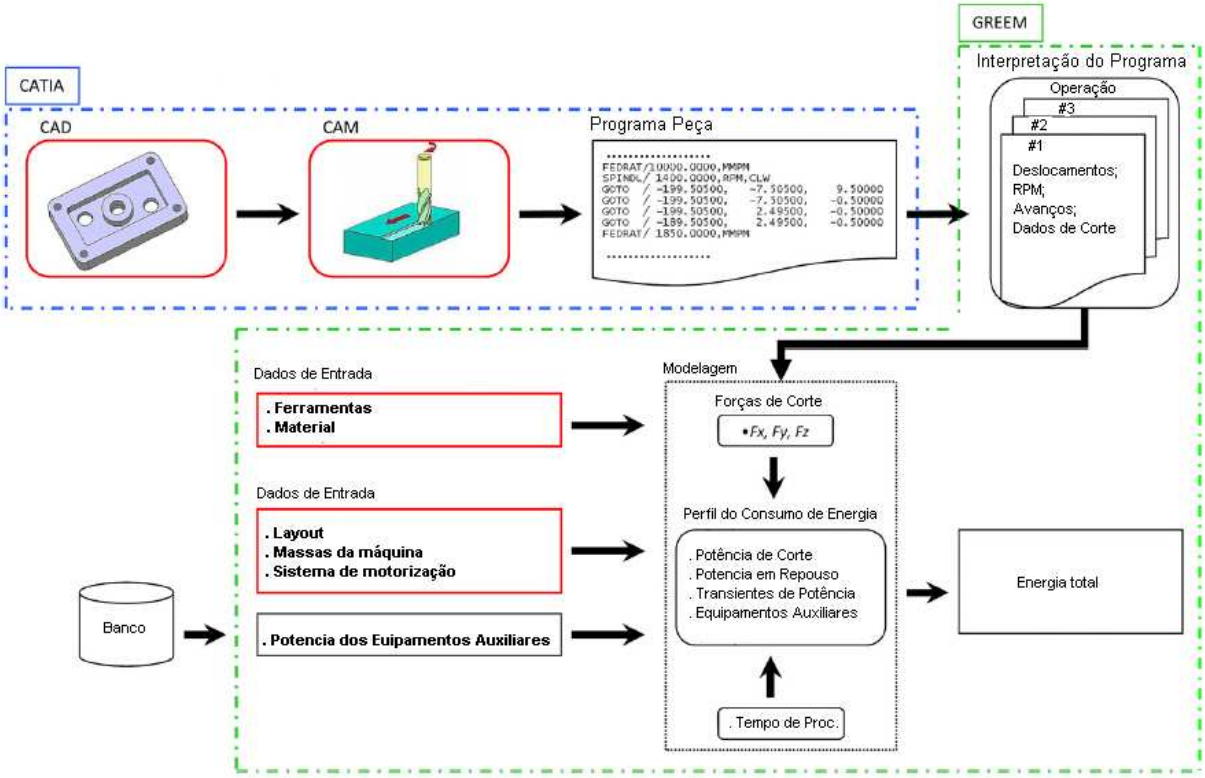


Figura 18 – Representação do Modelo proposto por (AVRAM;XIROUCHAKIS,2011)

Os quatro passos principais do modelo proposto podem ser basicamente descritos conforme segue:

- Passo #1: Importar programa da peça desenvolvido em sistema CAD/CAM. O programa é lido bloco por bloco, juntamente com os dados de rotação do eixo-árvore e os valores correspondentes de avanço para cada uma das operações listadas no plano de processo;
- Passo #2: As forças de corte de cada uma das operações de fresamento são então calculadas, considerando-se as geometrias e parâmetros das ferramentas (aresta de corte, ângulo, ângulo da aresta, avanço radial, profundidade de corte, e pressão especifica de corte para cada material), parâmetros de máquina;
- Passo #3: Calculo dos valores estimados de carga para cada um dos motores;
- Passo #4: Integração dos valores de potencia em relação ao tempo, fornecendo uma curva de estimativa da energia utilizada em todo o processo.

As equações que regem o modelo proposto podem ser sumarizadas conforme segue:

Torque necessário para acelerar o eixo árvore dado pela expressão:

$$T_a = T_{Asp} + T_{run} \quad (13)$$

Onde T_{Asp} é o torque necessário para acelerar a massa total do eixo-árvore devido a sua massa para uma dada velocidade especifica durante um certo tempo. T_{run} representa o torque necessário devido as perdas mecânicas (atrito, tipo de rolamentos, sistema de lubrificação). Logo,

$$T_{run} = T_{fr\ fb} + T_{fr\ rb} + T_{shear} \quad (14)$$

Onde $T_{fr\ fb}$ e $T_{fr\ rb}$ representam o torque devido aos atritos nos rolamentos frontais e traseiros do sistema de mancalização do cabeçote. T_{shear} representa a perda de torque devido a viscosidade no ar causado pelo atrito no sistema de transmissão (correias, rolamentos, polias).

A potência consumida na aceleração P_{aS} e a potência necessária para manter o eixo-árvore numa velocidade constante P_{run}, ambas representadas na Figura 20, são estimadas pelas seguintes expressões, respectivamente:

$$P_{aS} = T_a * \omega \quad (15)$$
$$P_{run} = T_{run} * \omega \quad (16)$$

Onde $\omega = 2\pi n$. n denota o valor da rotação em RPM do eixo árvore.

A potência mecânica na saída do eixo-árvore representa a potência disponível na aceleração e na remoção de material. A medida que o eixo-árvore remove, o perfil da potência pode ser descrito pela seguinte expressão:

$$P_{cutting} = P_{run} + P_c \quad (17)$$

Onde Pc é a potência necessária para quantidade especifica de material estimado como produto entre a força de corte e a velocidade de corte, resultando em:

$$P_C = F_c * V_c \quad (18)$$

Na conclusão do processo de usinagem e mesmo antes de depositar uma ferramenta no magazine de ferramentas, o eixo-árvore é colocado em estado de espera, reduzindo sua

velocidade S > 0 para S = 0, aplicando-se um torque equivalente à aceleração, porém, no sentido contrário. O valor do torque influenciado também pelas perdas mecânicas gera uma potência de desaceleração, retornando ao sistema de alimentação pelo sistema regenerativo da fonte de alimentação. Esta não foi modelada pelo autor. O torque de desaceleração pode ser descrito por:

$$T_d = -T_{Asp} + T_{run} \quad (19)$$

A seqüência básica dos movimentos, sobretudo os de troca de ferramenta observadas e discutidas por (AVRAM;XIROUCHAKIS,2011) pode ser representada pela Figura 19.

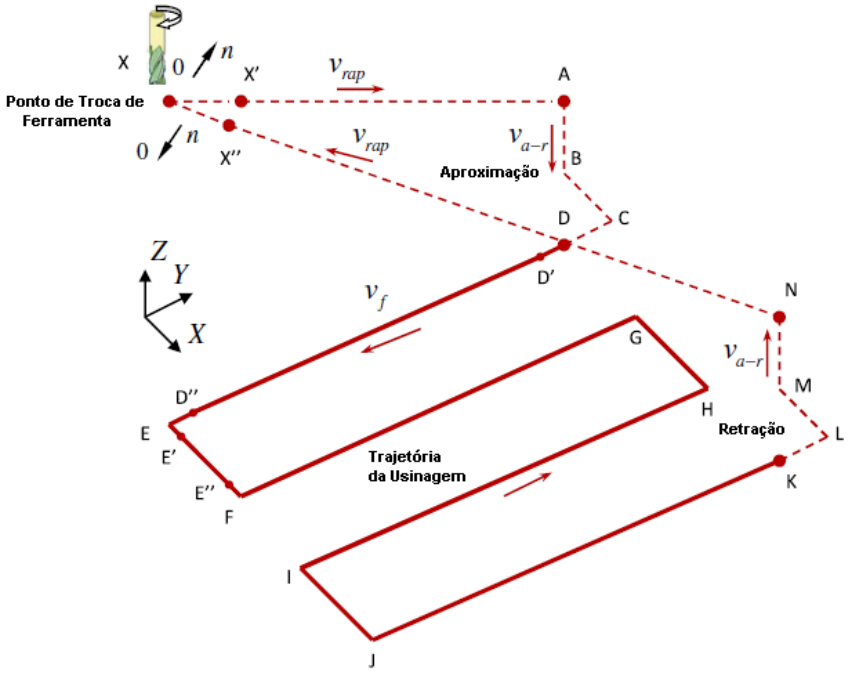


Figura 19 – Observação do Ciclo de Troca de Ferramenta.

Esta seqüência pode ser resumidamente explicada pelos passos abaixo:

- Aceleração do eixo árvore para a rotação programada depois que a troca de ferramenta foi concluída (trajetória X – X´);

- Movimento rápido em G00 dos eixos coordenados posicionando-se próximos do material a ser removido (trajetória X – A), seguido pela aproximação lenta (G01) em direção ao material (trajetória A-D);
- Deslocamento em avanço de corte programado – usinagem do material - (trajetória D – K);
- Outros movimentos intermediários (quando aplicados) não foram representados;
- Movimento de retração da ferramenta (trajetória K – N), seguida de um deslocamento rápido para o ponto de troca de ferramenta (trajetória N – X);
- Desaceleração do Eixo Árvore (trajetória X´ - X).

Os diagramas de movimentos, torque e perfil de potência, usados para o calculo de consumo de energia do eixo árvore e dos eixos coordenados em relação aos movimentos são representados na Figura 20.

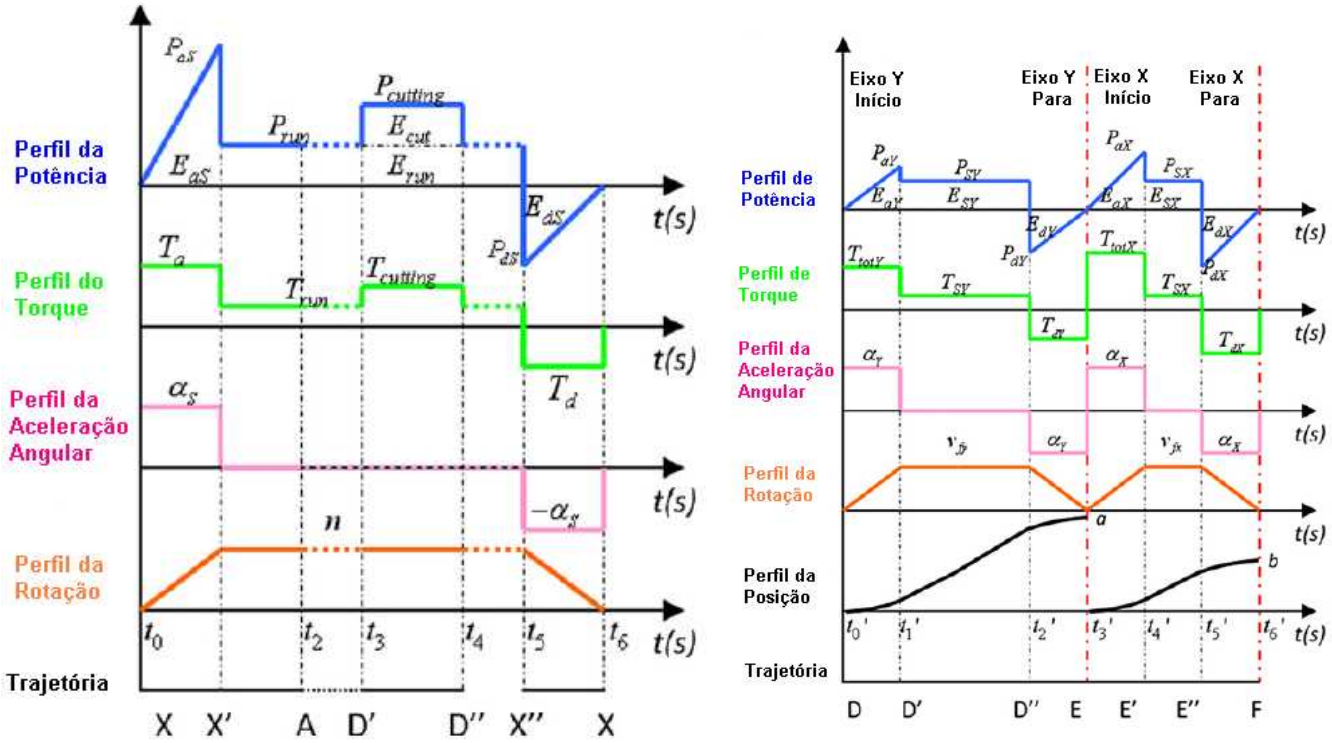


Figura 20 – Esquerda – Referente ao Eixo Árvore – Direita – Eixos Coordenados XY

Resumidamente o cálculo da energia $\mathbf{E_{DE}}$ consumida pelo eixo árvore e eixos coordenados no segmento **DE** pode ser expresso por: (A energia para aceleração do eixo árvore $\mathbf{E_{as}}$ não foi considerada).

$$\mathbf{E_{DE} = E_{ay} + E_{Sy} + E_{dy} + E_{run} + E_{cut}} \qquad \textbf{(20)}$$

Logo,

$$\mathbf{E_{DE}} = \int_{t_0}^{t_1} \mathbf{P_{ay}}dt + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{P_{sy}}dt + \int_{t_2}^{t_3} \mathbf{P_{dy}}dt + \int_{t_0}^{t_3} \mathbf{P_{run}}dt + \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{P_c}dt \qquad \textbf{(21)}$$

Os ciclos selecionados para o modelamento proposto por (AVRAM;XIROUCHAKIS,2011), resumem-se basicamente na operação de faceamento, contorno e pocket conforme a Figura 21.

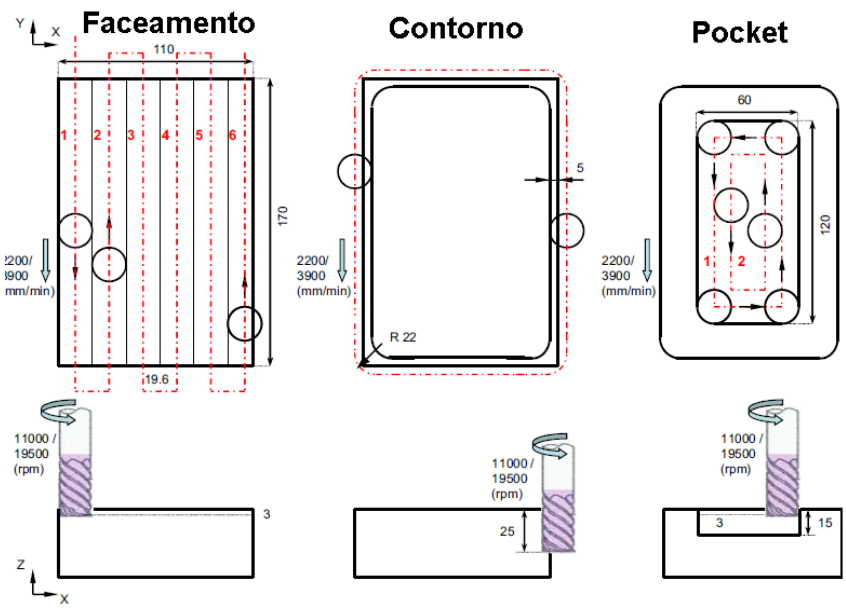


Figura 21 – Ciclos de Usinagem selecionados para o Modelamento

O perfil da energia de remoção de material e o uso de refrigerante de corte foram abordados por (DOHMUS;GUTOWSKY,2004). Suas investigações começam na definição da fronteira do sistema, ilustrado pela Figura 22, estudado em uma MF, concentrando-se no consumo de energia. Portanto, interessante observar que os aspectos construtivos, preparação de ferramenta, limpeza e outros atributos não são relevantes para os estudos de (DOHMUS;GUTOWSKY,2004).

Notadamente, uma considerável soma dos impactos ambientais observados no ambiente produtivo, de acordo com (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), estão relacionados à energia necessária para o processo de remoção de cavacos. Esta energia se apresenta dependente de vários fatores, incluindo as propriedades dos materiais, aplicação ou não dos fluídos de corte, tipo dos fluídos de corte, formas geométricas das ferramentas e as diversas variáveis do processo, como por exemplo, as que determinam as grandezas de corte.

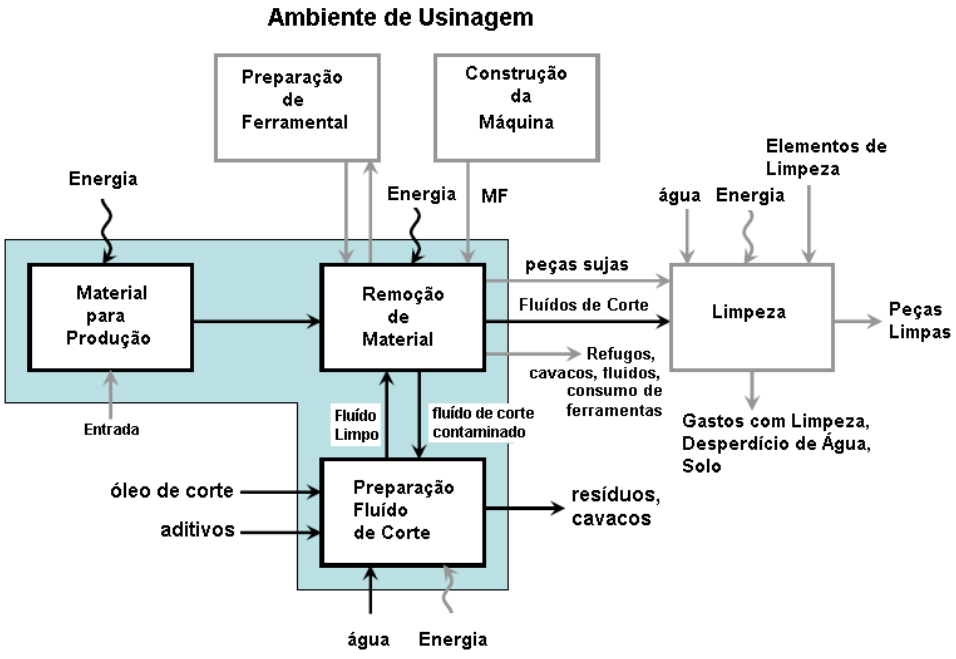


Figura 22 – Representação da Fronteira de Estudos Adotada por (DOHMUS;GUTOWSKY,2004).

Dentro das observações dos perfis de consumo de energia no processo de usinagem estudado, está compreendido ainda o comportamento do consumo de energia dos diversos equipamentos auxiliares, definidos como sistemas de manuseio de peças, dispositivos de fixação, sistemas hidráulicos, sistemas de remoção de cavacos e sistemas de refrigeração.

Enquanto esses equipamentos adicionais podem estar freqüentemente configurados nas máquinas, segundo afirmam (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), existem muitos que, certamente já poderiam ser considerados obsoletos e bem menos eficientes. Consideram ainda que, dependendo do tipo de máquina ou mesmo situação da configuração atual da mesma, é possível observar a não aplicação de diversos destes equipamentos.

Notadamente, segundo ainda esta mesma abordagem e, mesmo nos casos da existência do que os autores denominam de equipamentos auxiliares, o consumo de energia destes pode exceder os requisitos atuais de energia dentro do processo de usinagem.

Dessa forma, fundamentando-se, por exemplo, em um ambiente de produção, (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), sumarizam o consumo de energia neste ambiente, estabelecendo um esquema separado por partes (*breakdown)* deste perfil, o qual pode ser descrito resumidamente pela Figura 23. Observa-se um consumo constante de energia de 85,2% enquanto que em produção, isto é, em usinagem, de somente 14,8%. Mas isso deve ser compreendido em um ambiente de produção e não para uma máquina somente.

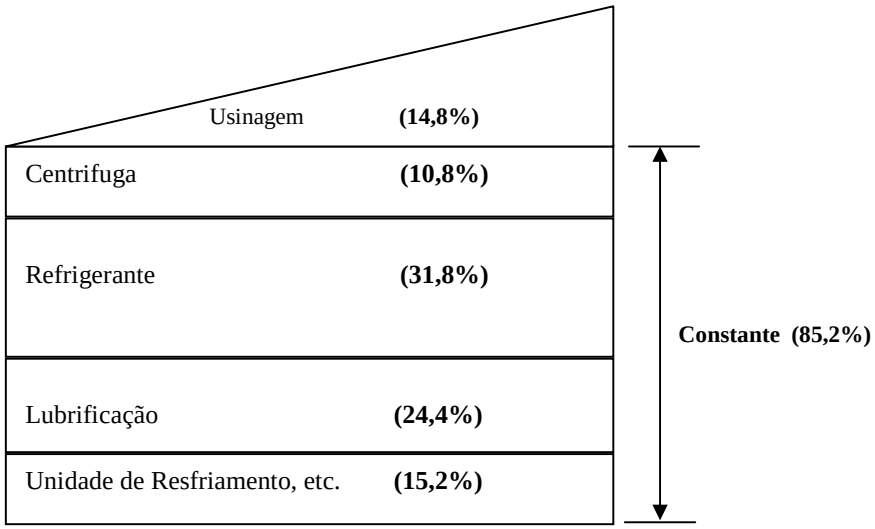


Figura 23 - Esquema simplificado do consumo de energia em produção.

Os estudos do comportamento das máquinas de acordo com (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), neste ambiente de produção, permitiu produzir um resultado comparativo do perfil de consumo de energia de seus vários elementos a partir de vários tipos de Centros de Usinagem.

Inicialmente, para efeito de demonstração do perfil de consumo de energia, os autores fundamentaram as medições em um Centro de Usinagem *Bridgeport* 1998 e um Centro de Usinagem *Cincinnati Milacron* 1988, ambas configuradas como máquinas CNC.

Apesar de não se aprofundar no método aplicado nas medições, notadamente, este é um dos poucos estudos encontrados que sugerem evidenciar alterações no consumo de energia a partir de tecnologias distintas e do que sugere ocorrer com o que este trabalho denomina de degradação tecnológica.

É possível observar um comprometimento dos vários elementos que contribuem com os aspectos de impacto e do consumo de energia. As duas máquinas a CNC possuem capacidades e tamanhos muito similares. Mesmo assim, é possível notar variações consideráveis no perfil do consumo de energia à medida que a máquina envelhece. A Tabela 6 sumariza os resultados das medições conduzidas por (DOHMUS;GUTOWSKY,2004) nos dois Centros de Usinagem.

Tabela 6 – Resultado do Perfil de Consumo de Energia nos Centros de Usinagem

Pontos	Descrição	Centro de Usinagem 1998	Centro de Usinagem 1988	Observação
P1	Usinagem	65,8%	48,1%	Consumo disponível durante usinagem da peça. Considerado consumo variável em função do perfil e das condições de corte da peça
P2	Carroussel	0,4%	1,9%	20,2% para a MF 1998 contra 24,9% para a MF 1988. Considerado consumo constante durante usinagem
P3	Spindle	9,9%	11,5%	
P4	Troca Ferramenta	3,3%	3,8%	
P5	Jog (XYZ)	6,6%	7,7%	
P6	Outros	2%	2,7%	13,2% para a MF 1998 contra 28% para a MF 1988. Considerado consumo constante durante setup de máquina
P7	Jog do Spindle	2%	1,2%	
P8	Refrigeração	2%	9,6%	
P9	Servos	1,3%	<1%	
P10	CNC e Sistema de Ventilação	5,9%	13,5%	

O ponto denominado P1 na Tabela 6 denota uma reserva de consumo em usinagem. Daí é possível concluir comparativamente que para uma mesma usinagem, a máquina com tecnologia recente, teria mais 17,7% de energia disponível para ser usada na usinagem.

Os pontos P2 a P5 na Tabela 6 denotam o consumo para aqueles elementos tabelados, durante uma usinagem. A máquina de 1998 apresenta um perfil de 20,2% contra 24,9% na máquina de 1988. Nota-se que o spindle tem maior peso na composição deste percentual e que

aqui também é possível concluir por um spindle mais eficiente aplicado na máquina de 1998, provavelmente em função de uma tecnologia mais recente.

Os pontos P6 a P10 na Tabela 6 mostram o perfil de consumo durante as operações em setup, sendo de 13,2% para a máquina de 1998 contra 28% para a máquina de 1988.

Resumidamente, as investigações conduzidas por (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), estabelecem um método comparativo denominado de “Uso da Energia por 1000 horas de Trabalho”. E segundo os autores, este pode ser calculado tomando-se as seguintes considerações:

- O número de horas gastas de máquina ligada, porém sem produzir;
- O número de horas gastas em posicionamento e carga;
- O número de horas gastas efetivamente na remoção de material;
- A energia necessária para manter a máquina em regime de espera (*idle state)*;
- A energia gasta para a movimentação em posicionamento e carga;
- A energia para a movimentação da máquina no processo de remoção de material.

O método proposto pelos autores foi aplicado em 4 tipos diferentes de máquinas, comparando-se um Centro de Usinagem no ano 2000, uma do ano de 1998, outra do ano de 1988 e finalmente uma Fresadora Manual de 1985. Para efeito de demonstração neste trabalho, foca-se somente alguns dados conforme sumarizados na Tabela 7. .

Dessa forma, parece possível, a partir dos resultados obtidos por (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), estabelecer parâmetros iniciais de comparação, evidenciando o comportamento da obsolescência das máquinas e seus impactos na produtividade e nos aspectos ambientais. Isto pode ser um fator preliminar que poderá contribuir para justificar, sem considerar ainda os aspectos de custos, a aplicação de um processo de modernização de máquinas.

