



**POSMEC | UFSC**  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Santa Catarina



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
MECÂNICA**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETO DE SISTEMAS MECÂNICOS  
LINHA DE PESQUISA: CONFIABILIDADE FUNCIONAL E MANTENABILIDADE DE  
SISTEMAS MECÂNICOS

**OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE  
MANUTENÇÃO PREVENTIVA: UMA MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**ORIENTADOR: ACIRES DIAS, DR. ENG.  
MESTRANDO: ENG. RODRIGO FERNANDES CORRÊA**

Florianópolis – SC, Outubro de 2015



**RODRIGO FERNANDES CORRÊA**

**OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE  
MANUTENÇÃO PREVENTIVA: UMA MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

Dissertação submetida ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Grau de  
Mestre em Engenharia Mecânica.  
Orientador: Prof. Acires Dias, Dr.  
Eng.

Florianópolis  
2015



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Corrêa, Rodrigo Fernandes Corrêa  
Otimização de Periodicidade nos Planos de Manutenção  
Preventiva: Uma Modelagem Matemática / Rodrigo Fernandes  
Corrêa Corrêa ; orientador, Acires Dias, Dr. Eng. -  
Florianópolis, SC, 2015.  
190 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Manutenção Preventiva. 3.  
Modelagem Matemática. 4. Custo residual/manutenção. 5. Vida  
Útil. I. , Acires Dias, Dr. Eng. II. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.



**RODRIGO FERNANDES CORRÊA**

**OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE  
MANUTENÇÃO PREVENTIVA: UMA MODELAGEM  
MATEMÁTICA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Mecânica”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Florianópolis, 01 de Outubro de 2015.

---

**Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.**  
Coordenador do Curso

---

**Prof. Acires Dias, Dr. Eng.**  
Orientador

**BANCA EXAMINADORA**

---

**Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr. Eng.**  
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

---

**Prof. Rodrigo de Souza Vieira, Dr. Eng.**  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

---

**Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.**  
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC



## **DEDICATÓRIA**

À memória de meu Pai, Sr. Antônio, meu grande mestre e companheiro e principal incentivador da minha carreira profissional. Creio que este trabalho seria mais uma de suas realizações em vida.



## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar vida e sabedoria, e por me privilegiar com tantas coisas boas da vida, dentre as quais destaco minha profissão, da qual muito me honro.

Agradeço aos meus Pais, Antônio (em memória) e Maria, por me conceberem e me propiciarem ótima educação.

Agradeço à minha esposa, Maria de Fátima, pela paciência nas minhas ausências, pelo companheirismo e aconchego nas minhas horas de lazer.

Agradeço a empresa Portobello S.A., pela oportunidade de trabalhar, estudar, desenvolver minhas aptidões e pela flexibilidade de horário permitida ao longo deste mestrado.

Agradeço aos professores, pela oportunidade de aprendizado que foi proporcionada durante o mestrado.

Agradeço, em especial, ao meu orientador, Eng. Dr. Acires Dias, pelos ensinamentos e dedicação demonstrada na orientação deste trabalho.

Agradeço ao professor Eng. Dr. Jonny Silva, por ter-me encorajado a concluir este mestrado em 2015.

Aos colegas do NEDIP, pela troca de conhecimento, apoio e contribuições a este trabalho.

Por fim, a todos que me ajudaram, diretamente ou indiretamente, na conclusão desta dissertação.



*"Os computadores são incrivelmente rápidos, precisos e burros; os homens são incrivelmente lentos, imprecisos e brilhantes; juntos, seus poderes ultrapassam os limites da imaginação." (Albert Einstein)*



## RESUMO

Várias estratégias de manutenção são empregadas nos complexos industriais, tendo, como destaque, modelos de gestão que buscam ações preventivas, como TPM (*Total Productive Maintenance*), RCM (*Reliability Centered Maintenance*), e outras preventivas baseadas na condição, no tempo, em paradas, dentre outras. Ao aprofundar este tema, tanto do ponto de vista do planejamento quanto da aplicação, percebe-se que o grande desafio para otimização do custo dessas estratégias está em “o que fazer” e “quando fazer”; ou seja, qual escopo e com que periodicidade. Observa-se, no contexto industrial, que há conhecimento das equipes de manutenção em avaliar o comportamento das falhas, definir a vida útil dos principais sistemas que compõem os processos, programar todas as necessidades de reparo e controlar as paradas de um processo. Contudo, percebe-se que há limites em relação à previsão de periodicidade ótima, devido à grande complexidade de combinações possíveis de escopo e momento ideal para a parada de um processo. Esta percepção motivou o presente estudo, para o qual se traçou o objetivo de desenvolver um modelo matemático que otimizasse os custos de manutenção, por meio do estudo da vida útil dos sistemas, fundamentados pelo uso, tempo, condição e custos. A modelagem matemática utilizada foi implementada computacionalmente por meio do MATLAB<sup>®</sup>. Assim, foi possível analisar o comportamento das variáveis envolvidas na otimização da periodicidade, o custo residual por troca prematura, a periodicidade ótima, o escopo, os custos com manutenção corretiva/preventiva, o tempo de parada de processo e a identificação dos sistemas significativos para aplicação de projeto e para dimensionamento da vida útil dentro do conceito RCM. Para aplicar o modelo, foi desenvolvida uma metodologia que auxilia o usuário durante as simulações com a utilização da ferramenta computacional. A análise foi aplicada numa empresa da indústria cerâmica de grande porte, composta de mais de 43 processos com 5.000 ativos. Para as simulações foram utilizadas linhas de processo contínuo e equipamentos; contudo, a sistemática poderá ser utilizada em empresas de outros setores industriais.

**Palavras chave:** Manutenção preventiva, periodicidade, vida útil, modelagem matemática, custo residual, custo de manutenção.\*

---

O autor é mestrando em engenharia mecânica pelo programa POSMEC-UFSC, pós-graduado em engenharia de manutenção pela PUC-PR, graduado em engenharia mecânica pela UNIVALI-SJ, graduado em tecnólogo eletromecânica pela UNISUL e técnico em mecânica pela ETDF. Atua a mais de 19 anos em manutenção industrial, sendo 5 anos na indústria de bebidas e 14 anos na indústria cerâmica. Atuou como professor da disciplina de sistema hidráulico/pneumático no SENAI-SC por 4 anos. Já ocupou vários cargos na área; desde mecânico, técnico, planejador, analista, engenheiro e coordenador de manutenção. Atualmente é gerente de manutenção do parque fabril da cerâmica PORTOBELLO S.A. onde teve oportunidade de atuar em projetos de estruturação como: terceirização/internalização da manutenção, ampliações/montagem de fábricas, condução de grandes paradas; implantações: manutenção centrada/mista, manutenção preventiva/preditiva, CMMS e estruturação de indicadores de manutenção.

## ABSTRACT

Several maintenance strategies are introduced in the industrial environment and as a highlight management models that seek preventive actions such as TPM (Total Productive Maintenance), RCM (Reliability Centered Maintenance), in other preventive based on the condition, time, Turnaround, them others. Deepening this topic from the point of view of planning as the application, it is clear that the challenge to optimize the cost of these strategies is "what to do" and "when to do it", that is, what scope and which periodicity. It is observed in the industrial context, there is knowledge of the maintenance teams to evaluate the behavior of faults; in defining the useful life of the major systems that compose the processes; to schedule all repairs needs and control downtime of a process. However, we realized that there are limits on the optimal periodicity of prevision due to the great complexity of possible combinations of scope and ideal time to stop a process. This perception has motivated this study by which traced the objective of developing a mathematical model that optimizes maintenance costs through the lifetime of the study of systems, justified by used, time, condition and costs. Mathematical model was implement computationally in MATLAB®. It was possible to analyze the behavior of the variables involved in the optimization of periodicity, the residual cost for premature replacement, the optimal periodicity, scope, costs of corrective/preventive maintenance, process downtime and identification of systems that are important for project implementation and scaling of lifetime within the RCM concept. It was developed a methodology that assists the user during simulations. The analysis was applied to a large company industry, made up of more than 43 processes with 5000 assets. The lines and equipment were used for the simulations.

**Key Word:** Preventive maintenance, periodicity, lifetime, math modeling, residual cost, maintenance cost.



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: OTIMIZAÇÃO DA PERIODICIDADE (CAVALCANTE, 2010). .....	31
FIGURA 2: METODOLOGIA PARA O DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	33
FIGURA 3: FUNÇÃO PRODUÇÃO X MANUTENÇÃO (ADAPTADO DE WAEYENBERGH, 2005).....	35
FIGURA 4: POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO DE ACORDO COM WAEYENBERGH (2005). .....	36
FIGURA 5: MANUTENÇÃO NO CONTEXTO PRODUTIVO (ADAPTADO DE FUENTES, 2006). .....	37
FIGURA 6: CURVA DA TAXA DE FALHA. ....	39
FIGURA 7: EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO (ADAPTADO DE WAEYENBERGH, 2005).....	40
FIGURA 8: CUSTO ANUAL DA MANUTENÇÃO (CBM, 2011). .....	43
FIGURA 9: ELABORAÇÃO/ATUALIZAÇÃO DE UM PLANO DE MP (ADAPTADO DE SMITH A. M., 1993). .....	46
FIGURA 10: PILARES BÁSICOS DA TPM (NAKAJIMA, 1989).....	50
FIGURA 11: LIMITE DE TOLERÂNCIA DA FALHA (DIAS, 2004. CAP. 04) .....	60
FIGURA 12: VALORES DISCRETOS (ADAPTADO DE LAFRAIA, 2001). .....	61
FIGURA 13: VALORES VARIÁVEIS (ADAPTADO DE LAFRAIA, 2001). .....	61
FIGURA 14: SOBREPOSIÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES (ADAPTADO LAFRAIA, 2001). .....	62
FIGURA 15: ATUAÇÃO DA FALHA (BASEADO EM LRS PLANT 2012).....	63
FIGURA 16: CURVAS DE TAXA DE FALHA (ADAPTADO DE BERTSCHE, 2008).....	67
FIGURA 17: PITSTOP EQUIPE DE “FÓRMULA 1” .....	69
FIGURA 18: SISTEMAS DE UM CARRO DE “FÓRMULA 1” .....	69
FIGURA 19: MODELO MARKOVIANO DA MANUTENÇÃO (ADAPTADO DE BERTSCHE, 2008). .....	71
FIGURA 20: CUSTO DO CICLO DE VIDA (ADAPTADO DE BERTSCHE, 2008). .....	73
FIGURA 21: EFEITO DOS CUSTOS NA PERIODICIDADE DE PREVENTIVA. ....	75
FIGURA 22: FUNÇÃO CONFIABILIDADE DO MANCAL.....	77
FIGURA 23: DEFINIÇÃO DA PERIODICIDADE EM FUNÇÃO VIDA ÚTIL.....	79
FIGURA 24: DISTRIBUIÇÃO DE FALHA DE CADA SISTEMA PARA UM EQUIPAMENTO. ....	80
FIGURA 25: VIDA DOS SISTEMAS AO LONGO DA VIDA ÚTIL DE AVALIAÇÃO DO EQUIPAMENTO. ....	81
FIGURA 26: DISTRIBUIÇÃO DA FUNÇÃO VIDA ÚTIL DE UM PROCESSO. ....	82
FIGURA 27: REPRESENTAÇÃO DO CUSTO RESIDUAL DE UM COMPONENTE.....	84
FIGURA 28: REPRESENTAÇÃO DO CUSTO RESIDUAL DE UMA PRENSA. ....	85
FIGURA 29: CUSTO DE MANUTENÇÃO EM FUNÇÃO DA VIDA ÚTIL.....	86
FIGURA 30: CUSTO DA MANUTENÇÃO SEM CUSTO RESIDUAL.....	87
FIGURA 31: FUNÇÃO CUSTO RESIDUAL MODELADO NA SÉRIE DE FOURIER, N=5. ....	95
FIGURA 32: DIAGRAMA DO PROGRAMA, OTMIZAMP. ....	99
FIGURA 33: MODELO DE UM SISTEMA PARA SIMULAÇÃO NO MATLAB. ....	100
FIGURA 34: EXEMPLO DA PÁGINA DE ENTRADA DE DADOS NO OTMIZAMP.....	101
FIGURA 35: CUSTO RESIDUAL EM FUNÇÃO DA VIDA ÚTIL, PARA QUATRO SISTEMAS. ....	102
FIGURA 36: CUSTO RESIDUAL TOTAL E CUSTO DO REPARO PREVENTIVO X TEMPO. ....	103
FIGURA 37: INTERAÇÃO DAS PERIODICIDADES.....	103
FIGURA 38: SIMULAÇÃO DAS PERIODICIDADES.....	104
FIGURA 39: CUSTO RESIDUAL TOTAL EM FUNÇÃO DA PERIODICIDADE. ....	105
FIGURA 40: COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE MANUTENÇÃO EM FUNÇÃO DA PERIODICIDADE.....	106

FIGURA 41: CUSTO DA MANUTENÇÃO NA VIDA ÚTIL AVALIADA EM FUNÇÃO DA PERIODICIDADE.....	107
FIGURA 42: RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO NO OTIMIZAMP. ....	108
FIGURA 43: CÁLCULO DA RAZÃO ENTRE OS SISTEMAS.....	109
FIGURA 44: INTERCALAÇÃO DO ESCOPO DA MP.....	110
FIGURA 45: RESULTADOS OBTIDOS COM A OTIMIZAÇÃO DO ESCOPO.....	111
FIGURA 46: INFLUÊNCIA CHC NA PERIODICIDADE. ....	112
FIGURA 47: METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA MP. ....	115
FIGURA 48: DISTRIBUIÇÃO DE FALHA DE BOMBAS HIDRÁULICA DE PRENSAS. ....	117
FIGURA 49: MOINHO CONTÍNUO DA INDÚSTRIA CERÂMICA. ....	122
FIGURA 50: CARACTERÍSTICAS DO MOINHO MTC161 SACMI.....	122
FIGURA 51: RBD, MOINHO CONTÍNUO MTC161. ....	123
FIGURA 52: MEDIÇÕES DE INSPEÇÃO DO REVESTIMENTO, MOINHO CONTÍNUO MTC161. ....	123
FIGURA 53: COMPONENTES DO INVERSOR ACS600 ABB, ITEM 12, FIGURA 49. ....	124
FIGURA 54: CUSTO DA VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DO TEMPO. ....	126
FIGURA 55: CUSTO DA MP EM FUNÇÃO DO TEMPO E AVALIAÇÃO DA PERIODICIDADE. ....	128
FIGURA 56: CUSTO RESIDUAL E COMPOSIÇÃO DO CUSTO DA MP.....	130
FIGURA 57: CMVU COM PERIODICIDADE OTIMIZADA E RAZÃO VU DOS SISTEMAS.....	132
FIGURA 58: INTERCALAÇÃO DO ESCOPO PARA SIMULAÇÃO MOINHO MTC161. ....	134
FIGURA 59: RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PARA MOINHO MTC161. ....	135
FIGURA 60: REDUÇÃO DO CUSTO E TEMPO COM A INTERCALAÇÃO DO ESCOPO.....	136
FIGURA 61: DETALHE DO GRÁFICO 1 DA FIGURA 57. ....	137
FIGURA 62: DETALHE DO GRÁFICO 2 DA FIGURA 56. ....	138
FIGURA 63: RBD PROCESSO DE QUEIMA. ....	141
FIGURA 64: CUSTO DA VIDA ÚTIL EM FUNÇÃO DO TEMPO, PROCESSO DE QUEIMA.....	143
FIGURA 65: CUSTO DA MP E AVALIAÇÃO DA PERIODICIDADE, PROCESSO DE QUEIMA.....	144
FIGURA 66: CUSTO RESIDUAL E COMPOSIÇÃO DO CUSTO DA MP, PROCESSO DE QUEIMA. ....	146
FIGURA 67: CMVU, PERIODICIDADE OTIMIZADA E RAZÃO VU, PROCESSO DE QUEIMA. ....	147
FIGURA 68: INTERCALAÇÃO DO ESCOPO PARA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE QUEIMA.....	149
FIGURA 69: REDUÇÃO DO CUSTO E TEMPO COM A INTERCALAÇÃO DO ESCOPO.....	150
FIGURA 70: RELATÓRIO DA SIMULAÇÃO PARA PROCESSO DE QUEIMA. ....	150
FIGURA 71: AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES QUE COMPÕEM O CUSTO DE MANUTENÇÃO CMVU.....	151
FIGURA 72: DETALHE FIGURA 67, REDUÇÃO DA FUNÇÃO CMVU NO INTERVALO 6,3 A 8,4 MESES. ....	153
FIGURA 73: RESULTADO DE DUAS SIMULAÇÕES DA FUNÇÃO CMVU PARA O ESQUADREJADOR.....	155
FIGURA 74: AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO MTTR, "PROCESSO DE QUEIMA". ....	158
FIGURA 75: FAIXA DE OCORRÊNCIA DAS POSSÍVEIS FALHAS PARA CINCO PROCESSOS. ....	160
FIGURA 76: CURVAS OTIMIZADAS DO CUSTO DE MANUTENÇÃO PARA CINCO PROCESSOS. ....	162

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1: CUSTO DA MANUTENÇÃO NO BRASIL (CBM, 2011). .....	42
TABELA 2: CUSTO DA MANUTENÇÃO X FATURAMENTO (CBM, 2011). .....	43
TABELA 3: REPRESENTAÇÃO DE UMA PRENSA HIDRÁULICA DIVIDIDA EM SISTEMAS. ....	83
TABELA 4: FOLHA DE DADOS DO MOINHO CONTÍNUO PARA SIMULAÇÃO COM OTIMIZAMP. ....	124
TABELA 5: FOLHA DE DADOS DO PROCESSO DE QUEIMA PARA SIMULAÇÃO COM OTIMIZAMP. ....	142
TABELA 6: DADOS DOS COMPONENTES COM VU = 6 MESES. ....	152
TABELA 7: FOLHA DE DADOS DO ESQUADREJADOR PARA SIMULAÇÃO COM OTIMIZAMP. ....	154
TABELA 8: AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES PARA CINCO PROCESSOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA.....	160
TABELA 9: EFEITO DE ALGUMAS VARIÁVEIS NA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO. ....	167



## LISTA DE SIGLAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABRAMAN** – Associação Brasileira de Manutenção.
- ABRISCO** – Associação Brasileira de Análise de Risco, Segurança de Processo e Confiabilidade.
- BACKLOG** – Relação de pendências, na manutenção é uma relação de serviços pendentes.
- BBN** - *Bayesian Belief Networks*. (Redes Bayesianas).
- BSI** - *British Standard*. (Padrão Britânico).
- BTA** – *Bow Tie Analysis*. (Análise do “Botão da Gravata” ponto central da falha).
- CCI** - *Confederation of Indian Industry*. (Confederação da Indústria Indiana).
- CMMS** – *Computerized Maintenance Management System*. (Sistema Computadorizado de Gerenciamento de Manutenção).
- EFNMS** - *European Federation of National Maintenance Societies*. (Federação Europeia das Sociedades Nacionais de manutenção).
- ENGEMAN** – *Software* utilizado para gerenciamento de manutenção.
- FMEA** - *Failure Mode and Effect Analysis*. (Análise do modo e efeito da falha).
- FTA** - *Fault Tree Analysis*. (Análise da árvore de falha).
- JIPM** - *Japan Institute of Plant Maintenance*. (Instituto Japonês de Planejamento de Manutenção).
- JIT** – *Just In Time*. (Produção *just-in-time*).
- LCC** - *Life Cycle Costing*. (Custo do Ciclo de Vida).
- LRS** – *Lifetime Reliability Solutions*. (Soluções de Confiabilidade na Vida Útil).
- MAINTWORLD** – Revista de Manutenção da EFNMS.
- MATLAB** – *MATrix LABORatory, software* interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico.
- MBC** – Manutenção Baseada na Condição.
- MC** – Manutenção Corretiva.
- MO** – Mão de obra.
- MP** – Manutenção Preventiva.
- MSG** – *Maintenance Steering Group*. (Grupo Governamental “de condução” da Manutenção)
- MTBF** - *Mean Time Between Failures*. (Tempo Médio Entre Falha).

**MTC** – Moinho Contínuo.

**MTTF** - *Mean Time to Failure*. (Tempo Médio para Falha).

**MTTFF** - *Mean Time to Failure First*. (Tempo Médio para Primeira Falha).

**MTTR** - *Mean Time to Repair*. (Tempo Médio para Reparo).

**NBR** – Norma Brasileira.

**OEE** - *Overall equipment effectiveness*. (Eficiência Global dos Equipamentos).

**OtimizaMP** - Programa para Otimização da Manutenção Preventiva.

**PAS** - *Publicly Available Specification*. (Especificação Disponível Publicamente).

**PH** – Prensa Hidráulica.

**PIB** - Produto Interno Bruto.

**PMBOK** - *Project Management Body of Knowledge*.

*Conjunto de Conhecimento em Gerenciamento de Projeto*).

**PMI** - *Project Management Institute*. (Instituto de Gerenciamento de Projeto).

**POPMP** – Programa para Otimização de Periodicidade de Manutenção Preventiva.

**RBD** - *Reliability Block Diagram*. (Diagrama de Bloco de Confiabilidade).

**RBM** – *Risk Based Maintenance*. (Manutenção Baseada no Risco).

**RCM** – *Reliability Centered Maintenance*. (Manutenção Centrada na Confiabilidade).

**SACMI** – Fabricante Italiano de Equipamentos da Indústria Cerâmica.

**TPM** - *Total Productive Maintenance*. (Manutenção Produtiva Total).

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1	Motivação da Pesquisa .....	30
1.2	Objetivo.....	32
1.3	Objetivos Específicos.....	32
1.4	Metodologia da Pesquisa.....	33
1.5	Estrutura do Trabalho.....	33
<b>2</b>	<b>MANUTENÇÃO.....</b>	<b>35</b>
2.1	História da Manutenção.....	37
2.2	Manutenção nos Tempos Modernos .....	39
2.3	Custo de Manutenção .....	41
2.4	Manutenção Corretiva .....	44
2.5	Manutenção Preventiva .....	44
2.6	TPM (Total Productive Maintenance) .....	47
2.7	RCM (Reliability Centered Maintenance) .....	51
2.7.1	Conceitos e Metodologias.....	51
2.7.2	Implementação .....	53
2.8	Confiabilidade .....	54
2.9	Estatística Aplicada à Confiabilidade.....	55
2.9.1	Distribuição Normal ou Gaussiana .....	56
2.9.2	Distribuição Exponencial.....	57
2.9.3	Distribuição de Weibull.....	57
2.10	Falha.....	59
2.10.1	Estudo da Falha .....	60
2.10.2	Modo de Falha.....	64
2.10.3	Modos de Falha Dependentes do Tempo .....	64
2.10.4	Modos de Falha Independentes do Tempo.....	65
2.10.5	Mecanismo de Falha .....	65
2.10.6	Critério de Falha .....	65
2.10.7	Taxa de Falha .....	66
2.11	Mantenabilidade .....	68
2.12	Modelagem da Função Manutenção .....	70
2.13	Considerações .....	71
<b>3</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA.....</b>	<b>73</b>
3.1	Definição da Periodicidade no Plano MP .....	74
3.1.1	Exemplo de Definição da Periodicidade .....	76
3.2	Vida Útil na Manutenção Preventiva.....	78
3.3	Estudo da Periodicidade .....	82
3.4	Considerações .....	88
<b>4</b>	<b>MODELAGEM PARA OTIMIZAÇÃO DA MP.....</b>	<b>91</b>
4.1	Declarações das Variáveis.....	92
4.2	Equações .....	94
4.3	Implementação Computacional .....	98
4.4	Avaliação da Modelagem .....	100
4.4.1	Entrada de Dados.....	100
4.4.2	Resultados .....	101
		25

4.4.3	Avaliação da Periodicidade .....	108
4.4.4	Influências CHC .....	112
4.5	Considerações .....	113
<b>5</b>	<b>SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>115</b>
5.1	Metodologia para Otimização da MP .....	115
5.1.1	Mapeamento do Processo .....	116
5.1.2	Definição da Vida Útil.....	117
5.1.3	Simulação Computacional.....	120
5.1.4	Otimização da Manutenção Preventiva.....	120
5.2	Simulação: Moinho Contínuo MTC161 .....	121
5.2.1	Mapeamento do Processo .....	123
5.2.2	Estudo da Vida Útil .....	123
5.2.3	Resultados da Simulação .....	125
5.2.4	Avaliação da Simulação .....	137
5.3	Simulação: Processo de Queima.....	139
5.3.1	Mapeamento do Processo .....	140
5.3.2	Estudo da Vida Útil .....	141
5.3.3	Resultados da Simulação.....	143
5.3.1	Avaliação da Simulação .....	151
5.4	Avaliação do Trabalho .....	153
5.5	Avaliação dos Resultados.....	156
5.5.1	Avaliação: Custo Residual.....	156
5.5.2	Avaliação: MTTR.....	157
5.5.3	Avaliação: Otimização da Periodicidade .....	160
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>165</b>
6.1	Recomendação a Trabalhos Futuros .....	168
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>171</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>177</b>
ANEXO 01 – TABELA DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FALHA DOS 10 SISTEMAS DO ESQUADREJADOR .....		178
ANEXO 02 – PLANO DE MP BASEADO NO TEMPO, DO EQUIPAMENTO MOINHO MTC161, FABRICANTE “SACMI”.....		179
ANEXO 03 – PLANO DE MP BASEADO NO TEMPO, DO INVERSOR DO MOINHO MTC161, FABRICANTE “ABB”.....		180
ANEXO 04 – INSAIO DE VIDA ÚTIL DA PLACA ELETRÔNICA, DO INVERSOR MTC161, FABRICANTE “ABB”.....		181
ANEXO 05 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DE MP BASEADA NA CONDIÇÃO, CMMS PORTOBELLO S.A.....		182
ANEXO 06 – <i>DATA SHEET</i> , PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE CONTADORES ELÉTRICOS....		183
ANEXO 07 - <i>DATA SHEET</i> , PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DOS ROLAMENTOS. ....		184
ANEXO 08 - <i>DATA SHEET</i> , NORMA ISSO 13849, PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL PARA COMPONENTES DE SISTEMAS DE SEGURANÇA. ....		185
ANEXO 09 - <i>DATA SHEET</i> , PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE VÁLVULAS HIDRÁULICAS, “BOSCH REXROTH”.....		186

ANEXO 10 – RELATÓRIO DOS REGISTROS DE FALHA, BOMBAS HIDRÁULICA UTILIZADAS NAS PRENSAS, CMMS PORTOBELLO .....	187
ANEXO 11 - <i>DATA SHEET</i> , PROJETO GUIAS DOS ESQUADREJADORES COM REVESTIMENTO ALTA-ALUMINA. ....	188
ANEXO 12 – COMENTÁRIOS DOS ESPECIALISTAS DE MANUTENÇÃO, A PARTIR DA LEITURA DO ARTIGO .....	189
ANEXO 13 – ARTIGO DESENVOLVIDO DURANTE A PESQUISA .....	194



# 1 INTRODUÇÃO

A evolução da sociedade, principalmente após a Segunda Guerra Mundial, impactou todos os setores da economia. A modernização das máquinas, as exigências de qualidade, a internacionalização dos produtos, a comunicação rápida, em tempo real, e a globalização da econômica obrigaram os setores industriais a contemplarem os custos em todas as ações do processo produtivo.

De acordo com Cavalcante (2010), com o competitivo crescimento do mercado, demandas por produtos de alta qualidade, rápida entrega e preços competitivos têm conduzido a uma nova configuração dos sistemas de manufatura, combinando automação, integração e flexibilidade, a qual impacta diretamente na necessidade de plantas com alto nível de eficiência. Por outro lado, a eficiência de alguns sistemas de trabalho não depende apenas de propriedades de projeto, mas também da qualidade de operação, manutenção e reparo. Assim, o gerenciamento de manutenção representa um elemento competitivo para as companhias, não impactando apenas no aspecto do negócio de cada produto e sua rentabilidade, mas também na qualidade dos produtos e serviços.

Muitos são os modelos de gestão de manutenção. Fuentes (2006), por exemplo, considera: manutenção centrada na confiabilidade (RCM), manutenção produtiva total (TPM), manutenção baseada no risco (RBM). Contudo, em qualquer que seja o modelo a ser implantado, há que serem feitas otimizações para contemplar as exigências atuais por efetividade operacional (OEE) e mitigar ao máximo os riscos presentes nos processos de gestão de manutenção industrial, onde as questões econômicas e financeiras sempre aparecem de forma significativa. (FUENTES, DIAS E SALINAS, 2012).

É sabido que os custos gerados em paradas inesperadas podem ser elevados, considerando-se o custo com MO (mão de obra), com aquisição e recolocação de peças (sistemas e componentes), com a hora cessante do processo, dentre outros. A mitigação desses custos pode se dar pela gestão mais segura de controle de custos a partir do planejamento da manutenção com gerenciamento planejado das falhas. As falhas podem ser previstas a partir de técnicas e procedimentos, com base no tempo e na condição, a partir de técnicas de predição. Mesmo com a previsão das falhas de cada componente de um determinado processo, ainda assim a manutenção pode ser custosa devido a dispersão das estimativas ao longo do tempo. Em outras palavras, se para cada ciclo de vida útil estimado de um

determinado componente for feito uma parada do processo, o custo da hora cessante pode se tornar inviável financeiramente, dado que o término de cada vida útil estimada não é igual. Logo, torna-se importante um processo de otimização das previsões da vida útil, podendo implicar a substituição antecipada (prematura) ou não de alguns componentes. Em assim sendo, para obter-se uma periodicidade otimizada de manutenção, mais variáveis devem ser contempladas. Quanto mais complexo for o sistema produtivo, mais variáveis aparecem durante o processo de planejamento otimizado na manutenção. Neste caso, torna-se premente o apoio computacional para otimizar a periodicidade dos planos de manutenção preventiva de ativos industriais. Atributos importantes como uso, tempo, condição, custos, segurança necessitam ser considerados. A aplicação de técnicas de otimização são bases para modelo de gestão como RCM (*Reliability Centered Maintenance*) ou outros modelos de gestão estruturados em previsão de falhas.

Como base para esta pesquisa, o trabalho será aplicado na estrutura de manutenção da cerâmica Portobello S.A, e servirá como laboratório para validação do modelo de proposta e coleta de evidências dos problemas proposto neste trabalho.

## 1.1 MOTIVAÇÃO DA PESQUISA

Apesar de as ações da política de manutenção preventiva proporcionarem melhor confiabilidade aos sistemas, quando a periodicidade e o escopo não são bem projetados, os custos podem ser elevados até o ponto de inviabilizar o negócio.

Além disso, sabe-se que a vida útil dos sistemas pode ser pré-identificada por meio de histórico de falha, recomendação de fabricante, análises preditivas ou outras técnicas. Assim, mesmo quando se considera o término da vida útil de um componente ou sistema, torna-se bastante trabalhoso a identificação do instante ótimo para parar um processo.

Essas são necessidades e razões que motivam o desenvolvimento de uma ferramenta computacional, que auxilie o processo de gestão de manutenção preventiva otimizada ao negócio, tendo o custo como atributo importante para a tomada de decisão.

Várias publicações abordam estudos a respeito de otimização dos planos de manutenção preventiva a partir de técnicas RCM, em diferentes segmentos industriais, como: indústria de energia, petróleo, papel e celulose entre outros.

Há, também, trabalhos recentes sobre manutenção de ativos. Dale (2013), por exemplo, cita os principais insucessos dos planos de manutenção preventiva e aborda que o RCM é uma metodologia mais adequada para melhorá-lo. Outras abordagens estão em Rigoni (2009) sobre Manutenção Centrada em Confiabilidade.

Vicente (2014), aborda o tema da definição e escolha dos equipamentos críticos em um processo, utilizando uma matriz de periodicidade em função da probabilidade de falha *versus* efeito no resultado financeiro do negócio na indústria de óleo e gás.

Baker (2010) desenvolveu uma modelagem matemática para definir a melhor política de manutenção com aversão ao risco financeiro da companhia, buscando, dessa forma, identificar qual estratégia de manutenção mais adequada ao fluxo financeiro do momento.

Cavalcante (2010) abordou a modelagem matemática usando método de multicritério e redes bayesianas para otimizar a utilização de técnicas de manutenção mais apropriadas a um determinado processo preventivo/corretivo, obtendo como resultado final a periodicidade ótima, Figura 1.

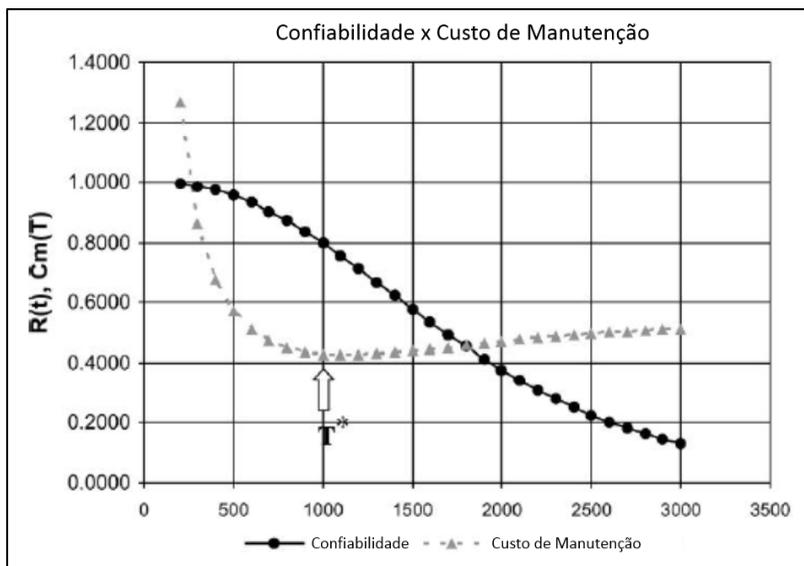


Figura 1: Otimização da periodicidade (CAVALCANTE, 2010).

Hai (2014) tratou da modelagem matemática com algoritmo genético para verificar a dependência de componentes que sofrem

manutenção preventiva e que afetam positivamente e negativamente o custo de manutenção.

Christer (1998) estudou a otimização da periodicidade de manutenção preventiva, a partir da taxa de falha dos equipamentos, aplicada na indústria de autopeças.

Apesar dessas abordagens iniciais citadas na literatura técnica, há a necessidade de adequar ou aprimorar o que já está dissertado na literatura. para o que está sendo vivenciado no âmbito da atividade de gestão de manutenção aplicada na estrutura de manutenção da cerâmica Portobello S.A.

Em face do interesse na pesquisa, a empresa, disponibilizará a base de dados para aplicar seu desenvolvimento teórico e avaliar o modelo decorrente da pesquisa.

## **1.2 OBJETIVO**

Desenvolver um modelo de otimização de periodicidade dos planos de manutenção preventiva de ativos industriais, por meio do estudo da vida útil dos sistemas, fundamentado pelos atributos de uso, tempo, condição, custos. Para tanto será desenvolvido um modelo matemático e, posteriormente, será feita a implementação computacional.

Espera-se que seja possível, a partir da mantabilidade, planejar a manutenção e o custo do ciclo de vida, para sistemas já existentes e para novas instalações.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Definir as variáveis envolvidas na definição de periodicidade.
- ✓ Elaborar modelagem matemática para o cálculo da periodicidade.
- ✓ Formular uma lógica para processar as informações.
- ✓ Implementar o programa computacional no MATLAB®.
- ✓ Desenvolver uma metodologia para modelagem de sistemas na ferramenta desenvolvida.
- ✓ Elaborar simulações no contexto da empresa.
- ✓ Avaliar os resultados com as condições do negócio, a partir de exemplos.

## 1.4 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia da pesquisa inicia com o estudo da literatura relacionada aos temas, delineados na Figura 2:

1. Estudo das referências: será contextualizada a evolução histórica e política da manutenção, TPM, RCM, confiabilidade, análise de falha, na literatura básica da área veiculada nos livros, teses e dissertações.
2. Estudo de casos: revistas científicas, técnicas e congressos.
3. Pesquisa de dados: CMMS (*Computerized Maintenance Management Software*) Portobello S.A, visitas em outros segmentos industriais (Siderúrgica, Papel & Celulose).
4. Elaboração do modelo: elaboração do modelo matemático, estudo de programação do MATLAB®, simulações e aplicação em campo.

O fundamento para o delineamento da pesquisa tem por base o conjunto de disciplinas e leituras efetuadas durante a primeira fase da formação para o mestrado.

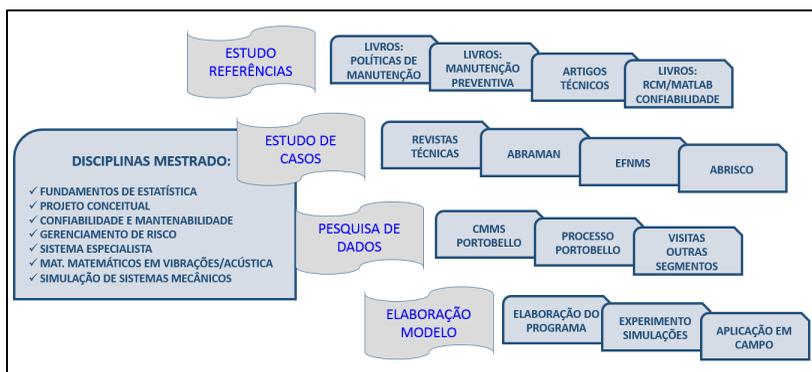


Figura 2: Metodologia para o desenvolvimento do trabalho.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho será apresentado em seis capítulos, sendo que neste primeiro capítulo está sendo apresentada uma visão geral do trabalho e seus respectivos objetivos.

O capítulo dois será dedicado a uma revisão bibliográfica sobre a manutenção, relatando a evolução histórica, as principais técnicas,

abordando TPM, RCM, confiabilidade, estudo da falha, paradas e a modelagem da função manutenção.

No terceiro capítulo será abordada a contextualização do problema, onde será evidenciada a necessidade de se estudar e calcular a periodicidade ótima de um plano de manutenção preventiva.

No quarto capítulo será desenvolvida a modelagem matemática e a implementação da ferramenta computacional com a utilização do MATLAB®, que é a principal proposta do trabalho.

No quinto capítulo será desenvolvida uma metodologia para modelar o sistema dentro da ferramenta desenvolvida, sendo, ainda, desenvolvidas várias simulações de processos industriais reais, utilizando as instalações do parque fabril Portobello S.A.

No sexto capítulo serão avaliados os resultados obtidos nas simulações e apresentadas as conclusões finais do trabalho em relação aos resultados obtidos.\*

---

O autor é mestrando em engenharia mecânica pelo programa POSMEC-UFSC, pós-graduado em engenharia de manutenção pela PUC-PR, graduado em engenharia mecânica pela UNIVALI-SJ, graduado em tecnólogo eletromecânica pela UNISUL e técnico em mecânica pela ETDF. Atua a mais de 19 anos em manutenção industrial, sendo 5 anos na indústria de bebidas e 14 anos na indústria cerâmica. Atuou como professor da disciplina de sistema hidráulico/pneumático no SENAI-SC por 4 anos. Já ocupou vários cargos na área; desde mecânico, técnico, planejador, analista, engenheiro e coordenador de manutenção. Atualmente é gerente de manutenção do parque fabril da cerâmica PORTOBELLO S.A. onde teve oportunidade de atuar em projetos de estruturação como: terceirização/internalização da manutenção, ampliações/montagem de fábricas, condução de grandes paradas; implantações: manutenção centrada/mista, manutenção preventiva/preditiva, CMMS e estruturação de indicadores de manutenção.

## 2 MANUTENÇÃO

No competitivo mundo dos negócios, o curto tempo de fabricação, exigência de qualidade e *just time* na entrega dos produtos requer que a manutenção esteja integrada de forma estratégica para otimização dos processos produtivos.

Para Bertsche (2008), manutenção significa métodos para determinação e avaliação da situação atual, bem como para a preservação e o restabelecimento da condição nominal das instalações, máquinas e componentes.

Waeyenbergh (2005) cita que a produção é responsável em processar as funções básicas em um processo produtivo, transformar matéria-prima, energia e mão de obra em bens e serviço. Para o autor, a manutenção é responsável em garantir a funcionalidade desses processos atuando no reparo, conservação e controle da vida útil de todos os equipamentos e instalações.

A Figura 3 representa a combinação da função produção e manutenção em um processo produtivo básico.

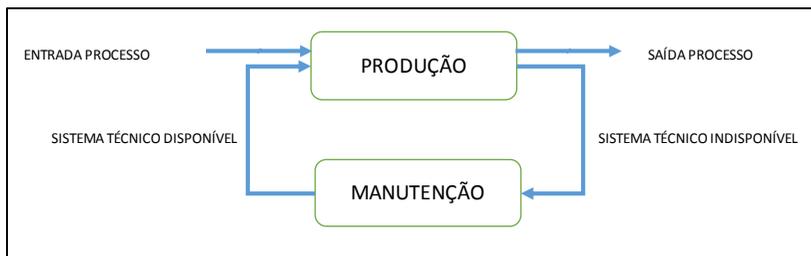


Figura 3: Função produção x manutenção (adaptado de WAEYENBERGH, 2005).

Dependendo do negócio de cada segmento industrial, existem maneiras distintas de operacionalizar a manutenção, as quais integram a “política de manutenção”.

A política de manutenção é um conjunto de regras, técnicas e conceitos que são abordados para operacionalizar a manutenção de forma a atender os principais interesses da empresa.

As principais políticas de manutenção, de acordo com Waeyenbergh (2005), são apresentadas na Figura 4.

POLÍTICAS DE MANUTENÇÃO		
Grupo	Base da Política de Manutenção	Ação da Manutenção
Manutenção Corretiva	Manutenção Baseada na Falha	Reparar
Manutenção Preventiva	Manutenção Baseada no Uso	Inspeccionar
	Manutenção Baseada no Tempo	Reparar
	Manutenção Baseada no Projeto	Substituir
Manutenção Preditiva	Manutenção Baseada na Detecção	Inspeccionar
	manutenção Baseada na Condição	Inspeccionar

Figura 4: Políticas de manutenção de acordo com Waeyenbergh (2005).

De acordo com Fuentes (2006), as ações de manutenção são usadas para controlar as falhas e restabelecer o equipamento a seu estado operacional, de preferência, “tão bom quanto novo”. As decisões mais importantes a serem tomadas na administração da manutenção referem-se à escolha dos itens que devem ser submetidos à manutenção, ao tipo de manutenção que deve ser realizado e ao momento em que as ações de manutenção devem ser realizadas.

A concepção de manutenção manifesta-se como um conjunto de ações necessárias para desenvolver as políticas específicas de manutenção numa organização de produção.

É a customização da forma como a organização pensa sobre o papel (função a cumprir) da manutenção, visto como uma função operativa. Assim, a concepção da manutenção se traduz em um conjunto de variadas formas de intervenções de manutenção (corretiva, preventiva, etc.) e de estruturação geral, pelas quais essas intervenções serão realizadas (WAEYENBERGH, 2005).

Em uma concepção da manutenção, reflete-se a ênfase e a percepção que tem a empresa sobre o papel da função de manutenção. Por exemplo, se a empresa decide integrar os operadores na manutenção dos equipamentos para aumentar os padrões de qualidade, tratará de se adequar à concepção da Manutenção Produtiva Total (TPM). Outra que está mais focalizada no controle dos custos da manutenção ao longo do ciclo de vida de um determinado produto, optará pela concepção de Custo do Ciclo de Vida (*Life Cycle Costing*-LCC).

Para cada política de manutenção adotada em uma organização, pode-se dispor de algumas desvantagens e vantagens. Cada parte do processo ou do equipamento pode necessitar de uma política específica, alinhada ao resultado final do processo. Ou seja, dependendo da complexidade de um processo, a gestão da manutenção pode ser

composta por uma combinação dessas políticas, sendo que a adequada composição fará um sistema de manutenção ser mais eficaz.

A Figura 5 trata da integração entre o sistema de produção e manutenção para sistemas reparáveis. Em sendo esta integração gestada pela concepção RCM, integrada com LCC, atributos como confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade são referenciais para tal política de manutenção. Neste caso, os recursos financeiros, humanos, físicos, tecnológicos e de informação compõem LCC, demandado para garantir um sistema produtivo com alta eficiência e produtividade. Neste contexto, se for requerido aumento de produtividade, ações de projetos deverão ser requeridas. Assim, ou se negocia as melhorias de itens do sistema produtivo com um setor de desenvolvimento de produto da empresa, ou se implementa um setor de projeto no corpo da gestão de manutenção.

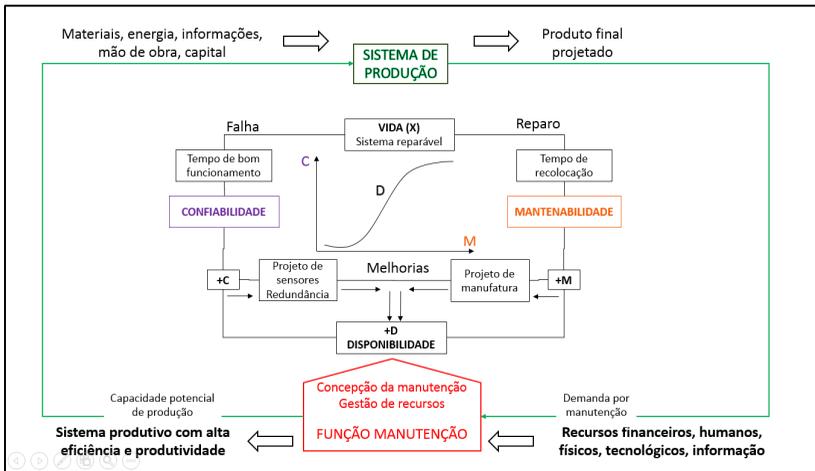


Figura 5: Manutenção no contexto produtivo (adaptado de FUENTES, 2006).

## 2.1 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

O objetivo da manutenção é maximizar a disponibilidade das instalações de produção com vista a produzir a quantidade desejada de produtos para atender a especificação de qualidade exigida. Esse objetivo deve evidentemente ser realizado dentro de um custo especificado, atendendo as exigências ambientais e de segurança. Mas isso é uma moderna definição para a manutenção. Manutenção não foi sempre

considerada desta forma. Embora a manutenção seja tão antiga quanto a humanidade, ela não foi reconhecida academicamente até a segunda parte do século 20. Como uma consequência da Segunda Guerra Mundial e do desenvolvimento aeroespacial, a manutenção realmente passou a receber atenção acadêmica.

Desde que as empresas industriais tornaram-se mais e mais conscientes das exigências de mercado, entrou em campo a manutenção, que pode reduzir parte da incerteza dos processos produtivos. As empresas que, inicialmente, acreditavam que “Manutenção é somente custo”, passaram a acreditar que “Manutenção também paga”. Como tal, pode-se dizer que a manutenção experimentou uma evolução notável. Portanto, vale a pena olhar a evolução histórica da manutenção, em Waeyenbergh (2005).

Em uma das fases evolutivas da manutenção, os projetos estavam preocupados com a rotação de eixos e rolamentos, rodas dentadas, aceleração e desaceleração dos mecanismos de manivela com limitação inerente de lubrificação perfeita. No entanto, a peça de deslizamento era dominante. O conhecimento disponível naquela época era a engenharia mecânica. As falhas foram-se transformando principalmente em fratura. As fraturas foram observadas e caracterizadas como fragilidade das peças. Concluía-se que essas falhas poderiam ser eliminadas, tornando-as mais fortes.

Restaram, então, as falhas devidas ao desgaste. Estas não poderiam ser eliminadas. No entanto, como essas falhas não apareciam até que um determinado período de uso fosse alcançado, concluiu-se que, se essas peças em questão fossem substituídas ou recondicionadas antes da primeira falha ocorrer, a falha real poderia ser evitada. Foi o início de uma manutenção preventiva periódica, baseada no tempo, na condição ou no uso.

O grande problema em questão era como determinar exatamente a quantidade ideal de manutenção preventiva. A pesquisa estatística com base nos intervalos de falha ficou conhecida como teoria da confiabilidade. Serviu em particular para a análise da confiabilidade de um sistema técnico na fase de projeto.

Com o surgimento da confiabilidade, estudos relacionados à vida útil eram abordados e, dessa forma, passou a ser utilizada a curva da taxa de falha. A Figura 6 apresenta a variação da taxa de falha de itens ao longo do ciclo de vida. De acordo com Smith (1993), a curva 1 divide-se em três fases distintas: prematura, vida útil e desgaste. Falhas prematuras são

relacionadas a falhas de projeto e fabricação, vida útil refere-se a falhas aleatórias que ocorrem no regime de uso normal do equipamento, e a fase de desgaste apresenta uma taxa de falha exponencial, relacionada ao desgaste natural dos sistemas. Já para Billinton (1983), define a curva 2, como comportamento de vida útil para sistemas mecânicos.

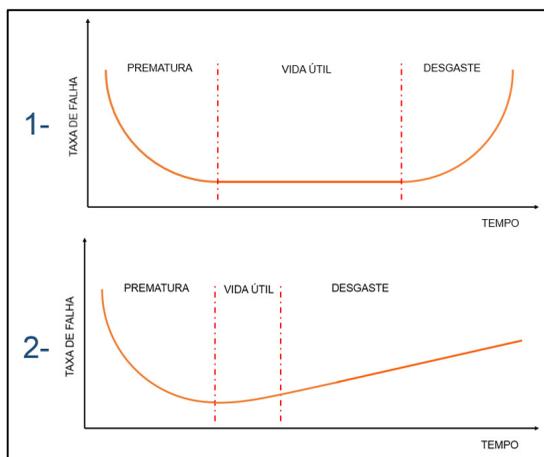


Figura 6: Curva da taxa de falha.

Após um período, passou-se a apostar, também, numa política de manutenção que, por muito tempo foi negligenciada; trata-se da chamada manutenção baseada na condição (MBC). Essa manutenção baseia-se no fato de que em muitos casos o processo que leva à falha é conhecido, permitindo prever falhas individuais antes que ocorram. No Reino Unido, é denominada de manutenção baseada na condição; nos EUA, manutenção preditiva.

## 2.2 MANUTENÇÃO NOS TEMPOS MODERNOS

Limitando-nos aos últimos 70 anos, é interessante averiguar, ainda que brevemente, como e por que a manutenção evoluiu durante o que chamamos de "tempos modernos", de acordo com Waeyenbergh (2005).

Após a Segunda Guerra Mundial, e como consequência dos desenvolvimentos tecnológicos ocorridos durante a guerra, o tempo de parada de processo entrou em foco de forma mais nítida, mais definida. A este respeito, uma mudança revolucionária na função de manutenção estava prestes a acontecer. Manutenção finalmente passou a ser

responsabilidade de um departamento especial, entrando-se, então, para a era do “Eu opero – Você conserta”. Essa ideia de que falhas no equipamento poderiam e deveriam ser evitadas gerou a política de manutenção preventiva. Na década de 1960, essa "questão técnica" consistia principalmente de revisão de equipamentos feitas em intervalos de tempo fixos.

Desde meados dos anos setenta, com o aumento de usinas nucleares e a expansão da indústria de processo químico, o processo de mudança na indústria reuniu um impulso ainda maior. As mudanças podem ser classificadas sob os títulos de novas expectativas, novas pesquisas e novas técnicas (Multifuncional, RCM, informática, etc.). O tempo de parada de processo sempre afetou a capacidade produtiva de ativos físicos, por redução da produção, aumentando os custos de operação e interferindo com o serviço ao cliente. Assim, as empresas começaram a ver que a manutenção não era uma função isolada. No processo de fabricação, os efeitos da paralisação estavam sendo agravados pelo grande movimento mundial para os sistemas “*just-in-time*”, onde pequenas avarias poderiam parar uma planta inteira. Nesse cenário, a manutenção tornou-se cada vez mais uma "contribuinte de lucro".

Na Figura 7, registra-se a evolução histórica da manutenção, no último século, segundo Waeyenbergh (2005).

< 1950	1950 - 1975	> 1975	→ "2000" →
<b>Mão de Obra (Simples)</b>	<b>Mecanismos (Complexos)</b>	<b>Automação (Mais Complexo)</b>	<b>Globalização (Atravessando Fronteiras)</b>
"Reparo depois que quebra"	"Eu opero - você conserta"	"Confiabilidade, Disponibilidade, Manutenibilidade"	"Manutenção agrupada com a produção"
	Disponibilidade/Longevidade/Custo/Manutenção preventiva/Gerenciamento das ordens de serviço	Segurança/Qualidade/Ambiente/Condições de monitoramento/Manutenção Baseada na Condição/Manutenção depende projeto/Multifuncional/Gerenciamento de Ativos	Conceito otimizado de manutenção/terceirização/Tecnologia de informação/Tecnologia de comunicação
Manutenção é:	Manutenção é:	Manutenção é:	Manutenção é:
"Um Tarefa da Produção"	"Uma Tarefa do Departamento de Manutenção"	"Não é Uma Função Isolada"	"Um Sócio Interno e Externo"
"Mal Necessário"	"Assunto Técnico"	"Contribui com o Lucro"	"Sócio"

Figura 7: Evolução da manutenção (adaptado de WAEYENBERGH, 2005).

De forma sintetizada, pode-se dividir a história da manutenção, de forma geral, em três períodos distintos de acordo com MOUBRAY (1997):

Primeiro período – anterior à Segunda Guerra Mundial, denominado como manutenção da primeira geração onde a disponibilidade dos equipamentos e a preocupação pela prevenção das falhas não era prioridade.

Segundo período – denominado manutenção da segunda geração, iniciou-se na década de 1950, onde o pós-guerra gerou crescente demanda por produtos, impulsionando a mecanização das indústrias, com máquinas numerosas e complexas. Planos de manutenção preventiva eram elaborados e passou a existir a preocupação com os tempos de parada dos equipamentos produtivos. O conceito de manutenção preventiva surge, então, aparecendo também a consideração de que as falhas nos equipamentos podiam e deviam ser previstas. Os custos de manutenção elevaram-se, sendo necessário maior controle.

Terceiro período – iniciado em meados da década de 1970, foi denominado manutenção da terceira geração. Neste período buscaram-se novas maneiras de maximizar a vida útil dos equipamentos produtivos, passando a existir a preocupação com alta disponibilidade e confiabilidade.

Conforme a norma PAS 55, BSI – BRITISH STANDARDS (2008), nos dias atuais, tudo é tratado como ativo e contabilizado no planejamento estratégico industrial. Com foco na lucratividade do capital investimento, a gestão de ativos possui como principal objetivo a prática sistemática e coordenada pelas quais uma organização gerencia, de forma ótima e sustentável, seus ativos, os desempenhos associados a eles, os riscos e as despesas ao longo dos seus ciclos de vida, tudo isso com o propósito de cumprir seu planejamento estratégico organizacional.

A manutenção é um referencial nos planejamentos estratégicos com conhecimento divulgado desde o responsável pela manutenção, o operador até os acionistas das empresas. A manutenção vai além da função dos itens, como preconiza a RCM. Contempla as tecnologias que estão embarcadas nos produtos e tem o custo como referência para as tomadas de decisão (DIAS, 2011).

### **2.3 CUSTO DE MANUTENÇÃO**

O custo de manutenção é uma variável de grande importância na definição de uma periodicidade de manutenção. É a base para qualquer organização industrial cujo lucro é fundamental para a continuidade do negócio.

Para Fouladirad (2014), os custos de manutenção preventiva podem ser otimizados, a partir do controle do nível de degradação dos componentes (taxa de falha) e do consequente ajuste da periodicidade das inspeções.

Yin (2011) cita a importância da modelagem matemática para os processos de otimização dos custos de manutenção, com a aplicação da resolução dos intervalos de manutenção otimizados.

De acordo com Loganathan (2005), a indústria do mundo todo gasta uma grande quantidade de dinheiro em manutenção das instalações. Cada ano a indústria dos EUA gasta em torno de 300 bilhões de dólares na manutenção e operação das plantas. Além do mais, é estimado que aproximadamente 80% desses gastos da indústria são direcionados a falhas crônicas dos equipamentos e a indenizações pessoais. Uma operação de redução de custo na ordem de 40 a 60% pode ser alcançada por meio de uma estratégia de manutenção eficaz.

O Congresso Brasileiro de Manutenção (2011) apresenta o custo de manutenção da indústria brasileira, em média, 3,95 % do PIB, conforme Tabela 1.

CUSTO DA MANUTENÇÃO NO BRASIL				
Ano da Pesquisa	Ano Base	PIB (Milhões de R\$)	CTM/FB (%)	Custo (Milhões de R\$)
2011	2010	3.675.000	3,95	145.162,500
2009	2008	2.900.000	4,14	120.060,000
2007	2006	2.322.000	3,89	90.325,800
2005	2004	1.769.202	4,10	72.537,282
2003	2002	1.346.028	4,27	57.475,396
2001	2000	1.101.255	4,47	49.226,099
1999	1998	914.188	3,56	32.545,093
1997	1996	778.887	4,39	34.193,139
1995	1994	349.205	4,26	14.876,133

Tabela 1: Custo da manutenção no Brasil (CBM, 2011).

O custo de manutenção é fator decisivo na viabilidade operacional de um equipamento ou processo. Dentro do contexto industrial, o custo

de manutenção chega a representar, em média, 20% dos custos fixos dos produtos.

Outro dado elaborado pela “*Profitability Engineers*”, pesquisa feita em 404 empresas da Europa e dos EUA (Tabela 2), mostra que o percentual médio do custo de manutenção em função do faturamento das indústrias é de 4%, variando em função de cada segmento.

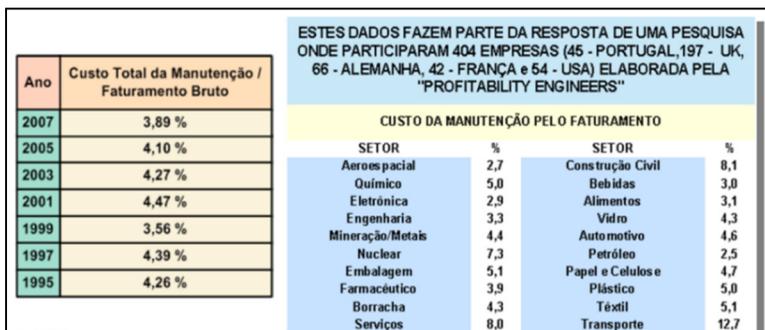


Tabela 2: Custo da manutenção x faturamento (CBM, 2011).

No Gráfico da Figura 8 pode-se observar que apesar do custo anual da manutenção ser crescente, o percentual do custo de manutenção em função do faturamento é decrescente. Isso representa uma melhor eficiência da atuação da manutenção nos processos.

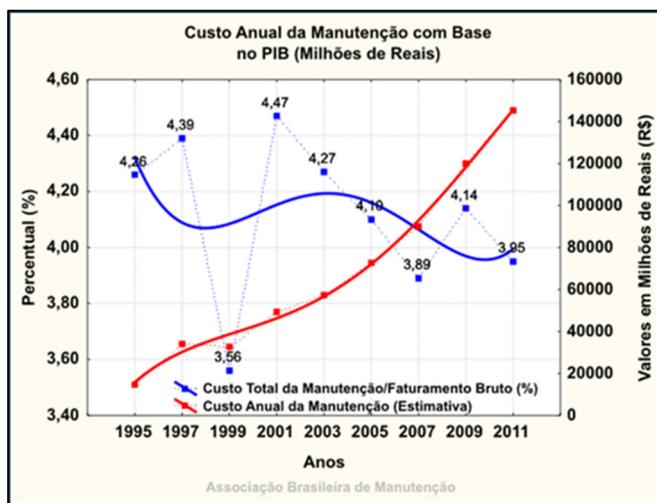


Figura 8: Custo anual da manutenção (CBM, 2011).

## **2.4 MANUTENÇÃO CORRETIVA**

De acordo com a norma ABNT NBR\_5462/1994 manutenção corretiva é a manutenção efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida.

Para Bertsche (2008), os métodos de manutenção corretiva são necessários para falhas parciais e totais nas instalações, dispositivos e componentes. Tais métodos servem para o restabelecimento das suas condições nominais e são descritos pelo termo reparação.

A definição mais simples que pode ser aplicada à manutenção corretiva é: todas as atividades de manutenção (reparar, ajustar) feitas após a ocorrência da falha, com o objetivo de reestabelecer a disponibilidade e a capacidade produtiva de um processo produtivo ou equipamento.

A política de manutenção corretiva é vantajosa quando aplicada em sistemas para os quais os custos de parada de processo não são muito significantes e quando as ocorrências de falha no processo não geram nenhum dano à segurança e ao meio ambiente. A principal vantagem em optar pela manutenção corretiva é que todos os componentes são utilizados por completo, ou seja, em 100% de sua vida útil, proporcionando uma redução significativa nos custos com materiais de manutenção.

De acordo com Fouladirad (2014), as principais desvantagens da manutenção corretiva é a ocorrência de parada não planejada no processo e a baixa produtividade da equipe (MO utilizada) pelo fato de os serviços não serem planejados. Na maioria das vezes, os mesmos reparos, quando executados corretivamente possuem um tempo de execução superior ao gasto numa manutenção preventiva.

Quando a política de manutenção corretiva é aplicada a um sistema, exige-se um forte trabalho para melhorar a manutenibilidade; é preciso capacitar melhor a mão de obra e melhorar as ferramentas, com o objetivo de reduzir os tempos de intervenção, dado que na maioria das situações eles são maiores que os tempos de intervenção programados.

## **2.5 MANUTENÇÃO PREVENTIVA**

De acordo com a norma ABNT NBR\_5462/1994, manutenção preventiva é a manutenção efetuada em intervalos predeterminados, ou

de acordo com critérios prescritos, destinada a reduzir a probabilidade de falha ou a degradação do funcionamento de um item.

Para Bertsche (2008), os métodos de manutenção preventiva permitem a determinação e a avaliação da situação atual, bem como a preservação da condição padrão e nominal das instalações, máquinas e componentes, considerando a execução de serviço, inspeção e revisão geral.

A manutenção preventiva é a política de manutenção empregada com o objetivo de corrigir as avarias do equipamento, antes que as falhas ocorram, por meio de ações de reparo, substituição de peças, inspeção e ajustes. A manutenção preventiva pode ser baseada no uso, tempo ou condição dos equipamentos. Ainda conforme Bertsche (2008), manutenção preventiva promove métodos de manutenção, que são realizadas de forma preventiva, a um tempo predeterminado ou periodicamente definida, após certa quantidade de horas de operações. Método de manutenção preventiva permite a determinação e a avaliação da situação atual, bem como para a preservação do estado nominal das instalações, máquinas e componentes. Métodos de manutenções preventivas incluem:

**Serviço:** métodos para a preservação do estado nominal, por exemplo, a limpeza, substituição dos lubrificantes e meios de resfriamento, ajuste, calibração.

**Inspeção:** Métodos para a determinação e julgamento da situação atual, por exemplo, inspeção de desgaste, corrosão, vazamentos, conexões soltas, podendo ser periódico ou contínuo de medição e análise.

**Revisão Geral:** Desmontar até determinado nível de componentes, conjuntos ou elementos que possam ser alcançados e, se necessário, substituir os componentes ou conjuntos que apresentam evolução de falhas.

Segundo Souza (2009), manutenção preventiva é uma atividade técnica que tem como objetivo principal a prevenção da ocorrência de uma falha ou de uma parada do equipamento por quebra; também apoiar a manutenção corretiva por meio da aplicação de trabalho sistemático, ou ainda ser responsável pela intervenção que poderá interromper ou não a produção de maneira planejada e programada.

De acordo com Smith (1993), a atualização ou a elaboração de um plano de manutenção preventiva deve atender as necessidades básicas conforme fluxograma da Figura 9.