Demais aspectos, dentro da fronteira proposta pelos autores, como por exemplo, os aspectos do consumo de fluido de corte não serão abordados no escopo deste documento, apesar de apresentarem um importante papel dentro da modernização de máquinas e das novas tecnologias empregadas. Entende-se que estes têm seu peso dentro de uma proposta de

retrofitting, mas de peso relativamente menor dentro de uma dimensão maior que envolve a tecnologia.

Tabela 7 – Sumário dos Resultados Após 1000horas/trabalho

Pontos	**Descrição**	**Centro de Usinagem 2000**	**Centro de Usinagem 1998**	**Centro de Usinagem 1988**	**Fresadora Manual 1985**
P1	Operação em Start Up de Máquina	11,3%	13,2%	27%	31,6%
P2	Posicionamento/ Carga	3,5%	20,2%	24,9%	0%
P3	Remoção de Cavacos	85,2%	65,8%	48,1%	69,4%
P4	Hora Máquina ativa 1000/horas	810h	585h	585h	315h

Tomando-se os extremos dos dados vê-se que para o ponto P1 na Tabela 7, a máquina com maior grau de automação apresenta menor tempo nas operações de preparação, enquanto que na manual, este tempo é praticamente 3 vezes maior.

O ponto P4 na Tabela 7 evidencia um índice de máquina disponível de cerca de 80% contra 31,5% da máquina manual. Daí se conclui que maior grau de automação, implica em maior rendimento operacional e de produção da máquina.

3. PROPOSTA DO TRABALHO

3.1. Motivação e Definições Iniciais.

As fundamentações sobre remanufatura e *retrofitting*, discutidas anteriormente nos capítulos específicos, permitiram contextualizar estas duas nomenclaturas, sugerindo que ambas poderiam ser adaptadas ao que se pretende abordar com a proposta do método aqui apresentado a seguir. Considerando-se também um mercado de MF já existente, o qual pode ser constatado na prática quando se investigam as diversas atividades atuais referentes ao processo de reformas destas, não se verificam a aplicação de métodos ou modelos orientativos nos processos de *retrofitting*. Quase sempre os métodos de trabalho são meramente comparativos, mas sem nenhuma fundamentação técnica e estes sugerem ser quase sempre empiricamente endereçados. Dessa forma, apesar da ambigüidade que os termos podem sugerir, optou-se por usar, no escopo deste trabalho, logo, dentro do método de referência, a terminologia *retrofitting*. Parece ser mais apropriado frente à realidade deste tipo de mercado, e mesmo de atividade, onde isso se insere atualmente. Além do que, ao se investigar diversas empresas existentes no mercado atualmente, cuja missão é propor soluções de *retrofitting*, pôde-se concluir por uma disseminação do termo neste tipo de atividade. O uso do termo remanufatura, portanto, não parece recomendável dado às características deste mercado e, sobretudo considerando-se também as definições adotadas por diversos autores e mesmo a normalização específica para os procedimentos sobre remanufatura. Por sua vez, um processo de desenvolvimento de um produto do tipo de uma MF difere sobremaneira de um processo de *retrofitting*. Enquanto que um processo de desenvolvimento parte de definições de projeto, de uma coleção de dados de entrada, define escopo de funcionamento, dentre outros, o processo de *retrofitting* sugere ser, de certa forma, um processo relativamente mais complexo devido às várias incertezas que se verificam já no inicio do processo. Um processo de *retrofitting* sempre parte de uma máquina já existente, mas que pode haver lacunas de dados técnicos que poderiam ser considerados importantes, justamente por se estar tratando de um equipamento, muitas vezes obsoleto. Essas lacunas podem se apresentar como dificuldades ou incertezas dentro de um processo de *retrofitting*.

Essas incertezas podem compreender a falta de documentação original do equipamento, complexidade de uso e de sua aplicação, falta de domínio técnico na aplicação das plataformas

de CNC, dentre outros. Adicionalmente, podem apresentar e sugerir ainda outras variáveis, desde restrições de uso da MF, comportamentos geométricos, estruturais, de materiais e ainda de aspectos funcionais. Há casos em que a máquina precisa ser readaptada, o que pode significar alterações de suas características principais, e isso pode implicar em considerações não previstas anteriormente. O reflexo deste processo deve ainda considerar que muitos dos aspectos de automação, principalmente, são aspectos que podem apresentar ganhos ou incrementos tecnológicos consideráveis. É possível sugerir e elaborar métricas que possam medir estes ganhos ou incrementos, mas isso não será discutido dentro do método proposto.

Em diversos casos e em função da complexidade de uma máquina, isso pode ser em parte, verificado anteriormente, isto é, antes mesmo de se aplicar um processo de *retrofitting*. Entretanto, isso sugere não ser necessariamente verdade, ou mesmo aplicável em toda a extensão da máquina, posto que pode depender de vários outros atributos, tais como, documentações técnicas originais do equipamento, domínio do conhecimento técnico nas áreas afins, grau de complexidade do equipamento e implicações de adaptação do CNC na máquina.

Se o processo produtivo de uma MF parte de um projeto e posterior agregação de peças, componentes, sistemas, para ao final formar um equipamento, o processo de *retrofitting*, parte de um equipamento já existente e que foi submetido a diferentes regimes de trabalho ao longo de seu ciclo de vida, experimentando as questões da obsolescência e da degradação tecnológica. Dessa forma, também se pode afirmar que implica ainda em estudos preliminares de configuração, de custos, de impactos econômicos e técnicos, além da configuração da solução da automação a ser adotada, de seu grau da automação, do reprojeto, desmontagem, limpeza, montagem, ajustes finais e funcionamento.

3.2. Descrição do Método Proposto.

(Du et al.,2011) propõem um método para avaliação do *retrofitting* de MFs aplicado a máquinas de grande porte, fundamentado em diversos índices a partir de critérios definidos como critérios de tecnologia, critérios econômicos e critérios ambientais. O conceito de definição de máquina de grande porte não foi claramente definido na proposta elaborada pelos autores. Porém, a definição conceitual de tamanho de máquina tampouco será foco da proposta deste trabalho.

No entanto, é possível verificar que nas fundamentações discutidas por (Du et al.,2011), sobretudo as de ordem econômica, sugerem indicar que máquinas consideradas de dimensões físicas maiores apresentam um maior potencial para se aplicar os processos de *retrofitting*. Sugere ainda ser interessante que as MFs de grande porte apresentam um apelo de sustentabilidade maior, sem, no entanto, poder afirmar com índices que possam indicá-los claramente.

A elaboração da proposta do método conforme discutido no escopo deste trabalho não aborda o método em função das dimensões físicas das MFs, porém, é possível sugerir que na prática os equipamentos de menor dimensão física, sobretudo quando associado a uma complexidade tecnológica menor, apresentam um apelo econômico menor quando se discute um processo de *retrofitting*. Assim, a proposta do método apresentado neste trabalho se inicia pela fundamentação e definição de três coeficientes principais, definidos como Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina $(\mathbf{C}_{im})$, Coeficiente de Manutenção $(\mathbf{C}_{mn})$ e Coeficiente de Degradação Tecnológica $(\mathbf{C}_{dt})$. Além da fundamentação destes três coeficientes, a proposta do trabalho se fundamenta também em dois outros coeficientes adicionais, associados ao Índice da Documentação Técnica da Maquina $(\mathbf{I}_{ddt})$, e Índice de Complexidade da Máquina $(\mathbf{I}_{cm})$.

É preciso observar que estes coeficientes não devem ser considerados como eventos excludentes, mas ao contrário, são todos eventos que devem convergir para uma indicação numérica como resultado da aplicação de vários fatores e atuam como valores indicativos e orientativos dentro de um processo de tomada de decisão. Sua aplicação pode compreender uma série de coleta de dados, os quais, a principio, podem não estar disponíveis de imediato. Idealmente, a aplicação do método poderia compreender a monitoração constante de diversas variáveis aplicadas a uma determinada máquina durante seu ciclo de vida. No entanto, entende-se que isso pode apresentar dificuldades de ordem prática na sua aplicação, mas não sua

inviabilidade. Dessa forma, a proposta do trabalho no escopo de sua abrangência, define basicamente três níveis de tomada de decisão, conforme representa o esquema da Figura 24. O primeiro nível consiste na aplicação do $C_{im,}$ C_{mn} e $C_{dt.}$ O segundo nível compreende o C_{dt} e o I_{cm} . Já o terceiro nível compreende a fase de análise. A fase de análise engloba os custos do *retrofitting*, o levantamento de custos de uma máquina similar e o tempo de indisponibilidade de máquina.

Os valores resultantes dos coeficientes e dos índices devem ser sempre interpretados como valores orientativos e não absolutos, dentro do processo de tomada de decisão. Se se considerar o universo de aplicação das máquinas, suas diferenças construtivas, aplicação e ainda a idade da máquina, podem implicar em análises adicionais não consideradas no método.

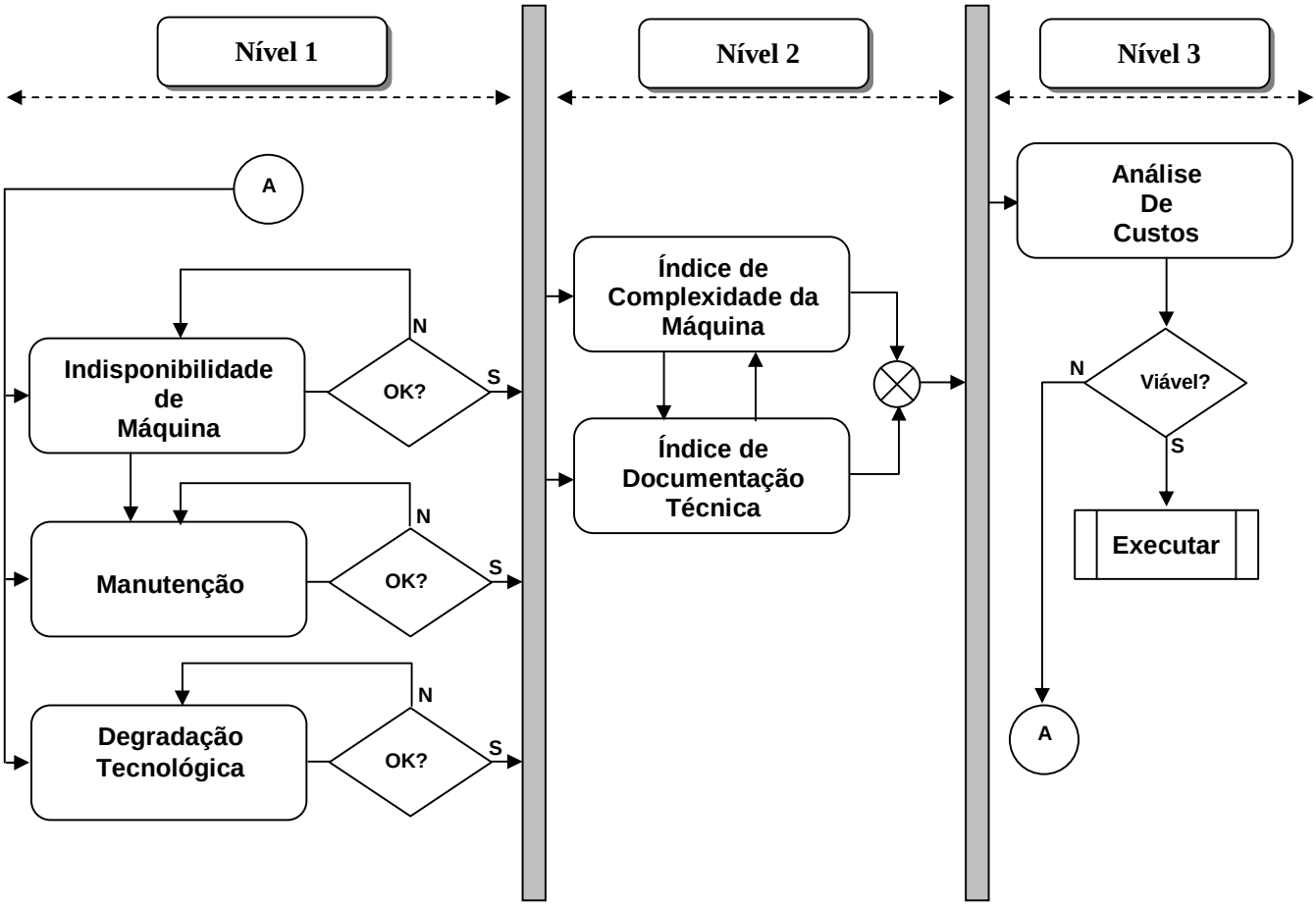


Figura 24 – Representação Esquematica e Fluxo do Método.

É, no entanto, sempre recomendável observar a realidade do chão-de-fábrica onde o método está sendo aplicado devido à generalidade dos aspectos de automação, sem entrar nas definições ou tratativas mais aprofundadas sobre suas generalidades.

Deve-se considerar ainda o domínio do conhecimento técnico de quem aplica um processo de *retrofitting* em uma MF e isso implicaria num atributo mais de ordem qualitativa do que quantitativa. Considerando que se está discutindo um processo de complexidade técnica nas diversas áreas do conhecimento de uma MF, é sempre interessante observar este domínio. Neste caso, é possível sugerir a necessidade de sempre consultar especialistas na área de conhecimento das MFs. Assim, a partir das definições discutidas até aqui foi possível situar a proposta do método dentro de seus três níveis, formalizando a sua arquitetura principal.

3.3. Nível 1 - Definição dos Coeficientes Principais.

Resumidamente, considera-se que o Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina (C_{im}) baseia-se em intervalo de tempo de uma dada máquina a cada 1000horas de trabalho. O conceito aqui aplicado se refere às questões de eficiência da máquina, ao acúmulo de tempo em que a máquina permanece indisponível devido às intervenções para manutenção.

Já o Coeficiente de Manutenção (C_{mt}) é definido em função dos custos de manutenção. Este coeficiente, formado pelos custos de manutenção, deve estar associado ao Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina (C_{im}).

O Coeficiente de Degradação Tecnológica (C_{dt}) é definido como uma função da percepção da perda das características funcionais e operacionais dos elementos de automação de uma MF. Neste caso, a formação deste coeficiente considera e foca, fundamentalmente, no elemento principal de automação, isto é o CNC. Notadamente, o método proposto foca como elementos de automação a plataforma de CNC, o que compreende todos seus elementos, tais como os motores, seus sistemas de acionamentos, os sistemas de Entrada/Saída, as funções e recursos de programação e as demais funções e recursos da plataforma aplicada do CNC.

Em máquinas denominadas de máquinas convencionais, isto é, onde não há aplicação original do CNC, o Coeficiente de Degradação Tecnológica pode ser considerado como sendo igual a 0. Um processo de *retrofitting* em uma MF convencional pode ser considerado, em parte, diferente de um processo de *retrofitting* de uma máquina a CNC. O método, no entanto, não está preocupado com as diferenças conceituais, construtivas e de características entre estes dois tipos de máquinas, mas busca orientar, a partir de seus indicadores numéricos, o processo de tomada de decisão.

O Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina (C_{im}) está baseado em hora de máquina parada a cada 1000 horas de operação, assumindo-se que a produtividade pode ser afetada pelas intervenções na manutenção. O coeficiente considera o tempo de indisponibilidade somente após o período de garantia de uma dada máquina, denominado de período de observação.

Analogamente, (DOHMUS;GUTOWSKY,2004), estabelecem um método comparativo denominado de “Uso da Energia por 1000 horas de Trabalho”. Logo, a constante de valor igual

a 1000 horas segundo definido pela equação **(22)** foi também fundamentado a partir de observações práticas dos registros de manutenção de várias máquinas onde isso foi possível ser verificado. Os valores foram também fundamentados em registros específicos de manutenção de vários CNC e periféricos.

Logo, a constante 1000 deve representar um tempo médio aproximado de 6 meses. Observa-se que a maioria do período de garantia dos insumos que configuram uma plataforma de CNC, em média, pode variar de 18 a 24 meses. Considera ainda o seguinte regime de trabalho:

- 44 horas/semanais para um turno de 8 horas diárias;
- Média mensal de 4 semanas/mês;
- Logo, 44 * 4 = 176 horas/mês;
- Tempo médio (1000 horas / 176 horas) = +/- 6 meses.

Assim, o coeficiente pode ser descrito pela seguinte expressão, onde **t** denota o tempo em horas de máquina parada a cada 1000 horas de operação. Para todo **t** definido no intervalo conforme segue:

$$0 < t \leq 1000 \qquad \textbf{(22)}$$

Logo, tem-se que:

$$C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-t)} \qquad \textbf{(23)}$$

O coeficiente, porém, não é determinante para se estabelecer a causa das paradas de máquina, posto que os eventos causais podem se apresentar de várias origens, nem é este o objetivo do C_{im}. O valor do C_{im} constitui um valor indicativo e orientativo de que a produtividade do equipamento está sendo afetada pelo aumento da hora de máquina parada, cuja causa deve ser investigada. Logo, o coeficiente não é um indicativo causal da falha que ocasionou a parada da máquina.

A Figura 25 ilustra a atuação na formação do C_{im}. O período de garantia é um tempo de evento excludente, isto é, os tempos de parada de máquina não entram na formação deste coeficiente. Somente os eventos pós-período de garantia é que são considerados.

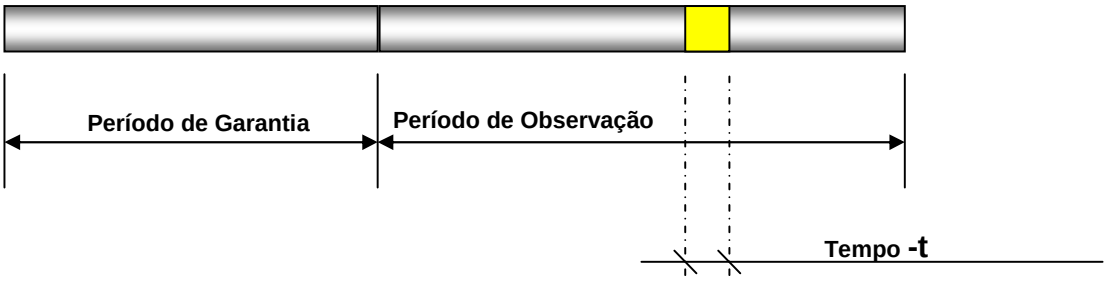


Figura 25 - Ilustração da atuação na formação do C_{im}.

Assim, aplicando-se a equação **(23)**, tem-se que o coeficiente de indisponibilidade C_{im} é um valor localizado entre um intervalo de 0 a 1. Valores que tendem à 1 indicam uma maior indisponibilidade da máquina, estando associado a paradas cada vez mais constantes.

Para efeito de formação deste coeficiente, paradas mais constantes sugerem indicar um envelhecimento ou obsolescência dos insumos que compõem a máquina, com consequente perda de sua funcionalidade, aumento na indisponibilidade de componentes ou ainda de sistemas que possam ser substituidos, aumento no tempo de manutenção da máquina, também pela indisponilidade de insumos ou ainda pela busca de soluções alternativas, dentre outros. Assim, por exemplo, aplicando-se a equação **(23)** em uma máquina que permaneceu parada por um período de 1 hora, dentro do tempo de 1000horas, tem-se que:

$$C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-1)}$$

O que resulta em um $C_{im} = 0.001$.

Tomando-se a mesma máquina, por exemplo, a qual permaneceu parada por um período de 1000 horas, dentro do tempo de 1000horas, tem-se:

$$C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-1000)}$$

O que resulta em um $C_{im} = 0.99312$.

Dessa forma, quanto maior for o valor resultante do coeficiente C_{im}, maior será o tempo de indisponibilidade de máquina.

A Figura 26 ilustra a localização do Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina dentro do Nível 1.

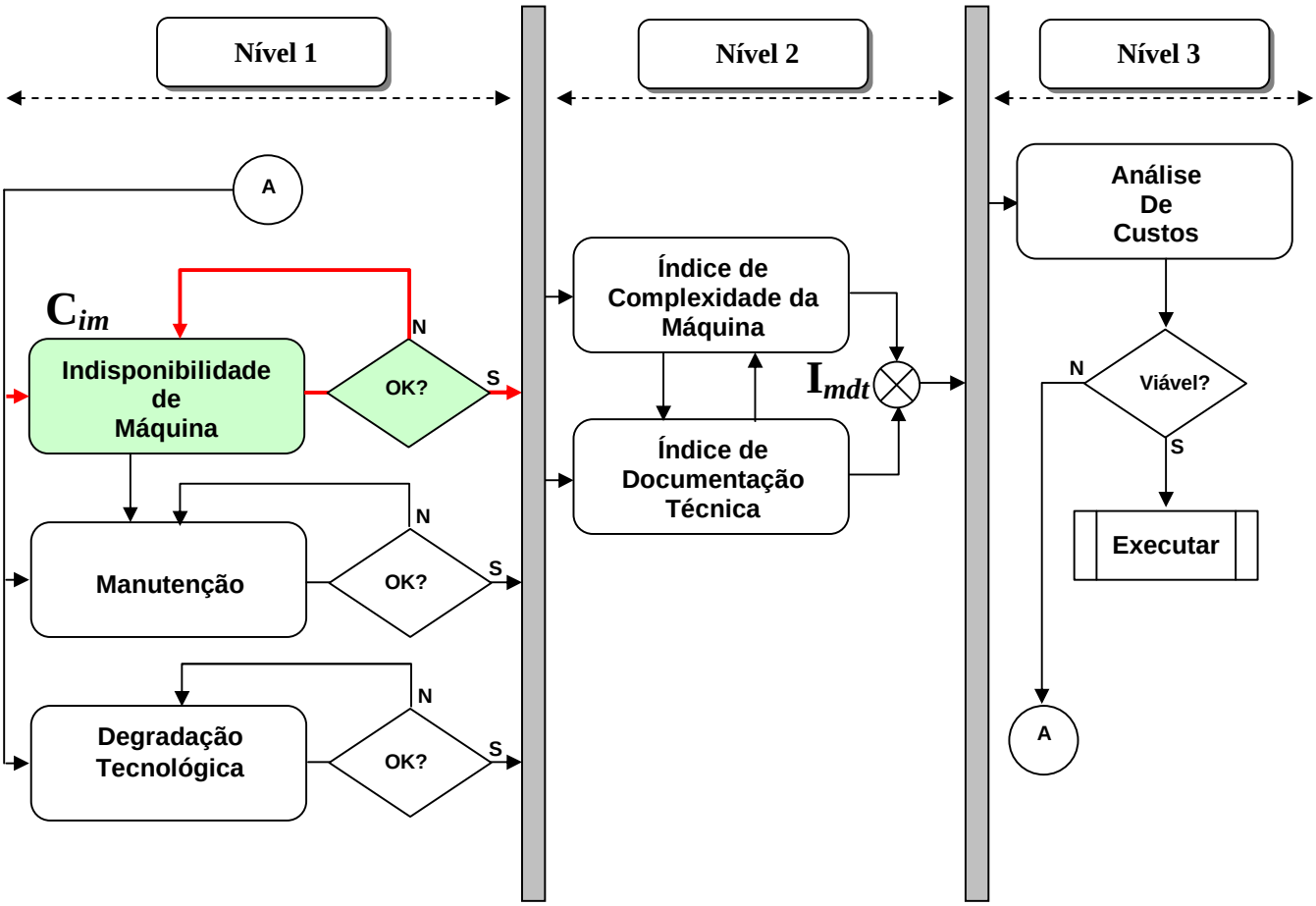


Figura 26 – Ilustração da localização do Coeficiente C_{im} dentro do Nivel 1.

O Coeficiente de Manutenção C_{mn} é determinado pelo perfil dos custos de manutenção da máquina. O perfil destes custos pode apresentar maior ou menor contribuição também como função da complexidade da máquina e de seu grau de automação. O coeficiente considera, dessa forma, os custos de hora de máquina parada e o tempo de cada intervenção. As áreas principais consideradas para efeito de formação na proposta do método são as representadas pela Figura 27.

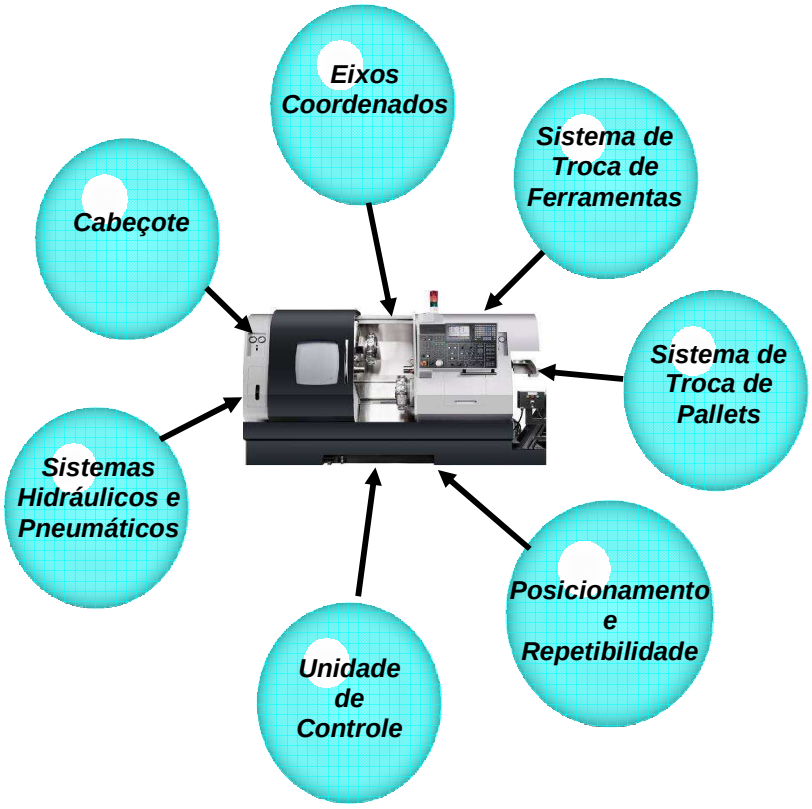


Figura 27 - Ilustração da formação das áreas para composição do C_{mn}.