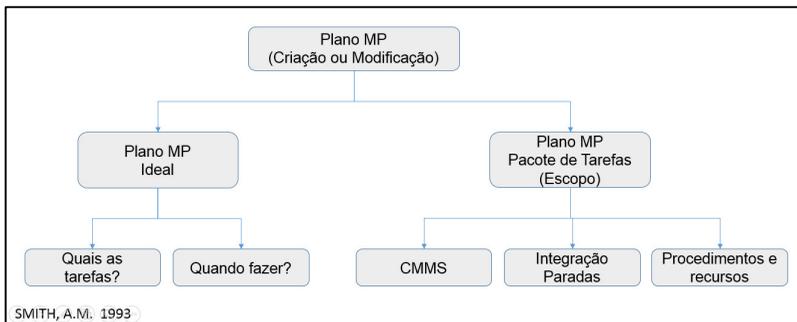


Figura 9: Elaboração/Atualização de um plano de MP (adaptado de SMITH A. M., 1993).

Com o objetivo de prever as possíveis falhas e garantir a disponibilidade dos processos, planos de manutenções preventivas são empregados nos equipamentos. Esses planos são fundamentados no tempo a partir de histórico de falhas, recomendações dos fabricantes, inspeções de campo e projetos de melhorias com o objetivo de eliminar a causa-raiz.

Um plano de manutenção preventiva ideal está fundamentado na definição do escopo, identificada pela pergunta: “Quais as tarefas?”, e na periodicidade da intervenção, identificada por: “Quando fazer?”.

Isso mostra que a periodicidade é um fator muito importante na otimização de um plano de manutenção preventiva.

Podemos também citar outra modalidade de manutenção preventiva, denominada de “Parada”, muito empregada na indústria de processo contínuo, como refinarias, petroquímicas, siderúrgica, dentre outras. Essa modalidade de manutenção é caracterizada pela amplitude do evento, que implica um grande número de atividades e o envolvimento de profissionais, tornando-a especial no aspecto de seu gerenciamento.

No Brasil, a maior aplicação de “Paradas” é na indústria de petróleo e petroquímica, onde elas chegam a utilizar de 1.500 a 5.000 profissionais, com duração do evento entre 20 a 40 dias, podendo ocorrer em intervalos entre 2 a 4 anos. Na maior parte do mundo, os estudos e publicação de eventos dessa natureza, conhecidos na língua inglesa por “*Turnaround, Shutdowns* ou *Outages*”, são, quase sempre, referenciados em aplicação de refinarias e petroquímica.

A parada é um evento especialmente importante em plantas de processamento contínuo, que operam 24 horas por dia, sete dias por semana. Após um período determinado de operação (que se chama de

“campanha”), a planta toda para, e é submetida a uma grande manutenção preventiva, que colocará os equipamentos e os sistemas aptos para trabalhar mais uma campanha (VERRI, 2008).

Paradas programadas de plantas industriais são eventos marcantes em uma unidade industrial. Em um período entre 12 a 24 meses, as atividades começam num ritmo crescente, inicialmente com um planejamento macro desenvolvido por um grupo de técnicos com bastante experiência, e várias solicitações da produção, onde se origina a formação de todo o escopo de trabalho. O detalhamento do planejamento vai aumentando, envolvendo outros departamentos, como operação da planta que será envolvida na parada, engenharia básica e detalhamento, inspeção de equipamentos, compras de materiais e contratação, segurança industrial, segurança patrimonial, recursos humanos, comunicação, financeiro e controle, enfim, todos os departamentos da empresa.

Uma parada de manutenção requer um grande planejamento, dado que se assim não for, pode apresentar vários danos à companhia quando o prazo da manutenção não é cumprido, os custos são superiores ao planejado ou ainda se as qualidades dos serviços não forem satisfatórias; futuras falhas irão ocorrer no processo antes das datas previstas.

As indústrias pioneiras em gerenciamento de Paradas tratam o evento como um projeto e aplicam referenciais de Gerenciamento de Projeto, como o referencial PMI (PMBok 2000, V 1.0) a cada evento.

## **2.6 TPM (TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE)**

A TPM surgiu como suporte à demanda crescente do alto nível tecnológico, quando se exigiam ações de manutenção e operação que permitissem um menor nível de desperdício e maior precisão na execução das tarefas. A crescente complexidade dos equipamentos e mecanismos de produção exigiu um ambiente industrial mais integrado e com uma nova cultura de operação e manutenção, dois elementos básicos da organização industrial. A TPM propôs um novo ambiente de manutenção, em que o operador cumpriria papel de destaque na preservação dos equipamentos, assumindo responsabilidades sobre a integridade da instalação, e a manutenção especializada, além de cumprir tarefas específicas de manutenção, preocupar-se-ia com a operação dos equipamentos.

De acordo com Nakajima (1989), a TPM surgiu no Japão no final da década de 1960, embora alguns de seus conceitos tenham sido

empregados desde a década de 1950. A metodologia surgiu logo após o esgotamento dos modelos de manutenção preventiva (Baseado no Tempo), tendo em vista as novas exigências tecnológicas e o recrudescimento da disputa de mercado. A TPM foi, inicialmente, implantada na Nippon Denso co., empresa do grupo Toyota, entre 1961 e 1969. Por esse trabalho, a Nippon Denso co. recebeu o prêmio PM da JIPM (*Japanese Institute for Plant Maintenance*) em 1971, a partir de quando a metodologia passou a receber a denominação de Manutenção Produtiva Total (TPM – *Total Productive Maintenance*), sendo lançada oficialmente como uma metodologia de manutenção. A TPM popularizou-se no Japão durante década de 1970, e foi apresentada no Brasil, em 1986, pelo Seiichi Nakajima (NAKAJIMA, 1989).

De acordo com Waeyenbergh (2005), o incremento da automação na Nippon Denso co. aumentou a demanda por serviços de manutenção e, conseqüentemente, a necessidade de mais profissionais de manutenção. Para atender essa nova demanda, surgiu a ideia de executar as atividades de rotina da manutenção e as atividades mais simples, como limpeza, lubrificação e reaperto, com o próprio operador da máquina. A essa modalidade de manutenção chamou-se de manutenção autônoma.

A TPM tem por objetivo atingir a quebra-zero e maximizar a eficiência global dos equipamentos por meio do envolvimento de todos empregados. A eficiência global é medida pelo indicador OEE (*Overall Equipment Effectiveness*). Cria-se uma cultura de que o operador deve conservar o equipamento, ao invés de simplesmente adquirir a consciência de preservação. Vê-se, portanto, que a TPM é um processo de educação, pelo qual se procura implantar uma nova cultura de trabalho. A TPM propõe a integração total, homem x máquina x empresa, sendo que, dessa forma, o trabalho de manutenção dos meios de produção passa a constituir-se na preocupação de todos. A TPM procura romper com a tradicional relação “Eu opero – Você conserta”, em função do envolvimento de todos em sua implantação.

Inicialmente, as atividades de TPM (tradicional) eram determinadas pelo departamento de produção e sua definição seguia cinco estratégias básicas.

- ✓ Maximizar a eficiência global dos equipamentos.
- ✓ Estabelecer um sistema de manutenção que cubra toda vida do equipamento.
- ✓ Envolver todos os departamentos que planejam, usam ou mantêm os equipamentos.

- ✓ Envolver desde a alta gerência até o chão-de-fábrica.
- ✓ Promover a manutenção preventiva através da motivação.

De acordo com Nakajima (1989), a metodologia da TPM é estruturada em oito pilares básicos, conhecidos como pilares básicos de sustentação da TPM. Os oito pilares básicos da TPM são:

Manutenção Autônoma (MA): baseia-se nos treinamentos teórico e prático recebidos pelos operários e no espírito de trabalho em equipe para a melhoria contínua das rotinas de produção, manutenção e no aprimoramento da capacitação técnica.

Manutenção Planejada (MP): Refere-se às rotinas de manutenção preventiva e preditiva, baseadas, respectivamente, no tempo ou na condição do equipamento, visando à melhoria contínua da disponibilidade e confiabilidade, além da redução dos custos de manutenção focados na Quebra/ Falha zero.

Educação e Treinamento (ET): refere-se à aplicação de treinamentos técnicos e comportamentais para liderança, a flexibilidade e a autonomia das equipes, capacitação da mão de obra, com responsabilidade de capacitar os colaboradores com treinamentos específicos e para melhor utilização das ferramentas.

Melhoria Específica (ME): utiliza-se do conceito de Manutenção Corretiva de Melhorias para atuar nas perdas crônicas relacionadas aos equipamentos, com foco em eliminação das mesmas.

Controle Inicial (CI): minimização das ineficiências em novos produtos, processos e equipamentos. Responsável por garantir novos equipamentos como menores custos e *layout* apropriado.

Manutenção da Qualidade (MQ): defeito zero – consolidação da qualidade assegurada. Garantir a qualidade dos produtos e serviços utilizando os recursos e ferramentas da qualidade.

Segurança, Higiene e Meio Ambiente (SHE): acidente zero – minimização do risco de acidentes do trabalho e riscos ambientais. Responsável por garantir a segurança dos colaboradores na empresa, trabalhando no método de conscientização e melhorias nos postos de trabalho, seguindo e trabalhando com todas as normas ambientais.

Melhoria dos processos administrativos: também conhecido como TPM de escritório, ou TPM *Office*, utiliza-se dos conceitos de organização e eliminação de desperdícios nas rotinas administrativas, que de alguma maneira acabam interferindo na eficiência dos equipamentos produtivos e processos.

A estrutura básica da TPM pode ser mais bem interpretada na Figura 10.

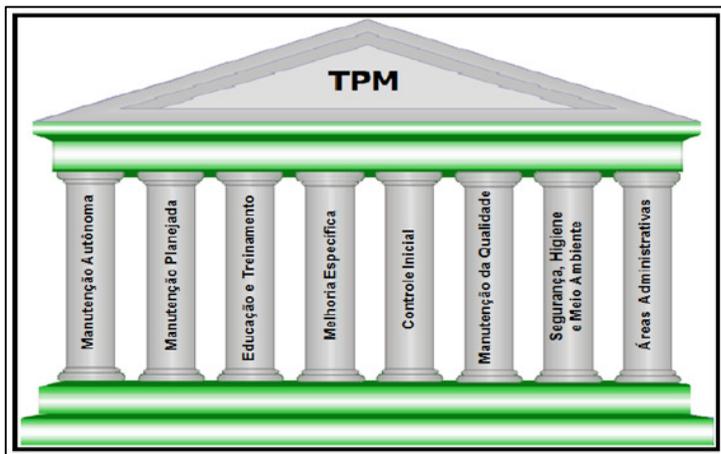


Figura 10: Pilares básicos da TPM (NAKAJIMA, 1989).

A TPM é uma metodologia empregada na manutenção para o atingimento de alta performance. Embora composta de excelentes práticas, a TPM não pode atingir os melhores resultados em todas as modalidades de manutenção industrial. Criada dentro da indústria automobilística, a TPM possui grande aplicabilidade na indústria de manufatura, onde as características de manutenção são pequenos reparos e baixo tempo de intervenção, bem diferente do que ocorre em indústrias de processo contínuo que se caracterizam por máquinas mais pesadas. A maior característica operacional da TPM é a sistematização de atividades de manutenção simples, que podem ser executadas pela operação. Exemplos de aplicação da TPM podem ser vistos em França (1999) e Biasotto (2006).

Neste trabalho, não será dado destaque à TPM como metodologia de manutenção, uma vez que seu foco está na metodologia RCM, a qual possui uma preocupação maior com paradas de processo que têm grandes impactos financeiros e abordagem de técnicas de controle da vida útil dos componentes, de acordo com a metodologia da confiabilidade.

## 2.7 RCM (RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE)

RCM é uma metodologia que nasceu na aviação civil na década de 1960, impulsionada pela necessidade de melhorar os custos, garantir confiabilidade e disponibilidade das aeronaves. A partir de dados estatísticos das falhas, a metodologia RCM dimensiona periodicidade, planos de manutenção preventiva e suas técnicas, inspeção, reparo, substituição ou alteração de projeto; com o objetivo final de mitigar as falhas e aumentar a confiabilidade dos sistemas. É um tema bastante atual em trabalhos recentes como: LRS Plant (2012), Vicente (2014), Dale (2013) e Rigoni (2009).

Segundo Souza (2009), RCM é uma metodologia que determina as ações de manutenção dos equipamentos, conjuntos e instrumentos baseados em critérios de confiabilidade intrínsecos das funções do equipamento e de seus periféricos na análise das falhas e seus efeitos.

De acordo com Rigoni (2009), o objetivo principal do RCM é reduzir o custo de manutenção, focalizando as funções mais importantes do sistema, evitando ou removendo ações de manutenção que não são absolutamente necessárias.

Para Lafraia (2001), RCM possui, como principal objetivo, assegurar que um sistema ou item continue a preencher as funções desejadas. Determina-se “*o que deve*” ser feito para assegurar que um equipamento continue a cumprir suas funções no contexto operacional. A ênfase é determinar a manutenção preventiva necessária para manter o sistema funcionando, ao invés de tentar restaurar o equipamento a uma condição ideal.

De acordo com Moubray (1997) e Smith (1993 e 2004), o RCM é, portanto, uma metodologia para analisar as funções do sistema e o modo como as funções podem falhar, para, então, aplicar um critério de priorização explícito baseado em fatores ambientais, econômicos, operacionais e de segurança, a fim de identificar as tarefas de manutenção aplicáveis e efetivas.

A origem e a evolução histórica do RCM podem ser vistas em Rigoni (2009).

### 2.7.1 CONCEITOS E METODOLOGIAS

De acordo com Smith (1993), o RCM pode ser apresentado por quatro principais características:

1. Preservação da função.
2. Identificação dos modos de falhas que afetam as funções.
3. Utilização de um diagrama lógico de decisão.
4. Seleção das tarefas de manutenção preventiva aplicáveis e eficazes.

O RCM é reconhecido como um método de gestão de manutenção inovador justamente por apresentar características exclusivas. Existem algumas características básicas que alicerçam a teoria de RCM e, como tal, podem ser caracterizadas como pilares básicos da metodologia, quais sejam:

- ✓ enfoque funcional;
- ✓ visão sistêmica;
- ✓ ênfase na consequência das falhas.

Na metodologia do RCM, o enfoque funcional está relacionado à função do sistema, diferente dos métodos tradicionais da manutenção que possuem o enfoque na preservação do equipamento. O funcionamento do equipamento é uma consequência da preservação da função que esse equipamento deve cumprir dentro do sistema definido. Como exemplo, pode-se citar um cilindro hidráulico, cuja função é converter energia hidráulica em energia mecânica a uma determinada força e num determinado deslocamento. Mesmo que o cilindro esteja gerando movimento, mas não esteja atingindo a força projetada, ele não estará cumprindo sua função e, portanto, não estará operando corretamente. No RCM a visão sistêmica enfatiza a análise da manutenção que procura associá-la ao equipamento genericamente. Segundo Smith (2004), sistema pode ser assim conceituado: “Um agrupamento lógico de componentes que irão cumprir funções-chaves exigidas pela planta”. A visão sistêmica do RCM procura dar uma conotação diferenciada para cada equipamento ou sistema, de acordo com a importância no processo ou em função da condição de trabalho. Neste caso, equipamentos idênticos podem ser tratados de forma diferenciada pelo RCM na definição de tarefas de manutenção preventiva. Pode-se fazer uma analogia em relação ao processo ou equipamento em que um determinado sistema esteja inserido. Ou seja, se um mesmo sistema estiver executando uma função em um processo que gera grande impacto financeiro ou ambiental, a tratativa perante o RCM será mais criteriosa, quando comparada a outro sistema que esteja executando uma função em um processo com menores impactos financeiros ou ambientais.

Ênfase nas consequências é outro pilar básico do RCM. Daí que a consequência da falha é mais importante que a característica técnica, o que sugere a ideia geral de que a prevenção de uma falha nada mais é do que a eliminação ou mitigação das consequências (SMITH, 2004). No RCM, a rotina de manutenção visa a evitar, reduzir, ou eliminar as consequências da falha, ao invés de prevenir a falha simplesmente, como normalmente acontece na concepção tradicional de manutenção. Como resultado prático, a manutenção passa a enfatizar o custo da falha, sobretudo os desdobramentos, como perda de produção, risco pessoal ou do ambiente. Quanto à evidência, uma falha pode ser oculta ou evidente. Quanto à segurança e à produção, as categorias de consequências da falha, comumente encontradas na literatura do RCM, são:

- ✓ Consequências na segurança e meio ambiente.
- ✓ Consequências operacionais.
- ✓ Consequências não operacionais (apenas econômicas).

### 2.7.2 IMPLEMENTAÇÃO

O RCM consiste em um processo lógico, compreendido de etapas bem definidas com o objetivo final de elaborar um plano de manutenção consistente, que proporcione redução de custo e maior confiabilidade. Implementações práticas podem ser vistas em Rigoni (2009) e França (1999).

De acordo com Smith (1993), as quatro características básicas do RCM, podem ser mais bem representadas em sete passos:

1. Seleção do sistema e coleta de informações.
2. Definição de limite de sistema.
3. Descrição do sistema e diagrama de blocos funcional.
4. Falhas da função do sistema – preservar as funções.
5. Modo de falha e análise de efeitos (FMEA) – Identificar modos de falha que podem mobilizar as funções.
6. Análise da árvore (FTA) – priorizar função e necessidade através dos modos de falha.
7. Seleção de tarefa – selecionar apenas tarefas aplicáveis e eficazes para o plano de MP.

Observa-se que os passos de 4 a 7 correspondem ao método da característica básica número quatro do RCM; “Seleção das tarefas de manutenção preventiva aplicáveis e eficazes”, apresentado na seção 2.7.1.

## 2.8 CONFIABILIDADE

Nos dicionários, “confiabilidade” é definida como sendo a capacidade de uma pessoa ou sistema realizar e manter seu funcionamento em circunstâncias de rotina, bem como em circunstâncias hostis e inesperadas.

De acordo com a norma NBR 5462 (1994), confiabilidade é a capacidade de um item desempenhar uma função requerida, sobre condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo.

Bertsche (2008) conceitua confiabilidade como sendo a probabilidade de um produto não falhar sob determinada condição de funcionamento e ambiental, durante um período de tempo definido.

Para Lafraia (2001), confiabilidade é a probabilidade de que um componente ou sistema permaneça funcionando dentro dos limites especificados de projeto, não falhe durante o período de tempo previsto para a sua vida, dentro das condições de agressividade ao meio.

Mais que um conceito, a confiabilidade é uma área da engenharia que envolve vários especialistas de engenharia, estatística, matemática, computação, física, química e biologia. A aplicação nos sistemas técnicos por parte das diversas áreas da engenharia, normalmente denominada de Engenharia de Confiabilidade, tem sido feita a partir de técnicas de análise como: Análise da árvore de falha (FTA); Análise do modo e do efeito da falha (FMEA); Análise da causa raiz; Análise de risco, etc.

Dias (2004) define a confiabilidade em quatro estruturas fundamentais: 1 – probabilidade, 2 – comportamento adequado, 3 – período de uso, 4 – condições de uso.

As métricas que definirão a confiabilidade de um produto, sistema ou componente revelam a sua natureza probabilística. Para tratar devidamente os dados dentro dessa natureza probabilística, há que se organizar informações, segundo uma racionalidade técnico-científica, de forma a poder processar estatisticamente os dados e produzir resultados quantitativos ou qualitativos, a partir de observações empíricas planejadas. Cada um dos parâmetros observados pode ser definido matematicamente, e ser associado a variáveis aleatórias representadas pela função tempo ( $t$ ), ou período de vida ( $x$ ), número de ciclos ( $n$ ), etc.

A métrica ou a probabilidade associada à variável aleatória ( $x$ ) pode ser exemplificada por:

- ✓ Número de falha que ocorrerá num período especificado de uso.

- ✓ Tempo ou distância percorrida.
- ✓ Tempo médio até a parada ou tempo de parada.
- ✓ Perda de rendimento esperado devido a falha.
- ✓ Perda de produção esperada devido a falha.

Para definir um comportamento adequado, necessita-se de um padrão de referência, baseado nas necessidades de mercado (*benchmarking* – a melhor prática), ou em relação aos conhecimentos técnicos dos agentes de projeto, produção e manutenção. Esse padrão pode estar associado à média ou a um critério de medida efetiva, que se usa para comparar o comportamento do que se deseja avaliar.

Este trabalho tratará como “vida útil” a métrica que caracteriza a natureza temporal da confiabilidade e é utilizada para definir o intervalo de tempo sobre o qual será calculada a probabilidade de falha ou probabilidade de sucesso. Deve ser analisado a partir da premissa básica de que a falha ocorrerá, mais cedo ou mais tarde. O período padrão de medição pode ser contínuo ou discreto. Dentro do contexto da manutenção industrial, esses tempos podem ser:

- ✓ Tempo de falha paramétrica ou devido à deterioração.
- ✓ Tempo até a primeira falha ou falha inicial (MTTFF).
- ✓ Tempo médio até a falha (MTTF).
- ✓ Tempo médio entre falhas (MTBF).
- ✓ Tempo de uso desejado.
- ✓ Tempo médio para reparo (MTTR).

Condições de operação referem-se à adequação do ambiente de uso do equipamento estabelecido no projeto. Essa condição necessita ser bem definida, dado que o sucesso de um evento pode não se manter se as premissas anteriormente estabelecidas forem alteradas. É importante definir padrões de pressão, temperatura, umidade, esforços, deformações, número de ciclos, distância percorrida, etc., para garantir a confiabilidade inicialmente proposta.

## **2.9 ESTATÍSTICA APLICADA À CONFIABILIDADE**

Na área de conhecimento da confiabilidade, distribuições estatísticas são utilizadas para quantificar os eventos, número de falha, intervenção, etc. As distribuições podem ser classificadas em distribuições discretas, cujas saídas podem ser variáveis do tipo: cara/coroa, passa/não-passa, bom/ruim; ou contínuas, que medem eventos

que se desenvolvem ao longo de uma variável aleatória contínua como: tempo, número de ciclos, processo de deterioração química, radiação, entre outras.

As distribuições contínuas são as mais utilizadas para modelar o comportamento de falha dos sistemas industriais. São clássicas na área de confiabilidade, a utilização das distribuições; Normal ou Gaussiana, Logonormal, Exponencial e Weibull.

### 2.9.1 DISTRIBUIÇÃO NORMAL OU GAUSSIANA

Amaral (2005) informa que a função densidade de probabilidade da distribuição Normal tem uma distribuição simétrica e por isso não representa a maioria dos eventos de falha de equipamentos ou sistemas. Para essa distribuição, a forma e a posição da função densidade de probabilidade é especificada em termos do valor médio e do desvio-padrão. Essas propriedades criam a possibilidade de usar a distribuição normal incorretamente, já que toda distribuição de qualquer evento pode ser caracterizada pela média e pelo desvio-padrão. As equações utilizadas na confiabilidade para essa distribuição são:

$$\text{Densidade de probabilidade} - f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (01)$$

$$\text{Função da confiabilidade} - R(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_t^\infty e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (02)$$

$$\text{Função da probabilidade de falha} - F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^t e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} dt \quad (03)$$

$$\text{Função da taxa de falha} - \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (04)$$

Sendo:

$\mu$  – O valor médio, média aritmética

$\sigma$  – Desvio padrão

t – variável aleatória

## 2.9.2 DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

É um modelo apropriado para descrever a vida de sistemas complexos, como máquinas e equipamentos constituídos de diversos itens. Na distribuição exponencial, a taxa de falha é constante  $\lambda(t)$  ao longo do ciclo de vida e, por isso, é utilizada para o período normal de uso, ou fase 2 da curva da taxa de falha ou “curva da banheira”, conforme apresentado na seção 2.1, Figura 6. Significa que as falhas ocorrem de forma aleatória, não apresentando uma tendência de crescer ou decrescer no período considerado. Por isso, o acompanhamento da falha deve ser feito a partir da predição, uso de sensores, ou simplesmente deixar falhar. É para os itens que apresentam essa tendência que ações corretivas ou preditivas tornam-se processos adequados de manutenção, incluindo aí a manutenção centrada em confiabilidade, RCM, como citado por Amaral (2005). As equações utilizadas para essa distribuição são:

$$\text{Densidade de probabilidade - } f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (05)$$

$$\text{Função da confiabilidade - } R(t) = e^{-\lambda \cdot t} \quad (06)$$

$$\text{Função da probabilidade de falha - } F(t) = 1 - e^{-\lambda \cdot t} \quad (07)$$

$$\text{Função da taxa de falha - } \lambda(t) = \textit{Constante} \quad (08)$$

Sendo:

$t$  – Variável aleatória (Tempo, número de ciclo, quilometragem, etc.).

$\lambda$  – Parâmetro de forma –  $\lambda = 1/T_m > 0$ ; inverso da vida útil.

## 2.9.3 DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

Conforme Weibull (1951), essa distribuição é uma ferramenta estatística que possibilita modelar a distribuição de falha de sistemas mecânicos originadas por desgaste, com bastante precisão.

Bertsche (2008) afirma que, com a distribuição de Weibull, é possível modelar diferentes comportamentos de falha através de uma função de densidade de probabilidade.

De acordo com Lafraia (2001), a análise de Weibull permite determinar a fase de falhas prematuras, a fase de falhas casuais ou aleatórias (taxa de falha constante) e a fase de falhas por desgaste.

Para Amaral (2005), a distribuição postulada por Waloddi Weibull (1951) é a que melhor representa o evento relacionado à taxa de falha de sistemas técnicos. Permite representar o evento de falha nos três períodos mais significativos do ciclo de vida do produto, caracterizado pela curva da taxa de falha (Figura 6) como sendo: fase 1, como taxa de falhas decrescente, caracterizada por falhas de projeto e/ou de processo, chamado também de período de juventude; fase 2, com taxas de falha aleatórias durante o período normal de uso. Esse período se aproxima da distribuição exponencial e é chamado de período de vida útil. A fase 3 tem taxa de falha crescente dado que descreve o período final de vida, chamado de período de envelhecimento. O aumento da taxa de falhas se manifesta gradativamente, na forma de desgaste, fadiga, corrosão, vazamento, aumento de temperatura, ruído, vibração, perda de características elétricas, eletrônicas, químicas e físicas. Para acompanhar essas variáveis, podem-se utilizar sensores para definir padrões de vida e orientar os procedimentos de manutenção, na forma de recuperação, troca ou descarte. Devido à predição das falhas em função dos parâmetros estabelecidos, tem-se a chamada manutenção preditiva ou manutenção preventiva de condição.

A distribuição de Weibull pode ser tripamétrica ou bipamétrica. Com a distribuição tripamétrica, pode-se determinar o período inicial de vida. Neste período inicial é também considerado o tempo gasto em testes e ensaios de equipamentos eletrônicos (ensaios *burn-in*) ou rolamentos. Em alguns casos é o período de tempo decorrido até a primeira falha de um item, num lote considerado. Na distribuição bipamétrica, este período inicial é desconsiderado, dado que o período de vida útil é muito maior que este período inicial. Em qualquer dos casos, o parâmetro mais significativo da distribuição em termos de decisões para o projeto é o parâmetro de forma, normalmente representado por ( $\beta$ ). É aquele que dá a aparência da distribuição. Se  $\beta < 1$ , os dados indicam que o item está se comportando como se estivesse na parte inicial da vida, fase de juventude. Nesses casos, diz-se que as falhas têm origem no projeto, no processo, ou na utilização, devido à inadequada aplicação. Quando  $\beta = 1$ , a função densidade de probabilidade equivale à função distribuição exponencial, a taxa de falha é constante e o item está na fase de vida útil. Quando  $1 < \beta < 2$ , indica que se tem um rápido aumento da função densidade de probabilidade para curto período de vida; ponto evidente para definir a necessidade de manutenção preventiva. A curva passa a ter uma taxa de crescimento, praticamente constante, aproximando-se, neste

caso, de uma logonormal. À medida que o parâmetro de forma aumenta,  $\beta \geq 3,44$ , a distribuição de Weibull se aproxima da distribuição Normal. No limite, quando  $\beta$  assume valores muito grandes, a função tende a concentrar todos os pontos próximos a uma reta paralela ao eixo das ordenadas, traçada a partir da taxa de falha característica.

A distribuição de Weibull pode ser caracterizada matematicamente, conforme equações abaixo:

$$\text{Densidade de probabilidade - } f(t) = \frac{\beta}{T-t_0} \left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{\beta-1} \times e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^\beta} \quad (09)$$

$$\text{Função da confiabilidade - } R(t) = e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^\beta} \quad (10)$$

$$\text{Função da probabilidade de falha - } F(t) = 1 - e^{-\left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^\beta} \quad (11)$$

$$\text{Função da taxa de falha - } \lambda(t) = \frac{\beta}{T-t_0} \left( \frac{t-t_0}{T-t_0} \right)^{\beta-1} \quad (12)$$

Sendo:

$t$  – Variável aleatória (Tempo, número de ciclo, quilometragem etc.).

$T$  – Parâmetro de escala, vida característica (vida útil).

$\beta$  – Parâmetro de forma.

$t_0$  – Tempo livre de falha, parâmetro de localização, determinação do tempo inicial da falha.

Conforme apresentado anteriormente, a distribuição pode ser triparmétrica ou biparmétrica. Para representação biparmétrica, substitui-se a variável  $t_0$ , por “zero”, transformando a equação confiabilidade, por exemplo, em:

$$\text{Função da confiabilidade - } R(t) = e^{-\left( \frac{t}{T} \right)^\beta} \quad (13)$$

## 2.10 FALHA

É um evento que interrompe a função do item. Esta situação engloba uma falha por colapso total do sistema, quando deixa de operar por completo, ou condições em que o sistema continua operando, mas fora de uma faixa tolerada, desviando-se, assim, do ponto desejado de

operação e comprometendo sua funcionalidade. Generalizando, pode-se dizer que o desempenho de um sistema é a resposta que este fornece a uma dada entrada, ou excitação, como a Figura 11 ilustra.

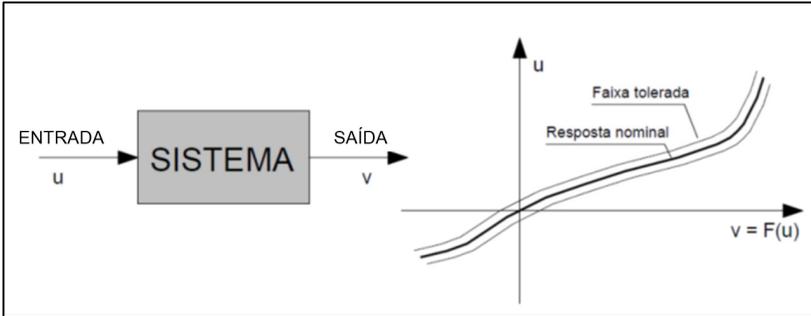


Figura 11: Limite de tolerância da falha (DIAS, 2004. Cap. 04).

Com esta definição de falha, quando a resposta cai fora da faixa tolerada, o sistema já deixa de cumprir sua função e, logo, falhou. A causa desta falha pode ser realmente um colapso, na forma de uma ruptura, ou pode ser um desgaste excessivo, ou uma falta de rigidez, ou, ainda, qualquer outra causa. É o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida.

### 2.10.1 ESTUDO DA FALHA

Para Lafraia (2001), as falhas ocorrem quando as cargas atuantes num equipamento ou estrutura excedem a resistência dos materiais utilizados na sua construção. Portanto, as relações entre as cargas e as resistências são muito importantes. A probabilidade de falha como consequência das cargas excederem as resistências pode ser modelada através da estatística, pois as cargas e as resistências são frequentemente variáveis e podem ser modeladas pelas funções de distribuição.

Pode-se fazer uma observação bastante simples na Figura 12, onde se tem um componente com uma resistência (S) exata de 136N submetido a uma carga (L) exata de 56N. Nessa situação não teríamos falha.