Considerando que uma MF é um equipamento de certa complexidade, assume-se ser possível fracionar a máquina em áreas, objetivando identificá-las em função de sua maior ou menor contribuição na composição e na formação do coeficiente. A partir desta definição, a máquina pode ser descrita pela seguinte expressão:

$$M = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + ... A_7 \quad (24)$$

Reescrevendo a equação **(24)**, tem-se a seguinte notação:

$$\mathbf{M} = \sum_{k=1}^{7} \mathbf{Ak} \quad , \qquad \textbf{(25)}$$

Onde,

M é a máquina representada pela soma das áreas **A1,.... A7**. As áreas denotam as áreas de observação conforme indicadas na Tabela 8.

As áreas propostas não se esgotam nas áreas definidas na Tabela 8, podendo ser incrementadas à medida que se entenda ser possível aumentar sua abrangência. No entanto, o método proposto focou nas áreas indicadas sugerindo que estas apresentam e contribuem com maior peso nos custos de manutenção e por estarem também sujeitas a um processo de envelhecimento que se considerou com maior peso. Estas definições foram fundamentadas em observações práticas, sem, no entanto, se preocupar em descrever um método de envelhecimento. Assim por exemplo, a área denominada de Cabeçote, apresenta os seguintes elementos conforme descreve a Figura 28.

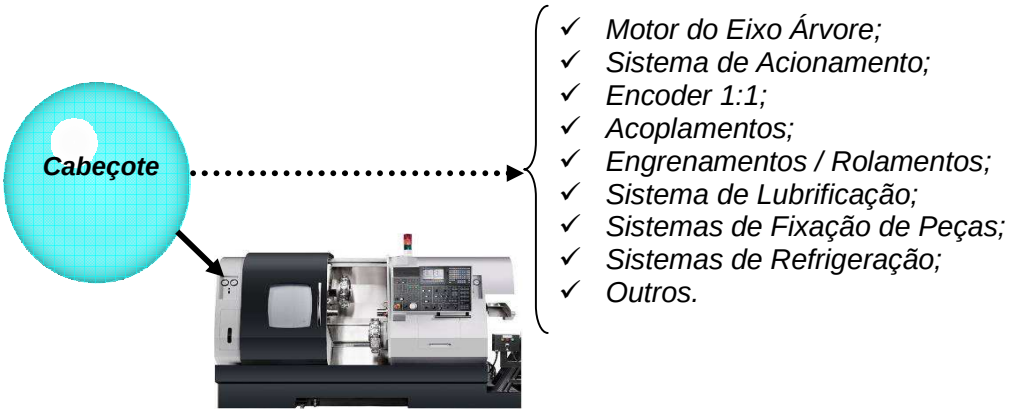


Figura 28 – Elementos de Formação da Área denominada Cabeçote.

Para cada uma das áreas definidas, existe uma coletânea de elementos ou sistemas que formam cada uma destas áreas conforme definido pela Tabela 8.

Tabela 8 – Definição das Áreas para Formação do Coeficiente de Manutenção

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Cabeçote	**Eixos Coordenados**	**Sistema de Troca de Ferramentas**	**Sistema de Troca de Pallets**	**Sistemas Hidráulicos & Pneumáticos**	**Unidade de Controle**	**Posicionamento e Repetibilidade**
Motor do Eixo Árvore	Motor Eixo X	Torre Porta Ferramentas Elétrico	Sistema de Acionamento Hidráulico	ContraPonto	CPU	Folga Mecânica nos Eixos
Sistema de Acionamento	Motor Eixo Y	Torre Porta Ferramentas Hidráulico	Sistema de Acionamento Elétrico	Luneta	Unidade de Operação	Geometria dos Eixos Coordenados
Encoder 1:1	Motor Eixo Z	Sistema de Magazine Elétrico	Sistema de Identificação	Sistemas de Segurança	Display	Geometria do Sistema de Eixo Árvore
Acoplamentos	Motor Eixo B	Sistema de Magazine Hidráulico	-	-	Módulos de I/Os	-
Engrenamentos / Rolamentos	Motor Eixo N	Sistema de Magazine Servo	-	-	Sistema de Comunicação	-
Sistemas de Lubrificação	Sistemas de Feedback de Posição	Sistema de Limpeza de Ferramentas	-	-	Parametrizações e Ajustes	-
Sistemas de Fixação de Peças	Sistema de Acionamento de X	Sistema de Fixação de Ferramentas	-	-	-	-
Sistemas de Refrigeração	Sistema de Acionamento de Y	-	-	-	-	-
-	Sistema de Acionamento de Z	-	-	-	-	-
-	Sistema de Acionamento de B	-	-	-	-	-
-	Sistema de Acionamento de N	-	-	-	-	-
-	Sistema de Lubrificação das Guias	-	-	-	-	-
-	Sistemas de Acoplamentos / Fusos	-	-	-	-	-

Dessa forma, o que se propõe é um acompanhamento de cada um desses elementos ou sistemas que formam uma determinada área em função de seus custos de manutenção. Note-se que a proposta da divisão da máquina em áreas não somente englobou elementos de constituição puramente de ordem eletro-eletrônica, mas também de vários elementos de ordem mecânica, justamente pelas características de uma MF e de seus aspectos de automação.

O método, no entanto, não se preocupa com a descrição dos aspectos de funcionalidade das áreas ou dos elementos que a compõem, mas conforme já contextualizado, os dispõe da forma descrita objetivando facilitar sua compreensão na formação dos custos.

Cada área pode então ser estudada separadamente para mais bem situar a contribuição de cada uma delas na formação dos custos de manutenção (C_{mt}). Os custos de cada área (C_A) podem ser expressos como função dos custos da mão de obra (C_{mo}), dos custos dos insumos (elementos, componentes ou sistemas) (C_i), e dos custos da hora de máquina parada (C_H).

Para efeito de formação dos custos, assumiu-se um acompanhamento médio anual destes valores. Assim, considerando-se sua somatória ao longo de um tempo **t** de observação ou acompanhamento e tomando-se a expressão **(25)**, tem-se que:

$$\mathbf{M = \sum_{k=1}^{7} Ak} \qquad \textbf{(25)}$$

O custo de cada área pode ser descrito então como:

$$\mathbf{C_A^{\,k} = C_{mo}^{\,k} + C_I^{\,k} + C_H^{\,k}} \qquad \textbf{(26)}$$

Dessa forma, o custo total de manutenção das áreas pode ser expresso como:

$$\mathbf{C_{mt} = \sum_{k=1}^{7} (CMOk + CIk + CHk)} \qquad \textbf{(27)}$$

Dessa forma, a formação dos custos segundo o modelo proposto é formado pelo Custo Médio Anual da Intervenção por Item e pelo Custo Médio Anual de Máquina Parada por Item.

Logo, o Custo Médio Anual da Intervenção por Item C_{AI} pode ser descrito pela seguinte expressão:

$C_{AI} = N_{IA} * T_{MI} * C_{I,}$ onde: **(28)**

N_{IA} = Número anual de intervenções por item;

T_{MI} = Tempo médio de intervenção por item;

C_{I} = Custo médio de intervenção por item;

O Custo Anual de Máquina Parada por Item C_{Mp} pode ser descrito pela seguinte expressão:

$C_{Mp} = T_{mp} * C_{mh,}$ onde: **(29)**

T_{Mp} = Tempo médio de máquina parada por intervenção

C_{mh} = Custo médio de hora máquina

Logo, aplicando-se a expressão **(27)** abaixo

$C_{mt} = \sum_{k=1}^{7} (CMOk + CHk + CIk)$, tem-se que

$$C_{mt} = \sum_{k=1}^{7} (CAIk + CMPk) \quad \textbf{(30)}$$

O valor expresso pela variável C_{mt} denota um valor em unidade monetária, refletindo os custos financeiros aplicados na manutenção. No entanto, considerando-se que os custos de manutenção podem apresentar picos de custos ao longo do tempo de observação ou acompanhamento, é preciso associar estes custos ao Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina, cujo resultado, associando-se as equações **(23)** e **(30)**, resultam num valor normalizado, denominado de Custo de Manutenção Normalizado C_{mn} e indicativo de tendência com o aumento da indisponibilidade da máquina.

Assim, Tomando-se agora a equação **(23)** do Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina,

$C_{im} = 1000horas^{(1/-t)}$, tem-se que:

$$C_{mn\ (\%)} = [C_{mt} / K] * 100 \quad \textbf{(31)}$$

Onde K [e definido como o um coeficiente de normalização na composição dos custos de manutenção, assumiu-se a definição de um valor de referência em função do Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina de acordo com a equação **(23)**, tem-se que:

$$K = [\textit{Valor de Referência} * C_{im}] \quad \textbf{(32)}$$

O valor de referência é definido em função das características da máquina e em função dos valores de custos estimados previstos no gasto da manutenção da máquina. O valor de referência é um valor arbitrariamente definido pelo usuário e pode compreender diversos fatores, como por exemplo, porcentagem do custo total da máquina (90%), percentual dos custos de produção (95%), dentre outros. Sugere-se para máquinas de grande porte, considerando-se custos mais elevados dos componentes, que o valor de referência seja relativamente menor em relação a outros tipos de máquinas, objetivando obter sinalização da elevação dos custos em menor tempo.

Reescrevendo a equação a partir das equações **(31)** e **(32)**, tem-se que:

$$C_{mn\ (\%)} = [C_{mt} / \textit{Valor de Referência} * C_{im}] * 100 \quad \textbf{(33)}$$

Isto implica que quanto maior for o valor percentual do C_{mn}, maior são os custos da manutenção. Note-se que, para um custo de manutenção próximo do valor de referência não necessariamente isto indicaria uma maior aproximação a um processo de *retrofitting*. Nestas condições pode indicar um pico de gasto na manutenção, não sugerindo uma indicação da degradação do equipamento.

A Figura 29 ilustra a localização do Coeficiente de Manutenção dentro do Nível 1.

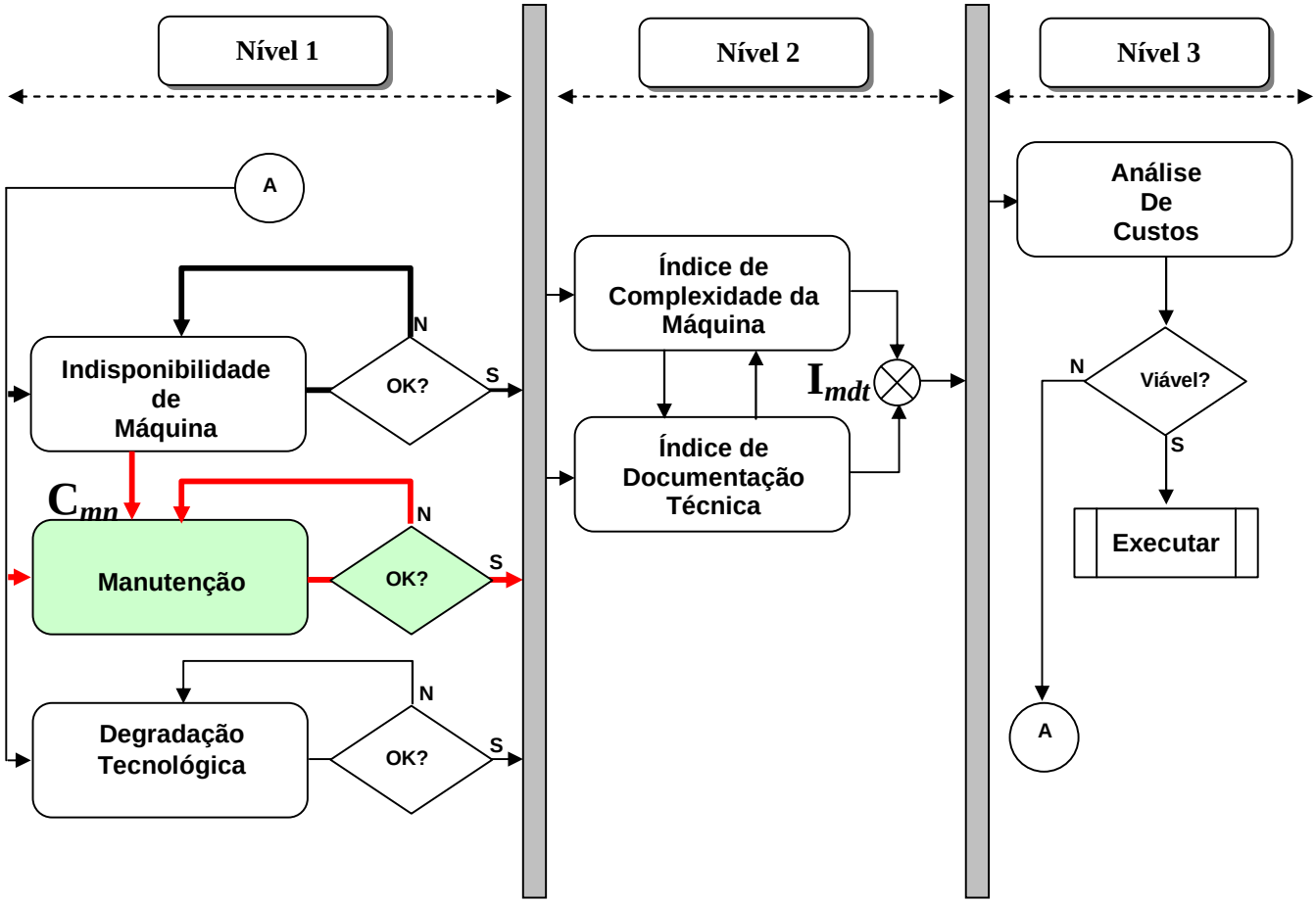


Figura 29 – Ilustração da localização do Coeficiente C_{mn} dentro do Nível 1.

O Coeficiente da Degradação Tecnológica C_{dt} também pode ser chamado de Coeficiente de Obsolescência e é descrito como função da perda da capacidade operacional ou perda dos recursos ou ainda do distanciamento tecnológico de uma plataforma de CNC quando comparadas com as tecnologias mais recentes e aplicadas a uma MF.

A partir dos diversos fundamentos discutidos, contextualizados e abordados na literatura dentro da revisão bibliográfica, é possível afirmar que a maioria dos elementos que configuram e formam uma MF experimentam de certa forma do fenômeno da obsolescência e da degradação tecnológica. No entanto, para efeito da determinação deste coeficiente assumiu-se somente a parte referente ao CNC, entendendo-se que poderia ser aplicado também às outras áreas da MF. Assim, o Coeficiente de Degradação, a partir de sua formulação, apresenta três atributos, a saber: Degradado, Indeterminado e Não Degradado. Estes três atributos são orientativos a partir de valores numéricos definidos previamente.

De forma análoga ao coeficiente de manutenção, o sistema de controle, mais especificamente o CNC, foi dividido em áreas, assumidas a partir do que se pode descrever como sendo de importância mais significativa na operação e recursos de uma MF. A composição destas áreas sugere apresentar uma maior percepção da degradação, observando que neste caso a degradação pode ser quantitativa ou ainda, qualitativa. Quantitativa quando de fato uma determinada função não mais corresponde à necessidade de uma função de interpolação, por exemplo. Mas ao mesmo tempo esta função poderia ser descrita de formas variadas, cujo resultado da operação fosse o mesmo, porém, com implicações no tempo de execução da peça, no grau de acabamento, dentre outros. Qualitativa quando a percepção da degradação fica mais subjetiva e depende de critérios muito mais de uma análise de conjuntura do que de uma análise técnica aplicada a uma dada função ou característica do CNC.

A dificuldade, portanto, está em como medir ou mesmo indicar uma obsolescência a partir de observações ou ainda da falta de variáveis que possam indicar numericamente, e de forma mais precisa, este coeficiente. Além disso, as demais áreas do CNC poderiam também ser classificadas como não menos importantes, mas subentende-se que poderiam variar conforme a aplicação. Dessa forma, o método propõe a divisão do CNC em áreas conforme sumarizadas na Tabela 9. Também se deve considerar que uma medida mais exata das questões tecnológicas deveria ser conduzida por um especialista da área, o que poderia implicar em uma análise mais complexa da própria plataforma de CNC existente.

Os pesos adotados para cada um dos itens, segundo descritos na Tabela 9, foram baseados em observações práticas e na aplicação de diversas plataformas de CNC em diferentes máquinas. Para máquinas não originalmente configuradas com CNC, isto é, em máquinas convencionais, assume-se que a degradação tecnológica é sempre igual a 1.

Tabela 9 - Divisão do CNC em Áreas e Respectivos Pesos

ITEM	**μ**	Nomenclatura Adotada	Peso	Valor % de Percepção de 0 a 100	Normalização da Percepção
Funções de Interpolação	**1**	μ_{IT}	2	-	= Valor % de Percepção / 100
Compensação de Ferramental	**2**	μ_{CT}	2	-	
Compensações Geométricas	**3**	μ_{CG}	4	-	
Sistemas de Acionamentos	**4**	μ_{EC}	5	-	
Recursos Operacionais Amigáveis	**5**	μ_{RO}	6	-	
Capacidade de Programas	**6**	μ_{CP}	6	-	
Processamento Gráfico	**7**	μ_{FG}	8	-	
Família de Ciclos Fixos	**8**	μ_{CF}	8	-	
Comunicação em Rede	**9**	μ_{CR}	**10**	**-**	
Programação Conversacional	**10**	μ_{PC}	**10**	**-**	

Os itens como capacidade de processamento gráfico, ciclos fixos, capacidade de programas e programação conversacional receberam um peso maior fundamentando-se na recente literatura técnica das plataformas de CNC pesquisada. Nestas é possível observar que à medida que novas plataformas de CNC se tornam disponíveis, há uma maior concentração destes itens como recursos tecnológicos adicionais (*IDOC FANUC, DOCONWEB SIEMENS, Programming Manual MITSUBISHI*).

As abordagens referentes aos servos motores, por exemplo, e, sobretudo os sistemas digitais, conferem maior desempenho dinâmico às máquinas, mas entende-se que estes apresentam maior percepção ao usuário final em máquinas novas e não em máquinas usadas.

Assim, para a definição do coeficiente C_{dt}, o método propõe a divisão do CNC em áreas de importância conforme definido e ilustrado na Tabela 9. Para cada item definido arbitrariamente, tem-se um valor peso, sendo que o peso de valor igual a 2 se aplica ao item de menor impacto na evolução da tecnologia e o de peso de valor igual a 10 aos itens considerados de maior importância nesta evolução.

Os itens definidos no intervalo $\mu_{IT...}$ μ_{CP} podem ser considerados itens comuns às várias plataformas de CNC, mesmo assumindo que existem variações em recursos e também de características quando se comparam, na prática, plataformas de diferentes fabricantes e modelos. Notadamente, é possível sugerir que, fundamentando-se também nas literaturas técnicas, que os itens μ_{CR} e μ_{PC} constituem elementos mais atuais, ou seja, representam os recursos que começam a ser disponibilizados com maior ênfase nas plataformas de CNC com tecnologias mais recentes.

Na Tabela 9, a coluna definida como Valor % de Percepção de 0 a 100% denota os valores de percepção aplicada a cada um dos itens. Os valores de percepção são definidos como valores quantitativos da percepção da degradação que o usuário tem para com cada um dos itens descritos. Estes são descritos como valores incrementais de 10%. Um valor de percepção de 10% indica uma percepção de baixa relevância para aquele item, enquanto que um valor de 100% denota uma percepção de alta relevância. Dessa forma, o indicador da percepção da degradação pode ser descrita por ε^{x}, onde o expoente **X** representa o valor normalizado da percepção. O expoente **X** pode ser definido no intervalo:

$$0 \leq X \leq 1$$

Tomando-se os pesos atribuídos a cada um dos itens descritos na Tabela 9 e dos valores de percepção, tem-se que a formação do coeficiente pode ser descrito a partir da definição do valor da média geométrica e dada pela equação **(33)**. Portanto, tem-se que o Coeficiente de Degradação Tecnológica C_{dt} é definido conforme segue:

$$C_{dt} = \sum_{k=1}^{10} [MG(\mu_{[k]} * \varepsilon_k^{x})] \ (k = 1,2,3,4,...10) \qquad (34)$$

Onde **MG** é definido como a Média Geométrica dos itens definidos na Tabela 9. Assim, $\mu_{[k]}$ denotam os valores dos itens normalizados no intervalo do vetor $\mu_{[1]}$ até $\mu_{[10]}$, os quais correspondem a μ_{IT} até μ_{PC} .

Uma vez definido o valor de C_{dt} pela equação **(34)**, é necessário aplicar um fator de normalização – (FNC_d) de forma a representar os atributos Degradado, Indeterminado e Não Degradado em valores percentuais. Assim, tem-se que:

$$NC_d = \sum_{k=1}^{10} [MG(\mu_{[k]} * \varepsilon_k^1)] \ (k = 1,2,3,4,...10) \quad (35)$$

Logo, tem-se que:

$$FNC_d = (100 * C_d) / NC_d \quad (36)$$

A proposta sugere que a percepção da degradação tecnológica ocorre de forma exponencial, posto não haver uma padronização ou método conhecido que permita medir corretamente a evolução de uma plataforma de CNC e associá-la ao conceito de degradação ou obsolescência. Quase sempre se observa na prática uma evolução ascendente, porém, sem parâmetros de comparação com as plataformas não tão recentes. Dessa forma, tomando-se a equação **(36)** e aplicando-se os valores de percepção da degradação, é possível definir as três faixas principais para os atributos Degradado, Indeterminado e Não Degradado. A Figura 30 ilustra graficamente as faixas indicativas e o posicionamento destes três atributos.

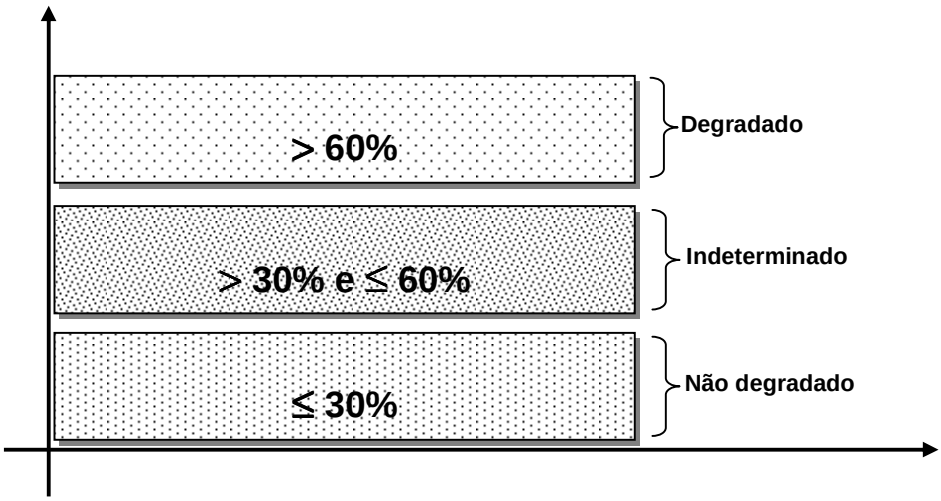


Figura 30 – Representação gráfica das faixas indicativas da degradação tecnológica.

É possível observar na Figura 31, a partir da Faixa Média, que os itens denominados de Sistemas de Acionamentos, Recursos Operacionais e Capacidade de Programas, podem representar um ponto de convergência na obsolescência. Considera-se que estes atributos, dentro do processo de degradação do CNC, como fatores com contribuição mais determinante na perda de capacidade operacional de uma MF.

Os itens referentes às compensações e funções de interpolação são funções que normalmente estão disponíveis na maioria dos recursos do CNC e tendem permanecer operantes, independentemente da evolução ou não do CNC.

Já os atributos de processamento gráfico, família de ciclos fixos, comunicação em rede e programação conversacional são recursos que evoluem mais rapidamente à medida que as novas plataformas disponibilizam novos recursos computacionais.

Isto sugere que um CNC, mesmo obsoleto pode realizar as funções básicas e essenciais, enquanto que um CNC com nova tecnologia pode, além das funções básicas, disponibilizar recursos adicionais que somente são possíveis a partir de novas arquiteturas de hardware e software. Estas considerações são sumarizadas e ilustradas pela Figura 31.