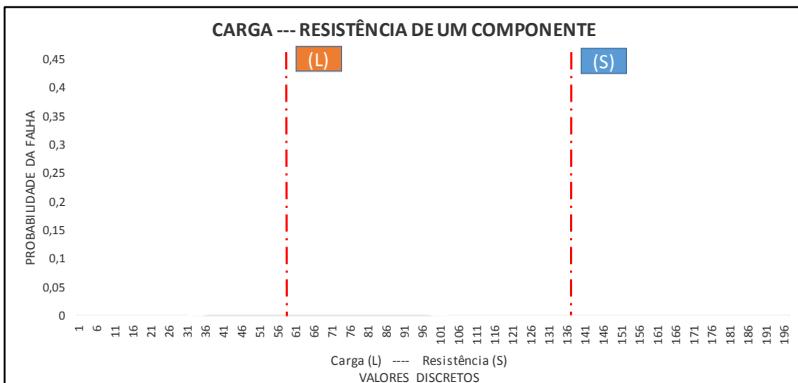


Figura 12: Valores discretos (adaptado de LAFRAIA, 2001).

Na prática, sabe-se que a informação acima não é verdadeira, pois na realidade os valores de resistência e carga não são discretos; são variáveis e obedecem a uma determinada distribuição, conforme Figura 13. Essas variáveis são determinadas a partir de seus valores médios na distribuição; ou seja: existe uma probabilidade finita de que ambos os valores excedam ou sejam menores que as respectivas médias. Para que não ocorra a falha, os valores das distribuições não podem se sobrepor.

É importante esclarecer que os termos carga e resistência podem se referir a qualquer propriedade física de um material, tais como: dureza, resistência mecânica, tensão elétrica, ponto de fusão, etc.

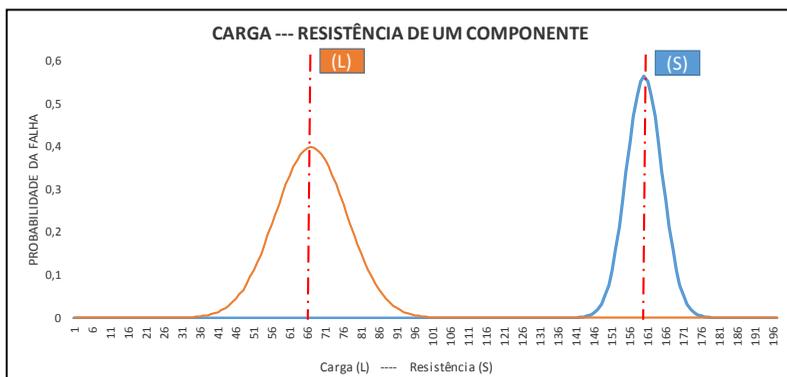


Figura 13: Valores variáveis (adaptado de LAFRAIA, 2001).

Quando existe sobreposição entre as distribuições de cargas e resistências, conforme Figura 14, qualquer item da extremidade esquerda

da distribuição de resistência submetida a uma carga na região de sobreposição com a distribuição de cargas falhará. Esta é uma situação onde existe interferência entre as distribuições de resistência e carga.

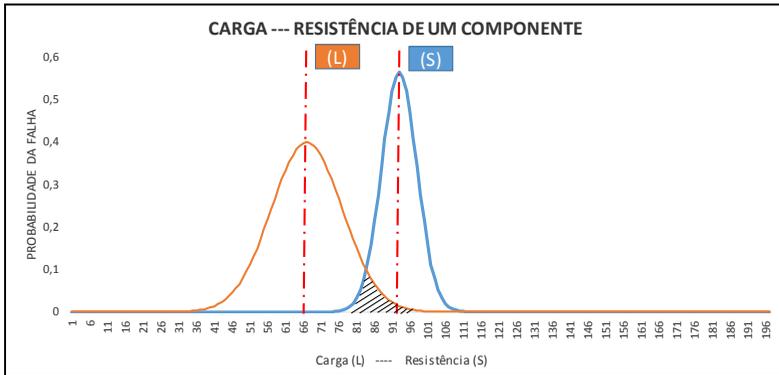


Figura 14: Sobreposição das distribuições (adaptado LAFRAIA, 2001).

De acordo com Norton (2004), a maioria das falhas em máquinas acontece devido a cargas que variam no tempo, e não a esforços estáticos. Essas falhas ocorrem, tipicamente, em níveis de tensão significativamente inferiores aos valores de resistência ao escoamento dos materiais.

De acordo com Waeyenbergh (2005), a fim de ser capaz de realizar uma análise de falha, é necessário diagnosticar as causas subjacentes a uma falha. Portanto, deve-se desenvolver e seguir um caminho lógico que garante uma caracterização da falha crítica. As principais questões que devem ser respondidas são:

- ✓ Qual é a possível falha funcional?
- ✓ Qual é a causa de cada falha funcional?
- ✓ O que acontece quando ocorrem essas falhas?
- ✓ De que forma cada falha se manifesta?

Para o mesmo autor, existem dois tipos de falha: falhas técnicas e falhas humanas. As falhas técnicas estão relacionadas aos equipamentos e as falhas humanas, relacionadas às ações dos profissionais.

David (2001) informa que quando o estado falho de um item não é definido, é impossível explicar o significado de qualidade ou de

confiabilidade. Para esse autor só existe uma definição de falha: é a não-conformidade de algum critério de desempenho definido.

Para Dias (2011), falha é a situação em que o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional, em que deixa de atender e desempenhar a função para a qual foi projetado. Pode ser colocado como a perda da habilidade de executar a função requerida.

Já a análise de falha, segundo Dias (2012), é um processo de caracterização da perda da função do item, por meio da identificação das causas, dos modos de falha, dos efeitos e das ações para eliminar as causas ou mitigar os efeitos das falhas sobre o item ou sobre o processo de produção ao qual o item está vinculado. Algumas técnicas são utilizadas para isso: Event Tree Analysis (ETA), Reliability Block Diagram (RBD), Bow-Tie Analysis (BTA), Bayesian Belief Networks (BBN), Fault Tree Analysis (FMEA), dentre outras.

Segundo a publicação LRS Plant (2012), equipamentos não falham; são seus componentes que falham. Ou seja, os sistemas deixam de executar suas funções devido a falhas nos componentes.

Conforme a Figura 15, para cada componente existe uma distribuição de probabilidade relacionando a resistência e a carga aplicada durante o ciclo de vida. Com o tempo, há a tendência de diminuição da resistência devido aos diferentes fatores relacionados com processos de degradação. Às vezes, ocorre também a intensificação do carregamento, o que pode levar à falha.



Figura 15: Atuação da falha (baseado em LRS Plant 2012).

Como se obtém o ponto de falha para um equipamento composto por vários componentes? Ou, ainda, para uma linha de produção composta por vários equipamentos? Obviamente, resultariam inúmeras distribuições para serem avaliadas, tornando essa modelagem muito trabalhosa e, portanto, haveria necessidade de outro método para prever o tempo de falha dos processos. Uma saída seria a utilização de indicadores como MTBF e MTTR. Ou, ainda, o auxílio de uma ferramenta computacional que modelasse e identificasse os parâmetros necessários para avaliação do menor custo de manutenção. Isso é o que veremos no desenvolvimento deste trabalho.

### 2.10.2 MODO DE FALHA

Conforme Dias (2012), modos de falha são as diferentes maneiras com que um sistema pode vir a falhar. São as várias formas de como o sistema deixa de cumprir seu requisito funcional. Assim, o modo de falha de uma peça mecânica pode ocorrer por desgaste, por corrosão, por fadiga, por escoamento, por flambagem, etc.

Geralmente o modo de falha é desencadeado por algum tipo de fenômeno físico ou químico. Este fenômeno é explicado pelo chamado mecanismo de falha. Os modos de falha ainda podem ser dependentes ou independentes do tempo.

### 2.10.3 MODOS DE FALHA DEPENDENTES DO TEMPO

No que concerne aos modos de falha dependentes do tempo, a falha só ocorre quando ocorreu certo tempo mínimo de uso do sistema, pois os mecanismos envolvidos exigem a necessidade de um dano progressivo no material, que vai se acumulando com o tempo, até desencadear a falha. Assim, a falha é muito pouco provável no início da vida do sistema, mas sua possibilidade de ocorrência aumenta progressivamente, conforme o tempo avança. Os modos de falha classificados como dependentes do tempo são também chamados de modos de falha por envelhecimento ou por desgaste. Alguns modos de falha por desgaste, para sistemas mecânicos, são: corrosão; corrosão sob tensão, fadiga, desgaste adesivo, desgaste abrasivo, fluência, deformação plástica progressiva.

## 2.10.4 MODOS DE FALHA INDEPENDENTES DO TEMPO

Estes modos de falha têm por característica básica o fato de que a chance de ocorrerem é a mesma em qualquer instante da vida útil do sistema em estudo; isto é: podem ocorrer com igual possibilidade logo no início da vida como ao seu final. Estes modos de falha são também designados de modos de falha por sobrecarga. Em sistemas estruturais os modos de falha por sobrecarga são, dentre outros: início de escoamento, colapso plástico, flambagem; ruptura dúctil, ruptura frágil.

## 2.10.5 MECANISMO DE FALHA

De acordo com a norma ABNT NBR\_5462/1994, é o conjunto de processos físicos, químicos ou outros que conduzem a uma falha. Assim, identificar o mecanismo da falha é chegar a uma descrição de como a falha do sistema ocorre e do fenômeno responsável pelo modo de falha. Essa descrição estabelece a sequência de eventos e que grandezas controlam tais eventos.

## 2.10.6 CRITÉRIO DE FALHA

É o conjunto de regras aplicáveis ao julgamento de tipos e gravidade de falhas, para determinação dos limites de aceitação de um item.

O critério de falha tem como objetivo quantificar o modo de falha de um componente ou de um sistema, sendo associado diretamente com este modo de falha. A utilização do critério de falha confere um caráter quantitativo à análise, pois permite avaliar a proximidade do sistema entrar na condição de falha. O critério de falha é uma idealização do mecanismo de falha, um modelo deste mecanismo que procura estabelecer uma lei de comportamento, de forma a permitir, conhecendo as grandezas relevantes, quantificar a situação existente e estabelecer a condição de falha ou não falha. Pode acontecer que para um mesmo modo de falha exista mais de um critério de falha, pois diferentes modelos podem vir a ser desenvolvidos, com maior ou menor sofisticação, usando diferentes hipóteses comportamentais.

Diz-se que a falha é crítica quando oferece probabilidade de resultar em condições perigosas e inseguras para pessoas, danos materiais significativos ou outras consequências inaceitáveis.

Falha por uso incorreto ocorre quando a falha é devida à aplicação de solicitações além dos limites especificados ou a erros de instalação ou operação.

Falha de projeto é aquela derivada de projeto inadequado.

Falha de fabricação ocorre quando houver não-conformidade na fabricação de um item com o projeto ou com os processos de fabricação especificados.

Falha aleatória refere-se a qualquer falha cuja causa ou mecanismo faça com que seu instante de ocorrência se torne imprevisível, a não ser no sentido probabilístico ou estatístico. São características de equipamentos em período de vida útil, vida econômica ou vida madura. A distribuição de Weibull, com Beta=1 corresponde a esta etapa.

Falha repentina é aquela que não poderia ser prevista por um exame anterior ou monitoração.

Falha gradual é devida a uma mudança gradual, com o tempo, de dadas características de um item. Uma falha gradual pode ser prevista por um exame anterior ou monitoração e pode, às vezes, ser evitada por ações de manutenção.

Falha catastrófica é a falha repentina, que resulta na incapacidade completa de um item desempenhar todas as funções requeridas. Esta é uma maneira de definir um tipo de falha da qual poderá resultar perigo para as pessoas com mortes múltiplas, ou danos à propriedade com degradação do sistema.

É importante que ao ser feita uma análise, seja corretamente estabelecida uma definição para as palavras que irão ser usadas para classificar os efeitos das falhas. A FMEA usa, normalmente, quatro definições para os tipos de falhas e seus efeitos: Catastrófica, Crítica, Marginal e Segura.

### 2.10.7 TAXA DE FALHA

Muitos profissionais podem não saber a verdade sobre a “Curva da Taxa de Falha”, uma vez que nem todos os equipamentos possuem uma curva igual. Isso é, a maioria não possui a forma tradicional (seção 2.1, Figura 6), equipamentos e processos possuem curvas diferentes que revelam seus comportamentos e características, quanto ao processo de falha, conforme apresentado na Figura 16, Bertsche (2008), Smith (1993).

	COMPORTAMENTO DA FALHA	CARACTERÍSTICA	EXEMPLOS
<b>FALHA ALEATORIA</b>	A 	Tem-se definido a mortalidade infantil, seguido pelo período da taxa de falha constante e depois por um pronunciado região de envelhecimento	Motores a vapor antigo, século 18 e 19
	B 	O item inicia a operar com taxa de falha constante ou pequena elevação, seguido com pronunciado aumento da taxa de falha depois de uma determinada vida	curva típica de motores a combustão
	C 	Há um crescimento gradual na probabilidade da taxa de falha, sem definir uma região de descarte	Curva característica de turbina de avião
<b>FALHA POR DESGASTE</b>	D 	Há uma baixa probabilidade de falha inicial, quando o item é novo, seguido de um aumento da probabilidade de falha no início da operação até atingir taxa de falha constante	Caraterística de bom controle de qualidade no início do processo e Máquinas complexas bem projetadas
	E 	Item com taxa de falha constante para todas as idades do ciclo de vida	
	F 	Apresenta mortalidade infantil, ou taxa de falha pronunciada no início da vida, seguido de uma tendência para taxa de falha constante no ciclo de vida útil	Equipamentos eletrônicos

Figura 16: Curvas de taxa de falha (adaptado de BERTSCHE, 2008).

## 2.11 MANTENABILIDADE

De acordo com a norma NBR 5462 (1994), manutenibilidade é a capacidade de um item ser mantido ou recolocado em condições de executar suas funções requeridas, sob condições de uso especificadas, quando a manutenção é executada sob condições determinadas e mediante procedimentos e meios prescritos.

Para Bertsche (2008), a manutenibilidade descreve a probabilidade de que a manutenção seja realizada em um tempo pré-definido sob condições de material e de MO.

Para Lafraia (2001), a definição de manutenibilidade é a facilidade com que se efetuam reparos e outras atividades de manutenção nos sistemas.

Durante minha carreira profissional, já ouvi vários executivos em empresas e em congressos utilizarem, como exemplo de eficiência de equipe de manutenção, a atuação das equipes de manutenção da “Fórmula 1”.

Não tenho dúvidas de que essas equipes possuem um trabalho muito bem sincronizado e que são compostas por excelentes profissionais. Porém, quando generalizada essa eficiência como a excelência de trabalho de manutenção industrial, precisamos ser um pouco mais cautelosos.

Se compararmos um carro de “Fórmula 1” com um processo produtivo, teríamos o carro de “Formula 1” como um processo produtivo que opera aproximadamente quatro horas a cada 15 dias. Seriam quatro horas de trabalho que geram lucratividade no sistema: duas horas de treino, que definem a posição da largada, e duas horas para a corrida.

Somente nesse aspecto da comparação, já se vislumbra uma grande desvantagem dos processos industriais. Para viabilizar o negócio das empresas, faz-se necessário operar 24 horas/dias e 365 dias/ano, na maioria das situações. Qualquer interrupção compromete o resultado financeiro da organização.

Observando-se a Figura 17, pode-se, ainda, avaliar a atuação de uma equipe de “Formula 1”, composta por 20 profissionais, atuando em um reparo no *pitstop*. Durante uma corrida, a intervenção possui tempo médio de reparo (MTTR) entre 6 a 12 segundos, realmente muito rápido quando comparado ao MTTR industrial. Porém não se deve esquecer que essas atuações são válidas apenas para alguns tipos de reparo, como: troca de pneu, carenagem, abastecimento.



Figura 17: *Pitstop* equipe de “Fórmula 1”.

Outro aspecto a ser considerado é o número de profissionais: 20 pessoas para uma atuação de 6 a 12 segundos. Seria, essa, uma equipe altamente produtiva quando comparada a uma equipe de manutenção industrial? Não estou insinuando que o trabalho dessa equipe seja fácil, pois seus integrantes devem trabalhar o tempo todo no acompanhamento da corrida, na preparação de ferramentas e até mesmo na preparação física e psicológica para o momento da atuação... Mesmo assim, para tudo isso há um custo financeiro muito elevado e, quando comparado a alguns processos industriais, inviabilizaria o negócio.

Conforme Figura 18, o sistema comparado “Carro Fórmula 1”, não é composto apenas de pneu e carenagem; sua disponibilidade não se sustenta fazendo apenas esses reparos; como seria o reparo em sistemas como suspensão, freio, transmissão, motorização, durante a corrida? Será que teríamos o mesmo MTTR de 6 a 12 segundos?

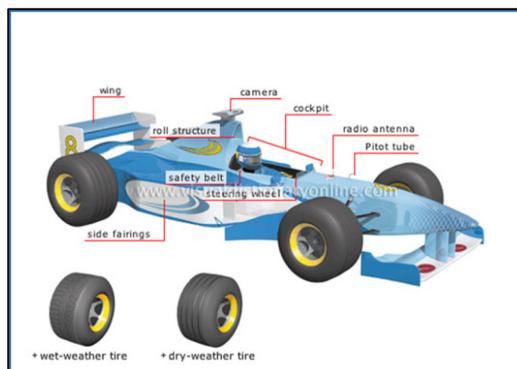


Figura 18: Sistemas de um carro de “Fórmula 1”.

Verifica-se, portanto, que antes de fazer esse tipo de analogia, é preciso calibrar as grandezas, a confiabilidade, a disponibilidade, a manutenibilidade e a lucratividade do negócio.

## 2.12 MODELAGEM DA FUNÇÃO MANUTENÇÃO

Conforme Bertsche (2008), um sistema (conjunto de equipamentos) reparável pode ser modelado através de um modelo markoviano (Figura 19). O objetivo deste modelo é determinar a disponibilidade de um sistema ou componente. Considerando os seguintes requisitos:

- ✓ A unidade a ser observada muda continuamente entre um estado de operação e reparo.
- ✓ Depois de cada ação da manutenção, a unidade reparada é tão boa quanto nova.
- ✓ O tempo necessário para a operação e a reparação para cada unidade é considerado contínuo e estocasticamente independente.
- ✓ A influência de qualquer dispositivo de comutação não é levada em consideração.

Conforme a Figura 19, um sistema sai de um estado em operação para um estado de falha, gerando uma taxa de falha “ $\lambda_i$ ”; quando reparado sai de um estado em reparo para o estado em operação, gerando uma taxa de reparo “ $\mu_i$ ”.

A taxa de reparo representa uma visão estratégica da manutenção na manutenibilidade  $M(t)$ , podendo atuar de forma corretiva ou preventiva; já a taxa de falha representa uma visão estratégica de manutenção na confiabilidade  $R(t)$ , resultando do equacionamento dessas duas variáveis a disponibilidade  $A(t)$  do sistema. A equação 14, mostra a relação entre essas variáveis.

$$A_t = \frac{\mu}{(\lambda + \mu)} + \frac{\mu}{(\lambda + \mu)^2 t} \{1 - e^{-(\lambda + \mu)t}\} \quad (14)$$

Sendo:

$A(t)$  - Disponibilidade

$\lambda$  – Taxa de falha  
 $\mu$  - Taxa de reparo  
 $t$  – Tempo

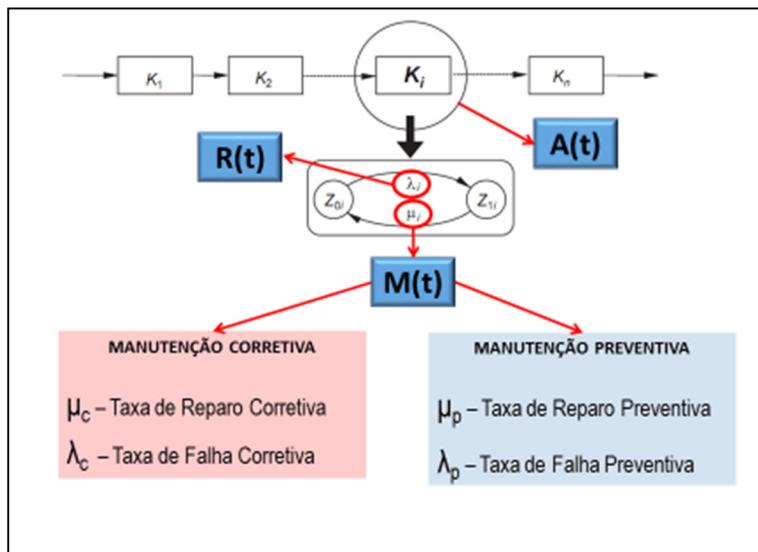


Figura 19: Modelo markoviano da manutenção (adaptado de Bertsche, 2008).

## 2.13 CONSIDERAÇÕES

Conforme apresentado na secção 2.9.2, sistemas que são modelados pela distribuição exponencial apresentam taxa de falha constante; nessa abordagem, muitos autores recomendam a não-utilização da política de manutenção preventiva, por serem as falhas aleatórias. No entanto, nas instalações industriais, essa recomendação requer uma avaliação um pouco mais detalhada, pois existem algumas particularidades que precisam ser consideradas.

Para processos industriais, em que a criticidade dos reparos possui o mesmo nível, cujos níveis de custo de componentes, serviços e tempo de parada de processo sejam similares (instalações equalizadas no aspecto dessas grandezas), é válida a recomendação para utilização da política de manutenção preditiva e corretiva, ao invés da manutenção preventiva.

Diferente de muitas instalações que possuem essa equalização da criticidade dos reparos, pode-se descrever uma instalação da indústria cerâmica, onde a taxa de falha de um determinado sistema pode ser

constante. Porém existem falhas que proporcionam alta criticidade, por causa do MTTR elevado, provocando altos custos de parada, MO necessária superior ao contingente da equipe própria, ou seja, necessita planejar ou contratar serviços extraordinários; necessita de materiais não disponíveis em almoxarifado, dentre outros.

Nessa situação, mesmo um sistema apresentando um comportamento de taxa de falha constante, ele necessita da aplicação de manutenção preventiva, quando as magnitudes dos reparos de manutenção não são equalizadas, ou seja, o reparo possui impactos financeiros diferente ao processo.

Na seção 2.1 apresentou-se a evolução histórica da manutenção, necessária para ter-se um entendimento das demandas e exigências encontradas nos dias atuais das indústrias, no aspecto de manutenção. O custo de manutenção da seção 2.3 fundamenta a importância e as diretrizes que serão desenvolvidas neste trabalho, sendo o custo de manutenção a variável-objetivo da modelagem proposta.

O entendimento das principais políticas de manutenção apresentadas nas seções 2.4, 2.5, 2.6 e 2.7 é necessário na modelagem e interpretações dos resultados que serão obtidos nas simulações do Capítulo 5.

A abordagem detalhada da confiabilidade e do conceito de falhas será utilizada na fundamentação do problema apresentado no Capítulo 3. O conceito de falha é necessário para auxiliar na definição dos sistemas críticos que devem ser simulados na metodologia proposta. A fundamentação estatística será utilizada para estimar a vida útil dos sistemas ou componentes, durante as simulações apresentadas no Capítulo 5.

O conceito da manutenibilidade será utilizado para proporcionar o entendimento da criticidade de um determinado sistema durante uma modelagem – que será apresentada no Capítulo 4 – além de auxiliar a esclarecer a melhor estratégia de manutenção aplicada na metodologia proposta no Capítulo 5.

### 3 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

Conforme Liang (2014), a evolução do estado de degradação de um componente é complexa, devido à dispersão da sua vida útil. Assim, a modelagem de um processo ou equipamento pode se tornar ainda mais complexa quando se tem um grande número de sistemas ou componentes.

Wang (2010), que apresentou uma série de trabalhos na Quinta Conferência Internacional sobre Modelagem em manutenção industrial, com a participação de mais de dez países, apontou a otimização dos intervalos de manutenção e custo, como uma das principais preocupações e necessidades da indústria.

De acordo com Jack (2002), a manutenção preventiva reduz a probabilidade de falha, porém isso só vale a pena quando os custos com reparo corretivo forem maiores que o custo com manutenções preventivas. Isso mostra que, em determinadas situações, a manutenção corretiva pode ser vantajosa.

Para Bertsche (2008), a indisponibilidade de um sistema pode influenciar no seu custo de ciclo de vida significativamente. Para tanto, a disponibilidade de um sistema deve ser otimizada a fim de alcançar o custo do ciclo de vida mais baixo possível. A Figura 20 mostra a relação entre a disponibilidade e o custo do ciclo de vida de uma forma simplificada. Alta disponibilidade gera um aumento dos preços de compra dos sistemas, alto investimento. De outra forma, baixo custo de investimento, por exemplo, na aquisição dos sistemas, gera altos custos de parada durante o ciclo de vida, em decorrência do aumento dos tempos de parada do processo, gerado pela baixa disponibilidade dos sistemas.

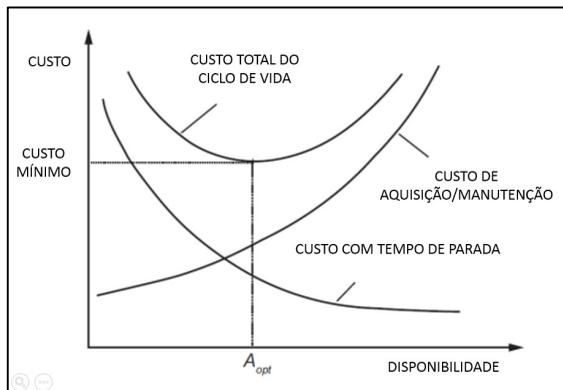


Figura 20: Custo do ciclo de vida (adaptado de BERTSCHE, 2008).

Pode-se observar que a otimização é necessária para equalizar os custos do ciclo de vida dos sistemas e, assim, proporcionar a melhor rentabilidade dos negócios. A manutenção e suas variáveis são fatores significativos para essa otimização. Destaca-se a periodicidade de manutenção preventiva, que interfere no processo das paradas necessárias para execução de serviços, reparos e inspeções, a qual será vista com maior detalhe no desenvolvimento deste trabalho.

### **3.1 DEFINIÇÃO DA PERIODICIDADE NO PLANO MP**

De acordo com Kobbacy (2002), apesar de a manutenção preventiva possibilitar a antecipação da correção da avaria antes que a falha ocorra – diminuir a probabilidade de falha –, ela também gera indisponibilidade no processo, pois para cada evento de manutenção existe a necessidade de parada do processo. Evidentemente, isso se verifica nos casos de processos contínuos, em regime de 24h por dia, 365 dias por ano, sem utilização de redundâncias nos equipamentos das funções principais do processo.

Percy (1998) afirma que a manutenção preventiva se torna difícil de ser modelada devido à quantificação de seus efeitos, gerados pelas paradas de processo necessárias para a execução das atividades e as diferentes taxas de degradação dos componentes que geram diferentes periodicidades.

Dessa forma, a configuração da periodicidade e o tempo de execução de uma manutenção preventiva tornam-se complexas, devido a fatores como:

- ✓ A periodicidade de manutenção preventiva de cada equipamento deve ser combinada com todos os equipamentos do processo, para gerar um melhor aproveitamento do tempo de parada do processo.
- ✓ Dificuldade de definir quais componentes serão trocados, a partir do conhecimento da vida útil dos mesmos.
- ✓ Dimensionamento de mão de obra (MO) para a execução das atividades.
- ✓ Concentração do maior número de atividades possíveis para aproveitar a parada do processo.

A definição da periodicidade ótima, que proporcione menor custo e maior confiabilidade nos sistemas, é um dos desafios da manutenção preventiva. Kobbacy (2002), ao desenvolver uma modelagem na indústria

siderúrgica para encontrar a periodicidade ótima para execução das manutenções preventivas, informou que a principal dificuldade foi saber como agrupar a vida útil de diferentes componentes.

Percy e Kobbacy (1998) afirmam ser necessário o uso de funções de distribuições, como exponencial e Weibull, para definição da periodicidade através do estudo da vida útil dos componentes.

Atuar de maneira conservadora em relação à confiabilidade gera um alto custo na manutenção, em função da troca prematura de componentes e do aumento do tempo de paradas programadas, as quais também geram indisponibilidade dos processos. Questionamentos, tais como: “intensifica-se a manutenção preventiva; aumenta-se o escopo ou reduz-se a periodicidade?” podem induzir erroneamente decisões do gestor de manutenção que aumentam consideravelmente os custos de manutenção ao longo da vida útil dos processos.

Ao agir de maneira conservadora relativamente ao custo de manutenção, com o objetivo de obter um bom aproveitamento dos componentes para utilizar ao máximo sua vida útil e reduzir os tempos de paradas programadas, pode-se também comprometer a confiabilidade do processo, haja vista a incerteza existente quanto à vida útil de cada componente, como explicam as regiões de periodicidade 17 a 20 da Figura 21. Por consequência, haverá possibilidade de reduzir o custo da manutenção e elevar o custo com paradas no processo, devido à baixa confiabilidade, gerando indisponibilidade no processo.

Essa análise também pode ser observada na Figura 21.

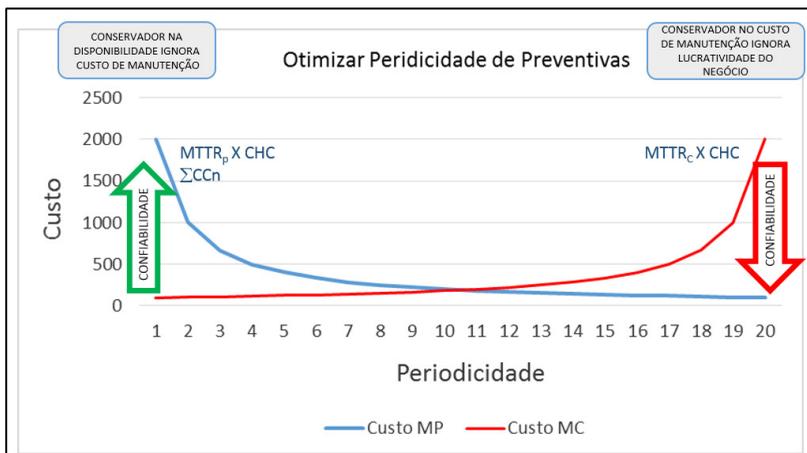


Figura 21: Efeito dos custos na periodicidade de preventiva.

Ainda conforme a Figura 21, a redução da periodicidade proporciona melhor confiabilidade, porém pode inviabilizar a lucratividade do processo em função do aumento do custo de manutenção, provocado por trocas prematuras de componentes e pela indisponibilidade gerada pelo aumento das paradas programadas (ver região 1 a 4 da Figura 21).

Como indicado na Figura 21, a região da periodicidade ótima (entre 9 e 12), que proporciona melhor resultado financeiro do processo, depende de alguns fatores, como: custo da manutenção preventiva, lucratividade do processo, custo com manutenção corretiva e principalmente conhecimento da vida útil dos sistemas/componentes. Para isso é necessário um aprofundado controle estatístico das falhas e tempo de ocorrência.

### 3.1.1 EXEMPLO DE DEFINIÇÃO DA PERIODICIDADE

Para evidenciar melhor a análise feita anteriormente, será apresentado um exemplo prático, onde se explana a relação entre confiabilidade, disponibilidade e impacto financeiro no processo. Os cálculos de vida em função dos intervalos de confiança podem ser vistos em Montgomery (2009).

Seja um sistema formado por um único componente, neste caso um mancal, composto pelos seguintes dados:

- ✓ Tempo de troca do mancal (MTTR) = 10 horas
- ✓ Custo do mancal = R\$1.000,00
- ✓ Custo da hora do sistema parado = R\$10,00/hora
- ✓ Taxa de falha = 0,0005 falhas/hora

O mancal possui uma distribuição de falha exponencial, o cálculo de confiabilidade desse sistema é dado pela equação 06 da seção 2.9.2, que resulta na função confiabilidade do Gráfico da Figura 22.

**Análise 1:** Para garantir com 74% de confiabilidade, é necessário trocar o mancal a cada 700 horas. Logo, tem-se a seguinte lucratividade no sistema:

$$\text{Receita financeira} = 700 \text{ horas} \times \text{R}\$10,00/\text{hora} = \text{R}\$7.000,00.$$

$$\text{Custo} = \text{Custo do mancal} + \text{Custo do sistema parado} = \text{R}\$1.000,00 + \text{R}\$100,00 = \text{R}\$1100,00.$$

Lucro = Receita - Custo = R\$7.000,00 - R\$1.100,00 = R\$5.900,00.

**Lucro/hora = 5.900/700 = R\$8,42.**

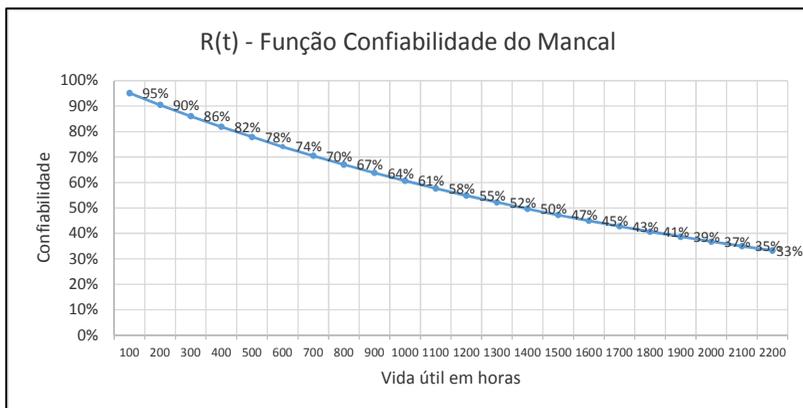


Figura 22: Função confiabilidade do mancal.

**Análise 2:** Deseja-se uma periodicidade que garanta uma confiabilidade de 86%. Para atender essa nova confiabilidade, é necessário trocar o mancal a cada 400 horas, de acordo com a Figura 22, cujo resultado financeiro é:

Receita financeira = 400 horas x R\$10,00/hora = R\$4.000,00.

Custo = Custo do mancal + Custo do sistema parado = R\$1.000,00 + R\$100,00 = R\$1.100,00.

Lucro = Receita - Custo = R\$4.000,00 - R\$1.100,00 = R\$2.900,00.

**Lucro/hora = 2.900/400 = R\$7,25.**

De acordo com os resultados obtidos nas análises 1 e 2, observa-se que a análise 1, com confiabilidade de 74% e periodicidade de preventiva de 700 horas, é mais vantajosa que a análise 2, que possui uma confiabilidade maior, 86%, porém uma lucratividade menor.

Dependendo da lucratividade do sistema e do custo para execução da manutenção, o aumento da confiabilidade com a redução da periodicidade pode reduzir o lucro financeiro, mesmo gerando melhor disponibilidade.

Indicadores de MTBF e taxa de falha, que são utilizados para dimensionar periodicidade de manutenção preventiva, podem ser vistos

em trabalhos como o de Christer (1998), na indústria de fabricação de lona de freio, e nos exemplos do capítulo 2 de Bertsche (2008).

### **3.2 VIDA ÚTIL NA MANUTENÇÃO PREVENTIVA**

Maior exatidão no conhecimento da vida útil dos sistemas/componentes/peças dos equipamentos é uma obsessão dos modelos matemáticos para obtenção do custo ótimo de manutenção. Trabalhos recentes, como os de Fouladirad (2014) e Cassantec (2015), mostram, a partir da condição do equipamento, o instante mais econômico para execução da manutenção preventiva das instalações.

Fouladirad (2014) relata que, além de conhecer a periodicidade das manutenções preventivas, o mais importante é conhecer a periodicidade das inspeções, por meio das quais se conhece melhor a condição do equipamento, obtendo-se, assim, mais exatidão da estimativa da vida útil de seus sistemas.

Para Bertsche (2008) e Smith (1993), a manutenção preventiva é um método, onde as tarefas são realizadas preventivamente; ou seja, a um predeterminado tempo, ou depois de uma periodicidade determinada, ou de uma quantidade de horas de funcionamento essas atividades são executadas. A manutenção preventiva pode ser baseada no tempo ou na condição.

É baseada no tempo, quando for definido um tempo determinado de uso ou um número de ciclos para a execução de determinados reparos, ajustes ou substituição de componentes. O tempo ou o número de ciclos é definido por histórico de falha do fabricante ou do usuário do equipamento. Na maioria das situações, a manutenção baseada no tempo é mais conservadora e age antes que o desgaste apareça. Ver a Figura 23, que apresenta a maior dispersão para distribuição baseada no tempo, também utilizada para dimensionamento de garantia dos equipamentos.

A manutenção é baseada na condição quando são aplicadas técnicas de inspeção visual, que podem ser de rotina ou mais aprofundadas, como técnicas de análise de vibração, análise termográfica, análise de óleo e ultrassom, também definidas como preditivas.

Com a manutenção baseada na condição, é possível diminuir a incerteza da provável vida útil do componente/peça; tem-se um instante de detecção do processo de degradação, podendo-se, então, planejar a troca do componente/peça antes que a falha ocorra. Já a manutenção baseada na falha é a manutenção corretiva, que se dá no instante da falha,

havendo, portanto, o aproveitamento total do componente/peças. Assim, essas duas ações preventivas são maneiras de conhecer com antecipação o momento da falha do equipamento, de prever o término de sua vida útil.

Conforme a Figura 23, quanto maior a intensidade da inspeção menor a incerteza da estimativa da vida do componente, até o ponto em que se possa atuar no instante exato da falha – “baseado na falha” – quando, então, há um aproveitamento de 100% da vida útil do componente.

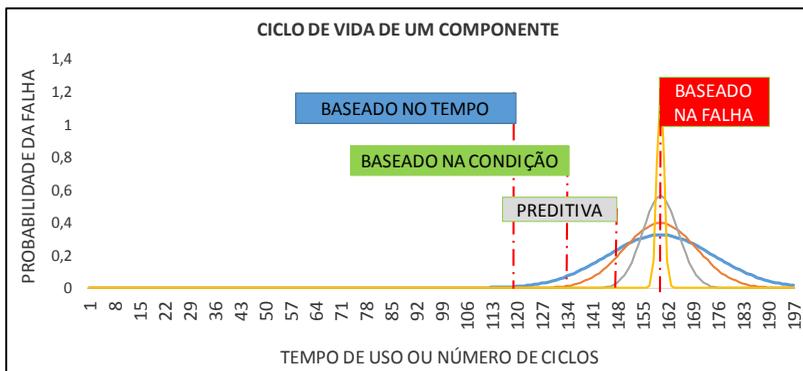


Figura 23: Definição da periodicidade em função vida útil.

Ao deixar o componente falhar, na visão do custo de manutenção, há um melhor aproveitamento do componente, com utilização de 100% da sua vida útil. Nesse sentido, não haveria um custo prematuro do componente, devido a esse aproveitamento; porém, na maioria das situações, a política de manutenção predominante seria a corretiva. Contudo, chama-se a atenção de que isso só é verdade quando a falha for independente, quando não comprometer os outros itens do sistema.

De acordo com Souza (2009), normalmente a avaliação da vida útil dos componentes é baseada na experiência passada e em dados estatísticos fornecidos pelos fabricantes. Em virtude da incompatibilidade de ajuste com o programa de produção, muitos equipamentos não podem ser revisados em determinadas épocas, obrigando a troca de componentes que ainda pode estar em boas condições. Razões como essas geram as principais críticas da política de manutenção preventiva.

Observa-se, na Figura 24, um equipamento, esquadrejador (equipamento da indústria cerâmica), dividido em 10 sistemas. Através do CMMS foi extraído o histórico de falha e elaborado um registro da distribuição de falha de cada sistema. Cada Gráfico da Figura 24 possui o

tempo de utilização do respectivo sistema na abscissa e a quantidade de falha na ordenada; a provável vida útil de cada sistema é definida pela moda de cada função. A tabela completa com os dados das distribuições de falha de cada sistema, pode ser visto no Anexo 1.

Pergunta-se, então: como se pode definir a periodicidade de uma intervenção no equipamento a partir da distribuição da vida útil de seus sistemas?

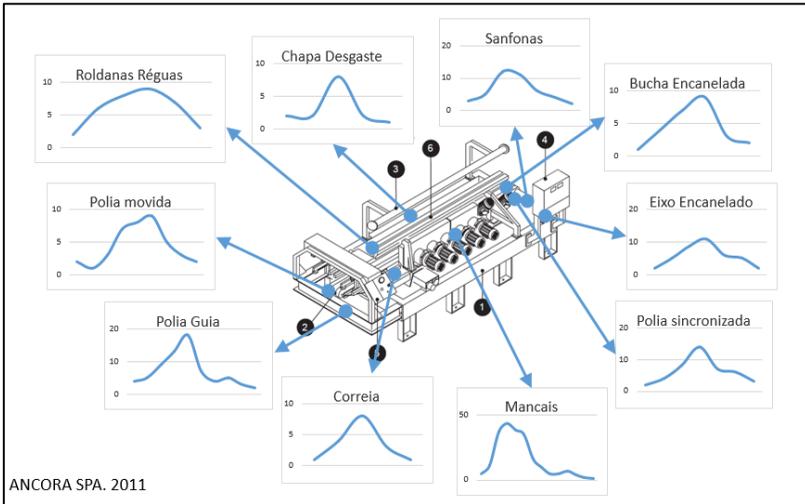


Figura 24: Distribuição de falha de cada sistema para um equipamento.

Pode-se definir a periodicidade da manutenção preventiva deste equipamento, com base apenas no conhecimento da vida útil de cada sistema?

Caso a resposta fosse “sim”, haveria a definição das paradas do equipamento em função do tempo, gerando uma parada para cada “moda” das distribuições apresentadas na Figura 24, que representa a vida útil média de cada sistema.

Na Figura 25, apresenta-se a vida útil média de cada sistema ao longo da linha do tempo, que representa a vida útil de avaliação do equipamento. No eixo vertical desta figura, tem-se o tempo em meses, variando de 1 a 22 meses.

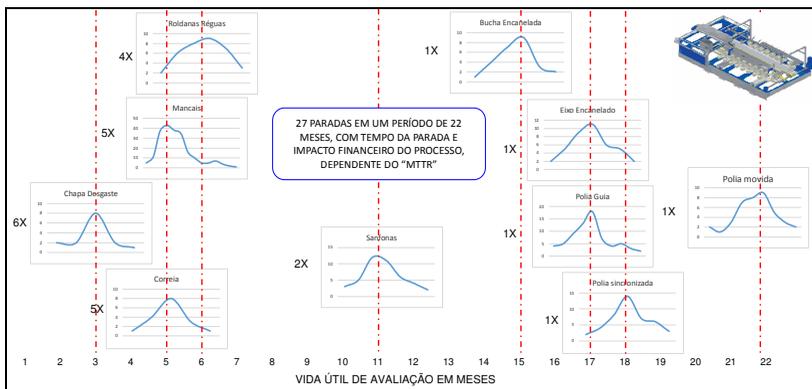


Figura 25: Vida dos sistemas ao longo da vida útil de avaliação do equipamento.

De acordo com a Figura 25, são necessárias 27 paradas no equipamento, para um período de 22 meses. É importante observar, nesta figura, que alguns sistemas são substituídos mais de uma vez, ao longo da vida útil de avaliação. Ou seja, numa vida útil de avaliação de 22 meses, o sistema que possui uma vida média de quatro meses terá que ser substituído seis vezes, gerando seis paradas de processo.

Como nesse exemplo não está sendo considerado o MTTR (tempo médio para reparo) e nem o custo da hora cessante do processo ao qual o equipamento está inserido, o custo gerado pela parada do processo não é significativo, sendo o custo de manutenção gerado apenas pelos custos de peças e MO. Dessa forma, a definição de periodicidade mais favorável financeiramente é atuar de forma corretiva, efetuando os reparos em cada sistema ao término da respectiva vida útil, ainda que isso provoque uma indisponibilidade elevada em decorrência do grande número de paradas.

Quando se faz essa abordagem para um processo de produção, há que ampliar a análise, pois, havendo um número maior de sistemas, o número de paradas será ainda maior, uma vez que a vida útil média de cada sistema não é coincidente (ver Figura 26).

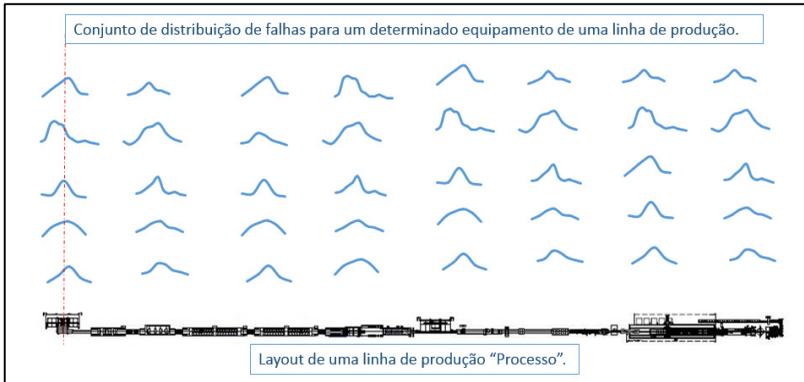


Figura 26: Distribuição da função vida útil de um processo.

Como seria a definição de periodicidade do processo nessa situação? Onde há várias distribuições em função do tempo e a combinação das vidas úteis poderia ser dispersa? Onde pode gerar um grande número de parada? Onde pode gerar uma grande indisponibilidade no processo?

As perguntas suscitam as seguintes hipóteses:

- ✓ Trocar os componentes antes do término da vida útil eleva os custos de manutenção preventiva!
- ✓ Utilizar os componentes até o término da vida útil gera manutenção corretiva, o que, dependendo do cenário, pode gerar elevados custos por indisponibilidade do processo.
- ✓ A periodicidade de manutenção preventiva definida somente em função da vida útil dos sistemas/componentes gera um elevado número de parada do processo.

### 3.3 ESTUDO DA PERIODICIDADE

Para entender melhor as hipóteses apresentadas anteriormente, propõe-se desenvolver uma avaliação de uma prensa hidráulica, com seis componentes, com os respectivos MTTR, vida útil e custo de reparo, conforme a Tabela 3.

PRENSA HIDRÁULICA			
Sistemas	MTTR (h)	Vu (h)	Custo Peças
Filtragem	4	3000	R\$ 3.500,00
Fluido hidraulico	10	5000	R\$ 13.000,00
Cilindro principal	30	15000	R\$ 40.000,00
Bombeamento	6	20000	R\$ 38.000,00
Comando hidraulico	5	25000	R\$ 20.000,00
Multiplicador	12	30000	R\$ 12.000,00

Tabela 3: Representação de uma prensa hidráulica dividida em sistemas.

Cada componente possui uma vida útil estimada a partir de dados estatísticos com uma incerteza para cada valor apresentado: cada vida útil foi estimada a partir de uma distribuição probabilística, podendo ser normal, lognormal ou Weibull, conforme apresentado na seção 2.9.

Foi, também, considerado o custo residual do componente, que é o valor do componente que foi substituído sem ter sido utilizada sua vida útil por completo. Custo residual é, pois, a provável vida útil total menos a vida efetiva de trabalho.

Nesta abordagem trata-se o custo de manutenção do processo conforme equação abaixo:

$$CM = CCn + CRn + CP$$

Sendo:

$CM$  – Custo de manutenção (R\$)

$CCn$  – Custo do componente “n” (R\$)

$CRn$  – Custo residual do componente “n” (R\$)

$CP$  – Custo da parada (R\$)

Dado que:

$$CP = (MTTRn \times CHC)$$

$MTTRn$  – Tempo médio para o reparo do sistema “n” (h)

$CHC$  – Custo hora cessante do sistema (R\$/h)

O custo residual visto na Figura 27 está representado por meio da função de uma reta descendente. Sempre que um componente for substituído antes do término da sua vida útil estimada, ao custo do reparo estará sendo adicionado o custo residual do componente substituído. Vale lembrar que a variável “custo do componente” está relacionada com o custo de materiais ou serviços necessários para um reparo ou substituição de um sistema/componente ou peças.

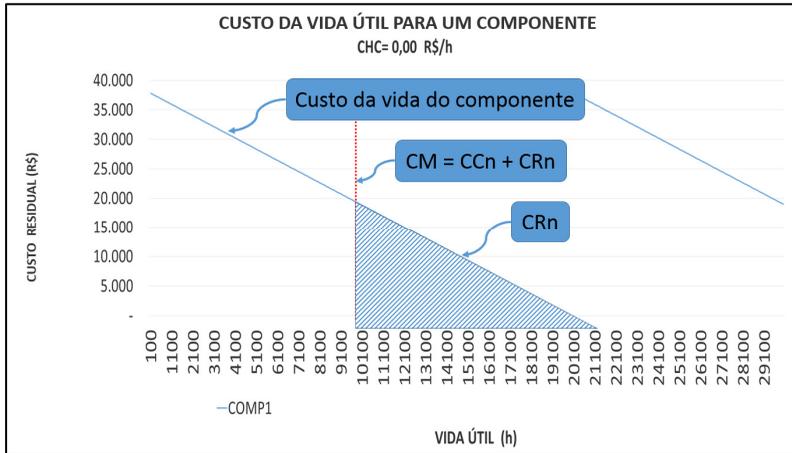


Figura 27: Representação do custo residual de um componente.

No exemplo da Figura 27, o componente “COMP1” possui uma vida útil estimada de 20.000 horas. Optando-se por substituí-lo preventivamente antes das 20.000 horas, (por exemplo, troca em 10.000 horas, Figura 27), haverá um custo residual de R\$20.000,00. Quando se optar por substituir um componente ou fazer um reparo de um sistema antes do término de sua vida útil, o custo da manutenção será: o custo de um componente novo (serviços/peças necessárias para o reparo) mais o custo residual do sistema ou componente, que ainda não atingiu o término de sua vida útil.

Análise 1: Custo de manutenção para um equipamento, com custo da hora cessante igual a zero.

Imagina-se, agora, que a prensa hidráulica apresentada na Tabela 3 esteja inserida em um processo cujo custo da hora cessante do processo seja R\$0,00 por hora de parada, dado que se trata de um item redundante. Nesse caso, pode-se parar o processo a qualquer momento sem efeito financeiro no processo. Do ponto de vista de custo de manutenção mais econômico, a opção seria substituir cada componente somente no término de sua vida útil, havendo, assim, um maior aproveitamento dos sistemas e inexistência de custo residual nas manutenções.

Considera-se, para essa situação, que haveria 14 paradas no equipamento, totalizando 120 horas de parada, conforme apresentado na Figura 28.

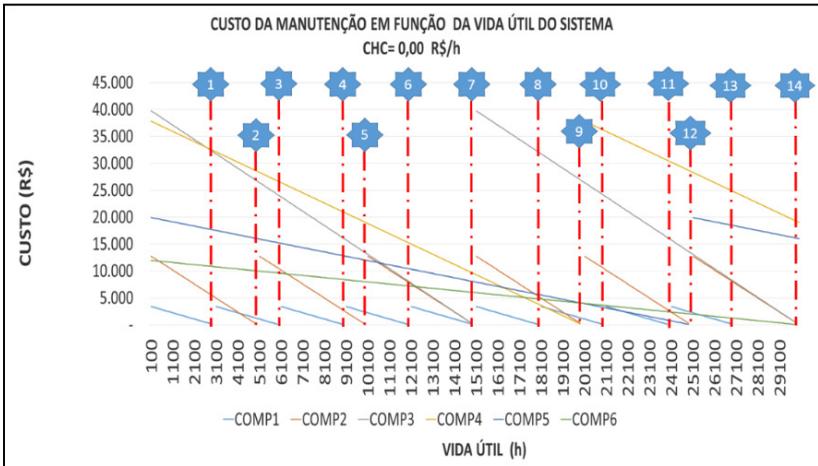


Figura 28: Representação do custo residual de uma prensa.

Para o exemplo apresentado na Figura 28, atua-se de acordo com a política de manutenção corretiva (MC). Os itens são independentes, ou seja, a falha gerada no equipamento devido à utilização exaustiva até a vida útil de cada componente não ocasiona degradação que intensifique a falha em outros sistemas e afete a segurança ou o meio ambiente. Do ponto de vista econômico, para o cenário apresentado anteriormente, atuar de maneira corretiva seria o mais viável para a lucratividade do processo.

Existem, todavia, outros fatores que devem ser considerados nessa análise, tais como: há disponibilidade de MO para atuar corretivamente, especialidade da MO, ferramental, peças de reposição e MTTR.

Análise 2: Custo de manutenção para um equipamento, com real custo da hora cessante.

Ao se fazer uma nova análise para o mesmo equipamento, desta vez num processo cujo custo da hora cessante é de R\$7.000,00, tem-se outra percepção para a tomada de decisão em relação à ação de manutenção.

Para entender melhor essa análise, serão comparados os dois componentes, representados na Figura 29 por COMP3 e COMP5.

Quando substituído o componente COMP3 com vida útil de 15.000 horas, o custo da manutenção será custo do componente COMP3 + custo de parada (CP).

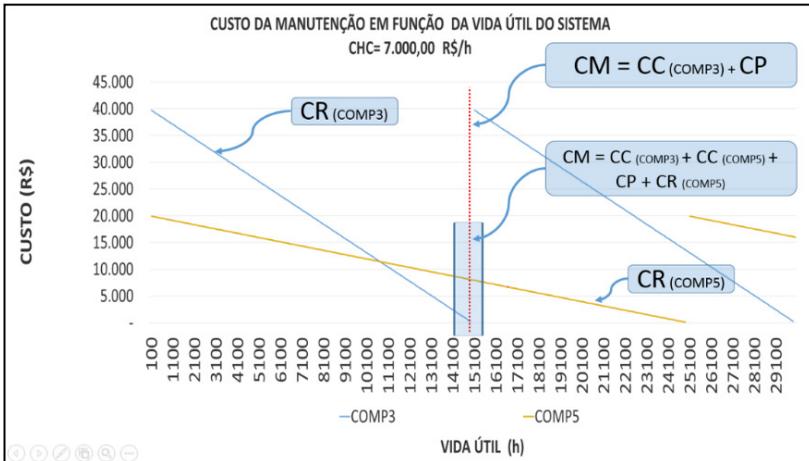


Figura 29: Custo de manutenção em função da vida útil.

Se nessa intervenção se optasse em substituir também o componente “COMP5”, com o intuito de aproveitar a parada do processo, o custo desta manutenção seria: custo dos componentes COMP3 e COMP5 + custo da parada (CP) + custo residual do componente COMP5 (CRcomp5). De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, o custo dessa manutenção seria:

$$CP = MTTR_{max} \times CHC = 5 \times 7000 = R\$35.000,00.$$

$$CM = CC_{comp3} + CC_{comp5} + CP + CR_{comp5}$$

$$CM = 13.000 + 20.000 + 35.000 + 8000$$

$$CM = R\$76.000,00$$

Outra opção seria substituir cada componente no tempo final de sua vida útil. Para essa situação haveria duas paradas no processo, conforme representado pela Figura 30.

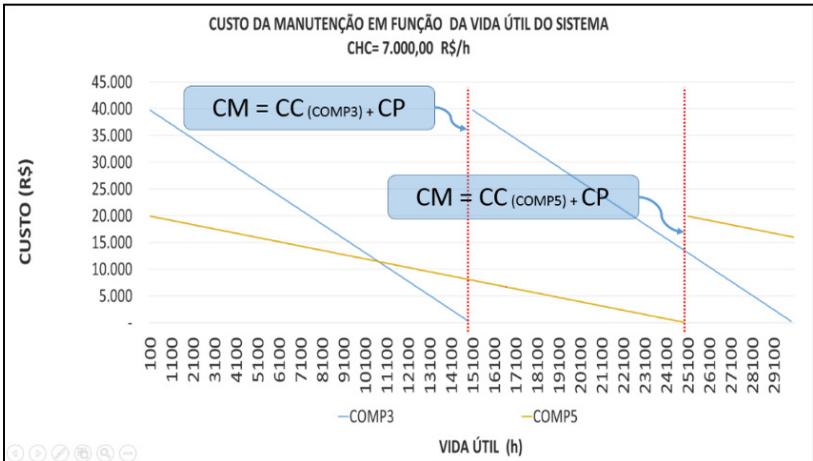


Figura 30: Custo da manutenção sem custo residual

No exemplo da Figura 30, haveria uma parada no instante 15.000 horas, e outra parada no instante de 25.000 horas.

Para 15.000 horas tem-se o CM como:

$$CP = MTTR_{comp3} \times CHC = 10 \times 7000 = R\$70.000,00.$$

$$CM = CC_{comp3} + CP$$

$$CM = 13.000 + 70.000 = R\$83.000,00$$

Para 25.000 horas tem-se o CM como:

$$CP = MTTR_{comp5} \times CHC = 5 \times 7000 = R\$35.000,00.$$

$$CM = CC_{comp5} + CP$$

$$CM = 20.000 + 35.000 = R\$55.000,00$$

No período de 25.000 horas haveria um custo de manutenção de duas paradas, totalizando em R\$138.000,00.

Quando se comparam os dois cenários apresentados nas Figuras 29 e 30, pode-se observar: **1)** Na Figura 29, no período de 25.000 horas, verifica-se a ocorrência de apenas uma parada no processo, totalizando um custo de manutenção, para o período, de R\$76.000,00. **2)** Na Figura 30, no mesmo período de 25.000 horas, têm-se duas paradas, totalizando um custo de manutenção de R\$138.000,00.

Pode-se observar, por meio dos exemplos citados, que o cenário representado na Figura 29 possui um custo de manutenção menor, apesar

de existir um custo residual. Consequentemente, essa opção é mais lucrativa para o negócio. Portanto, a substituição de componentes ou revisões prematuras dos sistemas, dependendo da lucratividade do processo, são necessárias e vantajosas.

### 3.4 CONSIDERAÇÕES

Os sistemas industriais reais são complexos, compostos por vários componentes que possuem vida útil diferente. Por mais que se tenha conhecimento da vida útil de cada sistema, dificilmente seria possível rearranjá-los de forma a permitir a substituição conjunta, num único instante de tempo, no término de cada vida útil.

Mesmo em trabalhos recentes, como o de Cassantec (2015), por exemplo, que propõe prognósticos a partir de monitoramento de temperatura e vibração de vários componentes – conseguindo, dessa forma, estimar com uma boa aproximação o instante de parada do processo para manutenção –, muitos componentes necessitam ser reparados prematuramente para otimizar o custo com a parada do processo, uma vez que o término estimado das respectivas vidas úteis não coincide.

Na abordagem deste trabalho, o custo residual é aquele demandado num reparo de um item antes que o mesmo atinja sua vida útil final. Nesse caso, não será considerado apenas o custo de substituição de componentes/peças, conforme apresentamos na seção 3.3, e sim o custo de todas as atividades preventivas, como serviços para um ajuste, alinhamento ou uma inspeção. Apesar de tais atividades não demandarem reposição de componentes (peças), possuem custos relacionados a MO, locação de equipamentos e, na maioria das situações, exigem a parada de processo para sua realização. Logo, para este estudo e modelagem, esses serviços serão caracterizados como um componente, pois dependendo de sua otimização, eles também, assim como um componente, podem sofrer utilização prematura.

Outra variável que possui, igualmente, influência na definição ótima de uma periodicidade de manutenção é o tempo médio para reparo (MTTR – *mean time to repair*). O MTTR é uma variável relevante da mantabilidade. A estratégia utilizada é reduzir o tempo médio de reparo, que é o inverso da taxa de reparo “ $\mu_i$ ”, conforme apresentado na seção 2.12 “Modelagens da função manutenção”. Isso é alcançado por meio de atividades relacionadas à produtividade das equipes de

manutenção, como treinamento, ferramentas especiais, pré-montagem de conjuntos de componentes reservas, que proporcionam agilidade na execução de reparos.

Outro ponto relacionado com o MTTR refere-se aos reparos corretivos e preventivos. Na maioria das situações práticas da indústria, existe diferença entre um MTTR obtido num reparo preventivo e num corretivo. No primeiro, por se tratar de atividade planejada, consegue-se dimensionar melhor a MO (mão de obra) necessária, materiais e ferramentas. Os reparos preventivos, na maioria das situações, exigem tempos de execução mais curtos que os corretivos, proporcionando menores impactos financeiros ao processo. Dessa forma, quando se calcula a periodicidade ótima de um plano de manutenção, deve-se considerar o MTTR (corretivo) e o MTTR (preventivo), que serão apresentados no capítulo 4.

O entendimento das variáveis “vida útil”, “MTTR” e da relação dos arranjos de vida útil com o custo de parada do processo, apresentados neste capítulo, são de extrema importância para o entendimento da modelagem proposta no capítulo seguinte.



## 4 MODELAGEM PARA OTIMIZAÇÃO DA MP

A modelagem matemática possui como objetivo a estruturação de variáveis do sistema a ser estudado de forma a obter cálculos para otimização da periodicidade das manutenções preventivas. Wang (2010) relaciona vários trabalhos de modelagem na manutenção industrial, que buscam a otimização do custo como principal objetivo. Cavalcante (2010), relata a importância de determinar algumas hipóteses durante a modelagem do modelo proposto, no seu trabalho.

Para a modelagem deste trabalho, o modelo leva em consideração algumas hipóteses dos sistemas:

1 - Toda intervenção de manutenção preventiva leva em consideração a substituição de todos componentes ou execução dos serviços/inspeções avaliadas.

2 - O tempo de execução da manutenção preventiva é baseado no componente que possui o maior tempo de reparo preventivo MTTRp, dentro do sistema avaliado.

3 - Os eventos de manutenção corretiva ocorrem de forma que não causem nenhuma falha à segurança, ao meio ambiente ou falha a outros componentes; ou seja, a falha provocada no evento corretivo é unicamente do componente, causando apenas impacto financeiro.

4 - Todos os sistemas são modelados por um RBD (Diagrama de Bloco de Confiabilidade) em série, dessa forma, a falha de um item proporciona a falha do processo.

Dentro da abordagem do trabalho, a modelagem se divide em vários itens – fábrica, processo, equipamento, sistema, componente e peça – os quais terão seus respectivos significados:

**Fábrica:** Estabelecimento industrial onde se transformam matérias-primas em produtos destinados ao consumo.

**Processo:** Conjunto de máquinas que operam para execução de atividades que visam à transformação de matéria-prima.

**Equipamentos:** Máquinas, conjunto de sistemas (mecânicos, elétricos, eletrônicos), destinados à execução de um trabalho.

**Sistemas:** Conjunto de componentes que executam uma função dentro de um equipamento. Exemplo: unidade hidráulica, freios, acionamento, arrefecimento, lubrificação automática.

**Componente:** Conjunto de peças que executam uma função dentro de um sistema. Exemplo: motor elétrico, bomba hidráulica, mancal, painel elétrico, cilindro hidráulico, redutor.

**Peças:** Menor parte divisível de um componente. Exemplo: rolamento, retentor, parafuso, flange, pistão, haste, engrenagem, correia, etc.

O modelo a se desenvolver é baseado na vida útil estimada, tempo médio para reparo e hora cessante do processo de cada sistema/componente/peças a ser avaliado. Para obter-se um resultado consistente neste modelo, devem ser avaliados apenas itens sobre cuja vida útil existam informações bem definidas.

Nos processos produtivos pode existir uma infinidade de sistema/componente/peças, porém este modelo se propõe a fazer uma avaliação de periodicidade ótima a partir de itens mais significativos que possuam uma maior representatividade no custo do reparo e no tempo de parada do processo. O termo criticidade será abordado no próximo capítulo, que explica melhor essa representatividade.

#### 4.1 DECLARAÇÕES DAS VARIÁVEIS

Para iniciar a modelagem matemática da periodicidade, primeiramente serão declaradas todas as variáveis envolvidas no modelo, de acordo com os conceitos matemáticos. Para Boyce (2006), há três tipos de variáveis: variáveis independente, dependente e de contorno.

As variáveis independentes, neste modelo, serão aquelas que podem variar, segundo escolha do usuário.

As variáveis dependentes são aquelas que representam a imagem das respectivas equações que são desenvolvidas pelo modelo.

As variáveis de contorno são também variáveis escolhidas pelo usuário e que geram algumas restrições e particularidades ao sistema a ser simulado no modelo. Essas possuem como principal objetivo transformar a modelagem o mais próximo possível da condição real do sistema simulado.