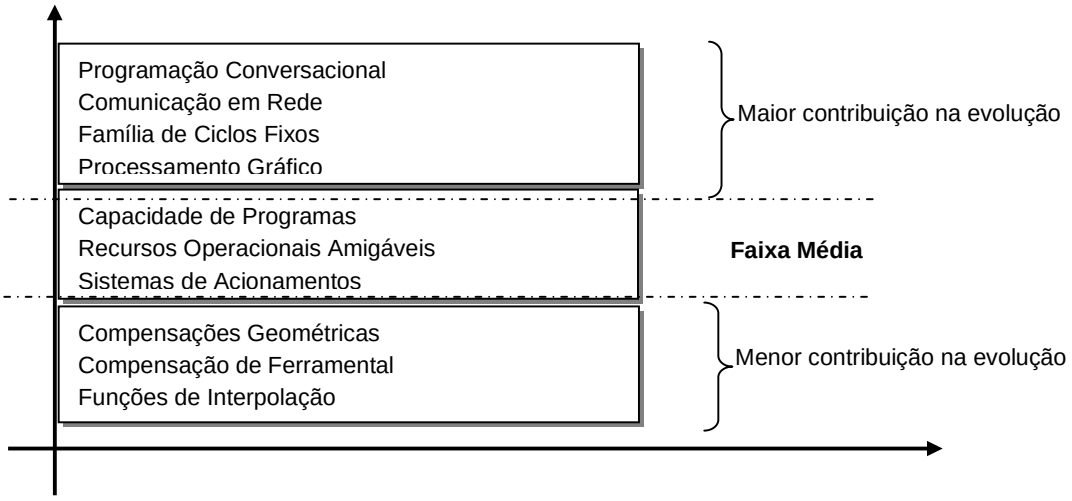


Figura 31 – Representação gráfica da contribuição dos itens na formação do coeficiente C_{dt}

A Figura 32 ilustra o Coeficiente de Degradação Tecnológica dentro do Nível 1.

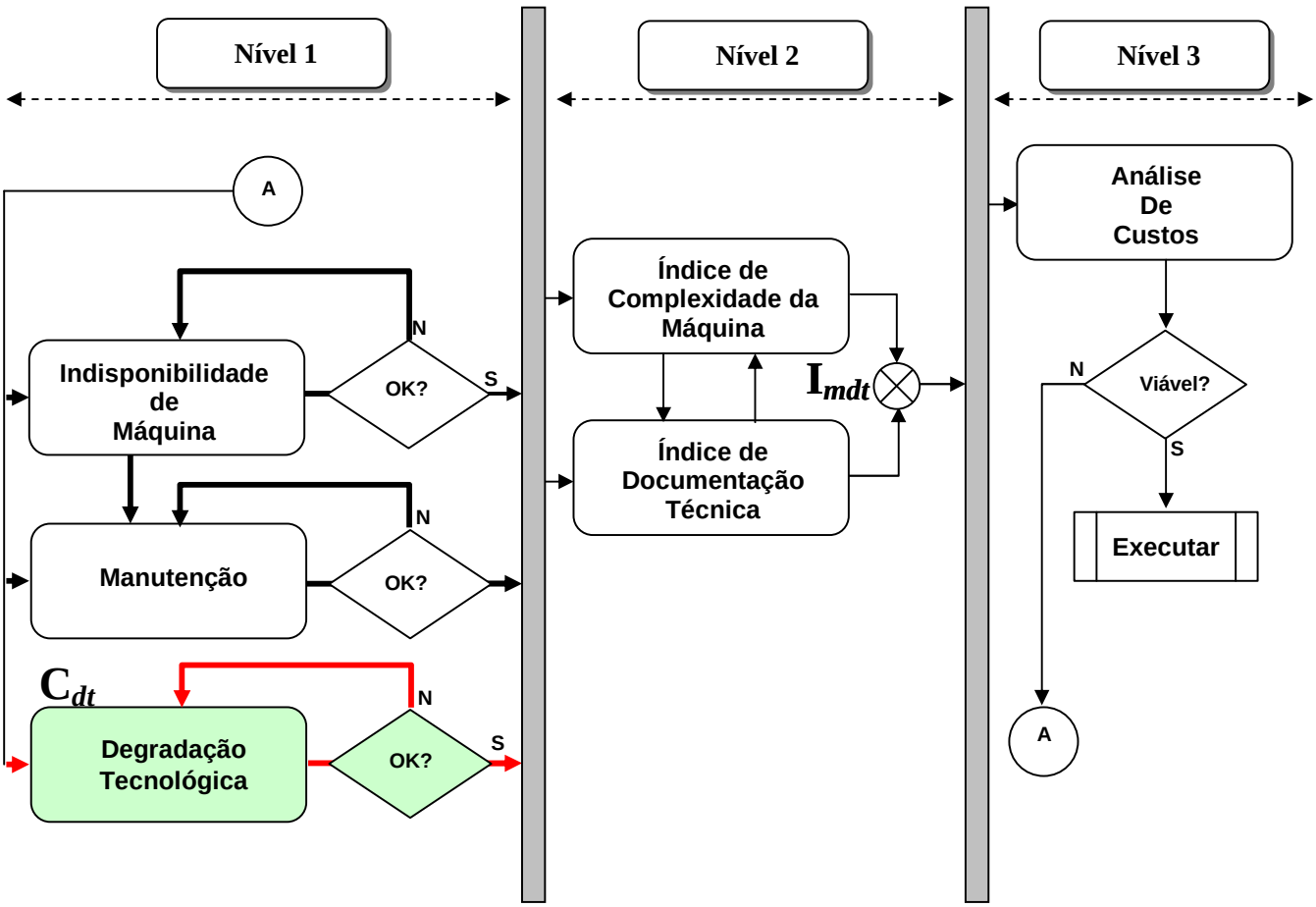


Figura 32 – Ilustração da localização do Coeficiente C_{dt} dentro do Nível 1.

Concluem-se assim as definições abordadas para os coeficientes de Indisponibilidade, de Manutenção e de Degradação Tecnológica, dentro do Nível 1. Dessa forma, é possível representar seus respectivos equacionamentos por meio da representação esquemática da Figura 33.

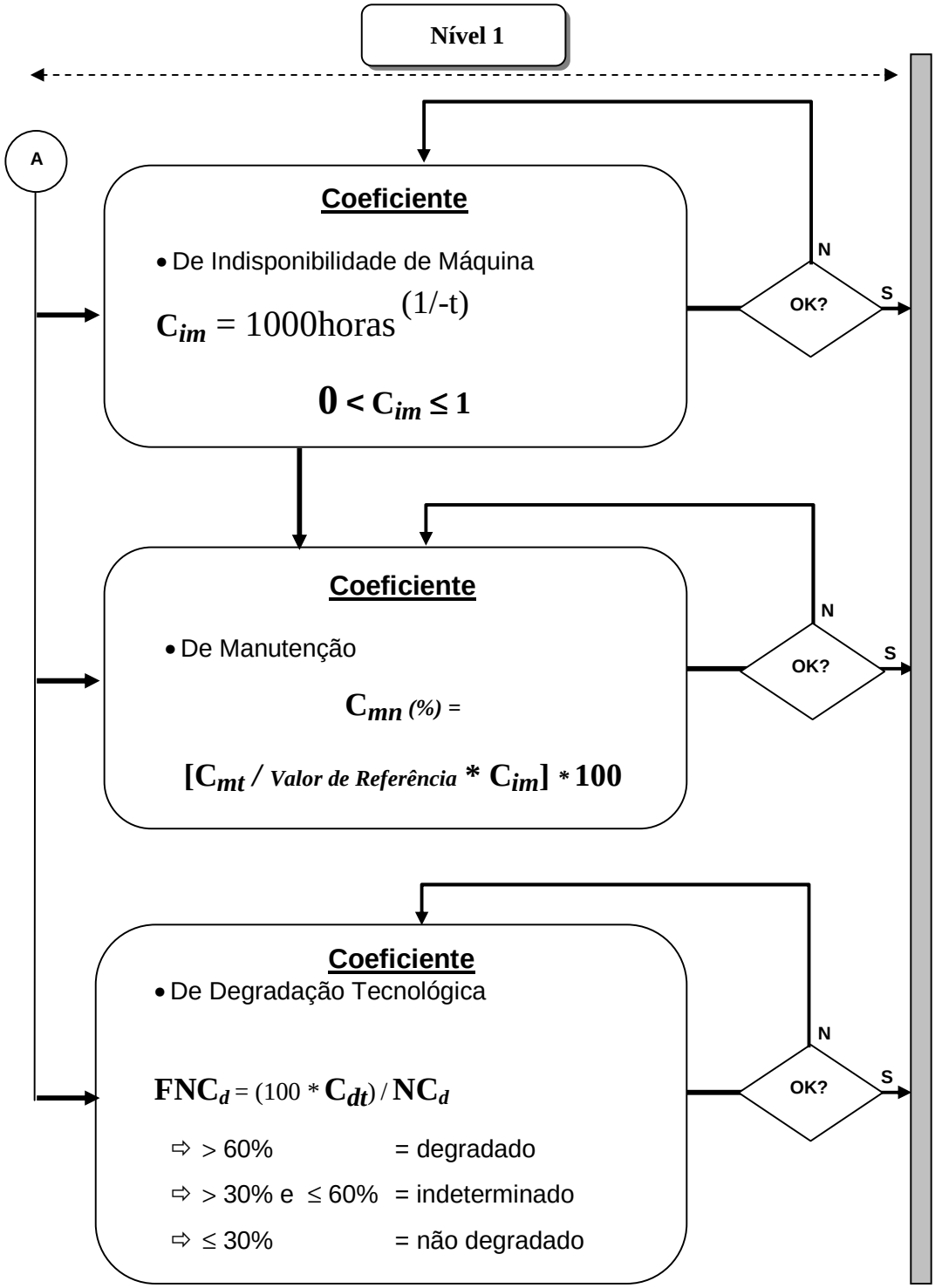


Figura 33 – Sumário dos Coeficientes – Nível 1.

Assim, uma vez estabelecidos e definidos estes três coeficientes principais, é possível verificar que seus valores numéricos correspondentes atuam como valores “gatilhos”, os quais, aplicados ao Nível 1, permitem indicar, sugerir ou convergir num processo de tomada de decisão, para as fases seguintes.

Tomando-se as equações **(23)**, **(33)** e **(36),** é possível construir a Tabela 10, a qual indica os denominados valores “gatilhos” práticos e sugeridos para a tomada de decisão. Esta tomada de decisão será entre efetuar o *retrofitting* ou não.

Tabela 10 – Valores Indicativos para Tomada de Decisão – NÍVEL 1

Coeficiente	Equação	Definição	Valor Gatilho	Observação
$C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-t)}$,	**(23)**	Tempo de máquina parada a cada 1000 horas	≥ 0,8	Máquina para em média 40horas/1000horas de trabalho
$C_{mn\,(\%)} = [C_{mt} / \textit{Valor de Referência} * C_{im}] * 100$	**(33)**	Manutenção	≥ 50%	Pode variar em função do Valor de Referência adotado
$FNC_d = (100 * C_d) / NC_d$	**(36)**	Valor % da Percepção da Degradação Tecnológica	≥ 70%	Valor % da Percepção da Degradação Tecnológica

Dessa forma, estabelecido o equacionamento proposto para o método, segue-se com a abordagem dos outros dois níveis de decisão. As definições e as contextualizações que se seguem permitem observar a descrição e formulação dos índices até atingir a implementação final do processo de *retrofitting*.

As observações neste campo são pontuais e necessitariam sempre de verificações comparativas constantes entre as diversas plataformas de CNC no mercado de forma que seja possível compará-las diretamente com as plataformas existentes.

3.4. Índice da Documentação Técnica de Máquina $I_{dtt.}$

Uma documentação técnica de uma MF compreende, em síntese, o conjunto de todos os diagramas (elétricos, hidráulicos, pneumáticos) e todos os desenhos, especificações e características que formam sua biblioteca técnica. Considerando-se que um processo de *retrofitting* abrange equipamentos obsoletos, parece possível sugerir que as condições daquelas documentações também sofreram deterioração, ou mesmo extravio, com o tempo. Dessa forma, o levantamento das condições deste conjunto ou ainda das condições destas documentações, constitui também uma das análises necessárias como forma de se avaliar preliminarmente o processo de *retrofitting*.

Uma análise, a partir das documentações técnicas de uma MF, é uma análise quase sempre conduzida por um especialista da área. A análise preliminar das documentações resulta em dados importantes e indicativos. As principais análises técnicas necessárias, a partir destas documentações, podem ser sumarizadas a partir do esquema proposto pela Figura 34.

O conjunto da documentação técnica original[14] da máquina pode variar em função do próprio fabricante da máquina, mas em termos gerais é possível afirmar que se constitui numa biblioteca técnica essencial da máquina. Esta biblioteca é fonte de estudos e forma assim uma fonte de investigação e de estudos do pessoal técnico e especialista como forma de compreensão dos requisitos técnicos de uma MF.

Do lado mecânico e mesmo de outros sistemas que compõem uma MF, podem implicar também em grau de complexidade maior ou menor quando se analisam as documentações técnicas. Logo, é possível concluir que a falta ou mesmo a qualidade dos dados existentes de uma máquina pode constituir-se em fator importante de decisão dentro de um processo de *retrofitting*.

Entende-se que uma maior disponibilidade dos dados originais de uma máquina, além de permitir representar e sugerir um menor trabalho de reengenharia contribui também para melhorar os índices de acertos no processo de reconfiguração e redimensionamento elétrico (potências), mecânicos, hidráulicos, etc., da MF e de seus elementos.

[14] Documentação técnica original de uma máquina constitui e forma o conjunto de documentação técnica, formada pelos desenhos mecânicos, diagramas elétricos, diagramas do sistema hidráulico, pneumático, folha de características, registros de medições e inspeções geométricas, dentre outros.

Uma análise da qualidade da documentação técnica pode a principio parecer subjetiva. Esta análise pode ser mais ou menos complexa em função, inclusive, do tipo de máquina sob análise e de sua própria complexidade. Entretanto, a análise sugere indicar sempre um resultado qualitativo e não quantitativo.

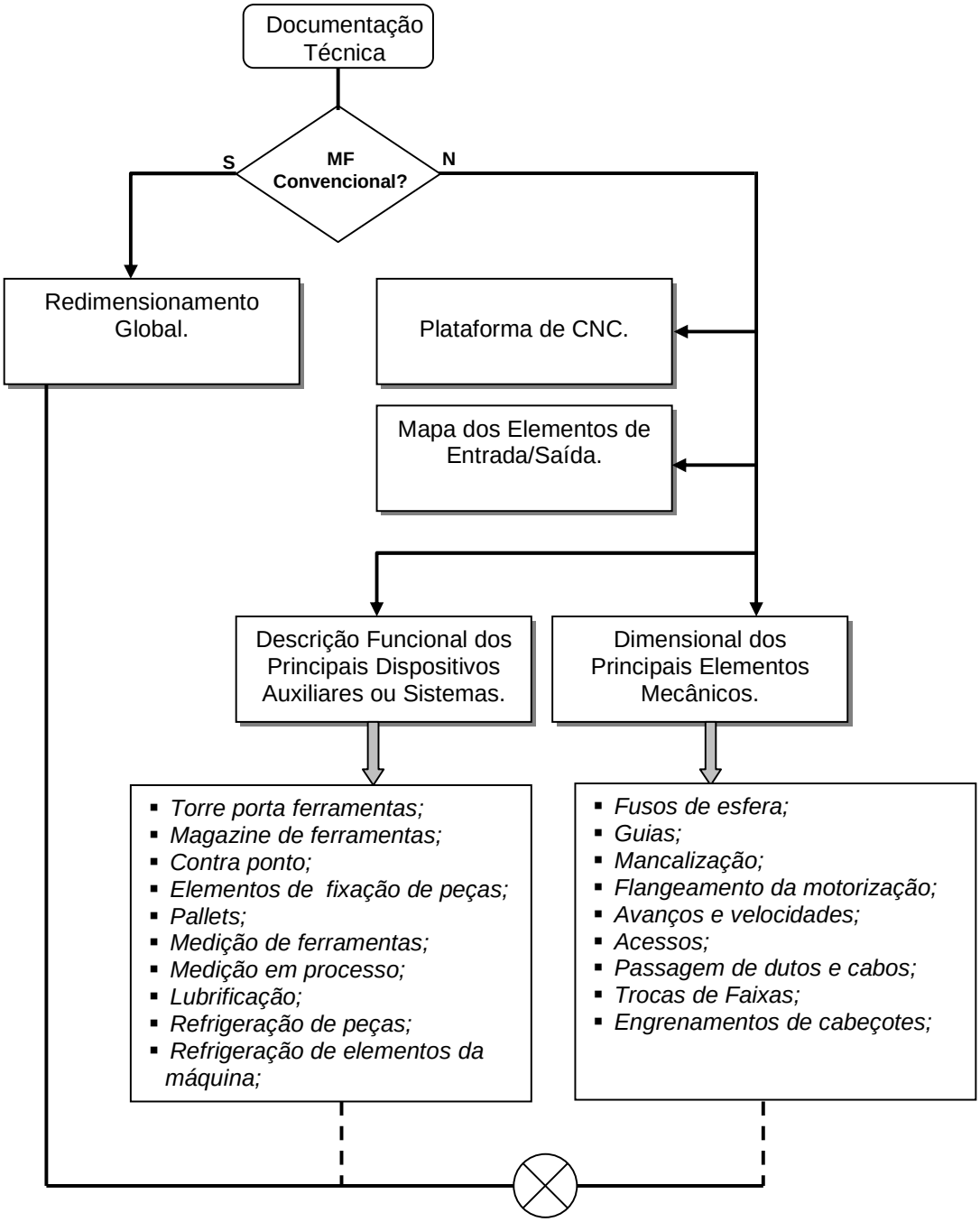


Figura 34 – Esquema representativo da análise da documentação técnica.

Considerando-se estas prerrogativas, o método propõe a criação de um Índice de Documentação Técnica $I_{dtt.}$. Dessa forma, a definição deste Índice, segundo a proposta do método, fundamenta-se nos seguintes índices conformes descritos e definidos na Tabela 11.

Os pesos para cada um dos itens foram definidos empiricamente e a partir de observações práticas, fundamentando-se em várias máquinas de tipos e funções diversas, as quais foram objetos de estudos e de formalização de propostas de *retrofitting*. Algumas máquinas com maior ou menor grau de complexidade.

Observou-se ainda que a qualidade destas documentações técnicas deve contribuir para uma melhor condução de um processo de *retrofitting* e pode ainda influenciar, sem no entanto poder mensurar esta influência, nos custos de reprojeto e mesmo nos custos dos insumos que irão compor novamente a máquina.

Tabela 11 – Documentações Técnicas – Atributos de Análise e Pesos

Documentação	**Índice** X_m	**Peso [P]** P_m	**Nota 1 ~ 10**
Elétrica	D_{elet}	5	-
Mecânica	D_{mec}	5	-
Hidráulica	D_{hid}	5	-
Programas de PLC	D_{plc}	4	-
Pneumática	D_{pn}	3	-
Relatórios Geométricos	D_{rg}	3	-
Programas e Funções Customizadas	D_{pc}	2	-
Programação e Operação	D_{po}	1	-
Layout Operacional	D_{lay}	1	-
Carta de Tempos e Ciclos	D_{tc}	1	-

Os pesos [P], conforme mencionado foram arbitrariamente definidos a partir de uma análise prática, sugerindo que uma documentação com maior peso apresenta-se com maior contribuição na definição do processo de *retrofitting*. Conseqüentemente, a de menor peso apresenta-se com uma menor contribuição.

Os itens definidos na Tabela 11 procuraram ser abrangentes na formação do índice, conforme contextualizado, a partir de observações práticas. A coluna denominada de atributo compreende uma pontuação de notas que variam de 0 a 10. O valor 0 (zero) compreende uma documentação inexistente, enquanto que uma nota de valor igual a 10 (dez) indica uma documentação completa.

O Índice de Documentação Técnica $I_{dtt.}$ pode ser descrito então pelo valor da Média Ponderada dos dez itens que compõem os atributos de análise.

$$I_{dtt} = \frac{x1p1 + x2p2 + x3p3 + ... + x10p10}{p1 + p2 + p3 + ... + p10} \quad \textbf{(37)}$$

Onde x1,x2,...x10, compreendem as notas atribuídas aos itens D_{elet}, D_{mec}, D_{hid}, ..., $D_{tc.}$ Os valores p1, p2, p3,...,p10 denotam seus pesos correspondentes.

Tomando-se a equação **(37)** tem-se que uma máquina sem nenhuma documentação, de acordo com os itens definidos na Tabela 11, apresenta o valor de I_{dtt} igual a um (1). Para uma máquina com o conjunto de documentações completas, o I_{dtt} será igual a dez (10).

$$1 \leq I_{dtt} \leq 10$$

A Figura 35 ilustra o Índice de Documentação Técnica dentro do Nível 2.

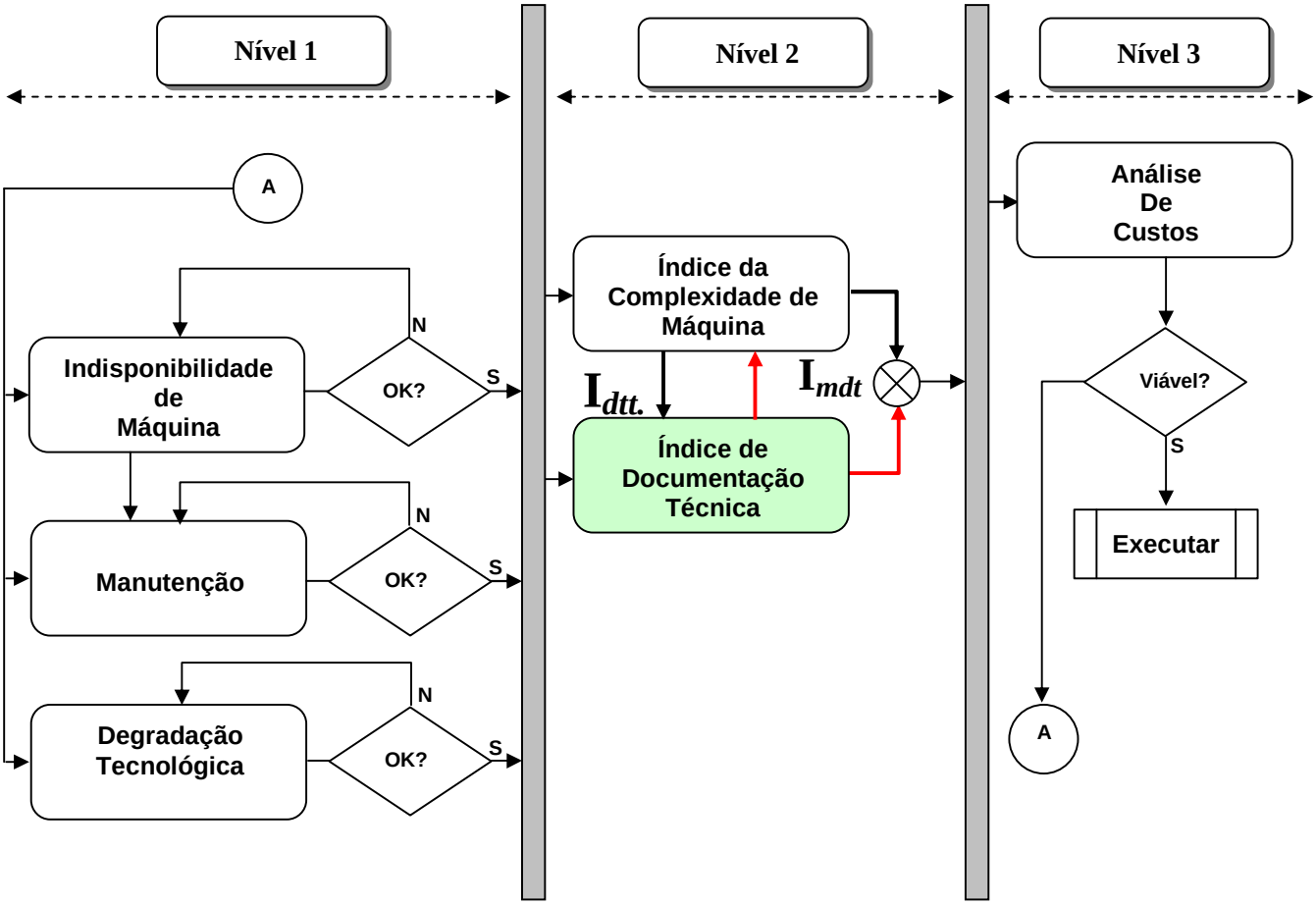


Figura 35 – Ilustração da localização Índice de Documentação Técnica I_{dtt} dentro do Nível 2.

3.5. Índice da Complexidade de Máquina $I_{cm.}$

(SHIBATA; YANO; KODAMA, 2005) afirmam que a maioria dos estudos sobre o desenvolvimento do produto se preocupa em comparar as vantagens e desvantagens de uma arquitetura modular com aquelas denominadas de arquitetura integral. A partir dessa afirmação, os autores abordam a evolução das plataformas de CNC FANUC, por exemplo, resultando na hipótese de que o produto evolui a partir de uma arquitetura integral para uma modular e depois para uma arquitetura aberta com conseqüências nos custos resultantes desta evolução. À medida que os insumos que definem este produto evoluem, é possível que o inverso também ocorra.

Nestas investigações, os autores estão preocupados com a evolução ao nível do processo do desenvolvimento da plataforma de CNC. Analogamente, no entanto, é preciso considerar, dentro do conceito de modelagem de um processo de *retrofitting*, logo numa camada que poderia ser entendida numa dimensão maior, qual seria a evolução dos custos do CNC em função da complexidade de uma MF dentro do modelo proposto.

Não se pode esgotar o conceito de complexidade de uma MF quando se considera o universo de sua aplicabilidade e diferenças nas diversas plataformas de CNC, e mesmo ainda das varias configurações mecânicas e dos mais diversos elementos de automação, mas parece possível definir alguns atributos que permitam medir esta complexidade. A medida da complexidade e perfil de uso de uma MF constitui fator importante no processo de decisão de um processo de *retrofitting*.