Um exemplo pode ser atribuído à variável de contorno - *BF* “*Buffer*”. Essa variável é atribuída para processos que admitem paradas sem gerar impacto financeiro; geralmente são pulmões, redundâncias ou estoque entre processo que conseguem suportar o sistema operando sem afetar o negócio. Outro caso são processos que não operam 24 horas ou não operam sete dias por semana. Assim, o tempo em que o processo não está operando é utilizado para executar as manutenções preventivas ou até mesmo compensar um atraso de produção devido a manutenções

corretivas. Portanto, essa variável serve para ajustar a simulação à condição real.

Variáveis independentes:

$CHC$  = Custo hora cessante do sistema (R\$/h).

$N_c$  = Número de sistema (Unidade)

$Vu_n$  = Vida útil média do componente “n” (horas).

$CC_n$  = Custo com materiais/serviços para substituição ou reparo do sistema/componente/peças “n” (R\$).

$MTTR_{pn}$  = Tempo médio para reparo preventivo do componente “n” (horas).

$MTTR_{cn}$  = Tempo médio para reparo corretivo do componente “n” (horas).

Variáveis dependentes:

$CR_n$  = Custo residual da vida útil do componente “n” (R\$).

$CR_T$  = Custo residual total da vida útil do sistema (R\$).

$C_{MP}$  = Custo da MP (R\$).

$C_{MC}$  = Custo da MC (R\$).

$CM_{Vu}$  = Custo de manutenção para vida útil avaliada (R\$).

$W_p$  = Periodicidade de preventiva (meses).

$Vu_{max}$  = Máxima vida útil do sistema (horas).

$Vu_{min}$  = Mínima vida útil do sistema (horas).

$MTTR_{max}$  = Máximo tempo médio para reparo preventivo do sistema (horas).

$W_{pot}$  = Periodicidade de preventiva otimizada (meses).

$CR(w)$  = Custo residual total da vida útil do sistema em função da periodicidade (meses).

$RZ_n$  = Razão entre a vida útil de um componente e a periodicidade otimizada.

Variáveis de contorno:

$VUT_n$  = Vida de utilização do componente “n” (horas).

$Vus$  = Vida útil de avaliação do sistema (horas).

$BF$  = “Buffer” pulmão do processo que admite parada (horas).

## 4.2 EQUAÇÕES

Conforme mencionado anteriormente, o custo residual do componente representado pela variável **CR<sub>n</sub>**, é uma função decrescente periódica em função do tempo. Cada período representa a substituição do componente.

Para modelar esse evento, a função que melhor representa é uma série de Fourier, do tipo dente de serra, Boyce (2006), conforme equação 15.

$$y(t) = \frac{2L}{\pi} \sum (-1)^{(n-1)} \times \sin \frac{n \times \pi \times t}{L} \quad (15)$$

Sendo:

*L = Período fundamental*  
*n = Número de termos da série*  
*t = Tempo*

Para modelar o **CR<sub>n</sub>** (Custo residual da vida útil do componente “n”), na série, foi necessário realizar alguns ajustes na equação original, conforme será apresentado na equação 16.

$$CR_n(t) = \frac{CC_n}{1.5} + \frac{CC_n}{2} \sum_{n=1}^{1000} \frac{(-1)^n}{n} \times \sin \left[ n \times \frac{\pi}{0.5 \times Vu_n} \times \left( Vus + \frac{Vu_n}{2} + VUT_n \right) \right] \quad (16)$$

Sendo:

*CR<sub>n</sub>(t) = Custo residual da vida útil do componente “n” (R\$) em função do tempo.*

Observa-se, inicialmente, que a equação original (15) se trata de uma série crescente, contudo a função de custo residual é decrescente, logo, há que definir inflexão da derivada. Para tanto foi necessário inserir um termo adicional, para deslocar a amplitude da equação que varia positivamente e negativamente em torno do ponto “zero”. Nesta modelagem necessita-se apenas de valores positivos que representam o **CR<sub>n</sub>(t)**. O número de termos para modelar cada série é predefinido nos valores de 1 a 1000, variando em uma unidade. Foram adicionados os termos,  $\frac{Vu_n}{2}$  que representam o ângulo de fase na função, deslocando toda a função para o início da vida útil de cada componente avaliado e o termo **VUT<sub>n</sub>** que ajusta a vida de utilização do sistema em função do instante a

ser avaliado. Por exemplo: quando um componente for trocado em uma corretiva, fora do instante da MP, onde todos componentes iniciam a contagem da vida útil juntos esse possui uma defasagem de tempo em relação aos demais componentes. Um exemplo desta função pode ser observado na Figura 31. Maiores detalhes sobre funções de série de Fourier podem ser vistos em Kreider (1972), além de modelagem de sinais em Shin (2008).

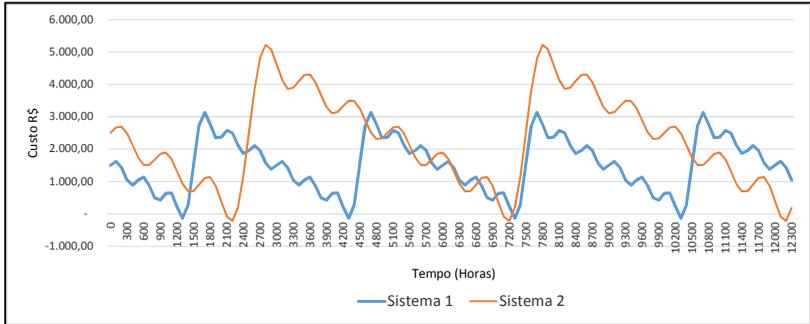


Figura 31: Função custo residual modelado na série de Fourier,  $n=5$ .

Após a definição da equação que representa o custo de cada componente em função da sua vida útil, para obter-se o custo da vida útil de todos os componentes a serem avaliados, aplica-se a equação 17, do custo residual total. Essa faz um somatório de todas as funções de cada item, resultando em uma única função.

$$CR_T = \sum CR_n(t) \quad (17)$$

Sendo:

$$CR_T = \text{Custo residual total da vida útil do sistema (R\$)}.$$

A partir da obtenção do custo residual do sistema em função do tempo, precisa-se conhecer o custo da manutenção preventiva em função do tempo, ou seja, qual o custo da MP para um determinado instante. Esse pode ser calculado por meio da equação 18.

$$C_{MP}(t) = \sum CC_n + (MTTR_{max} - BF) \times CHC + CR_T \quad (18)$$

Sendo:

$CC_n$  = Custo com materiais/serviços para substituição ou reparo do componente “n”.

$MTTR_{max}$  = Máximo tempo médio para reparo preventivo do sistema (horas).

$BF$  = “Buffer” pulmão do processo que admite parada (horas).

$CHC$  = Custo hora cessante do sistema (R\$/h).

Cabe, aqui, lembrar que o  $C_{MP}(t)$  (custo da MP em função do tempo) é composto pelos custos: componente ou serviço novo, parada de processo e custo residual por troca prematura, também é importante lembrar que esse considera a troca de todos componentes. Durante o cálculo do tempo de parada do processo, a equação 18 subtrai a variável  $BF$  do  $MTTR_{max}$ , logo assume-se que o tempo de pulmão não gera impacto financeiro no processo.

Para o presente estudo não se considera o custo instantâneo para executar um determinado reparo, mas considera-se o custo dos reparos em função da periodicidade. Portanto o programa irá simular várias periodicidades em função de uma vida útil determinada, denominada  $Vus$  (vida útil de avaliação do sistema). A  $Vus$  é a vida que incorpora o componente que possui a maior vida útil de um determinado sistema. A  $Vus$  é definida pelo usuário durante a entrada dos dados no programa. Para uma simulação consistente, recomenda-se que esse valor seja, no mínimo, duas vezes maior que a máxima vida útil de um determinado componente do sistema avaliado.

A periodicidade inicial de avaliação, isto é, a menor periodicidade avaliada, é definida por, um meio do valor da menor vida útil,  $Vu_{min}$  (Vida útil mínima do conjunto de itens a serem simulados) de um determinado componente do sistema avaliado. Conforme equação 19.

$$W_p = F \times Vu_{min} \quad \Rightarrow \quad \left[ \frac{Vu_{min}}{2}, Vus \right] \quad (19)$$

Sendo:

$F$  = Fator de incremento do programa durante as interações

$Vu_{min}$  = Vida útil mínima do conjunto de itens a serem simulados

$Vus$  = Vida útil de avaliação do sistema (horas).

$W_p$  = Periodicidade de preventiva (meses).

Nessa equação, obtêm-se vários pontos na função gerada pela equação 18, como se fosse um passo, que se repetem ao longo da *Vus*. Isso representa o número de manutenções para uma determinada periodicidade. As periodicidades variam conforme incremento da variável *F*, que aumenta em cada interação, até que se atinja o valor da  $\mathbf{W}_p = \mathbf{Vus}$ . Para cada periodicidade avaliada no intervalo definido na equação 19, obtêm-se o custo da manutenção preventiva em função da periodicidade, conforme a equação 20, que é a soma dos valores de  $\mathbf{C}_{MP}(t)$  obtidos em cada periodicidade simuladas na equação 19. O fator “F” é pré-definido com um valor inicial igual a 0.5; depois, a cada interação, ele recebe um incremento, conforme equação 21.

$$\mathbf{C}_{MP}(\mathbf{W}_p) = \sum \mathbf{C}_{MP}(t) \quad (20)$$

$$F = F_0 + \frac{Vus}{\frac{Vu_{min}}{200}} \quad (21)$$

Sendo:

$F_0 =$  Valor de “F” na interação anterior

Conforme as periodicidades são incrementadas, o custo de manutenção obtém outra variável  $\mathbf{C}_{MC}(\mathbf{w}_p)$  (custo da manutenção corretiva em função da periodicidade), gerada pelos eventos de manutenção corretiva. Assim, para cada periodicidade que ultrapassa o tempo da vida útil de um determinado componente, há um evento corretivo que pode ser calculado pela equação 22.

$$\mathbf{C}_{MC}(\mathbf{w}_p) = \sum [(CC_n + (MTTR_{cn} - BF) \times CHC) \times \left(\frac{Vus}{Vu_n}\right)] \quad (22)$$

Sendo:

$C_{MC}$  = Custo da MC em função da periodicidade.

$CC_n$  = Custo com materiais/serviços para substituição ou reparo do sistema/componente/peças “n” (R\$).

$MTTR_{cn}$  = Tempo médio para reparo corretivo do componente “n” (horas).

$BF$  = “Buffer” pulmão do processo que admite parada (horas).

$CHC$  = Custo hora cessante do sistema (R\$/h).

$Vus$  = Vida útil de avaliação do sistema (horas).

$Vu_n$  = Vida útil média do componente “n” (horas).

O custo de manutenção total para a **Vus** (vida útil de avaliação do sistema), em função da periodicidade, pode ser calculado pela equação 23, que é a soma das funções da MP e MC.

$$CM_{Vu} = C_{MP}(w_p) + C_{MC}(w_p) \quad (23)$$

Sendo:

$CM_{Vu}$  = Custo de manutenção para vida útil avaliada (R\$).

$C_{MP}(w_p)$  = Custo da MP em função da periodicidade.

$C_{MC}(w_p)$  = Custo da MC em função da periodicidade.

Com a função obtida na equação 23 é possível definir a periodicidade ótima para o sistema avaliado, que é o menor valor da função gerada através da equação 23. Na implementação computacional a seguir, é possível observar a aplicação desta equação.

### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL

A modelagem matemática foi transformada numa ferramenta computacional estruturada a partir do software MATLAB®. O principal objetivo do programa foi possibilitar simulações para permitir aos especialistas e gestores de manutenção avaliar cenários de processo industrial, sob o ponto de vista dos custos de manutenção preventiva e, além disso, avaliar a viabilidade econômica dos projetos de processos industriais.

O programa elaborado foi denominado de **OtimizaMP** (Programa para **O**timizar **M**anutenção **P**reventiva). Esse está estruturado em sete passos: Entrada de dados, custo residual, funções do sistema, simulação das periodicidades, transferência de domínio, reparo corretivo, otimização.

**Passo 1: Entrada de dados** – O sistema solicita o número de itens que serão avaliados e as variáveis necessárias para a simulação de cada sistema; na sequência, o sistema organiza todas as informações no formato de matrizes.

**Passo 2: Custo residual** - A partir da matriz da vida útil de cada item e demais variáveis, o sistema modela as entradas na função da série de Fourier para cada sistema.

**Passo 3: Funções do sistema** - Gera uma função que represente o conjunto das funções anteriores e elabora outra função que representa o custo da MP em função do tempo.

**Passo 4: Simulação das periodicidades** - A partir da vida útil de avaliação elabora-se enumeras simulações de possíveis periodicidades.

**Passo 5: Transferência de domínio** - Converte a função do custo residual e reparo preventivo do domínio tempo para o domínio da periodicidade.

**Passo 6: Custo da MC** – Gera-se a função do custo de manutenção corretiva em função da periodicidade, considerando o MTTRc de cada item e o tempo de parada.

**Passo 7: Otimização** – Gera-se a função do custo de manutenção em função da vida útil de avaliação, otimização da periodicidade, otimização do escopo, custo de materiais/corretiva e tempo de parada, cujos resultados são expressos na forma de relatório e Gráficos.

Na Figura 32, apresenta-se um diagrama que sintetiza os passos, as variáveis e as funções que correlacionam as variáveis de entrada com as saídas desejadas para tomadas de decisão. As linhas indicam este correlacionamento, mas não é possível ver ou identificar as priorizações de tomadas de decisão, porque não é esta a intenção. Estas decisões foram explicitadas no instante de formatar os códigos do programa **OtimizaMP**. O passo 7 explica os formatos de saída, tanto na forma de planilhas quanto na forma gráfica.

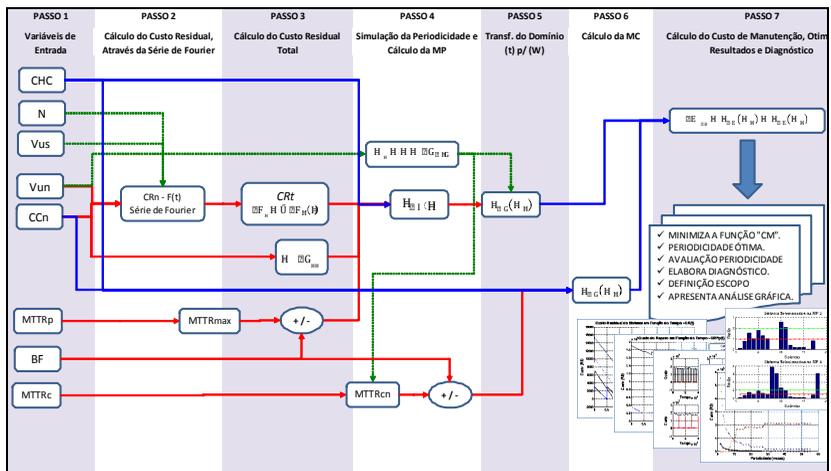


Figura 32: Diagrama do programa, OtimizaMP.

#### 4.4 AVALIAÇÃO DA MODELAGEM

Para avaliar a modelagem matemática e a consistência das decisões e codificação do programa implementado, será utilizado um modelo de um processo industrial cerâmico constituído de quatro equipamentos, quais sejam: prensa, secador, *roller* e forno contendo cada um apenas um sistema conforme está mostrado na Figura 33. O  $CHC = R\$ 12.000,00$  (Custo hora cessante do sistema). As demais variáveis de entrada estão presentes na Figura 33.

As entradas referem-se a:

$Vu_n =$  Vida útil média do componente “n” (horas).

$CC_n =$  Custo com materiais/serviços para substituição ou reparo do sistema/componente/peças “n” (R\$).

$MTTR_{pn} =$  Tempo médio para reparo preventivo do componente “n” (horas).

$MTTR_{cn} =$  Tempo médio para reparo corretivo do componente “n” (horas).



Figura 33: Modelo de um sistema para simulação no MATLAB.

##### 4.4.1 ENTRADA DE DADOS

Na Figura 34 é possível observar a página de entrada de dados do programa elaborado, denominado de **OtimizaMP** (Programa para **O**timizar **M**anutenção **P**reventiva).

```

***** PROGRAMA PARA OTIMIZAR PERIODICIDADE MP *****

** Projeto Dissertacao Mestrado: Eng. Rodrigo Fernandes Corrêa **
** Eng. Mecânica UFSC: Orientador Dr. Eng. Acires Dias *****
** Área: Projeto de Sistema Mecânicos *****
** Linha de Pesquisa: Confiabilidade e Manutenibilidade de Sistema
** Mecânicos *****

Deseja utilizar exemplos de simulação para conhecer o OtimizaMP?

(Sim= 1 / Nao= 2):2

***** ENTRADA DE DADOS *****

DIGITE O VALOR HORA CESSANTE DO PROCESSO (R$/h)-----:12000
DIGITE O TEMPO DE AMORTECIMENTO DO PROCESSO "buffer" (h)----:0
DIGITE O NÚMERO DE SISTEMAS -----:4
DIGITE A VIDA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA (h)-----:40000

* DIGITE A VIDA ÚTIL DO SISTEMA 1 (Hora) -----:5000
* DIGITE A VIDA ÚTIL DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA 1 (Hora)--:0
* DIGITE O CUSTO DE PEÇAS DO SISTEMA 1 (R$) -----:3000
* DIGITE O MTTRp (Preventiva) DO SISTEMA 1 (Hora) -----:6
* DIGITE O MTTRc (Corretiva) DO SISTEMA 1 (Hora) -----:8

* DIGITE A VIDA ÚTIL DO SISTEMA 2 (Hora) -----:8000
* DIGITE A VIDA ÚTIL DE UTILIZAÇÃO DO SISTEMA 2 (Hora)--:0
* DIGITE O CUSTO DE PEÇAS DO SISTEMA 2 (R$) -----:7000

```

Figura 34: Exemplo da página de entrada de dados no OtimizaMP.

Observa-se, pela Figura 34, que, de acordo com o número de sistemas que o usuário define para a simulação, as demais variáveis para cada sistema são solicitadas automaticamente, sendo possível a simulação de “n” sistemas. A partir da inclusão dos dados, o programa inicia o processamento das informações e apresenta os resultados conforme a seguir.

#### 4.4.2 RESULTADOS

Na Figura 35, pode-se observar a função do custo residual de cada componente do sistema, em função da sua vida útil. A função de cada componente possui cores diferentes para facilitar a visualização. Essas funções foram modeladas em uma série de Fourier, do tipo dente de serra, conforme equação 16 e passo 2 apresentado na seção 4.3. O custo residual decai com o tempo para cada um dos quatro itens modelados.

Por exemplo, a linha “rosa” representa a função custo residual em função da vida útil para o sistema “Forno”, que possui  $V_{un} = 20.000$  horas

e  $CCn = R\$15.000,00$ , de acordo com a Figura 33. Quando o valor da abscissa desta função é zero, o valor da ordenada é  $R\$15.000,00$ . Esse valor representa o custo residual deste sistema no início de sua vida útil, que é igual ao valor de um sistema novo  $CCn$ . De igual forma, quando se tem uma vida de 20.000 horas na abscissa desta mesma função, observa-se que o custo residual é igual a  $R\$0,00$ , ponto esse que representa o fim da vida útil deste sistema. Ou seja, atingiu-se 100% da vida útil do sistema. A mesma leitura da Figura 33 pode ser feita para os demais sistemas, que estão representados pelas funções das linhas: vermelha, azul e preta.

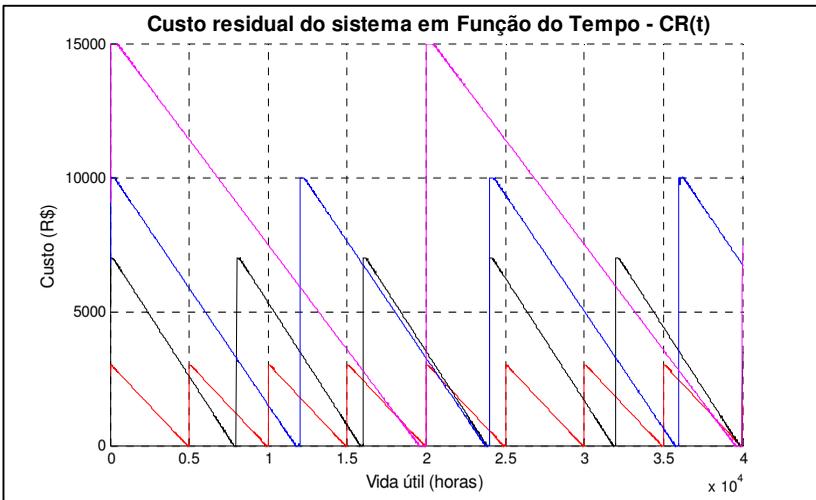


Figura 35: Custo residual em função da vida útil, para quatro sistemas.

A Figura 36 apresenta o  $CRt$  (custo residual total do sistema) pela linha “vermelha”, calculada pela equação 17, que se constitui na somatória de todas as funções já indicadas na Figura 35. O custo do reparo preventivo foi calculado pela equação 18, em função do tempo, passo 3 da seção 4.3, mostrado pela função da linha “azul”. Neste ponto do programa, tem-se apenas o custo de manutenção instantâneo - que é o  $CMP$  (custo da MP em função do tempo) e  $CRt$  (custo residual total do sistema em função do tempo) - e não em função da periodicidade, que é o principal objetivo do programa.

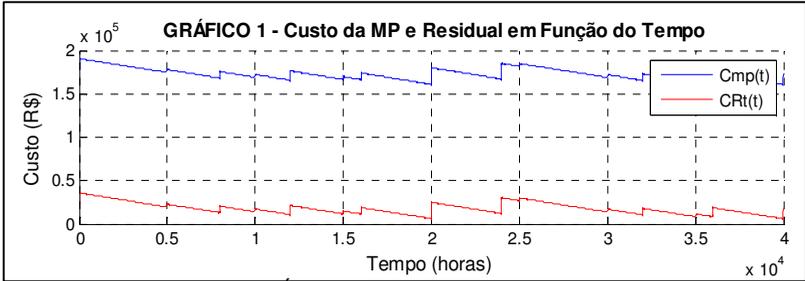


Figura 36: Custo residual total e custo do reparo preventivo x tempo.

A partir deste ponto o programa começa a simular as periodicidades, passo 4 da seção 4.3. Inicialmente o programa considera um meio da vida útil mínima do sistema de acordo com a equação 19, sendo a vida útil mínima do sistema, neste exemplo, 5.000 horas. O sistema inicialmente irá projetar uma periodicidade de 2.500 horas, conforme gráfico 1 da Figura 37.

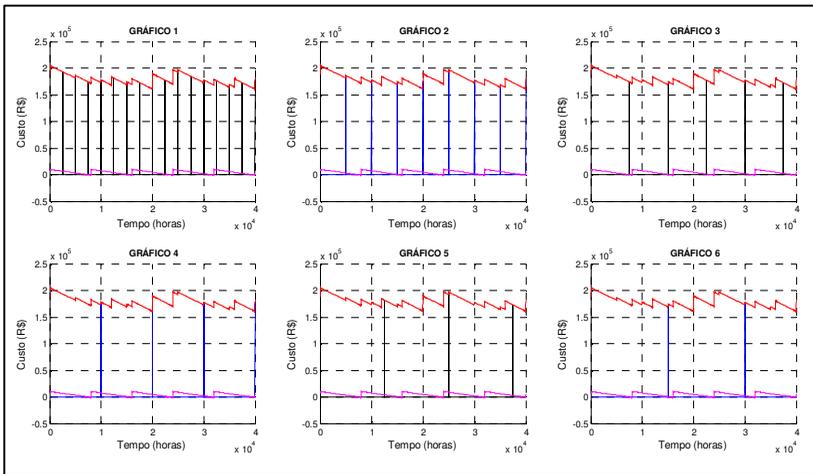


Figura 37: Interação das periodicidades.

Após a simulação da primeira periodicidade, o programa começa a incrementar a periodicidade um fator “ $F$ ”, conforme equação 19. Logo, para as interações seguintes, resultaram as seguintes periodicidades: Gráfico 2: 5.000 horas, Gráfico 3: 7.500 horas, Gráfico 4: 10.000 horas, Gráfico 5: 12.500 horas, Gráfico 6: 15.000 horas, conforme Figura 37.

Lembra-se que a interação continua até que o valor da  $W_p = Vus$ ; neste caso, a interação ocorre até que  $W_p = 40.000$  horas.

Para cada periodicidade simulada, o programa calcula o  $C_{MP}$  (custo da MP) levando em consideração que todos os componentes serão substituídos, numa ação de manutenção preventiva para uma determinada periodicidade, ao longo da  $Vus$  (vida útil de avaliação do sistema). A  $Vus$ , neste exemplo, é de 40.000 horas, o que pode ser observado na abscissa do Gráfico da Figura 38. Essa figura também representa todas as periodicidades possíveis para essa simulação.

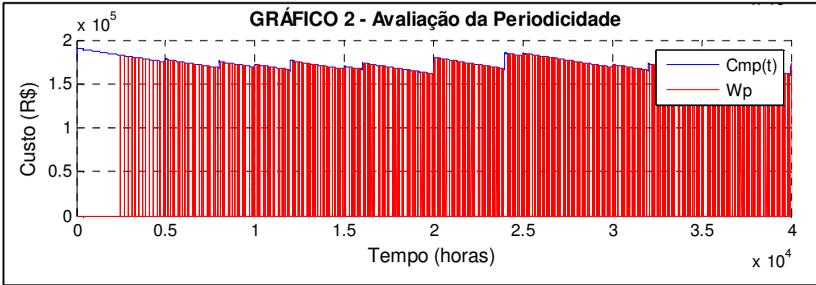


Figura 38: Simulação das periodicidades.

No passo 5 da seção 4.3, pode-se executar a transformação do domínio do tempo para o domínio da periodicidade. Na Figura 39, observa-se o comportamento do  $CR(w)$  (Custo residual total da vida útil do sistema em função da periodicidade (meses)). No primeiro ponto identificado na figura tem-se uma periodicidade de 4,3 meses, que representa um custo residual total de aproximadamente R\$ 214.700,00. Assim, se fosse executada uma manutenção preventiva a cada 4,3 meses para esse sistema, haveria esse custo apenas com troca prematura.

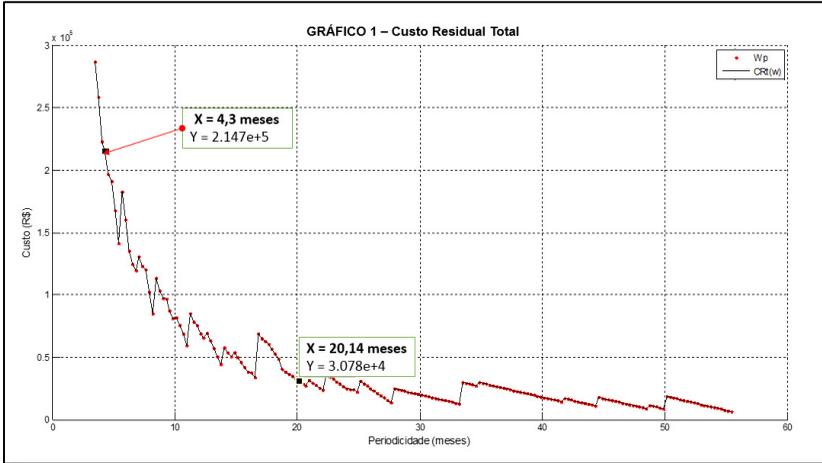


Figura 39: Custo residual total em função da periodicidade.

Já no segundo ponto, identificado na mesma figura tem-se um aumento de periodicidade para 20,14 meses, esse mesmo custo é reduzido para R\$ 30.780,00. É possível observar que quanto menor a periodicidade preventiva, maior são os custos residuais. Isso significa que quanto menor a periodicidade, a vida útil total dos componentes será menos utilizada, havendo, assim, maior ocorrência de trocas prematuras.

Para cada periodicidade simulada, o programa gera a função do custo da manutenção preventiva em função da periodicidade, conforme equação 20, indicado pela linha “azul” legenda  $C_{MP}$ , mostrado na Figura 40. É importante lembrar que o número de periodicidade simulada depende das variáveis apresentadas na equação 21.

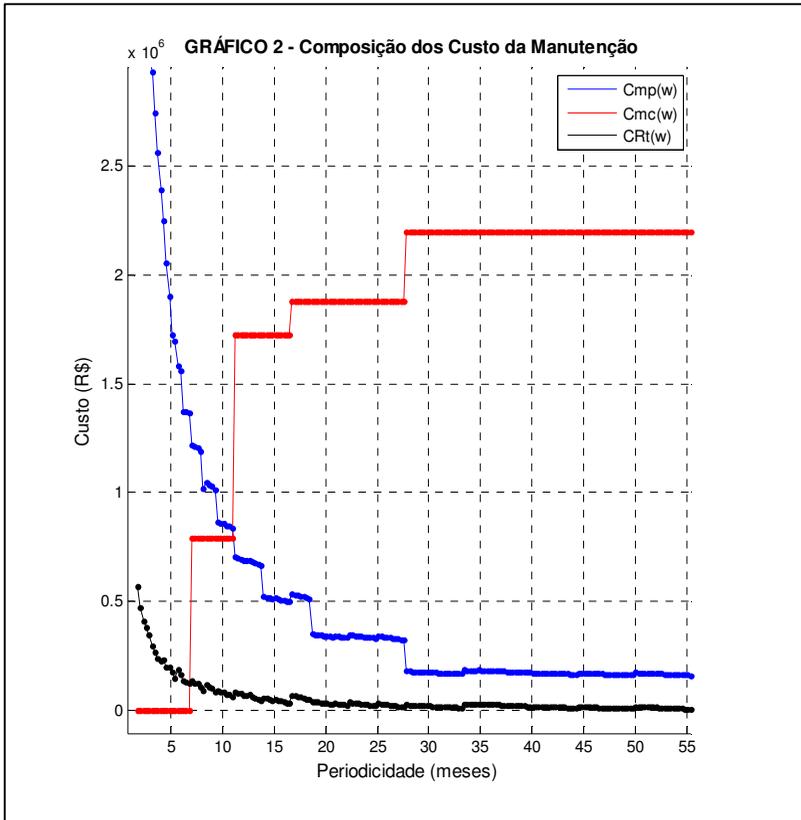


Figura 40: Composição dos custos de manutenção em função da periodicidade.

Depois de gerada a função do custo da MP em função da periodicidade, pode-se gerar a função do custo da manutenção corretiva em função da periodicidade, conforme equação 22, passo 6 da seção 4.3. Cabe lembrar, que para cada componente que possuir vida útil menor que a periodicidade avaliada, o programa considera, que houve um evento corretivo, calculando o custo da MC, a partir do custo do componente,  $MTR_c$  (tempo médio para reparo corretivo) do respectivo componente e da hora cessante do processo (ver Figura 40), variável  $C_{MC}$  da legenda.

A função  $C_{MC}$  está representada pela linha em “vermelho”. Observa-se que esta possui quatro degraus bem definidos, que representam o instante que a periodicidade atinge um valor superior à vida útil de cada item. Por exemplo, o degrau existente no intervalo entre a

periodicidade 10 e 12 meses, da Figura 40, significa: com a periodicidade de 12 meses, o item secador - que possui uma vida útil de 11,1 meses (8000 horas) - sofrerá corretiva; isto significa que ele irá falhar antes que a MP ocorra, gerando assim um custo com MC.

É também importante lembrar, que o valor do  $C_{MP}$  e  $C_{Mc}$  é calculado subtraindo o valor da variável  $BF$  “Buffer” das suas respectivas variáveis  $MTTR_c$  e  $MTTR_p$ . Assim, quando o resultado da diferença entre  $(MTTR - BF)$  for menor que “zero”, o programa leva em consideração que o tempo de parada possui custo nulo. Em função disso, neste exemplo, não houve nenhuma influência da variável  $BF$ , devido o valor ser “zero”.

Finalizando, com a equação 23, chega-se ao custo de manutenção total para a vida útil de avaliação em função da periodicidade. Ver Figura 41.

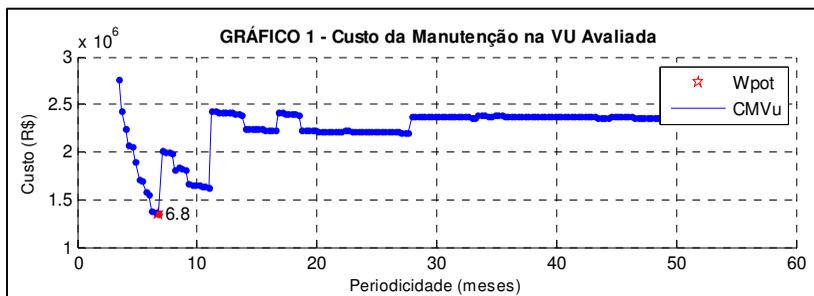


Figura 41: Custo da manutenção na vida útil avaliada em função da periodicidade.

Pode-se observar que para o sistema avaliado na modelagem proposta, a periodicidade otimizada se localiza em 6,8 meses (aproximadamente 4.896 horas), ponto em vermelho da Figura 41. Assim, se for elaborado um plano de manutenção planejando-se uma parada de 10 horas (ver  $MTTR_p$  máximo Figura 33) a cada 6,8 meses, com a substituição de todos os quatro componentes do sistema, obter-se-á o menor custo de manutenção para a vida de 55,6 meses do sistema.

===== CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA AVALIADO =====						
SISTEMAS	VU	CP	MTRp	MTRc	RZ	
* SISTEMA 1 =	5000	3000	6	8	1.0204	
* SISTEMA 2 =	8000	7000	10	15	1.6327	
* SISTEMA 3 =	12000	10000	1	3	2.449	
* SISTEMA 4 =	20000	15000	7	12	4.0816	
===== APRESENTAÇÃO RESULTADOS =====						
* A VIDA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA FOI DE _____						: 55.6 MESES
* A PERIODICIDADE ÓTIMA PARA O SISTEMA AVALIADO É DE _____						: 6.8 MESES
* O TEMPO DE CADA PARADA PREVENTIVA É DE _____						: 10.0 HORAS
* O NÚMERO TOTAL DE PARADAS PREVENTIVA PARA VIDA AVALIADA É DE _____						: 8.0
===== APRESENTAÇÃO CUSTOS =====						
* O CUSTO DA HORA CESSANTE DO PROCESSO É DE _____						: R\$ 12000.00
* O CUSTO COM MATERIAIS PARA CADA PREVENTIVA É DE _____						: R\$ 35000.00
* O PERCENTUAL DO CUSTO RESIDUAL x MATERIAIS DE MP É DE _____						: 42.74
* O CUSTO RESIDUAL PARA CADA PREVENTIVA É DE _____						: R\$ 14959.76
* O CUSTO DO TEMPO DE PARADA DO PROCESSO X PM _____						: R\$ 120000.00
* O CUSTO DE CADA MANUTENÇÃO PREVENTIVA É DE _____						: R\$ 169959.76
* O CUSTO MÉDIO COM MATERIAIS DE CORRETIVA MÊS É DE _____						: R\$ 0.00
* O CUSTO DE PARADA POR CORRETIVA MÊS É DE _____						: R\$ 0.00
* O CUSTO MÉDIO TOTAL DE CORRETIVA MÊS É DE _____						: R\$ 0.00

Figura 42: Relatório da simulação no OtimizaMP.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 42, o custo acumulado total de manutenção para periodicidade de 6,8 meses, é de aproximadamente R\$ 1.359.000,00 para uma vida de 55,6 meses (igual a 40.000 horas). Conforme resumo, relatório da Figura 42, cada parada terá um custo total de manutenção de aproximadamente R\$ 169.959,76. Pode-se observar que o custo mais representativo é o de parada de processo, de R\$ 120.000,00 por parada. E para a simulação feita, não se tem nenhuma ocorrência de corretiva para os sistemas avaliados, uma vez que o tempo da periodicidade ótima é inferior à menor vida útil de componente que, no modelo, é de 5.000 horas, aproximadamente 6,9 meses. Já, para periodicidades acima de 10 meses, Figura 41, o custo de manutenção subiria para além de R\$ 2.000.000,00.

#### 4.4.3 AVALIAÇÃO DA PERIODICIDADE

Após a apresentação da periodicidade otimizada é necessário observar a vida útil de cada sistema em função da periodicidade ótima.

Conforme a equação 18, o  $C_{MP}(t)$  (Custo da MP em função do tempo) não depende apenas do custo de peças, mas também do  $CHC$  (Custo da hora cessante) e do  $MTTR_p$ . Portanto, alguns componentes podem ser substituídos de forma muito prematura, para evitar custos da hora cessante. Para evitar essa tomada de decisão precipitada sugere-se intercalar as trocas entre a periodicidade otimizada.

Para essa avaliação, após o cálculo da otimização, definiu-se uma variável que calcula a razão da vida útil (RZ) de cada sistema em relação à periodicidade otimizada, lembrando que, nesse cálculo, a unidade da periodicidade é convertida em horas. RZ indica o número de preventivas que pode ser ignorado no escopo, desde que esse valor seja maior que 2. O cálculo é realizado através da equação 24 e apresentado na Figura 43.

$$RZ_n = \frac{Vu_n}{Wpot \text{ (horas)}} \quad (24)$$

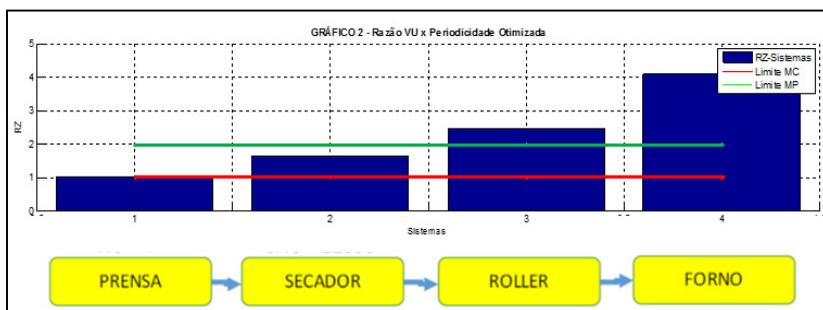


Figura 43: Cálculo da razão entre os sistemas.

A razão calculada para cada sistema possui alguns significados, como segue:

- ✓  $RZ < 1$ : Sistema substituído em MC.
- ✓  $RZ = 1$ : Sistema substituído em MP sem custo prematuro.
- ✓  $1 < RZ < 2$ : Sistema substituído em MP com custo prematuro.
- ✓  $RZ > 2$ : A substituição do sistema pode ser intercalada entre as MP.

$RZ < 1$ : Significa que a vida útil do sistema é inferior à periodicidade ótima e, portanto, ele deverá sofrer manutenção corretiva.

$RZ = 1$ : Significa que o sistema possui vida útil exatamente igual à periodicidade ótima, tendo-se, portanto, o aproveitamento de 100% da possível vida útil sem custo prematuro.

$1 < RZ < 2$ : Significa que o sistema possui vida útil superior à periodicidade ótima, e as trocas prematuras não ultrapassam 50% da vida útil estimada do sistema.

$RZ > 2$ : Significa que o sistema possui mais do que uma vida útil superior à periodicidade ótima, e as trocas prematuras podem ocorrer com valores superior a 50% da vida útil estimada do sistema.

Para as situações onde  $RZ > 2$ , recomenda-se a intercalação das trocas entre cada periodicidade de preventiva. Por exemplo, o sistema 4 da Figura 33 possui uma vida útil de 20.000 horas, sendo a periodicidade ótima de 6,7 meses (4.824 horas). Então, é possível executar quatro manutenções preventivas na periodicidade ótima, alcançando um tempo de vida útil de 19.296 horas e, mesmo assim, não se alcança a vida útil estimada de 20.000 horas do sistema 4. Portanto, o  $RZ = 4,12$  significa que se pode trocar esse componente a cada quatro preventivas, reduzindo o custo com troca prematura, sem comprometer a confiabilidade do sistema.

A Figura 44 mostra a intercalação de escopo, que resultou em quatro escopos de preventivas para essa simulação.

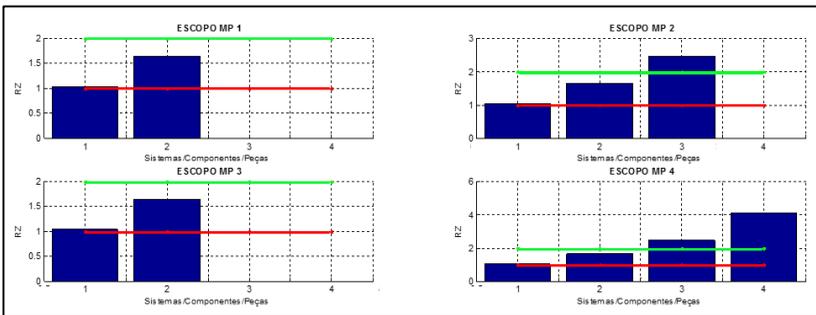


Figura 44: Intercalação do escopo da MP.

No escopo MP1 deve-se substituir somente os componentes 1 e 2; no MP2: 1,2 e 3; MP3: 1 e 2 e no escopo MP4: 1,2,3 e 4. Observa-se que o sistema 4 é indicado para ser substituído somente no escopo MP4, que representa a quarta manutenção preventiva.

Na Figura 45 é possível observar a redução dos custos proporcionada pela intercalação do escopo após a otimização da

periodicidade. Nos Gráficos desta figura, é possível observar os custos com materiais, parada, manutenção e o tempo de parada para cada escopo. Lembra-se que o valor limite de cada Gráfico representado pela linha em “vermelho” representa o valor em que, caso não houvesse a intercalação de escopo, todos os componentes seriam substituídos em cada periodicidade. Portanto, é possível observar que no escopo 4 de todos os Gráficos há o mesmo valor da linha limite, em vermelho, pois aí deverá haver a substituição de todos os itens.

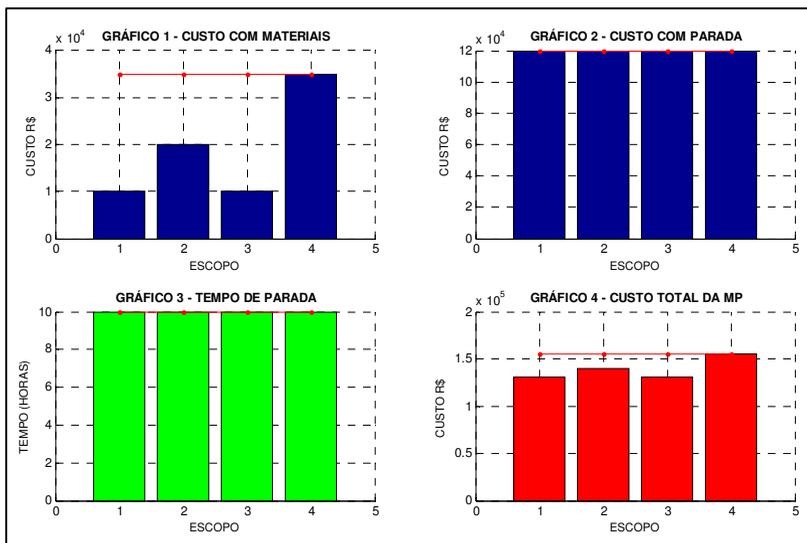


Figura 45: Resultados obtidos com a otimização do escopo.

O Gráfico 1, da Figura 45, mostra a redução do custo de materiais para cada escopo apresentado na Figura 44. Pode-se observar que no escopo 1, do Gráfico 1, tem-se a redução com custo de materiais de R\$35.000,00 para R\$10.000,00; no escopo 4, tem-se a substituição de todos os itens (ver escopo MP4 Figura 44); logo, o custo seria igual, caso não fosse feita a intercalação.

Pode-se dizer que o programa permite otimizar a periodicidade e o escopo dos sistemas a serem simulados.

#### 4.4.4 INFLUÊNCIAS CHC

Outra avaliação importante que se pode obter na simulação é a influência do *CHC* (custo da hora cessante do processo).

Para obter-se essa avaliação, considera-se o mesmo modelo da Figura 33, inserindo uma análise de sensibilidade à simulação. Inicia-se a simulação com *CHC* igual a “zero” e incrementa-se um valor de R\$ 2.000,00 por hora cessante a cada simulação, conforme Figura 46.

Para melhor compreensão desta análise, pode-se considerar a existência de nove processos de análise com iguais componentes e respectivas variáveis, como: vida útil/custo/MTTR e diferentes *CHC* para cada processo.

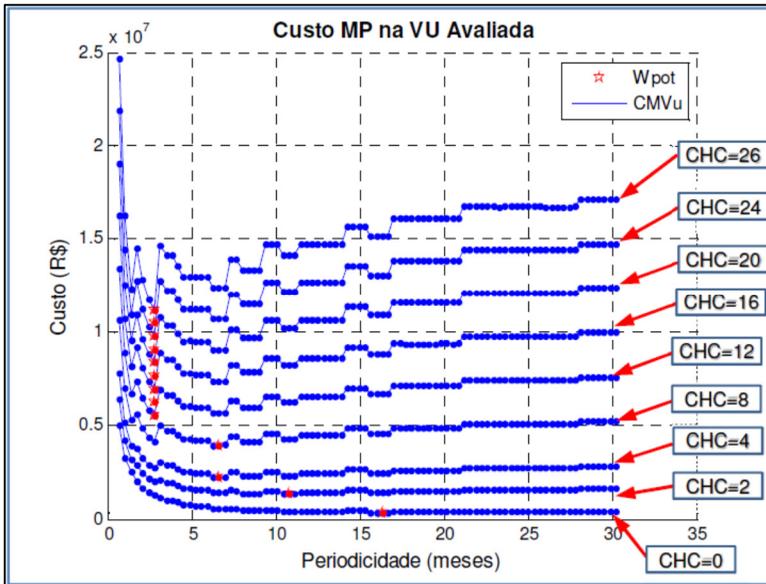


Figura 46: Influência *CHC* na periodicidade.

Observa-se que os valores de *CHC* estão representados por milhar, *CHC* x R\$1.000,00.

Conforme for incrementado o valor do *CHC*, observa-se uma redução da periodicidade ótima representada pelo ponto em “vermelho” de cada função. Isso ocorre devido ao custo residual “*CR*” (decorrentes das substituições prematuras) perder sua significância em relação ao *CHC*. Nesse sentido, para processos em que o custo da hora cessante

possui uma razão superior ao custo dos componentes, a substituição prematura de componentes é aconselhável para aumentar a disponibilidade do equipamento, evitando eventos corretivos. Ressalta-se, também, nesses casos, que os eventos corretivos possuem custos mais significativos, uma vez que o  $MTTRc$ , na maioria das situações, é superior ao  $MTTRp$ . Por este motivo, quanto mais significativo for o  $CHC$ , menor será a periodicidade, para evitar os eventos corretivos.

Outra observação a ser feita refere-se à ocorrência de  $CHC$  muito baixo. Observe-se a curva onde  $CHC = 0$ ; aí a periodicidade tende a aumentar, ultrapassando até mesmo a vida útil do componente que possui a maior vida útil. Isso significa que para processos em que o  $CHC$  é pouco significativo, a tendência é aplicar a estratégia de manutenção corretiva (MC), cujo custo residual será igual a “zero”, por não haver trocas prematuras.

Comparando a análise de sensibilidade com o resultado obtido na Figura 41, onde se obteve uma periodicidade ótima de 6,8 meses para um  $CHC$  de R\$12.000,00, observa-se que quando  $CHC$  é nulo a periodicidade ocorre em torno de 15 meses, o que indica o momento de se preparar para efetuar manutenção corretiva. No caso de haver  $CHC$  igual a 2, esta periodicidade já diminui para 12 meses, e nos casos de  $CHC$  ser igual a 4 e 8, a periodicidade indica de 6 a 7 meses, reduzindo-se em até 3 meses quando  $CHC$  ultrapassa o valor de 12. Nesses casos, as decisões gerenciais apontam para ações de manutenção preventiva.

## 4.5 CONSIDERAÇÕES

Neste capítulo foi feito o desenvolvimento da modelagem matemática, implementação computacional e a simulação numérica, a partir de uma simples aplicação do processo cerâmico. O objetivo foi explicar o potencial de análise da ferramenta desenvolvida, **OtimizaMP**, e quais análises podem ser desenvolvidas.

No próximo capítulo, será desenvolvida uma metodologia para auxiliar a organizar sistemas na simulação. Pretende-se aplicar as simulações com a utilização da ferramenta desenvolvida “**OtimizaMP**”, em sistemas reais da indústria. Inicialmente serão simulados equipamentos e processos da indústria cerâmica, interpretados e avaliados os resultados e, posteriormente, serão comparados com situações reais da indústria.



## 5 SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo propõe-se apresentar simulações de sistemas reais da área industrial, que serão utilizadas nas linhas de produção de uma indústria cerâmica, com uso da ferramenta **OtimizaMP (Programa para Otimização de Manutenção Preventiva)**, desenvolvida neste trabalho.

Apresenta-se, também, uma metodologia que auxiliará o usuário a realizar as simulações.

### 5.1 METODOLOGIA PARA OTIMIZAÇÃO DA MP

Para elaborar a simulação de um sistema produtivo de um determinado ambiente fabril, com uso do programa **OtimizaMP**, deve-se seguir uma sequência de passos. O objetivo é desenvolver uma análise estruturada do sistema técnico, cuja aplicação, neste caso, foi dividida em quatro passos: Mapeamento do processo; Estudo da vida útil; Simulação computacional e Otimização MP, conforme está apresentado na Figura 47. Cada um desses passos será apresentado a seguir. O objetivo é apresentar o processo de otimização da manutenção, principalmente, para o contexto da Manutenção Centrada em Confiabilidade, RCM. Contudo, poderá também ser utilizado para outros processos de gestão, no contexto das manutenções preventivas, já que a sistematização busca otimizar a periodicidade da preventiva, contextualizada no escopo, custos dos ativos, lucro cessante, tempo para manutenção corretiva e tempo para manutenção preventiva.



Figura 47: Metodologia para otimização da MP.

### 5.1.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO

O primeiro passo, mapeamento do processo, requer a organização de um processo industrial, que pode ser sintetizado na forma de um diagrama de blocos, divididos em equipamentos, sistemas ou componentes. Para isso, alguns cuidados devem ser tomados, de forma a identificar apenas os itens mais significativos: não ser tão geral que não represente a realidade e nem tão detalhado, que gere uma quantidade muito grande de informações, de difícil análise ou, ainda, pouco significativas para a tomada de decisão, em face da particularidade dentro do sistema. Por exemplo, uma linha de produção pode ser dividida em equipamentos e sistemas de acordo com as definições de itens feitas no capítulo 4.

De acordo com Waeyenbergh (2005), a importância da disponibilidade de um sistema pode ser feita em dois níveis: quanto ao impacto financeiro ou quanto aos impactos à segurança e ao meio ambiente. Neste trabalho o foco da modelagem centra-se nos impactos financeiros, e a importância é definida pela *CT* (criticidade), para a qual se aplica a equação 25.

A definição da equação 25 tomou por referência o modelo de cálculo de sistema crítico adotado em CII – *Confederation of Indian Industry* (2014).

$$CT = CC_n + MTTR \times CHC \quad (25)$$

Onde:

$CC_n$  = Custo com materiais/serviços para substituição ou reparo do sistema/componente/peças “n” (R\$).

$MTTR$  = Tempo médio para reparo corretivo do componente “n” (horas).

$CHC$  = Custo hora cessante do sistema (R\$/h).

A criticidade da equação 25 será usada como um parâmetro dos sistemas a serem utilizados em uma simulação, com o objetivo de selecionar sistemas que sejam mais representativos para simulação.

## 5.1.2 DEFINIÇÃO DA VIDA ÚTIL

De acordo com a norma ABNT NBR\_5462/1994, vida útil, sob dadas condições, é o intervalo de tempo desde o instante em que um item é colocado pela primeira vez em estado de disponibilidade, até o instante em que a intensidade de falha torna-se inaceitável ou até que o item seja considerado irrecuperável depois de uma pane.

A ação de definição da vida útil de um sistema ou componente é um fator decisivo para se determinar o instante de uma manutenção; portanto, a sua definição configura as necessidades de parada de um processo, para ações preventivas ou corretivas.

A vida útil de um determinado componente não é um valor exato e pode ser mensurado por meio de distribuições estatísticas utilizadas na confiabilidade, conforme apresentado na seção 2.9. A base das informações para esses cálculos resulta de um histórico de ocorrências proveniente de um CMMS. Muitos dados de vida útil são fornecidos pelo fabricante do equipamento, e são provenientes de uma simulação ou histórico de falha. Outra forma de definir vida útil é através do histórico de acompanhamento de preditiva, com aplicação de técnicas de análise de vibração, ultrassom, termográfica e óleo. Conseguindo-se uma boa aproximação do momento da falha e sua tendência de evolução, pode-se definir a vida útil aproximada do sistema/componente.

Na Figura 48, pode-se observar um exemplo do cálculo da vida útil média de bomba hidráulica, a partir de dados de falha extraídos do CMMS “Engeman” da Portobello S.A. As unidades estão apresentadas em milhões de ciclos de trabalho.

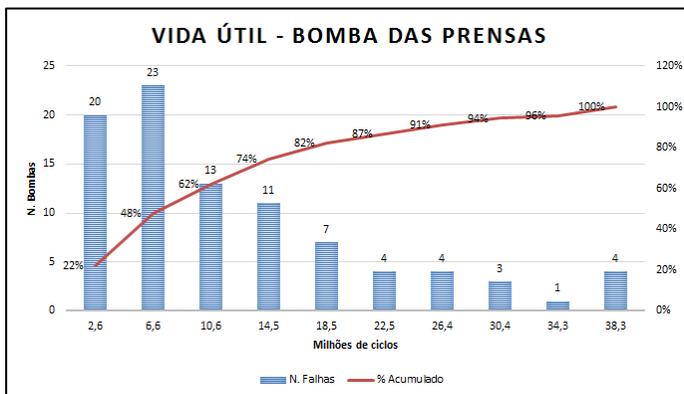


Figura 48: Distribuição de falha de bombas hidráulica de prensas.

Para calcular a vida útil média, nesse exemplo será utilizada a equação (6), exponencial, apresentada na seção 2.9.2.

$$R(t) = e^{-\lambda.t} \quad (06)$$

Como a variável aleatória é ciclo, e não tempo, a equação 06 é modificada: a variável “ $t$ ” (tempo) passa ser “ $c$ ” (ciclo), reescrita na equação 26.

$$R(c) = e^{-\lambda.c} \quad (26)$$

Para definir “ $\lambda$ ”, taxa de falha, calculam-se dois pontos conhecidos a partir do histórico de falha da Tabela do Anexo 10.

Primeiro ajusta-se a equação 26, isolando a variável “ $\lambda$ ”, para calcular-se a taxa de falha. Logo, tem-se:

$$\ln R(c) = \ln e^{-\lambda.c} \Rightarrow \ln R(c) = -\lambda.c \Rightarrow \lambda = \frac{-\ln R(c)}{c}$$

Ponto 1) Na Tabela registro de falha (Anexo 10), verificam-se, na frequência acumulada, nove falhas, que representam 10% das falhas, confiabilidade de 90%, número de ciclos de trabalho  $1,84 \times 10^6$ . Logo, tem-se:

$$\lambda = \frac{-\ln R(c)}{c} \Rightarrow \lambda = \frac{-\ln 0,90}{1,84 \times 10^6} \Rightarrow \lambda = 5,72 \times 10^{-8} \text{ Falha/ciclo}$$

Ponto 2) Na Tabela registros de falha (Anexo 10), verificam-se, na frequência acumulada, 20 falhas, que representam 22% das falhas, confiabilidade de 78%, número de ciclos de trabalho  $4,27 \times 10^6$ .

$$\lambda = \frac{-\ln R(c)}{c} \Rightarrow \lambda = \frac{-\ln 0,78}{4,27 \times 10^6} \Rightarrow \lambda = 5,81 \times 10^{-8} \text{ Falha/ciclo}$$

Observa-se que a taxa de falha possui uma pequena variação, neste caso pode-se considerar constante, característica da função exponencial, conforme apresentado na seção 2.9.2; logo, a  $VU$  pode ser definida como inverso da taxa de falha, conforme segue:

$$VU = \frac{1}{\lambda} \Rightarrow VU = \frac{1}{5,72 \times 10^{-8}} \Rightarrow VU = 17,48 \times 10^6 \text{ ciclos} = 1,66 \text{ ano}$$

Pode-se também definir a vida útil a partir da norma ISO 13846, destinada à definição de vida útil com 90% de confiabilidade aos projetos de sistemas de controle. Essa norma define a vida útil de um componente como:

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \times N_{op}} N_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600}{t_{cycle}} \quad (27)$$

Onde:

$MTTF_d$  – (*mean time to dangerous failure*) Tempo médio até a falha.

$B_{10d}$  – Número médio de ciclos até 10% dos componentes falharem.

$N_{op}$  – Número médio de ciclos de operação por ano.

$d_{op}$  – Número médio de dias de operação por ano.

$h_{op}$  – Número médio de horas de operação por dia.

$t_{cycle}$  – Tempo de ciclos de operação em segundos.

Para o exemplo, o histograma da Figura 48, com o cálculo de vida útil, na norma ISO 13849, ter-se-ia:

$$N_{op} = \frac{d_{op} \times h_{op} \times 3600}{t_{cycle}} \Rightarrow N_{op} = \frac{365 \times 24 \times 3600}{3} = 10,51 \times 10^6 \text{ Ciclo/ano}$$

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0,1 \times N_{op}} \Rightarrow MTTF_d = \frac{1,84 \times 10^6}{0,1 \times 10,51 \times 10^6} = 1,75 \text{ ano}$$

Observa-se que a variação entre o cálculo da equação exponencial, teoria da confiabilidade e a norma ISO 13849 é pequena: 1,66 ano para 1,75 ano. Assim, pode-se utilizar qualquer um dos métodos para definição de  $VU$  nas simulações. Ambos os casos consideram a distribuição exponencial.

Existem *softwares* disponíveis no mercado que também podem definir a vida útil, a partir dos dados disponíveis no CMMS. Outros exemplos de definição de vida útil podem ser vistos nos anexos 06, 07,08 e 09, que mostram o cálculo a partir de ensaios feitos para componentes elétricos, rolamentos e eletroválvulas hidráulicas.

### 5.1.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

De acordo com Ferreira (1997), simulação computacional de sistemas, ou apenas simulação, consiste na utilização de certas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real. É o estudo do comportamento de sistemas reais por meio de exercício de modelos.

Nesta etapa, desenvolve-se a ação de simulação do processo para análise computacional dos sistemas/componentes, para conhecimento de sua vida útil com maior criticidade, bem como das demais variáveis de entrada e contorno, conforme apresentado na seção 4.3. Apropria-se da sistematização computacional (OtimizaMP) para simular a otimização da periodicidade.

Os dados fornecidos nos gráficos e relatórios do OtimizaMP possibilitam ao gestor de manutenção avaliar o comportamento otimizado do processo, no contexto da manutenção.

### 5.1.4 OTIMIZAÇÃO DA MANUTENÇÃO PREVENTIVA

De acordo com Ferreira (1997), otimização é um processo utilizado a partir de um modelo, por meio de técnicas matemáticas ou gráficas, que consiste na redução de algumas variáveis de um produto com o objetivo de melhorar seu desempenho.

Neste passo da metodologia, executa-se a otimização da MP, a partir de dados gráficos e relatório, fornecidos pelo OtimizaMP; são feitas as correções das periodicidades nos planos de manutenção preventiva, definição do escopo e escolha da estratégia corretiva ou preventiva, além de conhecer o comportamento dos custos: peças para cada MP, residual para cada MP, tempo de parada do processo x MP e custo médio de manutenção corretiva mensal. Tudo isso auxilia o gestor de manutenção nas tomadas de decisão e no planejamento de orçamento.

De acordo com a Figura 47, a otimização da MP possui dois pilares: Projetos e Plano MP. De acordo com a metodologia do RCM, a manutenção pode ser otimizada através da melhora de um plano de MP ou por meio de projeto de equipamentos ou sistema.

**Projetos:** A partir do diagnóstico do OtimizaMP, é possível identificar sistemas/componentes que são mais críticos para disponibilidade do processo e para os custos de manutenção. Dessa forma,

pode-se elaborar projetos nos equipamentos/sistemas, que proporcionem maior facilidade para execução da manutenção (redução do MTTR) ou projetos que aumentem a durabilidade (maior vida útil) dos componentes. Consequentemente, otimizam-se os custos de manutenção e proporciona-se maior disponibilidade dos sistemas.

**Plano MP:** A partir do diagnóstico do OtimizaMP, o gestor de manutenção pode fazer o planejamento de manutenção, programação dos planos de manutenção e planejamento das paradas, com periodicidade otimizada e definição do escopo, levando em consideração que, dependendo do processo, nem todos os itens serão substituídos em cada MP (devido à intercalação dos escopos), e que outros deverão utilizar estratégia de MC. Conforme conceitos do RCM, apresentado por Smith (1993), na seção 2.5, a revisão de um plano de MP ideal deve-se ter periodicidade e escopo otimizado.

Uma otimização ideal dos custos de manutenção de um processo seria obtida quando se conseguisse equalizar todas as vidas úteis de todos os sistemas em um único valor; ou seja, seria feita uma única parada para a substituição de todos os componentes sem ter-se custo residual por troca prematura; além do mais, poderíamos em alguns casos utilizar o equipamento até seu término da vida útil e descartá-lo por inteiro.

A seguir serão apresentadas duas simulações de sistemas reais: Moinho contínuo e Processo de queima.

## 5.2 SIMULAÇÃO: MOINHO CONTÍNUO MTC161

Moinhos são equipamentos utilizados desde a pré-história, para moer, triturar grãos, cereais, etc. Hoje, muitas indústrias, como cerâmica, mineração e cimenteira, utilizam esses equipamentos para moer compostos das matérias-primas de seus produtos.

A indústria cerâmica utiliza os moinhos para moer argila, compostos rochosos e demais minerais para produzir a barbotina, que é um subproduto para fabricação do pó cerâmico utilizado na fabricação dos revestimentos cerâmicos.

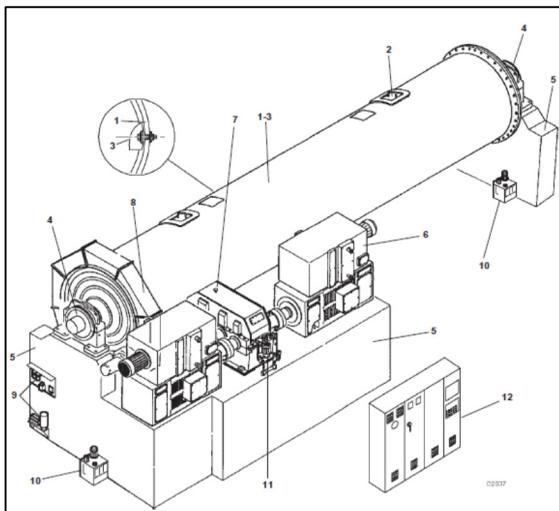


Figura 49: Moinho contínuo da indústria cerâmica.

O equipamento “Moinho”, Figura 49, que será simulado no programa “OtimizaMP”, possui capacidade produtiva de aproximadamente 35 Ton/h, com uma potência instalada de 1.030 Kw, conforme coluna do modelo MTC 161, apresentado na Figura 50 do fabricante “SACMI”.