Assim, em nível macro, é possível considerar ser necessário definir, estabelecer e conhecer o tipo de uma MF e sua aplicação no processo produtivo à medida que se estuda ou avalia um processo de *retrofitting*. Conhecer o perfil de uso e aplicação de uma MF permite representar um impacto direto em todo um novo redimensionamento da máquina, quando aplicável. O perfil de uso, neste contexto, busca definir o grau de complexidade da máquina, sugerindo assim orientar, em função de seu uso e aplicação, um redimensionamento mais correto. Este redimensionamento pode abranger, obviamente as diversas áreas de uma máquina. Assim, pode apresentar impactos na área da mecânica, como o redimensionamento dos sistemas de motorização, hidráulico, pneumático. Um redimensionamento dos sistemas de comunicação das interfaces de máquina, sobretudo os elementos que podem atuar mais diretamente nos aspectos da automação e ainda vários outros. E, de modo mais direto, que a configuração e

aplicação de uma nova plataforma de CNC, principalmente, é também função direta deste perfil. No entanto, é preciso observar também que o universo de aplicação de um processo de retrofitting pode ser considerado extenso à medida que se considera os mais diferentes tipos, modelos, funções e aplicações das MFs. Mesmo num universo de fronteira definida dentro dos limites funcionais e operacionais de uma máquina especifíca, podem existir graus de complexidade diversos. Dessa forma, como métrica de uma complexidade e a partir das considerações acima, considerou-se uma classificação de 1 a 10 como valores indicativos, conforme sumarizados na Tabela 12. Para cada um desses valores foi atribuido um perfil correspondente como uma descrição genérica e resumida de seu uso e aplicação.

Tabela 12 – Atributos para Classificação do Perfil de Uso de uma MF

Perfil	**Classificação do Grau de Complexidade**	**Valor Indicativo da Complexidade K**
2 Eixos Coordenados	**Simples**	1
3 Eixos Coordenados	**Simples**	2
3 Eixos Coordenados com Sistema Randômico de Ferramentas	**Médio Baixo**	3
4 Eixos Coordenados	**Médio Baixo**	4
4 Eixos Coordenados com Sistema Randômico de Ferramentas	**Médio Alto**	5
4 Eixos Coordenados com Sistema Randômico e um Eixo Auxiliar	**Médio Alto**	6
4 Eixos Coordenados com Sistema de Carga de Descarga de dois Eixos	**Complexo**	7
2 ou 4 Eixos Coordenados configurados com Sistema de Duplo Canal	**Complexo**	8
5 Eixos Coordenados	**Complexo**	9
Aplicação Especial	**Complexo**	10

A classificação usada, segundo a Tabela 12, é orientativa e reflete um universo de MFs com potencial de aplicação de retrofitting, para as quais foram apresentadas propostas técnicas de

substituição das plataformas de CNC e foram objetos de estudos e abordagens de soluções em automação pelo autor.

As poucas indicações ou abordagens encontradas na literatura pesquisada não apresentam, ou tampouco sugere índices que permitissem medir a evolução dos custos das plataformas de CNC, por exemplo, em função de sua aplicação e do nível de complexidade de uma MF. Isto é sempre de domínio do fabricante da máquina e podem ser considerados como dados estratégicos, logo, não divulgáveis. O que existe são dados de mercado disponiveis na forma de preço final do produto.

Os atributos de projetos, configurações mecânicas e demais partes da máquina não foram considerados. Obviamente, podem existir máquinas onde as configurações mecânicas, por exemplo, apresentam também grau de complexidade considerável, sobretudo em máquinas com maior número de eixos e quase sempre associados a elementos de manipulação de peças, mas estes não foram considerados. Assim, a proposta da métrica da complexidade foi formada tomando-se 10 (dez) máquinas similares para cada grau de complexidade proposto, objetivando ter um maior campo amostral. Para cada uma destas máquinas, variou-se ligeiramente algumas das configurações da plataforma de CNC. Esta variação de configuração apresentou implicações praticamente desprezíveis no grau de complexidade. O objetivo foi observar a variação da curva de custos em função da alteração de alguns de seus elementos.

Não foram encontrados, nos diversos textos pesquisados, dentro da revisão bibliográfica, um modelo anterior de referência, ou comparativo. Assim, foram estabelecidos quatro (4) atributos principais a partir das observações e aplicações em campo, sendo somente considerados os atributos referentes à plataforma de CNC conforme sumarizados pela Tabela 13.

Tabela 13 – Atributos para Configuração do Índice da Complexidade de Máquina.

Atributos	Definição	Dados	Observação
CNC	Plataforma MITSUBISHI M70B e M70A	Variação da configuração no tamanho do Display	Tem impacto em algumas funções de interpolação, sobretudo para ciclos mais complexos. Impacto também nas apresentações de telas e navegabilidade do CNC. Funções de compensação dos aspectos geométricos de máquina.
Elementos de Entrada/Saída	Usados para configurar as interfaces com os elementos de máquina	Variação no número de elementos digitais e inclusão de módulo de saída analógica	Pode variar em função da complexidade de máquina e do tipo de solução de motorização adotada para o Eixo Árvore.
Eixos Coordenados	Aplicação de servos motores brushless na configuração full digital. Não foram utilizadas configuração analógica.	Faixa de torque que variaram entre 5,9Nm a 37Nm;	Foram considerados os Servos Drives correspondentes em função dos torques nominais dos servos motores.
Eixo Árvore	Motorização para o eixo na configuração Full Digital, considerando funções de Macho Rígido e Orientação.	Motorização para o eixo árvore com potencia de 7.5/11/15kw/18.5kw – 6KRPM / 10KRPMRPM.	Para as configurações referentes à solução com eixo-árvore analógico, configurado módulo de saída analógica adicional.

A partir desses atributos, foram configuradas plataformas de CNC para cada uma das dez (10) máquinas selecionadas e para cada um dos graus de complexidade. As máquinas estão representadas na Tabela 14 (Sumário da Seleção de Máquinas). No entanto, configurar não siginifica que o processo de retrofitting foi aplicado em cada uma dessa máquinas, mas indica a condução de um estudo técnico aplicado á cada uma delas. Assim, dentro de cada grau de complexidade definido, mesmo considerando máquinas de funcionalidades similares entre si, foram observadas as variações em função dos dimensionamentos dos servo motores e eixo-árvore (potencia, torque, tensão, rotação), adaptações mecânicas (pontas de eixo, flangeamentos), dentre outros e, consequentemente, observando a tendência dos custos produzidos a partir daquelas configurações, conforme descrito pela Tabela 15.

Tabela 14 – Sumário da Seleção de Máquinas

Sumário da Seleção de Máquinas							
K	**Máquinas Nomenclatura**					**Máquinas Descrição**	**Observação**
1	$M1_1$	$M1_2$	$M1_3$	…	$M1_{10}$	Torno ROMI Centur 30D Torno ROMI Centur 30RV Torno ROMI 10G Torno ROMI 20U Torno ROMI Cosmos 20U Torno TRAUB TNC60 Torno Warney Swasey Torno Index GU800 Torno INDEX GFG250 Retificas LANDIS Tornos diversos	Aplicou-se solução variada com eixo-árvore analógico e digital.
2	$M2_1$	$M2_2$	$M2_3$	…	$M2_{10}$	Centro de Usinagem Vertical ROMI TORQ CUT 22 Centro de Usinagem Vertical ROMI 4022 Centro de Usinagem Vertical ROMI D760 Centro de Usinagem Vertical ROMI D1250 Centro de Furação KYRA Centro MATSURA Centro de Usinagem Vertical MDL Centro de Usinagem Vertical TONG TAI Centro de Usinagem FADAL VMC 15XT	Aplicou-se solução variada com eixo-árvore analógico e digital.
3	$M3_1$	$M3_2$	$M3_3$	…	$M3_{10}$	Centro de Usinagem Horizontal HELLER Centro de Usinagem Horizonal MAZAK H400 Centro de Usinagem Concinnati Milacron ARROW 2000 Centro de Usinagem HARTFORD	Variações no dimensionamento das motorizações (potencia, torque, rotação). Variações na configuração dos servos sistemas em função da tensão de alimentação das instalações.
4	$M4_1$	$M4_2$	$M4_3$	…	$M4_{10}$	Máquinas com K = 2 e 3, incluindo 4th Eixo seus periféricos	
5	$M5_1$	$M5_2$	$M5_3$	…	$M5_{10}$	Máquinas com K = 3 e 4 nas versões com trocadores de ferramentas randomicos	Encontradas configurações com sistemas randomicos servo acionados e eletricamento acionados.
6	$M6_1$	$M6_2$	$M6_3$	…	$M6_{10}$	Centros de Usinagem Horizontal ROMI Linha PH com sistema de troca randomica e sistema de troca de pallet Centros de Usinagem Horizontal MAZAK com sistema de troca sistema de troca randomica de ferramenta e sistema de troca de pallet	Algumas configurações de máquinas apresentavam adaptações com sistema de carga e descarga de peças por meio de sistema integrado ou sistema autonomo.
7	$M7_1$	$M7_2$	$M7_3$	…	$M7_{10}$	Tornos Duplos MORI SEIKI com sistema de Duplo Gantry	Versões diferentes de máquinas com dimensões físicas diversas em função do dimensional das peças (peço, dimensão física, geometria) produzidas
8	$M8_1$	$M8_2$	$M8_3$	…	$M8_{10}$	Tornos Duplos ROMI com sistema Gantry Tornos Duplos MORI SEIKI	Versões diferentes de máquinas com sistema grantry incorporado ou não. Variações nos dimensionais das motorizações (torque, tensão, potencia, RPM). Variações nas características do sistema gantry (servo acionado *full,* sistema misto servo acionado e pneumático).
9	$M9_1$	$M9_2$	$M9_3$	…	$M9_{10}$	Mandriladora UNION BT-125 Mandriladora HIDRAUMAT Mandriladora WOTAN B105 Mandriladora WOTAN 53305 Mandriladora WOTAN 53321 Mandriladora WOTAN B1305 Mandriladora WOTAN B1505	Aplicou-se solução variada com eixo-árvore analógico e digital.
10	$M10_1$	$M10_2$	$M10_3$	…	$M10_{10}$	Geradora da Engrenagens PFAUTER (3 máquinas) LORENZ 5 Eixos LIEBHERR CNC Shaver HURT CNC Geradora de Perfil de Engrenagem 5-Eixos Centro de Usinagem Duplo com Sistema Randômico Centro de Torneamento OKUMA Duplo Canal Analógico Centro de Torneamento OKUMA Duplo Canal Digital	Geradora de Engrenagem PFAUTER com motorização variada em função de torque, potencia, rotações).

Os custos produzidos puderam ser baseados e fundamentados em somente um fabricante de CNC específico. Para efeito de comparação, no entanto, quando aplicável, deve-se considerar plataformas de características técnicas similares, posto que atualmente nota-se uma maior proliferação de plataformas de CNC distintas. É preciso, no entanto, certificar-se de que sejam consideradas na mesma base de comparação tecnológica.

Tabela 15 – Variação da Configuração de Máquinas

Variação da Configuração de Máquina											
K	**Configuração e Custos**					**Média Geometrica dos Custos** $M_{G(K)}$	**Normalização** $N_{R(K)}$	**Valor Nominal de** $N_{R(K)}$	**X LOG$_{10}$ K**	**Limite superior X LOG$_{10}$ K + 10%**	**Limite superior X LOG$_{10}$ K - 10%**
1	$M1_1$	$M1_2$	$M1_3$	...	$M1_{10}$	$M1_1 \sim M1_{10}$	$1 - \lvert M_{G(1)} / Vref \rvert$	0,003508587	0,00000	0,00000	0,00000
2	$M2_1$	$M2_2$	$M2_3$	...	$M2_{10}$	$M2_1 \sim M2_{10}$	$1 - \lvert M_{G(2)} / Vref \rvert$	0,211011811	0,30103	0,33448	0,27366
3	$M3_1$	$M3_2$	$M3_3$	...	$M3_{10}$	$M3_1 \sim M3_{10}$	$1 - \lvert M_{G(3)} / Vref \rvert$	0,427354586	0,47712	0,53013	0,43375
4	$M4_1$	$M4_2$	$M4_3$	...	$M4_{10}$	$M4_1 \sim M4_{10}$	$1 - \lvert M_{G(4)} / Vref \rvert$	0,589420605	0,60206	0,66896	0,54733
5	$M5_1$	$M5_2$	$M5_3$	...	$M5_{10}$	$M5_1 \sim M5_{10}$	$1 - \lvert M_{G(5)} / Vref \rvert$	0,781162859	0,69897	0,77663	0,63543
6	$M6_1$	$M6_2$	$M6_3$	...	$M6_{10}$	$M6_1 \sim M6_{10}$	$1 - \lvert M_{G(6)} / Vref \rvert$	0,857919696	0,77815	0,86461	0,70741
7	$M7_1$	$M7_2$	$M7_3$	...	$M7_{10}$	$M7_1 \sim M7_{10}$	$1 - \lvert M_{G(7)} / Vref \rvert$	0,934698707	0,84510	0,93900	0,76827
8	$M8_1$	$M8_2$	$M8_3$	...	$M8_{10}$	$M8_1 \sim M8_{10}$	$1 - \lvert M_{G(8)} / Vref \rvert$	0,984600267	0,90309	1,00343	0,82099
9	$M9_1$	$M9_2$	$M9_3$	...	$M9_{10}$	$M9_1 \sim M9_{10}$	$1 - \lvert M_{G(9)} / Vref \rvert$	1,034222981	0,95424	1,06027	0,86749
10	$M10_1$	$M10_2$	$M10_3$	...	$M10_{10}$	$M10_1 \sim M10_{10}$	$1 - \lvert M_{G(10)} / Vref \rvert$	1,057277624	1,00000	1,11111	0,90909

Dessa forma, tomando-se as descrições sumarizadas na Tabela 15, tem-se os seguintes:

K = Valor indicativo da complexidade, onde

$$1 \leq K \leq 10$$

A configuração das máquinas estudadas e os custos resultantes de cada uma destas configurações, pode ser descrita pela Matriz $\mathbf{M_P}$, onde:

$$\mathbf{M_P\,[K,J]} \qquad \textbf{(38)}$$

Sendo K = linha, representado pelo valor indicativo da complexidade da máquina e J = coluna, representado pela quantidade de máquinas estudadas para cada um dos níveis de complexidade, cujo campo amostral ensaiado na Matriz M_P resulta num total de cem (100) máquinas.

M_G é a Média Geométrica e é uma função aplicada a cada conjunto de máquina para cada grau de complexidade correspondente, logo:

$$M_G(K) = \sum_{i=1}^{10} [Mp[K,i] \qquad (39)$$

Para cada um dos valores da Média Geométrica $M_G(K)$, define-se um valor de normalização correspondente a partir de um Valor de Referência (V_{REF}). O valor de referência representa o custo mínimo da configuração de uma plataforma de CNC. O valor de referência foi arbitrariamente definido a partir dos custos calculados para uma configuração padrão aplicada a um máquina simples (K=1). Logo, o valor da normalização pode ser descrito conforme segue:

$$N_R(K) = 1 - \mathbf{I}\, M_G(K) / V_{REF}\, \mathbf{I} \qquad (40)$$

O que se observa, partir dos valores descritos pela normalização, é que a função resultante sugere se aproximar de uma função logaritimica, conforme segue:

$$F(K) = Log_{10} K \qquad (41)$$

Notam-se, no entanto, variações em função das configurações adotadas para cada uma das máquinas estudadas. As variações observadas sugerem tender a +/- 10% da função $F(K)$. A faixa de erro pode ser descrita como Limite Superior e Limite Inferior conforme segue:

$$LS = F(K) / 0,9 \qquad (42)$$

$$LI = F(K) / 1,1 \qquad (43)$$

Assim, é o grau de complexidade é descrito pela função $F(K)$. Logo, o índice de complexidade de máquina é definido como segue

$$I_{cm} = F(K) \quad (44)$$

Onde, o intervalo de I_{cm} é dado por:

$$0 \leq I_{cm} \leq 1 \quad (45)$$

O grafico representado pela Figura 36 ilustra a função segundo a equação (41), estabelecem os limites superior e inferior da equação de acordo com a expressões (42) e (43) e o valor normalizado da equação (40).

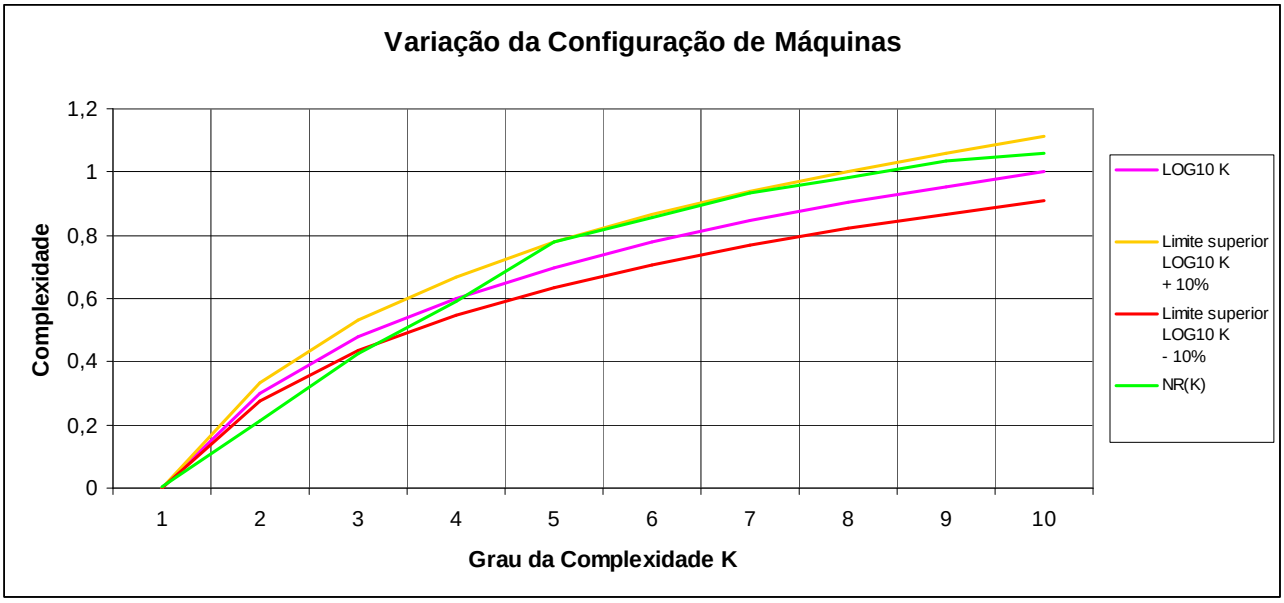


Figura 36 – Visualização gráfica do I_{cm} e seus valores limites.

Naturalmente, todos os elementos de uma MF apresentam sua contribuição quando se busca conhecer o todo de seu funcionamento. No entanto, é possível sugerir que a plataforma de CNC é fator determinante no processo de retrofitting, sobretudo quando se analisam as diversas configurações dos aspectos de automação, ciclos, tempos, funções, número de eixos coordenados e suas variantes de configurações.

Abordagens complementares poderiam, no entanto, ser ainda abordadas no levantamento do perfil de uso e aplicação de uma MF. Porém, para efeito do método proposto neste trabalho, se buscou somente definir o seu grau de complexidade aplicado a uma MF.

A Figura 37 ilustra o Índice de Complexidade de Máquina I_{cm} dentro do Nível 2.

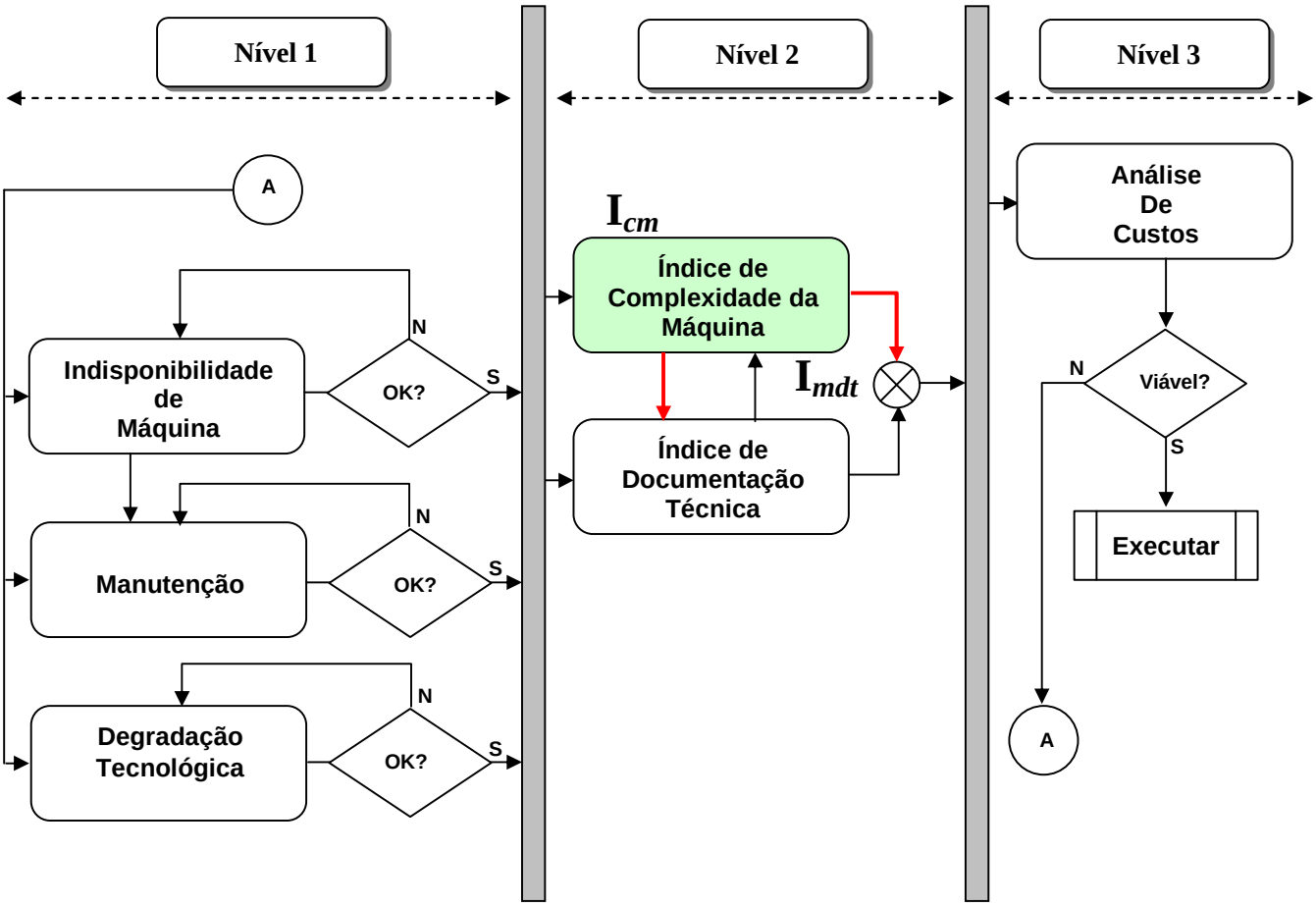


Figura 37 – Ilustração da localização Índice da Complexidade de Máquina I_{cm} dentro do Nível 2.

Concluem-se assim as definições abordadas para o Índice da Complexidade de Máquina e Índice da Documentação Técnica de Máquina dentro do Nível 2. Dessa forma, é possível

representar seus respectivos equacionamentos por meio da representação esquemática da Figura 38.

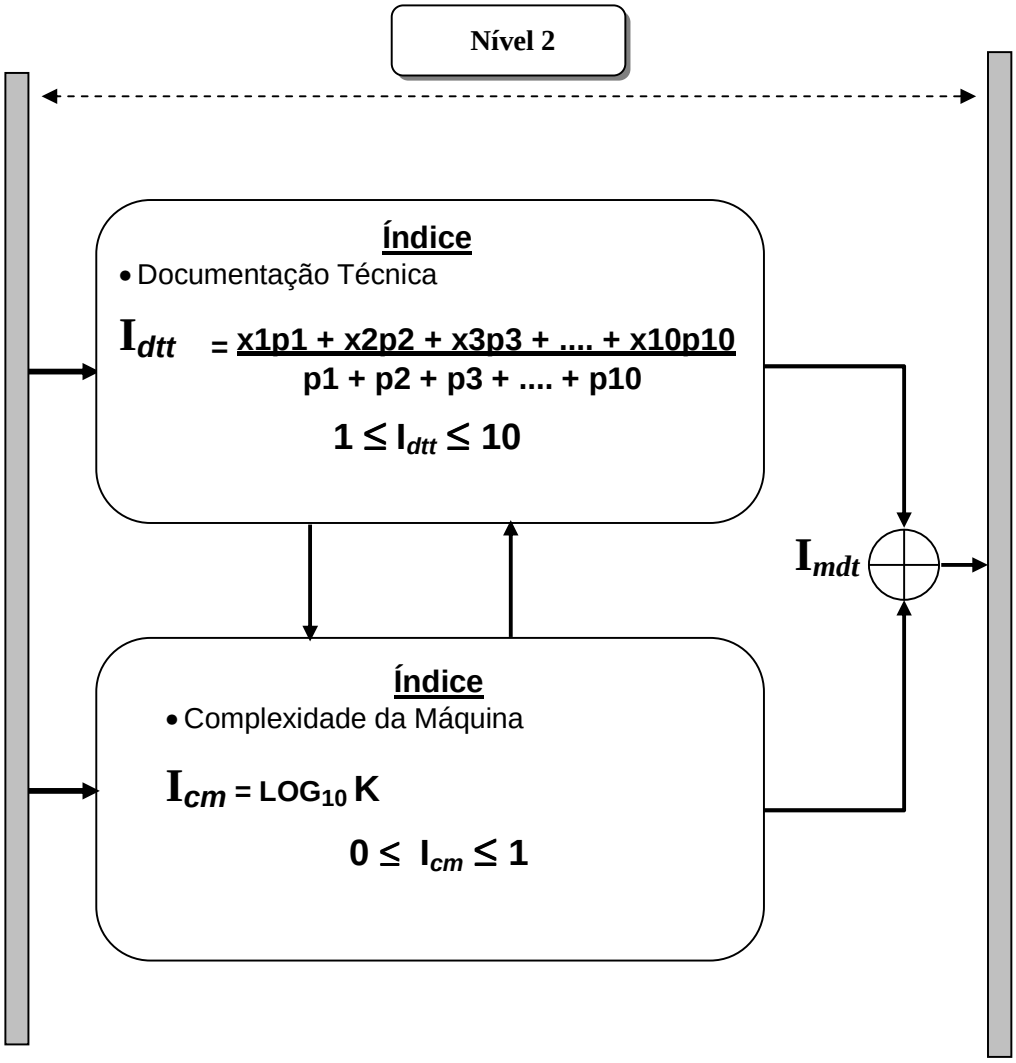


Figura 38 – Sumário dos Índices – Nível 2.

Tomando-se as equações **(37)** e **(44),** é possível estabelecer uma comparação entre estes dois índices. É possível assim sugerir uma relação entre documentação técnica e complexidade de máquina.

Para uma máquina de baixa complexidade um processo de *retrofitting* pode ser conduzido mesmo com baixa qualidade da documentação técnica original da máquina. Por outro, uma máquina com complexidade alta requer uma documentação técnica original com maior quantidade de dados possíveis.

Dessa forma, a partir das equações **(37)** e **(44),** define-se um índice adicional denominado de Índice Mínimo da Documentação Técnica, que pode ser definido como:

$$\mathbf{I}_{mdt} = 10^{\mathbf{I}_{cm}} \qquad \textbf{(46)}$$

O grafico representado pela Figura 39 ilustra a função $\mathbf{I}_{mdt}$ a partir da complexidade de máquina e do índice da documentação técnica.

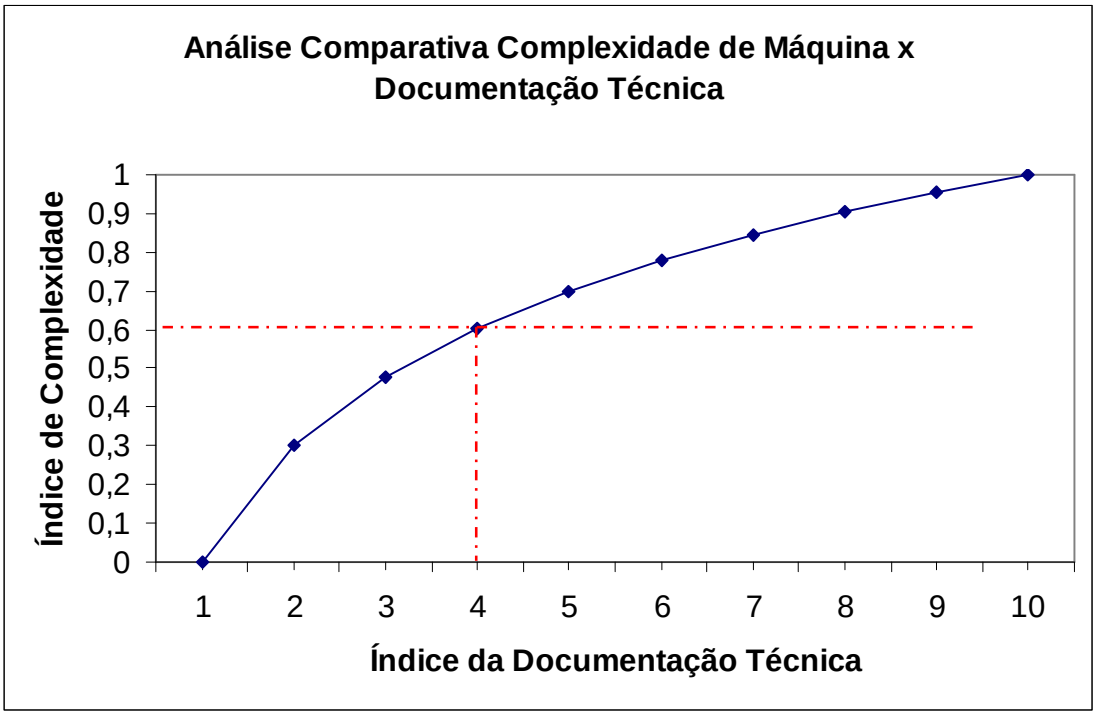


Figura 39 – Visualização gráfica do $\mathbf{I}_{mdt}$.

3.6. Análise de Custos.

A análise de custos objetiva, a partir deste ponto, satisfeitas as condições anteriormente estabelecidas para os coeficientes e índices, determinar a viabilidade econômica, ou não, do processo de retrofitting. No entanto, esta viabilidade econômica é também orientativa e não absoluta. Não leva em conta valores de depreciação, amortizações, produtividade, ciclo de vida adicional em função dos incrementos de tecnologia, dentre outros. A Figura 40 ilustra a localização desta fase dentro do Nível 3. Considera-se, no mínimo, que se conheçam os custos de aquisição de máquinas novas e similares no mercado para permitir um comparação entre os custos de um processo de retrofitting versus os custos de uma máquina nova.

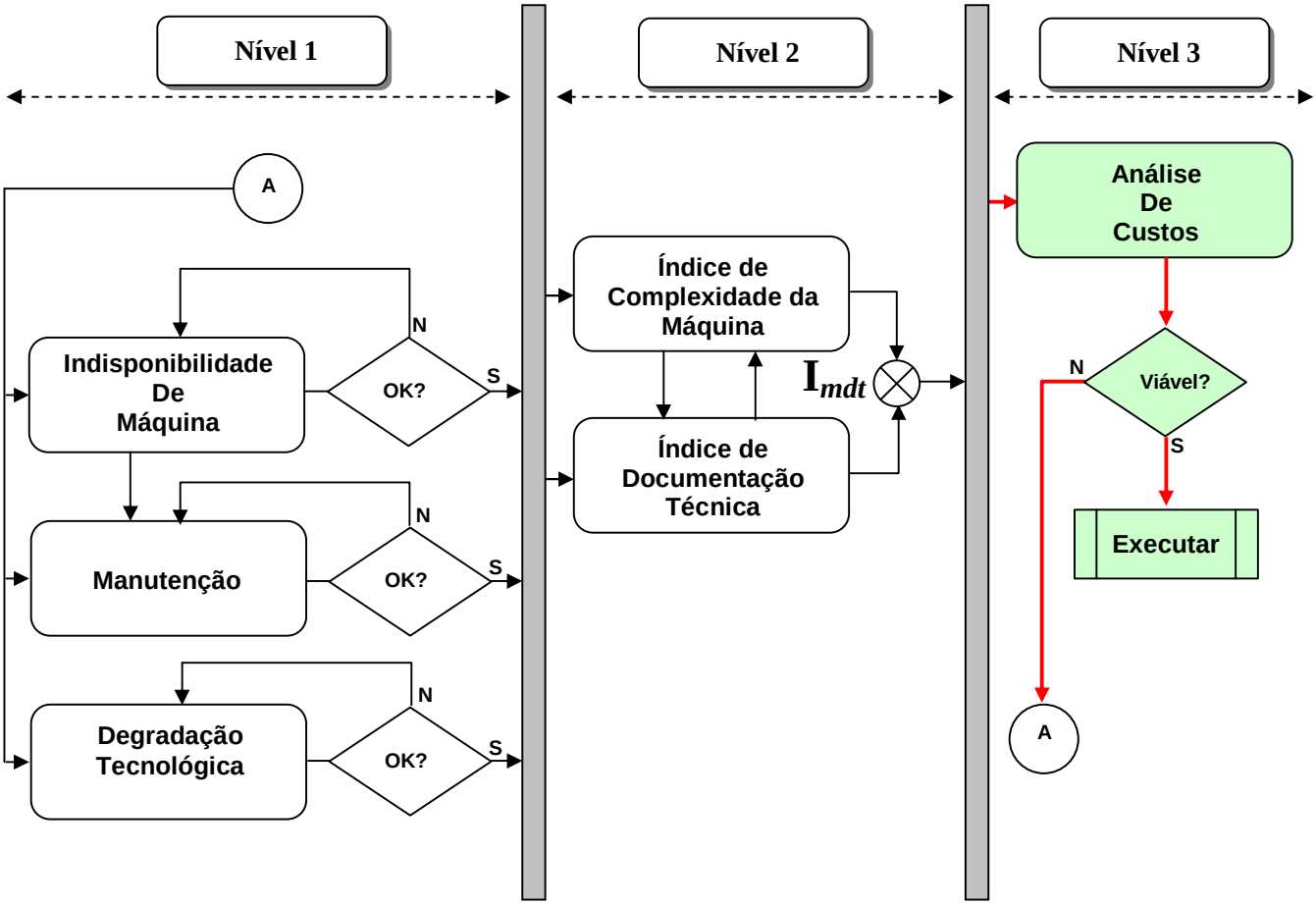


Figura 40 – Análise dos Custos dentro do Nível 3.

O Custo do Retrofitting C_{Ret} pode então ser descrito como a soma de vários elementos conforme segue:

$$C_{Ret} = \Sigma\,(\text{CNC} + \text{Insumos} + \text{projeto} + \text{instalação} + \text{montagem} + \text{start up}) \quad \textbf{(47)}$$

- Insumos compreendem todos os matériais como componentes elétricos, componentes mecânicos, hidráulicos, pneumáticos;
- Projeto considera os custos de projetos elétricos, mecânicos;
- Instalação considera os custos de instalação elétrica final na máquina;
- Montagem considera os custos de montagem elétrica e mecânica;
- Start up implica nos custos de testes finais na máquina.

O V_{mn} denota o custo de mercado para uma máquina nova similar a que se está analizando num processo de retrofitting, logo,

$$V_{mn} = \textit{Custo de máquina nova similar} \quad \textbf{(48)}$$

Tomando-se as equações **(47)** e **(48)**, tem-se que o valor percentual dos custos de um retrofitting pode ser descrito conforme segue:

$$\%\text{Valor Retrofitting} = [C_{Ret} / V_{mn}] \times 100 \quad \textbf{(49)}$$

Além dos custos, o Tempo de Indisponibilidade de Máquina em Retrofitting T_{Ret} , dado em meses, também deve ser considerado. Normalmente os custos do processo de retrofitting já englobam os tempos segundo a equação **(47).** O tempo de Lead Time $T_{Lt,}$ dados em meses, denota o tempo necessário para se disponibilizar e colocar em funcionamento uma máquina nova similar, Logo, tem-se que:

$$\%\text{Tempo} = [T_{Ret} / T_{Lt}] \times 100 \quad \textbf{(50)}$$

A representação esquemática do Nível 3, a partir das equações (47), (48), (49) e (50), pode ser sumarizada pela Figura 41.

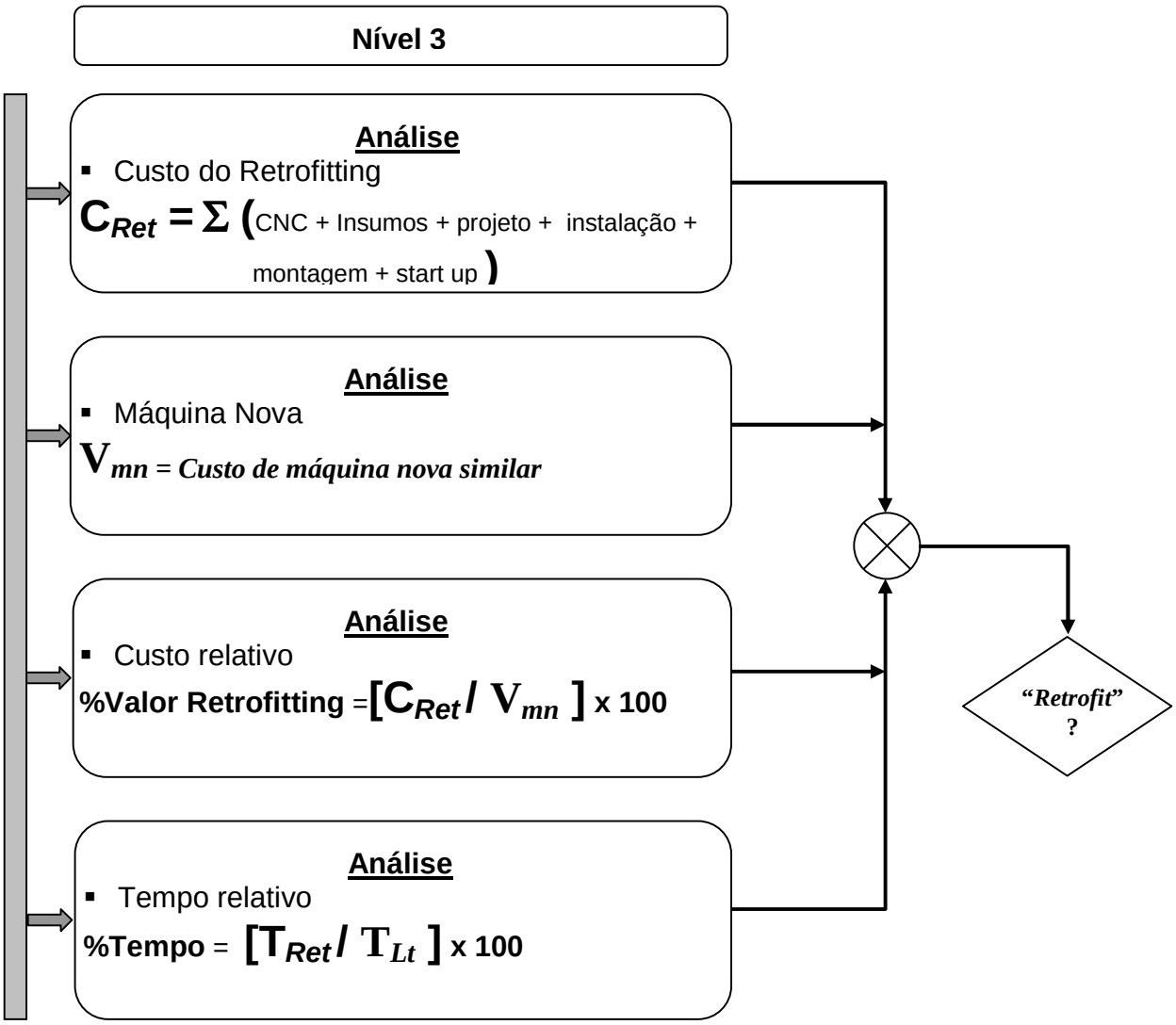


Figura 41 – Representação Esquemática da Análise de Custos - Nível 3.

Dessa forma, estabelecidos e definidos os valores para a análise de custos, é possível estabelecer valores comparativos e indicativos para o processo de *retrofitting*. Os valores indicados de custos são valores relativos. Deve-se considerar os aspectos de similaridade de uma MF para efeito de comparação. Estes aspectos não fazem parte do escopo do método.

A coluna denominada Faixa de Preços na Tabela 16 (Valores Indicativos para Tomada de Decisão – Nível 3) é orientativa e reflete somente algumas máquinas consideradas para efeito dessa análise.

Tabela 16 – Valores Indicativos para Tomada de Decisão – NÍVEL 3

Faixa de Preços R$ * 1000	**%Valor *Retrofitting*** $=[C_{Ret} / V_{mn}] \times 100$	**Tempo Médio do Processo de *Retrofitting* (*)**
50K ~ 300K	20% ~ 30%	40 ~ 60 dias
300K ~ 800K	40%	60 ~ 90 dias
> 800K	50% ~ 60%	120 dias

(*) *O tempo médio foi estimado a partir da configuração de processos de retrofitting e de tamanho de amostra superior a 100 máquinas. Entretanto, não necessariamente implica que os processos foram implantados.*

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O método proposto pôde ser aplicado em varias MFs com características e funções distintas, com o objetivo de validar o método. Nem todas as máquinas analisadas puderam ser acompanhadas ou ter o método aplicado desde o início do processo de análise. Algumas, no momento da validação do método, já tinham iniciado o processo de *retrofitting*, inviabilizando a aplicação da metodologia. No entanto, os resultados mostram que continuaram a ser válidos, mesmo sendo aplicados em um estágio posterior.

O universo de máquinas, onde se pretendia a principio aplicar o método proposto neste trabalho, não pode ser ampliado, devido principalmente aos custos envolvidos e as dificuldades de acesso em algumas instalações industriais. As dificuldades, neste caso, devem ser interpretadas como dificuldades com relação aos aspectos econômicos das empresas acessadas. A maioria não tinha nenhum plano pré-estabelecido ou mesmo interesse em que se aplicasse um estudo de *retrofitting* em suas máquinas.

Outras empresas, por sua vez, permitiram a condução de vários estudos e elaboração de cenários de configurações de máquinas com novas plataformas de CNC, o que permitiu construir uma base de dados e um campo amostral maior para as análises.

Os casos de estudo possíveis puderam ser aplicados em quatro (4) máquinas diferentes, cujos resultados estão sumarizados a seguir. Dois (2) tipos de aplicações especiais foram conduzidos em máquinas de furar vigas do Tipo I, porém, considerando uma aplicação muito particular, o método não pôde ser totalmente empregado. Havia uma falta considerável que dados que poderia resultar em valores não totalmente confiáveis, devido principalmente a falta de comparação com outras aplicações neste tipo de máquina.

4.1. Caso 1 - Mandriladora UNION BT-125.

O método foi aplicado na Mandriladora UNION BT-125, cujos resultados estão sumarizados e descritos na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores Numéricos Resultantes - UNION BT-125.

Coeficiente / Índice	Definição	Resultado	Observação
C_{im}	Indisponibilidade de Máquina	1	Máquina estava parada a mais de 6 meses devido a problemas mecânicos.
C_{mn} *(%)*	Manutenção	-	Não havia registro de acompanhamento dos custos de manutenção da máquina.
FNC_d (%)	Degradação Tecnológica	100%	Máquina convencional. Requisito foi o de transformar em Máquina CNC.
I_{dtt}	Documentação Técnica	3	Documentação somente alguns dados mecânicos do sistema do cabeçote
I_{cm}	Complexidade de Máquina	0,95	Máquina com 5 eixos coordenados + 2 sistemas auxiliares
I_{mdt}	Índice Mínimo da Documentação Técnica	9	Impacto na definição das rotinas de PLC e funções auxiliares da máquina. Impacto no redimensionamento das funções de troca de faixa de cabeçote.
C_{Ret}	Custo do Retrofitting	R$500.000,00	Valores aproximados. Alguns custos não foram revelados pelo Cliente
%Valor Retrofitting	Variação Retrofitting x Máquina Nova	~ 30%	
%Tempo	Tempo do Retrofitting em relação ao Lead Time	66%	

A máquina está ilustrada na Figura 42. A máquina é datada como fabricada em 1954. Originalmente possuía características de máquina convencional com todos os comandos

executados a partir de um único motor AC 12KW e uma série de comandos de movimentação por meio de embreagens eletro-magnéticas

.

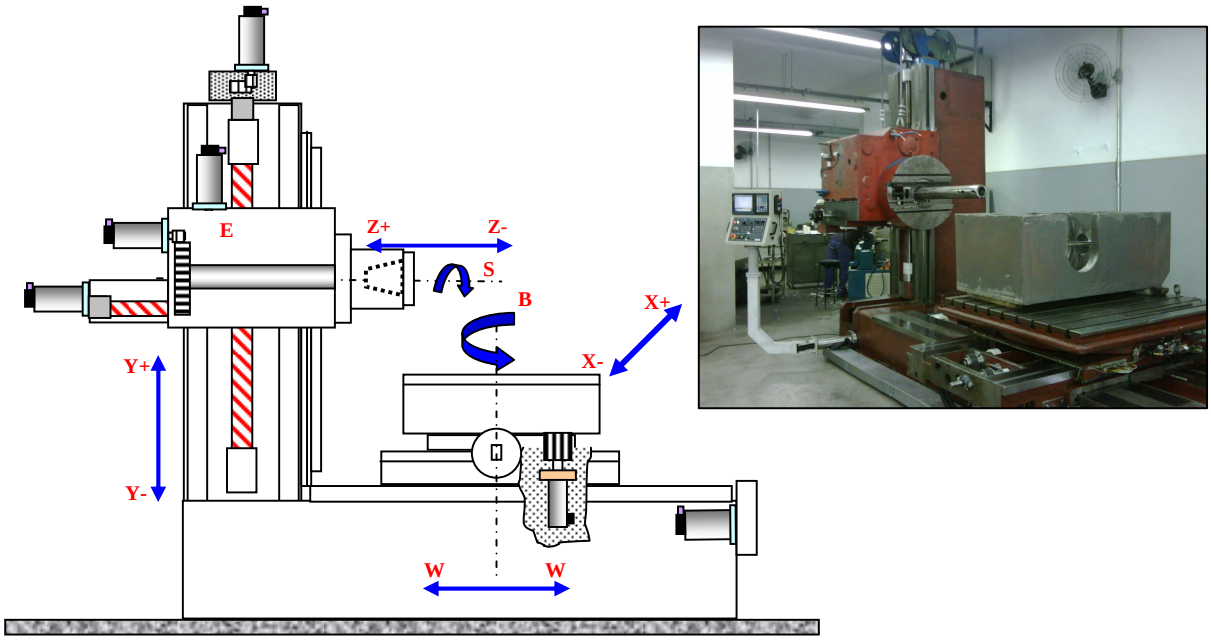


Figura 42 – Mandriladora UNION BT-125

Pode ser descrita como Mandriladora Horizontal de grande porte, com as seguintes características básicas:

- Cursos dos eixos maior que 2500mm
- Altura do eixo Y (Vertical) = 3500mm;
- Peso admissível sobre a mesa (Eixo B) até 3500kg;
- Potencia do eixo-árvore = 18.5Kw;
- Servos Motores de 12 a 49Nm, dependendo dos eixos coordenados;
- Envelope de trabalho aproximado de 2500mm x 1200mm no plano XZ;
- Interpolação simultânea de 4-eixos, com total de 6-eixos coordenados.

Caracteriza-se como configurada originalmente com sistema eletro-mecânico, sem nenhum recurso de automação. O processo de *retrofitting* foi fundamentado na necessidade de

disponibilizar nesta máquina os recursos de automação com CNC, enfatizando que não havia nenhum recurso de automação em sua configuração original.

O dimensionamento da motorização (servos e eixo árvore) foi fundamentado em dados mecânicos da estrutura original da máquina. Não havia documentação original da máquina. No entanto, devido à falta de documentação original da máquina, os dados de massa dos conjuntos foram conseguidos, onde aplicável, pesando-se cada conjunto em separado. Os demais foram calculados em função dos dados dos dados dos fusos de esfera, adaptados como itens mecânicos, esforços, avanços, potência para remoção de cavacos, ciclos específicos, dentre outros.

A aplicação dessa massa de dados permitiu o dimensionamento da motorização, conseqüentemente, o dimensionamento dos servos drives, dos elementos proteção, elementos da linha física de emergência, rotinas de segurança, dimensionamento dos cabos elétricos, layout e distribuição dos componentes. O software aplicativo – denominado de PLC – e suas rotinas de intertravamentos foram desenvolvimentos a partir do zero, já que não havia nenhuma documentação técnica original da máquina, posto que a máquina era, originalmente, sem automação.

As maiores dificuldades encontradas se resumiram nas definições dos ciclos específicos do sistema de engrenamento original do cabeçote – troca de faixas – o que impactou o tempo antes previsto de disponibilização da máquina para a produção. Aspectos mecânicos e geométricos, tais como, alinhamento do sistema de guias, mancalização dos fusos de esfera, comportamento do conjunto correias-polias, impactaram também a parte da automação da máquina.

Não foram observadas dificuldades no processo de tomada de decisão pelo *retrofitting* quando se considera os aspectos financeiros, indisponibilidade de máquina e projetos eletro-eletrônicos. A tomada de decisão exigiu mais em relação aos aspectos mecânicos devido à complexidade e custos na conversão de todo sistema comandado via embreagens eletro-magnéticas para um sistema servo acionado.

4.2. Caso 2 – Geradora de Perfil de Engrenagem PFAUTER 800.

O método foi aplicado na Geradora de Engrenagem PFAUTER P800, cujos resultados estão sumarizados e descritos na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores Numéricos Resultantes – PFAUTER 800

Coeficiente / Índice	Definição	Resultado	Observação
C_{im}	Indisponibilidade de Máquina	0,75	Máquina operando com precariedade no meio produtivo.
$C_{mn\ (\%)}$	Manutenção	-	Não havia registro de acompanhamento dos custos de manutenção da máquina.
FNC_{d} (%)	Degradação Tecnológica	100%	Máquina convencional. Requisito foi o de transformar em Máquina CNC.
I_{dtt}	Documentação Técnica	2	Documentação incompleta
I_{cm}	Complexidade de Máquina	0,95	Máquina com 4 eixos coordenados + sistema de sincronismo entre peça/ferramenta.
I_{mdt}	Índice Mínimo da Documentação Técnica	9	Impacto na definição das rotinas de PLC. Funções de sincronismo. Transformar sistema CAMS mecânico em eletrônico. Sistema de proteção para recuo automático da ferramenta na presença de queda de energia.
C_{Ret}	Custo do Retrofitting	R$295.000,00	Valores aproximados. Alguns custos não foram revelados pelo Cliente
%Valor Retrofitting	Variação Retrofitting x Máquina Nova	~ 45%	
%Tempo	Tempo do Retrofitting em relação ao Lead Time	54%	

A máquina PFAUTER 800 é definida como uma geradora de perfil de engrenagem. A máquina é datada como fabricada em 1970. Originalmente, possuía características de máquina convencional com todos os comandos executados a partir de motorização AC de indução, comandados por meio de elementos elétricos e um sistema mecânico de sincronismo por meio de um cames mecânico que acionava a ferramenta (caracol) e a mesa giratória (peça).

O dimensionamento da motorização (servos e eixo árvore) foi fundamentado em dados mecânicos da estrutura original da máquina. Não havia documentação original da máquina. No entanto, devido à falta de documentação original da máquina, os dados de massa dos conjuntos foram conseguidos, onde aplicável, pesando-se cada conjunto em separado. Os demais foram calculados em função dos dados dos dados dos fusos de esfera, adaptados como itens mecânicos, esforços, avanços, potência para remoção de cavacos, ciclos específicos, dentre outros.

A aplicação dessa massa de dados permitiu o dimensionamento da motorização, conseqüentemente, o dimensionamento dos servos drives, dos elementos proteção, elementos da linha física de emergência, rotinas de segurança, dimensionamento dos cabos elétricos, layout e distribuição dos componentes. Adicionalmente, foi desenvolvido um sistema de segurança microprocessado para retração automática dos eixos, de forma sincronizado, quando detectado queda de energia como forma de reduzir os riscos de danos à peça e ou à ferramenta.

O software aplicativo – denominado de PLC – e suas rotinas de intertravamentos foram desenvolvimentos a partir do zero. Ciclos customizados para facilitar a programação de perfis de engrenagens retas e cônicas também foram desenvolvidos.

A complexidade na aplicação do método de *retroffiting* neste tipo de máquina foi devido à sua característica original, ou seja, todo seu sistema de sincronismo ferramenta-peça era feito de forma mecânica. Converter todo esse sistema mecânico para um sistema servo acionado exigiu cerca de 300 horas/homem de engenharia.

Outro ponto que pode ser descrito como complexo, dentro do processo de tomada de decisão, foi em relação à necessidade de se manter o sincronismo do conjunto ferramenta-peça mesmo na ausência de energia. Isso resultou no desenvolvimento de um sistema microprocessado, permitindo interfacear o comportamento do conjunto ferramenta-peça e os sistemas de servo acionamento ao CNC.

4.3. Caso 3 – Retifica Cilíndrica LANDIS.

O método foi aplicado na Retífica Cilíndrica LANDIS, cujos resultados estão sumarizados e descritos na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores Numéricos Resultantes – Retifica LANDIS

Coeficiente / Índice	Definição	Resultado	Observação
C_{im}	Indisponibilidade de Máquina	0,75	Máquina operando com precariedade no meio produtivo.
$C_{mn\ (\%)}$	Manutenção	-	Não havia registro de acompanhamento dos custos de manutenção da máquina.
FNC_{d} (%)	Degradação Tecnológica	100%	Máquina convencional. Requisito foi o de transformar em Máquina CNC.
I_{dtt}	Documentação Técnica	4	Documentação incompleta
I_{cm}	Complexidade de Máquina	0,3	Máquina com 2 eixos coordenados + sistema de medição de peças e funções de Inclined Axis com cálculos tangencias devido à construção física da máquina
I_{mdt}	Índice Mínimo da Documentação Técnica	2	Impacto na definição das rotinas de PLC. Rotinas de customização para dressagem do rebolo e outrs funções.
C_{Ret}	Custo do Retrofitting	R$145.000,00	Valores aproximados. Alguns custos não foram revelados pelo Cliente
%Valor Retrofitting	Variação Retrofitting x Máquina Nova	~ 32%	
%Tempo	Tempo do Retrofitting em relação ao Lead Time	40%	

Originalmente a Retífica Cilíndrica LANDIS, possuía características de máquina convencional com todos os comandos executados a partir de motorização AC de indução, comandados por meio de elementos elétricos e um sistema hidráulico de aproximação e recuo do rebolo, atuando em ciclos normais de operação ou em condições de emergência.

O dimensionamento dos servo acionamentos (potencia, torque, rotação) e ainda os aspectos mecânicos (grau de proteção, ponta de eixo, flangeamentos) foram fundamentados em verificação na própria máquina devido a falta de documentação original da máquina. O motor do acionamento do rebolo foi mantido como originalmente definido, porém, adicionando-se um módulo de saída analógica e um Inversor de Freqüência para seu controle. De forma análoga, aplicou-se a mesma solução ao sistema porta-peças..

O software aplicativo – denominado de PLC – e suas rotinas de intertravamentos foram desenvolvimentos a partir do zero. Ciclos customizados para facilitar a programação de perfis diversos e de ciclos de dressagem do rebolo foram também desenvolvidos. Adicionalmente, foi desenvolvido um sistema de segurança para retração automática do rebolo, independente do tipo de operação da máquina. Este sistema exigiu a criação de rotinas especiais no próprio CNC, interfaceando suas funções com rotinas do PLC.

A aplicação do método de *retroffiting* neste tipo de máquina pode ser considerada de baixa complexidade. Algumas limitações tiveram que ser contornadas devido ao custo da solução de retrofitting. A relação custo de máquina e custo da solução, se não atentamente observada, poderia inviabilizar o processo.

4.4. Caso 4 – Torno Paralelo Horizontal TRAUB TNA480.

O método foi aplicado no Torno Paralelo Horizontal TRAUB TNA480, cujos resultados estão sumarizados e descritos na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores Numéricos Resultantes – TRAUB TNA480

Coeficiente / Índice	Definição	Resultado	Observação
C_{im}	Indisponibilidade de Máquina	1	Máquina parada.
$C_{mn\ (\%)}$	Manutenção	-	Não havia registro de acompanhamento dos custos de manutenção da máquina.
FNC_{d} (%)	Degradação Tecnológica	> 70%	Máquina convencional. Requisito foi o de transformar em Máquina CNC.
I_{dtt}	Documentação Técnica	10	Documentação completa
I_{cm}	Complexidade de Máquina	0	Máquina com 2 eixos coordenados + sistema de medição de peças e funções de Inclined Axis com cálculos tangencias devido à construção física da máquina
I_{mdt}	Índice Mínimo da Documentação Técnica	1	Impacto na definição das rotinas de PLC. Rotinas de customização para dressagem do rebolo e outrs funções.
C_{Ret}	Custo do Retrofitting	R$100.000,00	Valores aproximados. Alguns custos não foram revelados pelo Cliente
%Valor Retrofitting	Variação Retrofitting x Máquina Nova	~ 18%	
%Tempo	Tempo do Retrofitting em relação ao Lead Time	200%	

A máquina é datada como fabricada em 1991. Originalmente, esta máquina já possuía características de máquina CNC, com elementos de automação como Torre e Contra Ponto hidráulicos, sistema de troca de faixas do cabeçote por meio de caixa de engrenagem controlada pela lógica do PLC, sistema centralizado de lubrificação das guias e sistema de compensação de peso vertical do Eixo X.

O dimensionamento da motorização (servos e eixo árvore) foi fundamentado na motorização original da máquina. Os dados de placa dos motores se encontravam preservados, o que facilitou o levantamento dos dados. Estes dados foram, no entanto, confrontados com os dados originais da máquina, considerando que as documentações originais também estavam preservadas e completas, o que facilitou sobremaneira nas análises.

A verificação dos flanges da motorização foi considerada e os novos servos motores foram definidos com flanges 100% compatíveis com as dimensões originais da máquina, reduzindo-se os custos da mecânica. O software aplicativo – denominado de PLC – e suas rotinas de intertravamentos foram desenvolvimentos a partir das definições da documentação elétrica da máquina. As rotinas de segurança do sistema de contra ponto hidráulico foram redefinidas a partir dos dados técnicos contidos na documentação original da máquina.

O processo de tomada de decisão considerou os custos iniciais do processo, tempo de indisponibilidade de máquina em relação a uma máquina similar nova. Os resultados puderam antecipar sobremaneira o processo de *retrofitting*, indicando a tomada de decisão correta pelo *retrofitting*.

5. CONTRIBUIÇÃO FUTURA

O método proposto neste trabalho, sobretudo quando de sua validação, abordou diversas máquinas com características chamadas de máquinas convencionais. As máquinas convencionais, principalmente as de porte maior, se apresentam com potencial considerável ao *retrofitting*. Assim é possível sugerir, como contribuição futura, a proposta do modelamento de um coeficiente adicional, denominado de Coeficiente de Atualização Tecnológica, considerando que existem máquinas convencionais, que dada às suas características construtivas e de funções, podem apresentar-se como equipamentos com potencial para se tornarem máquinas a CNC. Casos em que o método foi aplicado em máquinas antes convencionais, mostraram resultados favoráveis pelo *retrofitting*.

A aplicação do método proposto neste trabalho requer o levantamento e o tratamento de uma série de dados de forma manual. A migração do método para uma modelamento computacional, objetiva facilitar sua aplicação e uso nos processos de tomada de decisão. É possível ainda que o método possa ser incorporado em conjunto com outras ferramentas de controle de manutenção de máquinas.

O tema de estudos sobre o perfil de consumo de energia em MF se mostrou vasto e extenso. Diversas literaturas abordam sistemas de monitoramento de energia, propõem e discutem modelos diversos. No entanto, quase não se observa ligação desses estudos com a realidade do chão-de-fábrica, significando que os modelos se aplicam no mapeamento do consumo de energia, por exemplo, mas não modelam soluções. Assim, como contribuição futura, é possível sugerir a proposta de um modelo agente (*Software* e *Hardware*) que permita acompanhar e rastrear o consumo de energia de uma máquina, ou um conjunto delas, associando ou combinando o consumo aos aspectos da degradação tecnológica, por exemplo. Isso poderia se constituir num novo coeficiente ou índice, refinando ainda mais o processo de tomada de decisão.

6. CONCLUSÕES

O método proposto é orientativo e não excludente, endereçando e propondo a definição dos coeficientes e índices numéricos a partir das fundamentações discutidas.

Dentro do modelo proposto, foi possível endereçar os três níveis principais, englobando os coeficientes e índices numéricos, cujos resultados numéricos permitiram orientar um processo de tomada de decisão de *retrofitting* de MFs. Os índices e coeficientes foram aplicados e validados em Torno, Retífica, Máquina Geradora de Perfil de Engrenagem e Mandriladora com sucesso. Dessa forma, o método pode ser validado no campo em máquinas com funções, dimensões e caracteristicas heterogêneas, que permitiram verificar o comportamento do método proposto.

Máquinas consideradas de maior valor agregado e que demandariam investimentos consideráveis na aquisição de uma máquina nova, puderam se beneficiar da aplicação do processo de *retrofitting* como foi, por exemplo, o caso da Mandriladora UNION BT-125 e da Geradora de Perfil de Engrenagem PFAUTER. Os ganhos e incrementos de tecnologia puderam ser observados nas máquinas onde o processo foi endereçado e os resultados operacionais e de produtividade puderam ser acompanhados quando as máquinas foram novamente colocadas em funcionamento no chão-de-fábrica.

Máquinas de menor valor agregado também puderam se beneficiar da aplicação do método dentro do processo de tomada de decisão, sobretudo quando se considerou os aspectos dos custos do *retrofitting*, do tempo de *retrofitting versus* tempo de aquisição de máquina similar nova, mostrando a validade da aplicação do método proposto. Assim, a aproximação com a realidade do chão-de-fábrica, sobretudo pela falta de modelos e propostas que pudessem abordar os processos de *retrofitting* de MFs, mostrou-se favorável quando da aplicação do método e da proposta de soluções de *retrofitting*.

O perfil de consumo de energia das MFs não pôde ser verificado. Esse aspecto não é parte integrante do método proposto neste trabalho. No entanto, mesmo assim é possível concluir, fundamentando-se nas simples verificação do comportamento dinâmico das máquinas e das soluções aplicadas em seus vários elementos de automação, que existiram ganhos também neste sentido.

Os conceitos de *green machining* e *green manufacturing* em termos gerais não são ainda realidades nas diversas instalações industriais visitadas quando da aplicação do método e ou dos processos de *retrofitting*. No entanto, notam-se preocupações com as questões do descarte de resíduos, do reaproveitamento da matéria prima, na melhoria do ambiente produtivo, dentre outros. Ainda não faz associação entre estes conceitos e o processo de *retrofitting*.

A demanda por máquinas pesadas ou máquinas consideradas de grande porte, sobretudo máquinas do tipo Mandriladora e Centros de Usinagem com envelopes de trabalho sobre a mesa XY na ordem de 2000mm x 1000mm, apresentam-se com potencial para *retrofitting*, sobretudo pela demanda na fabricação de insumos na área de energia. Há um parque considerável de máquinas com essas características básicas, mas com considerável degradação tecnológica. Isto constitui um passivo onde a aplicação do método proposto sugere mais bem indicar os processos de tomada de decisão.

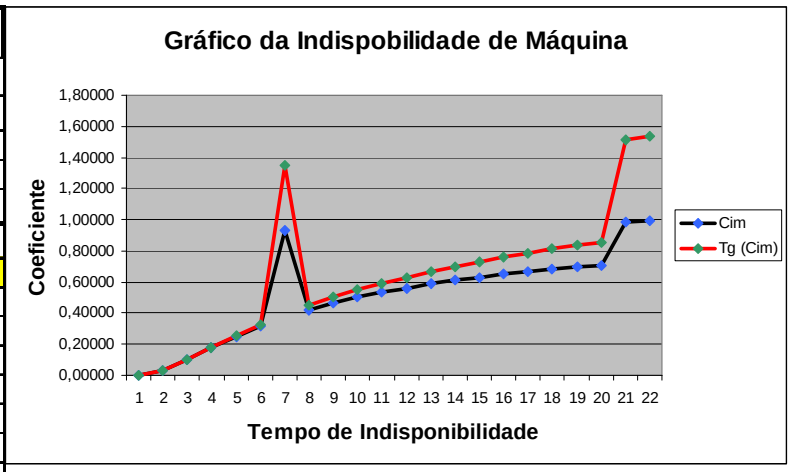
As evoluções das plataformas de CNC, com disponibilidade de novos recursos de automação, criação de rotinas e funções customizadas, permitiram a aplicação do *retrofitting* em vários casos, especialmente em máquinas geradoras de perfis de engrenagem e retíficas, as quais, de modo geral, se destacam das aplicações convencionais em relação a outros tipos de MFs.

Finalmente, a partir da complexidade do universo de uma MF e suas características funcionais e mesmo de sua arquitetura construtiva, principalmente as de maior porte, é natural que considerações adicionais , e mesmo variáveis, podem e devem ser feitas como incremento à ao método proposto. A falta de trabalhos e investigações que abordassem as questões de retrofitting, obsolescência de MFs, tecnologia, dentre outros, permitiu o desenvolvimento do trabalho e permitiu que o mesmo fosse endereçado em diversas máquinas, concluindo pela sua aplicabilidade.

APÊNDICE – Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina.

Coeficiente de Indisponibilidade de Máquina $C_{im} = 1000\text{horas}^{(1/-t)}$

Tempo	C_{im}	Tg (C_{im})
1	0,00100	0,001
2	0,03162	0,031633322
3	0,10000	0,100334672
4	0,17783	0,17972643
5	0,25119	0,256608448
6	0,31623	0,327208116
100	**0,93325**	**1,350019115**
8	0,42170	0,448608923
9	0,46416	0,500639256
10	0,50119	0,54784505
11	0,53367	0,590857461
12	0,56234	0,630215956
13	0,58780	0,666376378
14	0,61054	0,699723291
15	0,63096	0,730582031
16	0,64938	0,759229127
17	0,66608	0,785900931
18	0,68129	0,810800607
19	0,69519	0,834103784
20	0,70795	0,855963107
500	**0,98628**	**1,511388319**
1000	**0,99312**	**1,534076388**



Os valores indicados como tempo = 100; 500 e 1000 são valores somente para efeito visual dos picos apresentados pelo C_{im}.

A coluna Tg, denota a curva tangente da função C_{im}.

APÊNDICE – Coeficiente de Manutenção.

MANUTENÇÃO

Área	Tópicos	Aplicável S/N	Qte. de Intervenções P/ Ano	Tempo Médio P/ Intervenção (h)	Tempo Médio Total de Intervenções (h)	Custo Médio p/ Intervenção (R$)	Custo Médio Total da Intervenção (R$)	Tempo Total Máquina Parada (h)	Custo Médio Hora/Máquina (R$)	Custo Total Hora/Máquina Parada P/ Ano (R$)	Custo Total Efetivo/Item	Custo Total/Área	Custo Total de Manutenção	Custo Normalizado (%)
													Valor Referência X Cim	Valor de Referência
								Cim		0,785301			R$ 235.770,28	R$ 300.000,00
Máquina - *Break Down*			Custos Médio Anual da Intervenção P/Item – CAI					Custo de Máquina Parada/Ano/Item						
1.0 - Cabeçote														
1.1	*Motor do Eixo Árvore*	1	1	10	10	R$ 2.000,00	R$ 20.000,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 20.000,00	R$ 20.000,00	R$ 20.000,00	8,48
1.2	*Sistema de Acionamento*	1	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.3	*Encoder 1:1*	1	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.4	*Acoplamentos*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.5	*Engrenamentos/Rolamentos*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.6	*Sistemas de Lubrificação*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.7	*Sistemas de Fixação de Peças*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.8	*Sistemas de Refrigeração*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
1.9	*Sistemas de Lubrificação*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.0 - Eixos Coordenados														
2.1	*Motor do Eixo X*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
2.2	*Motor do Eixo Y*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.3	*Motor do Eixo Z*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.4	*Motor do Eixo B*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.5	*Motor do Eixo N*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.6	*Sistemas de Feedback de Posição*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.7	*Acionamento do Eixo X*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.8	*Acionamento do Eixo Y*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.9	*Acionamento do Eixo Z*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.10	*Acionamento do Eixo B*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.11	*Acionamento do Eixo N*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.12	*Sistemas de Lubrificação*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
2.13	*Sistemas de Acoplamentos/Fusos/Guias*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.0 - Sistema de Troca de Ferramentas														
3.1	*Torre Porta Ferramentas Elétrica*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
3.2	*Torre Porta Ferramentas Hidraúlica*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.3	*Magazine Hidráulico*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.4	*Magazine Servo Acionado*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.5	*Sistema de Limpeza de Ferramentas*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.6	*Sistema de Fixação de Ferramentas*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
3.7	*Sistema de Fixação de Ferramentas*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
4.0 - Sistema de Troca de Pallets														
4.1	*Sistema Hidráulico*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
4.2	*Sistema Elétrico*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
5.0 - Sistemas Hidráulicos / Pneumáticos														
5.1	*Contra Ponto*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
5.2	*Luneta*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
5.3	*Dispositivos Especiais*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
5.4	*Sistemas de Segurança*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
6.0 - Unidade de Controle														
6.0	*CNC*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
6.1	*Interface com o Operador*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
6.2	*Painel de Operação*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
6.3	*Módulos de I/Os*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
6.4	*Parametrizações e Ajustes*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
7.0 - Posicionamento e Repetibilidade														
7.1	*Folgas Mecânicas nos Eixos*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00		
7.2	*Geometria dos Eixos Coordenados*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			
7.3	*Geometria do Sistema de Eixo Árvore*	0	0	0	0	R$ 0,00	R$ 0,00	0	R$ 0,00	R$ 0,00	R$ 0,00			

APÊNDICE – Coeficiente da Degradação Tecnológica.

Coeficiente da Degradação Tecnológica

Incremento Experimental X	X
0	1
0,1	1,105171
0,2	1,221403
0,3	1,349859
0,4	1,491825
0,5	1,648721
0,6	1,822119
0,7	2,013753
0,8	2,225541
0,9	2,459603
1	2,718282

0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
1	1,105171	1,221403	1,349859	1,491825	1,648721	1,8221188	2,0137527	2,2255409	2,459603	2,718282
KT0	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5	KT6	KT7	KT8	KT9	KT10
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

< = 30%				> 30% e <= 60%			> 60%			
Não Degradado				Indeterminado			Degradado			
0	**0,1**	**0,2**	**0,3**	**0,4**	**0,5**	**0,6**	**0,7**	**0,8**	**0,9**	**1**
2	2,210342	2,442806	2,699718	2,983649	3,297443	3,6442376	4,0275054	4,4510819	4,919206	5,436564
2	2,210342	2,442806	2,699718	2,983649	3,297443	3,6442376	4,0275054	4,4510819	4,919206	5,436564
4	4,420684	4,885611	5,399435	5,967299	6,594885	7,2884752	8,0550108	8,9021637	9,838412	10,87313
5	4,420684	4,885611	5,399435	5,967299	6,594885	7,2884752	8,0550108	8,9021637	9,838412	10,87313
6	6,631026	7,328417	8,099153	8,950948	9,892328	10,932713	12,082516	13,353246	14,75762	16,30969
6	6,631026	7,328417	8,099153	8,950948	9,892328	10,932713	12,082516	13,353246	14,75762	16,30969
8	8,841367	9,771222	10,79887	11,9346	13,18977	14,57695	16,110022	17,804327	19,67682	21,74625
8	8,841367	9,771222	10,79887	11,9346	13,18977	14,57695	16,110022	17,804327	19,67682	21,74625
10	11,05171	12,21403	13,49859	14,91825	16,48721	18,221188	20,137527	22,255409	24,59603	27,18282
10	11,05171	12,21403	13,49859	14,91825	16,48721	18,221188	20,137527	22,255409	24,59603	27,18282

5,327914492											
5,33	5,758319										
	5,76	6,363926									
		6,37	7,033226								
			7,04	7,772917							
				7,78	8,590402						
					8,6	9,4938624					
						9,5	10,492341				
							10,5	11,59583			
								11,6	12,81537		
									12,82	14,16318	
										14,17	
5,327914492	5,758319	6,363926	7,033226	7,772917	8,590402	9,4938624	10,492341	11,59583	12,81537	14,16318	
37,61807079	40,65697	44,9329	49,65853	54,88116	60,65307	67,032005	74,081822	81,873075	90,48374	100	**% Relativo**
0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	**Limite %**
-0,081218935	-0,185834	1,400155	-0,694392	10,30817	1,436921	1,7784104	-3,845733	0,1940483	-0,717607	-0,587214	**Tg(% Relativo)**

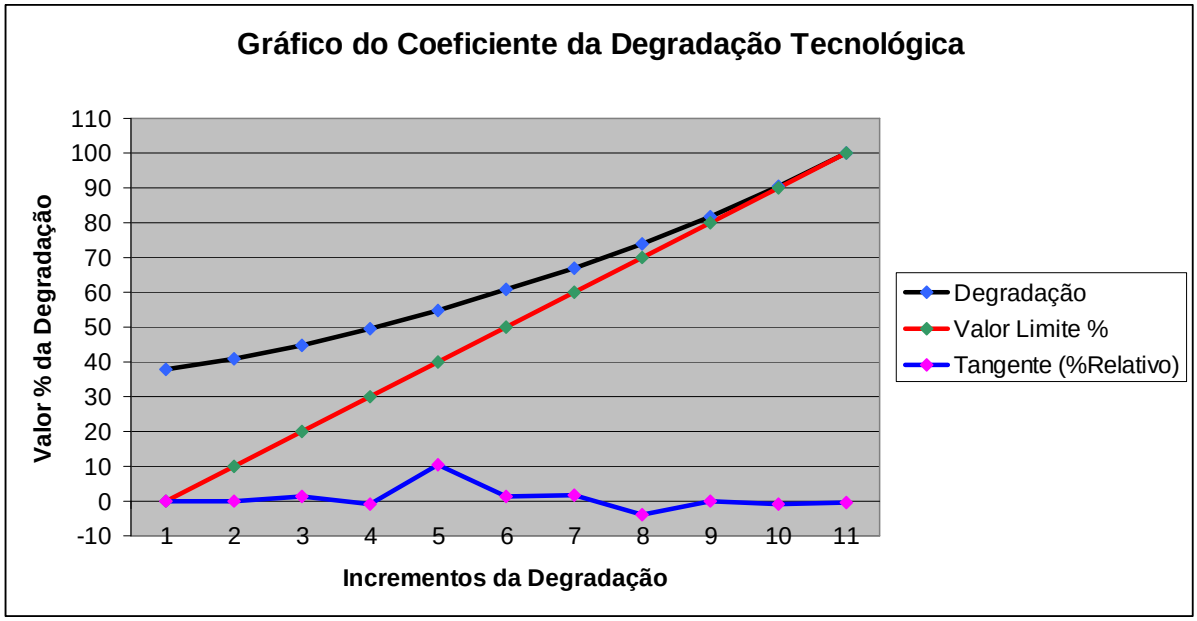
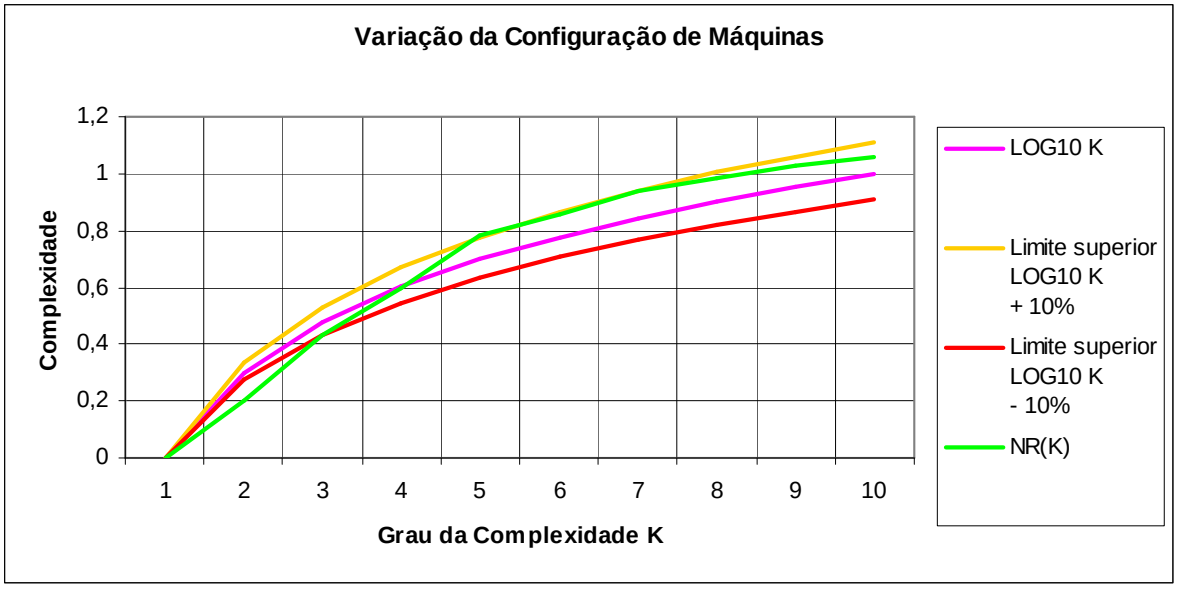


Gráfico do Coeficiente da Degradação Tecnológica
Valor % da Degradação
110
100
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
Incrementos da Degradação
Degradação
Valor Limite %
Tangente (%Relativo)

APÊNDICE – Complexidade da Máquina.

Variação da Configuração de Máquina											
K	Configuração e Custos					Média Geometrica dos Custos $M_{G(K)}$	Normalização $N_{R(K)}$	Valor Nominal de $N_{R(K)}$	LOG_{10} K	Limite superior LOG_{10} K + 10%	Limite superior LOG_{10} K - 10%
1	$M1_1$	$M1_2$	$M1_3$	...	$M1_{10}$	$M1_1 \sim M1_{10}$	$1 - \lvert M_{G(1)} / Vref \rvert$	0,003508587	0,00000	0,00000	0,00000
2	$M2_1$	$M2_2$	$M2_3$	...	$M2_{10}$	$M2_1 \sim M2_{10}$	$1 - \lvert M_{G(2)} / Vref \rvert$	0,211011811	0,30103	0,33448	0,27366
3	$M3_1$	$M3_2$	$M3_3$	...	$M3_{10}$	$M3_1 \sim M3_{10}$	$1 - \lvert M_{G(3)} / Vref \rvert$	0,427354586	0,47712	0,53013	0,43375
4	$M4_1$	$M4_2$	$M4_3$	...	$M4_{10}$	$M4_1 \sim M4_{10}$	$1 - \lvert M_{G(4)} / Vref \rvert$	0,589420605	0,60206	0,66896	0,54733
5	$M5_1$	$M5_2$	$M5_3$	...	$M5_{10}$	$M5_1 \sim M5_{10}$	$1 - \lvert M_{G(5)} / Vref \rvert$	0,781162859	0,69897	0,77663	0,63543
6	$M6_1$	$M6_2$	$M6_3$	...	$M6_{10}$	$M6_1 \sim M6_{10}$	$1 - \lvert M_{G(6)} / Vref \rvert$	0,857919696	0,77815	0,86461	0,70741
7	$M7_1$	$M7_2$	$M7_3$	...	$M7_{10}$	$M7_1 \sim M7_{10}$	$1 - \lvert M_{G(7)} / Vref \rvert$	0,934698707	0,84510	0,93900	0,76827
8	$M8_1$	$M8_2$	$M8_3$	...	$M8_{10}$	$M8_1 \sim M8_{10}$	$1 - \lvert M_{G(8)} / Vref \rvert$	0,984600267	0,90309	1,00343	0,82099
9	$M9_1$	$M9_2$	$M9_3$	...	$M9_{10}$	$M9_1 \sim M9_{10}$	$1 - \lvert M_{G(9)} / Vref \rvert$	1,034222981	0,95424	1,06027	0,86749
10	$M10_1$	$M10_2$	$M10_3$	...	$M10_{10}$	$M10_1 \sim M10_{10}$	$1 - \lvert M_{G(10)} / Vref \rvert$	1,057277624	1,00000	1,11111	0,90909



REFERÊNCIAS

Altintas, Y.; Brecher, C.; Weck, M.; Witt, S. **Virtual Machine Tool**. Annals of CIRP. 54/2:651-673.2005.

Altintas, Y.; Erkorkmaz, K.. **Feedrate Optimization for Spline Interpolation in High Speed Machine Tools**. Annals of the CIRP, 52/1:297-302.2003.

Amesquita, Tony; Hammond, Rick; Salazar, Marc; Brás, Bert, **Characterizing The Remanufacturability Of Engineering Systems.** Proceedings 1995 ASME Advances in Design. Automation Conference, Boston – 82 – (271-278). 1995.

Anderberg, S.E.; Kara, S.; Beno, T. **Impact of Energy Efficiency on Computer Numerically Controlled Machining.** Journal of Engineering Manufacturer. Volume 224. Part B., 2009.

Arnold, Heinrich M. **Technology shocks: Origins, Managerial Responses, and Firm Performance**. University of Munich. Munich School of Management. Institute for Innovation Research and Technology Management (INNO-TEC). 2003. 264 pgs.

Avram, Oliver Ioan; Xirouchakis, Paul. **Evaluating the Phase Energy Requirements of Machine Tool System**. Journal of Cleaner Production. Volume 19, Issues 6-7, April-May 2011, Pages 699-711, 2011.

Batista, José; Martins, Júlio S.; Afonso, João L. **Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC**. ISIE 2003 - IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Rio de Janeiro, Brasil, 9-11 Junho de 2003, ISBN: 0-7803-7912-8, 2003.

Banerjee, Blabatosh. **Cost Accounting Theory and Practice**. Twelfth Edition – Eastern Economy Edition, ISBN: 81-203-2894-9, 2006.

Bras, Bert; Hammond, Rick. **Towards Design for Remanufacturing – Metrics for Assessing Remanufacturability**. System Realization Laboratory. The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering. Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia, USA. Proceedings of the 1st International Workshop on Reuse, (S.D. Flapper and A.J. de Ron eds.), Eindhoven, The Netherlands, pp. 5-22, November 11-13. 1996.

Burk, S.; Goughran, W. Developing a Framework for Sustainability Management in Engineering SMEs. Robotic and Computer Integrated Manufacturing, 23 (696-703). 2007.

Bernard, Sofhie. Remanufacturing. **Journal of Environmental Economics and Management. 2009.** University Paris 1 Panthon-Sorbonne. Paris School of Economics. Centre díÈconomie de la Sorbonn. Abril, 2011. http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/59/40/51/PDF/11027.pdf. Acessado em 30/12/2011.

Carlton, Dennis W.; Waldman, Michael. **Competition, Monopoly, and Aftermarkets**. The Journal of Law, Economics, & Organization, Vol. 26, Issue 1, pp. 54-91, 2009.

Catty, P. James. **Wiley guide to fair value under IFRS, International Financial Reporting Standards.** John Wiley & Sons, ISBN: 9780470477083, 2010. 590 páginas.

Chaturvedi, Pradeep et al. **Modern Trends in Manufacturing**. The Institution of Engineers (INDIA). Delhi State Center. ISBN 81-7022-645-7. First Published 1998.

Dahmus, Jeffrey B.; Gutowsky, G, Timothy. **An Environmental Analysis of Machining**. Proceedings of IMECE. ASME International Mechanical Engineering Congress of RD&D EXPO. November. 13-19, 2004, Anaheim, CA, USA., 2004.

Datta, Tapan K. **Concept of Survivor Curve and Probable Life Curve.** www.eng.wayne.edu/.../**CE7640_Probable_Life_**... Acesso em 21/12/2011

Denkena, B.; Holz, C. **Advanced Position and Force Control Concepts for the Linear Direct Driven Hexapod PaLiDA**, Proc. 5th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, 33:359-378. 2006.

Diaz, Nancy.; Moneer, Helu.; Dornfeld, David. **Design and Operation Strategies for Green Machine Tool Development**. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Dept. of Mechanical Engineering. University of California, Berkeley. The Proceedings of MTTRF 2010 Annual Meeting, 2010.

Diaz, Nancy et al. **Environmental Analysis of Milling Machine Tool Use in Various Manufacturing Environments**. Laboratory for Manufacturing and Sustainability. Dept. of Mechanical Engineering. University of California, Berkeley. 2010.

Deif, Ahmed, M. **A System Model for Green Manufacturing. Journal of Cleaner Production**.19. (1553 – 1559). 2011.

Dorf, Richard C. **Technology, Humans, and Society: Toward a Sustainable World**. Academic Press. 2001.500 pgs.

Du, Y., et al. **An integrated Method for Evaluating the Remanufacturability of Used Machine Tool.** Journal of Cleaner Production. 1-10. 2011.

Elmaraghy, Hoda A.; Elmaraghy W.H. **Advances in Design**. Springer. 2006. 14th CIRP International Design Seminar held in May 2004. 576 pgs.

Ferreti, Giani.; Magnani, GianAntonio.; Rocco, Paulo. **Virtual Prototyping of Mechatronic Systems**. Annuals Review in Controls. Dipartimento di Elletronica e Informazione, Politecnico di Milano, 2004.

Fiksel, J. **Design for Environment: Creating eco-efficient products and processes**. McGraw-Hill, New York. 1996.

Graham, Dom. Going Dry. **Manufacturing Engineering**, 124, Issue 1. (72-78). 2000

Hesselbach, Jurgen; Herrmann, Christoph. **Globalized Solutions for Sustainability in Manufacturing.** Proceedings of the 18th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, May 2nd - 4th 2011.

Hoffman, Andrew, J. **Competitive Environmental Strategy. A Guide to the Changing Business Landscape**. Island Press, 2000. 301 pgs.

Jang, U-Il et al. **Development of a Web-Based Remote Monitoring System for Evaluating Degradation of Machine Tools Using ART2**. IEEE. 2008.

Jardine, Andrew, K.S.; Lin,Daming; Banjevic, Dragan. **A Review on Machinery Diagnostics and Prognostics Implementing Condition-Based Maintenance**. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (1483-1510), 2006.

Jiang, Zhigang; Zhang, Hua; Sutherland, John W. **Development of multi-criteria decision making model for remanufacturing technology portfolio selection**. Journal of Cleaner Production. (19).1939-1945. 2011.

Jedrzejewski, J.; Kowal, Z.; Kwasny, W.; Modrzycki. W. **High-speed Precise Machine Tools Spindle Units Improving**. Journal of Materials Processing Technology. 162-163:615-621.2005.

Jovane, F.; Koren, Y.; Boer, N. **Present and Future of Flexible Automation: Towards New Paradigm**. CIRP Annals 52 (2). (543-547). 2003.

Kalpakjian, S.; Schmid, S. **Manufacturing Engineering and Technology**, Fourth Edition, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey. 2001.

Krar, Stephen, F.; Gill, Arthur R. **Exploring Advanced Manufacturing Technologies.** Industrial Press Inc. First Edition. 2003. 448 pgs.

Klenke, F., Muller, V.; Hofmann, W. Energy Optimal Motion Control of Servo Motors and Downsizing of Components. Dresden University of Technology. Department of Electrical Machines and Drives. 2011. Helmholtzstraße 9, 01069 Dresden, Germany

Linton, J.D.; Yeomans, J.; Yoogalingam, R. Supply Planning for Industrial Ecology and Remanufacturing under Uncertainly: A Numerical Study of Leaved-Waste Recovery from Television Disposal. Journal of Operational Research Society. 53 (1185-1196). 2002.

Lund, R. **The Remanufacturing Industry**. Boston, Massachusetts: Boston University. 1996.

Mazhar, M. I.; Kara, S. ; Kaebernick, H. **Remaining Life Estimation of Used Components in Consumer Products: Life Cycle Data Analysis by WEIBULL and Artificial Neural Networkd**. Journal of Operations Management. 25 (1184-1193). 2007.

Melnyk, S.A; Sroufez, R.P.; Montabon, F.L.; Hinds, T.J. **Green MRP: Identifying the Material and Environmental Impacts of Production Shedules**. International Journal of Production Research 39. (8). (1559-1573). 2001.

Mohnty, R.P., Deshmukh, S.D. **Managing Green Productivity. Some Strategic Directions**. Production Planning and Control 9 (7). (624-633). 1998.

Moreira, Alexandre Candido et al. **Measurement and Signal Processing Using Labview**. PEQ/EEEC/Universidade Federal de Goiás. VI INDUSCON - VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais – Joinville – SC, 2004.

Naderj, A. **Productive Design. A new design attitude**. Proceeding of APO World Conference on Green Productivity. (178-182). Manila. 1996.

Narita et al. **Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation** (1st report, Proposal of calculation method for environmental burden). JSME Int. J., Ser., C. 49(4), 1188–1195.2006.

Neugebauer, R.; Denkena, B.; Wegener, K. **Mechatronic Systems for Machine Tools**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. Volume 56, Issue 2, 2007, Pages 657–686. 2007.

Neugebauer, R.; Wabner, M.; Rentzsch, H.; Scheffler, C.; Kolesnikov, A. **Development Approaches for Energy Efficient Machine Tool Structures**. Proceedings from IMS2020 Summer School on Sustainable Manufacturing. 26-28 May. ETH Zurich, Swittzerland. 2010.

Nonaka, Ikujiro; Nishiguchi, Toshihiro. **Knowledge Emergence: Social, Technical and Evolutionary Dimensions of Knowledge**. Oxford University Press. ISBN: 0-19-513063-4, 2001.

Pannerselvam, R. **Engineering Economics.** Prentice-Hall of India. ISBN-81-203-1743-2. 2001. 289 pgs.

Rajput, R. K. A. **Textbook of Manufacturing Technology: (manufacturing processes).** Laxmi Publications (P) LTD. 2008. 899 pgs.

Saaty, T.L..**The Analytic Hierarchy Process**. MacGraw Hill. New York. 1980.

Santos, Reginaldo Fagundes dos; Viagi, Arcione Ferreira. **Uso do Método AHP (Analytic Hierarchy para Otimizar a Cadeia de Suprimentos Durante o Desenvolvimento Integrado de Produtos**. 2009. Disponível em http://www.simpoi.fgvsp.br/arquivo/2009/artigos/E2009_T00337_PCN85503.pdf. Acessado em 03/01/2012.

Seliger, G.; Consiglio, S.; Zettl, M.M. Selling Use Instead of Selling Product – Technological and Educational Enables for Business in Ecological Product Life Cycles. The 11th International CIRP Life Cycle Engineering Seminar of Product Life Cycle – Quality Management Belgrade, Serbia. 17-21. 2004.

Shibata, Tomoatsu; Yano, Masaharu; Kodama, Fumio. **Empirical analysis of evolution of product architecture: Fanuc numerical controllers from 1962 to 1997.** Research Policy, Volume 34, Issue 1, February 2005, Pages 13-31.

Smith, Vanessa M.; Keoleian, Gregory A. **The Value of Remanufactured Engines – Life-Cycle Environmental and Economic Perspectives**. Journal of Industrial Ecology, Volume 8.,Number 1-2, pp 193-221. 2004.

Sreejith, P.S; Ngoi, B.K.A. **Dry machining: Machining of the future**. Journal of Materials Processing Technology, 101, pp. 287-291. 2000.

Stanford, M.; Lister, P.M. **The Future Role of Metalworking Fluids in Metal Cutting Operations** Industrial Lubrication and Tribology, 54, No. 1. (11-19). 2002.

Sutherland, J.W.; Kuluer V.N.; King, N.C. **An Experimental Investigation of Air Quality in Wet and Dry Turning**. Annals of the CIRP. 49/1. (61-64). 2000.

Teti R. et al. **Advanced Monitoring of Machining Operation**. CIRP ANNAL Manufacturing Technology 59 (717-739), 2010.

Uhlmann, E.; Holwieler, E.; Geisert, C. **Monitoring of Slowly Progressing Deterioration of CNC-Machine Axes**. Intelligent Production Machines and Systems. Cardiff University. Manufacturing Engineering Centre, Cardiff, UK, 2006.

Van Brussel, H.; Sas, P., Németh, I.; De Fonseca, P.; Van den Braembussche, P. **Towards a Mechatronic Compiler**. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 6(1):90-105.2001.

Vijayaraghavan A.; Dornfeld D. **Automated Energy Monitoring of Machine Tools**. CIRP ANNAL Manufacturing Technology 59 (21-24), 2010.

Pannerselvam, R. **Engineering Economics.** Prentice-Hall of India. ISBN-81-203-1743-2. 2001. 289 pgs.

Wang, L.; Lin, L. A Methodological Framework for the Triple Bottom Line Accounting and Management Industry Enterprises. International Journal of Production Research 45 (5). (1063-1088). 2007.

Winfrey, Robley. **Statistical Analyses of Industrial Property Retirements.** Iowa State University. Enginnering Research Institute. 1967. 204 páginas.

Zaeh, M.F.; Poernbacher, C. **A Model-Based Method to Develop PLC Software for Machine Tools**, Annals of the CIRP, 54/1:371-374. 2005.

Zhow, Guixia et al. **Green Remanufacturing Engineering in Structured Machinery Based on Reverse Engineering**. International Conference on Security, 2008.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS CONSULTADAS

Abdel-Malek, Layek; Wolf, Carl. **Measuring the Impact of Lifecycle Costs, Technological Obsolescence, and Flexibility in the Selection of FMS Design**. Journal of Manufacturing Systems. Volume 13, Issue 1, 1994, pages 37-47, 1994.

Avram, Oliver Ioan; Xirouchakis, Paul. **Evaluating the Phase Energy Requirements of Machine Tool System**. Journal of Cleaner Production. Volume 19, Issues 6-7, April-May 2011, Pages 699-711, 2011.

Bagci, Eyup. **Reverse Engineering Applications for Recovery of Broken or Worn Parts and Re-Manufacturing: Three Case Studies**. Journal of Advances in Engineering Software 40/6 (2009) 407-418, 2009.

Collin, A.; Jin-Cheng, D.; Miller, J.. **Retrofitting Machine Tools With Computer Control**. Department of Computer Science. University of Strathclyde, Livingstone Tower, UK, 1985.

Diaz, N. et al. **Environmental Analysis of Milling Machine Tool Use in Various Manufacturing Environments**. Dept. of Mech. Eng., Univ. of California, Berkeley, CA, USA. Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium – May 2010, 2010.

Diaz, Nancy et al. **Machine Tool Design and Operation Strategies for Green Manufacturing**. Proceeding of the CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2010.

Feng, Shaw C.; Joung, Che B. **An Overview of a Proposed Measurement Infrastructure for Sustainable Manufacturing**. The 7th Global Conference for Sustainable Manufacturing. 2009.

Gutowsky, Timothy; Dahmus, Jeffrey; Thiriez, Alex. **Electrical Energy Requirements for Manufacturing Processes**. 13th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, May – June 2006. 2006.

Herrmann, Christoph et al. **Bringing Sustainable Manufacturing into Practice – The Machine Tool Case**. Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Langer Kamp 19 B D-38106 Braunschweig. Sustainable Manufacturing VI: Global Conference in Sustainable Product Development and Life Cycle Engineering, Korea, 2008. 2008.

Hon, K. K. B. **Performance and Evaluation of Manufacturing Systems**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Volume 54, Issue 2, 2005, pages 139-154, 2005.

Huang, Baiquan et al. **Life Prediction of CNC Linear Rolling Guide Based on DFNN Performance Degradation Model**. Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Directory (FSKD 2010), 2010.

Huang, Xiaodiao; Ding, Wenzheng; Hong, Rongjing. **Research on Accuracy Design for Remanufactured Machine Tools**. College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing University of Technology, 210009, China. Technology and Innovation Conference, ITIC, 2006.

Ilgin, Mehmet Ali; Gupta, Surendra M. **Environmentally Conscious Manufacturing and Product Recovery (ECMPRO). A Review of the State of the Art**. Journal of Environmental Management. V.91, 2010, p.563-591. 2010.

Ji-Wen, Sun et al. **Tool Maintenance Optimization for Multi-Station Machining Systems with Economic Consideration of Quality Loss and Obsolescence**. Journal of Robotics and Computer-Aided Manufacturing 26 (145-155), 2010.

Klenke, F.; Muller, V.; Hofmann, W. **Energy Optimal Motion Control of Servo Motors and** Downsizing of Components. Disponível em:
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=5279014
Acesso em 25/04/2011.

Kopac, J. **Achievements of Sustainable Manufacturing by Machinining**. Journal of Achievements in Manufacturing Engineering. Volume 24, Issue 2, June 2009, 2009.

Kovacic, M. et al. **Evolutionary Programming of CNC Machines**. Journal of Materials Processing Technology, Volumes 164-165, May 2005, pages 1379-1387, 2005.

Krishnan, N.; Sheng, P.S. **Environmental versus Conventional Planning for Machined Components**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. V.49, Issue 1, 2000, p. 21-24, 2000.

Lee, Jay et al. **Intelligent Prognostics Tools and e-Maintenance**. NSF Center for Intelligent Maintenance System. University of Cincinnati. USA, 2006.

Lee, Ki-Hoon. **Why and How to Adopt the Green Management into Business Organizations?**. Journal of Management Decision (2009). V. 47, Issue:7, p. 1101-1121. 2009.

Liao, Linxia; Lee, Jay. **Design of Reconfigurable Prognostics Platform for Machine Tools. Journal of Expert Systems with Applications**. Volume 37, Issue 1, January 2010, pages 240-252, 2010.

Maropoulos, P.G.; Ceglarek, D. **Design Verification and Validation in Product Lifecycle**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Volume 59, Issue 2, 2010, Pages 740-759, 2010.

Munoz, A.A.; Sheng, P. **An Analytical Approach for Determining the Environmental Impact of Machining Processes**. Journal of Materials Processing Technology, 53 (1995), 736-758. 1995.

Narita, Hirohisa et al. **Development of Prediction System for Environmental Burden for Machine Tool Operation (1st Report, Proposal of Calculation Method for Environmental Burden).** JSME International Journal. Series C, V.49. No. 4. 2006.

Ni. J., Lee, J., Djurdjanovic D. **Watchdog – Information Technology for Proactive Product Maintenance and Ecological Product Re-Use**. Proceeding on Colloquium on E-Ecological Manufacturing, Technical University of Berlin, Germany, 2003.

Niggeschimidt, Stephan et al. **Integrating Green and Sustainability Aspects into Life Cyle Performance Evaluation**. Green Manufacturing and Sustainable Manufacturing Partnership. Laboratory for Manufacturing and Sustainability, UC Berkeley, May, 2010, 2010.

Pusavec, F.; Kopac, J. **Achieving and Implementation of Sustainability Principles in Machining Processes**. Journal of Advances in Production Engineering and Management, 4 (2009),3, 151-160. 2009.

Pusavec, Franci; Stoic, Antun; Kopac, Janez. **Sustainable Machining Process – Myth or Reality**. Disponível em:
http://bib.irb.hr/prikazi-rad?&lang=en&rad=472781.
Acessado em 03/05/2011.

Rajemi, M.F.; Mantivenga, P.T.; Aramcharoen, A. **Sustainable Machining:Selection of Optimum Turning Conditions Based on Minimum Energy Considerations**. Journal of Cleaner Production. V.18, 2010, p.1059-1065. 2010.

Reich-Weiser, Corinne; Vijayaraghavan, Athulan; Dornfeld, David. **Metrics for Sustainable Manufacturing**. Proceeding of the 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference – MSEC 2008 -. Illinois, USA, 2008.

Soplop, Jeffrey et al. **Manufacturing Execution Systems for Sustainability: Extending the Scopes of MES to Achieve Energy Efficiency and Sustainability Goals**. Disponível em: http://www.globalspec.com/reference/54830/manufacturing-execution-systems-for-sustainability-pdf. Acesso em 25/04/2011.

Szecsi, Tamas. **Automatic Cutting Tool Condition Monitoring on CNC Lathes**. Journal of Materials Processing Technology 77 (64-69), 1998.

Tanchoco, J.M.A; Leung L.C. **An Input-Output Model for Equipment Replacement Decisions**. Journal of Engineering Costs and Production Economics. Volume 11, Issue 1, April 1987, pages 69-78, 1987.

Teti, R. et al. **Advanced Monitoring of Machining Operations**. CIRP Annals – Manufacturing Technology. Volume 59, (2010) 717-739, 2010.

Xu, Yuming; Deng, Chao; Wu, Ju. Least Squares Support Vectors Machines for Performance Degradation Modeling of CNC Equipment. School of Mechanical Science and Engineering Huazhong. University of Science & Technology, China. IEEE, 2009.

Yusof, Yusri. **Exploring the Application of New Data Standard for CNC Machining**. Advances in Electrical and Electronics Engineering - IAENG Special Edition of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008, 2008.

Wang, Youjiang et al. **The Research of Machine Tool Appearance Design Based on Evolution Theory**. Management of Innovation and Technology (ICMIT), 2010 IEEE International Conference on Singapore, p.875-879, 2010.