SACMI MOLLA		Revisão 00 Data 19.03.20010			190.04.A06
CARACTERÍSTICAS GERAIS					2
<b>2.3 CARACTERÍSTICA TÉCNICAS</b>					
2.3.1 DADOS TÉCNICOS					
CARACTERÍSTICAS		MTC088	MTC101	MTC140	MTC 161
CAPACIDADE SEM REVESTIMENTO	l	88.000	100.000	140.000	160.000
CAPACIDADE ÚTIL	l	80.500	93.500	131.500	150.000
POTÊNCIA MOTORIZAÇÃO	kW	592	592	2 X 515	2 X 515
NÚMERO DE RPM		12,5	12,5	11	11
PESO CILINDRO	Kg	53.000	57.000	83.000	90.000
PESO REVESTIMENTO BORRACHA	Kg	14.000	15.500	23.000	25.500
PESO CORPOS A TRITURAR	Kg	75.000	68.000	120.000	110.000
		Alumina	Silice	Alumina	Silice

Figura 50: Características do moinho MTC161 SACMI.

Para modelar este equipamento, serão seguidos os passos conforme metodologia apresentada na seção 5.1.

### 5.2.1 MAPEAMENTO O PROCESSO

A Figura 51 apresenta a modelagem dos quatro sistemas constituintes do equipamento moinho, distribuídos na forma de um diagrama de bloco de confiabilidade “RBD”, neste caso, com todos os sistemas em série.

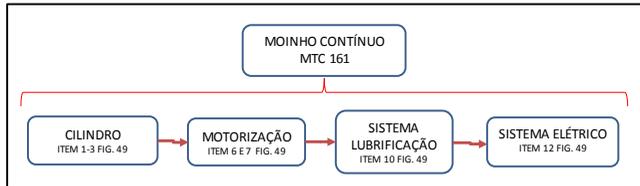


Figura 51: RBD, moinho contínuo MTC161.

### 5.2.2 ESTUDO DA VIDA ÚTIL

A vida útil de alguns componentes foi obtida do plano de manutenção do fabricante “SACMI”, conforme Anexo 02. Outros dados, como a vida útil dos revestimentos, foram extraídos por meio de relatórios de acompanhamentos de inspeção (Técnica Preditiva), com registros de medições, conforme Figura 52, que apresenta uma vida aproximada de 3,5 anos para o revestimento do cilindro da câmara 01.



Figura 52: Medições de inspeção do revestimento, moinho contínuo MTC161.

Os demais revestimentos, apresentados na folha de dados da Tabela 4, podem ser vistos no relatório de inspeção do Anexo 05, extraído do CMMS “Engeman” da Portobello S.A.

Os componentes que fazem parte do sistema elétrico resumem-se no inversor de frequência dos motores elétricos, (Figura 53).

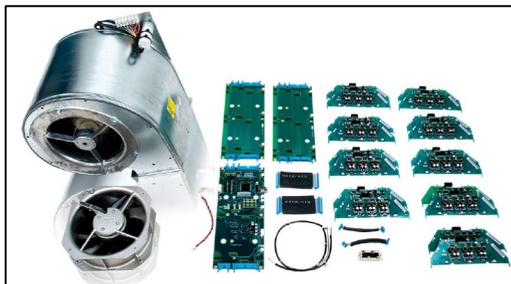


Figura 53: Componentes do inversor ACS600 ABB, item 12, Figura 49.

A vida útil de cada componente do sistema elétrico foi estimada a partir do plano de manutenção preventiva do fabricante, fundamentado em ensaios de vida útil, conforme Anexo 03 e 04.

As demais informações da folha de dados, como, custo de componentes,  $MTTRp$  e  $MTTRc$ , foram extraídas do histórico de dados do CMMS. Logo, para esta simulação, modelou-se o equipamento em quatro sistemas e 20 componentes, resultando na folha de dados, conforme Tabela 4.

FOLHA DE DADOS - MTC161						
Sistema	Componente	Componente	Vida Útil (h)	Custo Comp. (R\$)	MTTRp (h)	MTTRc (h)
GIIndro	Inspeção revestimento	1	2160	500	6	10
GIIndro	Revestimento Cabeceira de entrada	2	12960	65.000	36	42
GIIndro	Revestimento GIIndro camara 01	3	25920	378.000	72	85
GIIndro	Revestimento Diafragma camara 01	4	17280	40.000	36	42
GIIndro	Revestimento GIIndro camara 02	5	30240	180.000	72	85
GIIndro	Revestimento Diafragma camara 02	6	21600	40.000	36	42
GIIndro	Revestimento Cabeceira de saída	7	17280	45.000	36	42
Motorização	Rolamento mancais pinhão	8	129600	23.000	72	80
Motorização	Acoplamento saída redutor	9	103680	78.000	120	140
Motorização	Revisão motor	10	43200	15.000	24	30
Motorização	Acoplamento entrada redutor	11	34560	13.000	24	30
Sistema de lubrificação	Óleo redutor	12	7000	10.000	12	14
Sistema de lubrificação	Filtros redutor	13	3500	1.500	3	4
Sistema de lubrificação	Óleo mancais	14	3500	2.000	4	5
Sistema de lubrificação	Filtros mancais	15	3500	2.300	2	3
GIIndro	Giro rolamentos	17	14000	10.000	24	30
Sistema elétrico	Banco de capacitores dos drive	16	103680	25.914	36	45
Sistema elétrico	Placa de controle dos drives	18	77760	15.600	8	12
Sistema elétrico	Placa de corrente dos drives	19	77760	4.500	8	12
Sistema elétrico	Sistema de ventilação	20	25920	9.900	4	6

Tabela 4: Folha de dados do moinho contínuo para simulação com OtimizaMP.

As demais variáveis de entrada, como *CHC* (Custo da hora cessante) e *BF* (*Buffer*), foram definidas conforme processo da empresa Portobello S.A, onde o moinho está operando.

Neste processo, este equipamento possui um *CHC* de R\$14.000,00/hora; e um *BF* igual a 12 horas. Há uma armazenagem (pulmão) entre o processo de fabricação de pó cerâmico e o processo de prensagem. Assim a parada do processo cerâmico, com impacto financeiro, ocorrerá somente depois de 12 horas de parada do moinho, devido à existência do *BF*.

### 5.2.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Na Figura 54 é possível observar a função vida útil *versus* custos, para cada componente definido na Tabela 4. Essas estão modeladas por uma série de Fourier tipo dente de serra. Conforme identificado na Figura 54, as funções dos componentes 3 e 5 da Tabela 4 representam seu custo e vida útil, respectivamente, componente 3 lê-se no eixo “y” quando “x = 0” R\$378.000,00 que é o custo do componente 3 novo. Já quando se tem “x = 25.920”, o valor de “y” passa a ser zero, que representa o custo do componente quando esse atinge 100% de sua vida útil. Esse Gráfico ajuda o gestor de manutenção a obter uma sensibilidade da criticidade dos sistemas no processo, auxiliando nas tomadas de decisão, além de possibilitar os cálculos seguintes para o programa.

Ainda na mesma Figura 54, é possível observar que o eixo “x” do Gráfico possui um valor máximo de 150.000 horas, que representa a variável de entrada *Vus* (vida útil de avaliação do sistema).

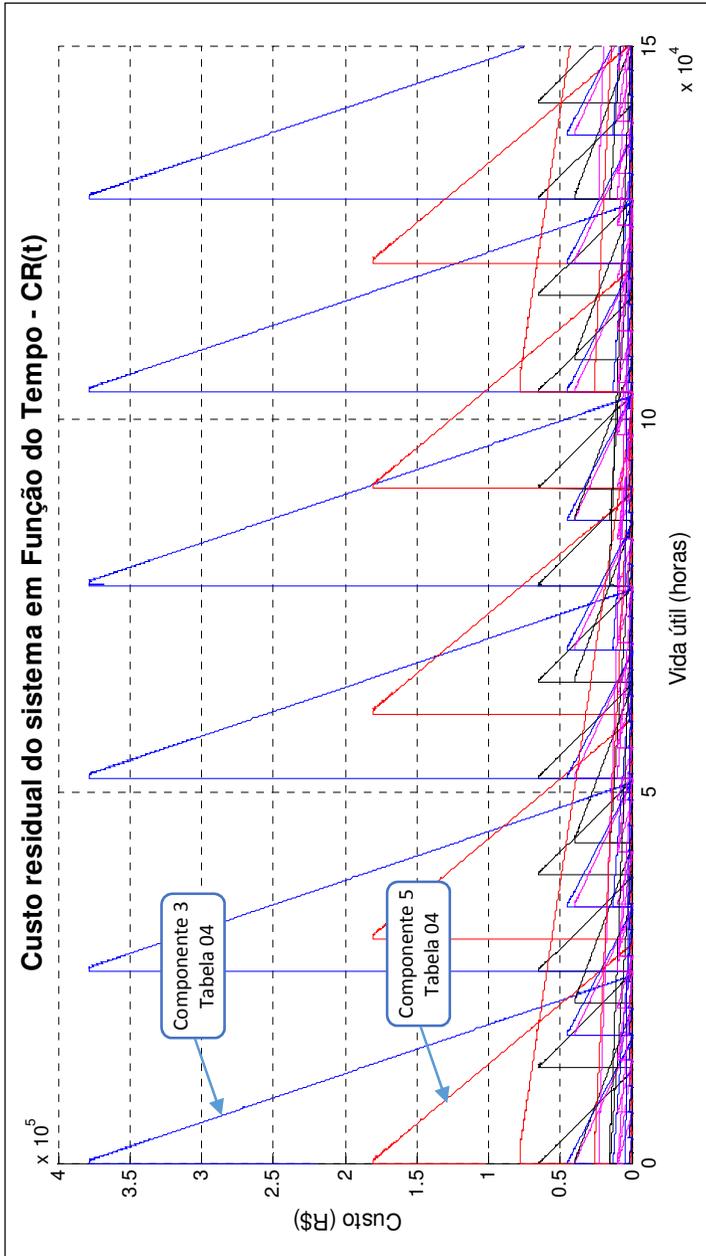


Figura 54: Custo da vida útil em função do tempo.

Na Figura 55 pode-se observar as funções  $CRt(t)$  (Custo residual total em função do tempo) e  $C_{MP}(t)$  (Custo da MP em função do tempo). Na função em “vermelho” que representa  $CRt(t)$ , é possível observar que, para “ $x = 0$ ”, tem-se o custo residual igual a R\$959.214,00, que é exatamente o valor da soma do custo de todos os componentes da Tabela 4. Isso seria o mesmo que substituir todos os componentes no início de sua vida útil, que não faria nenhum sentido na gestão da manutenção. Já para “ $x = 51.800$ ”, tem-se o menor custo residual, com valor de R\$166.000,00 e o  $C_{MP}(t)$  no valor de R\$2.600.00,00.

Também pode-se observar que não existe nenhum instante que a função  $CRt(t)$  seja “zero”, isso representa que o custo residual é inevitável nesta situação.

No Gráfico 2, da mesma Figura 55, pode-se observar as linhas verticais em vermelho, que representam as possíveis periodicidades para a MP. Cada linha em vermelho que toca a função da linha em “azul”  $C_{MP}(t)$  representa uma possível execução de manutenção preventiva para uma dada periodicidade.

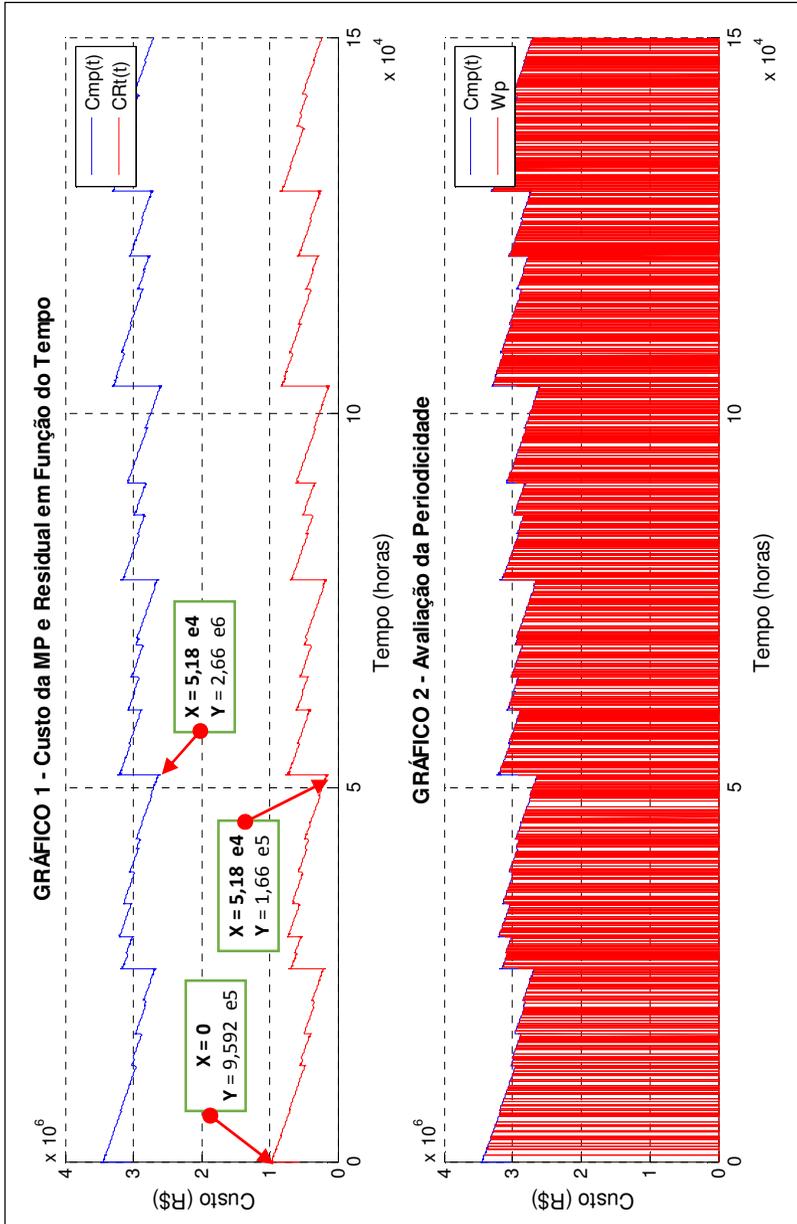


Figura 55: Custo da MP em função do tempo e Avaliação da periodicidade.

A Figura 56, no Gráfico 1, demonstra o custo residual do sistema em função da periodicidade. É possível observar que quanto menor a periodicidade maior serão os custos residuais (devido a trocas prematuras de componentes). Observa-se que a variação deste custo é bastante significativa. Por exemplo, na periodicidade 20,25 meses, é possível observar o custo residual de R\$4.672.000,00 para uma vida de 208 meses. É importante lembrar que no Gráfico 1 da Figura 55, o  $CRt(t)$  é em função do tempo; aqui, o  $CRt(w)$  é em função da periodicidade, conforme apresentado no passo 5 da seção 4.3.

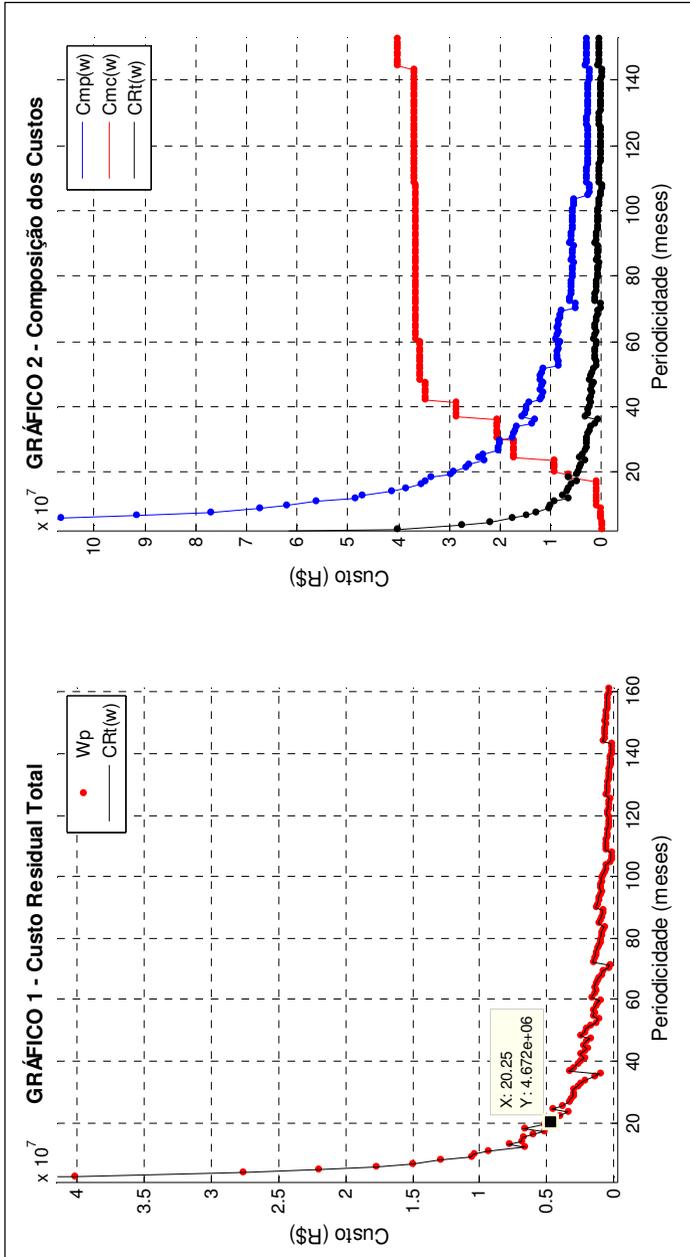


Figura 56: Custo residual e composição do custo da MP.

No Gráfico 2, da Figura 56, têm-se as funções:  $C_{MP}(w)$  (Custo da MP em função da periodicidade) e  $C_{MC}(w)$  (Custo da MC em função da periodicidade). Observa-se para essa simulação que o custo de corretiva é mais representativo na faixa de variação da periodicidade entre 20 e 40 meses. Com esse Gráfico, o gestor de manutenção consegue saber o efeito dos custos da MP, MC e o custo residual em relação à periodicidade. Essas informações podem ser utilizadas na tomada de decisão durante o planejamento das manutenções.

O Gráfico 1, da Figura 57, representa a função  $CMVu$  (Custo de manutenção para a vida útil avaliada), com a periodicidade otimizada, indicada no ponto vermelho, neste caso 23,4 meses. Esta indicação recomenda executar uma manutenção preventiva com a substituição de todos os componentes da Tabela 4 a cada 23,4 meses. Essa tomada de decisão, sob este ponto de vista, gera o menor impacto financeiro neste processo com essa condição.

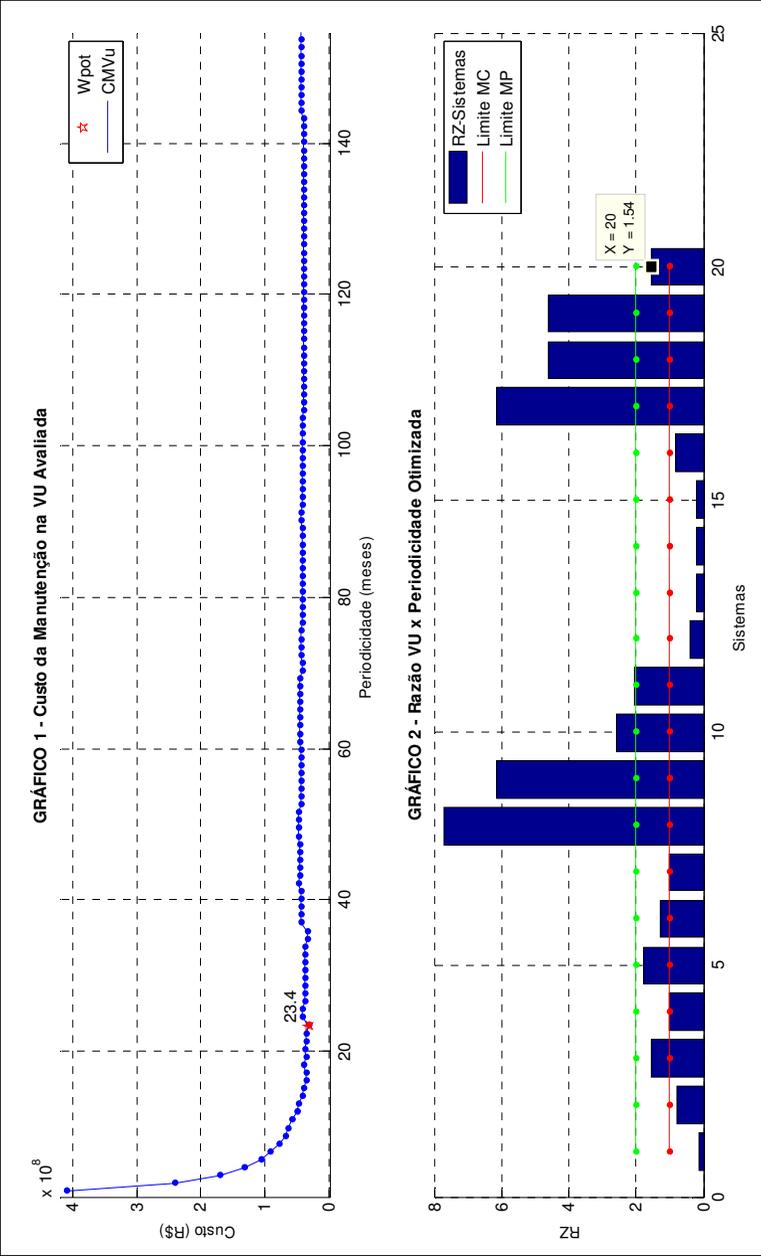


Figura 57: CMVu com periodicidade otimizada e Razão VU dos sistemas.

Ainda no Gráfico 1, da Figura 57, observa-se que a função, após o ponto otimizado (23,4 meses), tende a uma reta horizontal, que representa pouca variação do custo de manutenção após esse ponto. Uma interpretação pouco aprofundada dessa constatação pode resultar na seguinte conclusão: “Como o custo varia muito pouco após o ponto otimizado, a aplicação de MP se torna pouco representativa.” Porém, não é bem isso que ocorre. Quando se aprofunda com maior detalhe os valores dessa função, observa-se que, apesar de discreta, existe um aumento do custo. Nas avaliações dos resultados mais à frente, esse ponto será explicado com maiores detalhes.

Ainda na Figura 57, no Gráfico 2, apresenta-se um resumo do escopo, identificando quais sistemas podem ser intercalados para a periodicidade otimizada. É possível observar que os componentes: 8, 9, 10, 11, 17, 18 e 19 possuem RZ superior a 2. Conforme apresentado na seção 4.4.3, isso significa que esses componentes podem ser intercalados entre as preventivas; ou seja, não serão substituídos em todas as preventivas. Dessa forma, o custo prematuro não será superior a 50%. Na sequência, o sistema configura vários escopos intercalando a troca de cada componente conforme seu RZ.

Na Figura 58, é possível observar sete tipos de escopo; para cada escopo, um conjunto de componentes é selecionado para ser substituído de acordo com seu RZ. Por exemplo, no escopo MP1, não é contemplada a substituição do componente 18, uma vez que esse componente possui  $4 < RZ < 5$ ; logo, ele será substituído a cada quatro preventivas. Observe-se que no escopo MP4 ele já foi contemplado. Já no escopo MP3, foram selecionados os componentes, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 14, 15, 16 e 20. Isso significa que na terceira manutenção preventiva esses componentes serão substituídos.

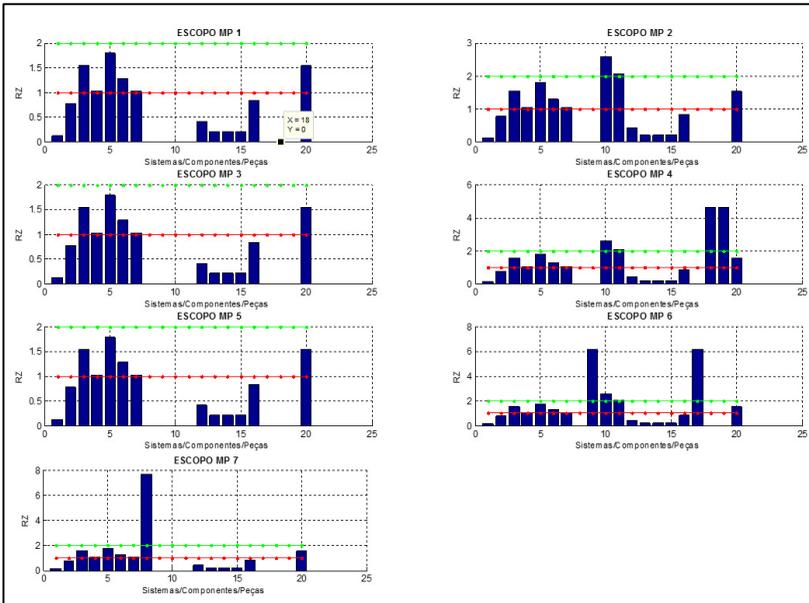


Figura 58: Intercalação do escopo para simulação Moinho MTC161.

Na Figura 59, é apresentado um relatório com dois conjuntos de informações gerenciais da manutenção: 1) características da MP; 2) resumo dos custos. Essas informações são úteis como auxílio do gestor no planejamento da manutenção.

**1) Características da MP:** O tempo de avaliação do sistema foi de 208,3 meses. Nesse período, a periodicidade otimizada foi de 23,4 meses, resultando em oito paradas de MP ao longo dos 208,3 meses.

**2) Resumo dos custos:** O custo total de materiais foi de R\$959.214,00, lembrando que o sistema considera como custo de material a soma do valor de todos os componentes apresentados na Tabela 4. Considera, pois, que todos os componentes serão substituídos em cada evento MP. Logo, essa seria a pior condição prática, pois se sabe que, devido à intercalação, nem todos serão substituídos, obtendo-se um custo com materiais menor, conforme pode ser observado no Gráfico 1 da Figura 60.

O percentual do custo residual por MP está relacionado com o valor do custo residual em relação ao custo de materiais, apresentado anteriormente. Neste caso, o custo residual (decorrente da troca prematura) foi de R\$430.077,00, o que representou 44,84% do custo com

materiais. Essa informação mostra ao gestor uma oportunidade de ganho na manutenção: Ora, se a troca prematura significa 44,84% de gasto, pode-se estudar projetos nos equipamentos para alterar a vida útil dos seus componentes (melhorar durabilidade), de forma que um rearranjo deles proporcione um custo residual menor.

===== APRESENTAÇÃO RESULTADOS =====	
* A VIDA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA FOI DE _____	: 208.3 MESES
* A PERIODICIDADE ÓTIMA PARA O SISTEMA AVALIADO É DE _____	: 23.4 MESES
* O TEMPO DE CADA PARADA PREVENTIVA É DE _____	: 108.0 HORAS
* O NÚMERO TOTAL DE PARADAS PREVENTIVA PARA VIDA AVALIADA É DE _____	: 8.0
===== APRESENTAÇÃO CUSTOS =====	
* O CUSTO DA HORA CESSANTE DO PROCESSO É DE _____	: R\$ 14000.00
* O CUSTO COM MATERIAIS PARA CADA PREVENTIVA É DE _____	: R\$ 959214.00
* O PERCENTUAL DO CUSTO RESIDUAL x MATERIAIS DE MP É DE _____	: 44.84
* O CUSTO RESIDUAL PARA CADA PREVENTIVA É DE _____	: R\$ 430077.42
* O CUSTO DO TEMPO DE PARADA DO PROCESSO X PM _____	: R\$ 1512000.00
* O CUSTO DE CADA MANUTENÇÃO PREVENTIVA É DE _____	: R\$ 2901291.42
* O CUSTO MÉDIO COM MATERIAIS DE CORRETIVA MÊS É DE _____	: R\$ 6513.78
* O CUSTO DE PARADA POR CORRETIVA MÊS É DE _____	: R\$ 39173.33
* O CUSTO MÉDIO TOTAL DE CORRETIVA MÊS É DE _____	: R\$ 45687.11

Figura 59: Relatório da simulação para Moinho MTC161.

Ainda na Figura 59, o custo do tempo de parada foi de R\$1.512.000,00 para cada evento de MP; esse custo é o resultado do *CHC* multiplicado pelo máximo  $MTTR_p$ . Para um total de R\$2.901.291,00 para cada MP, 52,1% desse custo da MP está relacionado com parada de processo. Logo, pode-se concluir que trabalhos relacionados à redução do  $MTTR_p$  são bastante relevantes. Com essa avaliação, o gestor de manutenção pode focar na manutenibilidade do processo, como atividades de produtividade de MO, ferramentais que proporcionam maior agilidade na execução dos serviços, planejamento detalhado dos serviços, pré-montagem antecipadas de conjuntos. Todas essas opções serão importantes para redução dos custos de manutenção.

Outros detalhes de custo com materiais e paradas são apresentados em relação à MC; essas informações auxiliam o gestor a prever a disponibilidade do processo e dimensionar o orçamento de MC.

De acordo com o Gráfico 2 da Figura 57, os componentes: 1, 2, 12, 13, 14, 15 e 16 possuem “RZ” menor que 1. Conforme apresentado na seção 4.4.3, isso significa que os mesmos sofrerão manutenção corretiva, apesar de serem substituídos preventivamente em cada manutenção

preventiva. O relatório da Figura 59 mostra o custo médio com manutenção corretiva mês, de R\$45.687,11, sendo R\$6.513,78 com materiais e R\$39.173,33 com paradas, proveniente da falha desses componentes.

Após a otimização da periodicidade, ainda é possível evitar alguma das trocas prematuras, por meio da intercalação dos escopos, Figura 58. A redução dos custos com paradas e trocas prematuras, resultante da intercalação dos escopos, contribui ainda mais para a otimização dos resultados. As reduções podem ser observadas na Figura 60.

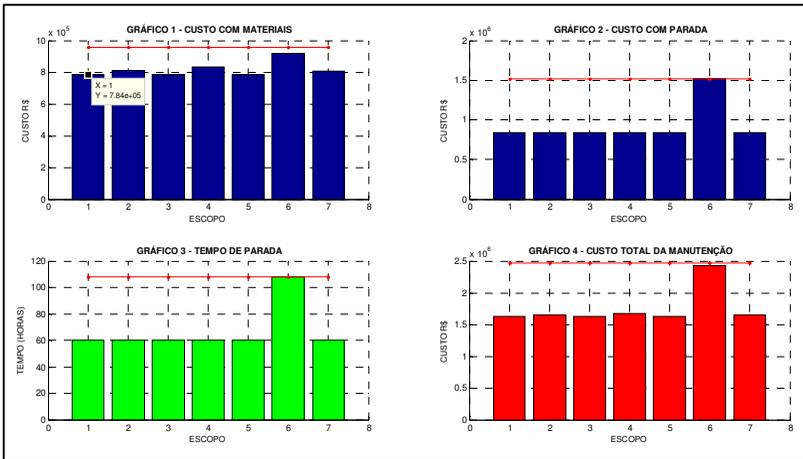


Figura 60: Redução do custo e tempo com a intercalação do escopo.

No Gráfico 1, da Figura 60, é possível observar a redução do custo com materiais provenientes da intercalação de cada escopo. A linha em “vermelho” representa o custo, caso todos os componentes fossem substituídos, sem a intercalação dos escopos, o que somaria, neste caso, R\$959.214,00. Pode-se observar que nos escopos 1, 3 e 5 ocorre a maior redução: do valor de R\$959.214,00 para 784.000,00. Já no escopo 6, ocorre a menor redução, haja vista que a maior parte dos componentes de mais alto custo é trocada neste escopo, MP6. No Gráfico 2 e 3, têm-se o custo e o tempo com paradas. Observe-se que, no escopo 6, o custo e o tempo com paradas seriam os mesmos, caso fossem substituídos todos os componentes sem a intercalação. Isso ocorre porque o sistema 9 foi substituído no escopo 6. Esse, por sua vez, possui o maior  $MTTR_p$  do equipamento (ver Tabela 4). Por essa razão, não temos redução dessas variáveis do escopo 6 na intercalação.

## 5.2.4 AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO

As Figuras 54, 55 e 56 trazem informações em relação ao cálculo do custo residual, vida útil e simulação das possíveis periodicidades; conforme apresentado na seção 4.4.

O Gráfico 1, da Figura 57, mostra a curva do custo de manutenção em função da periodicidade  $CMVu$ , onde a periodicidade ótima para esse equipamento é de 23,4 meses. Observa-se que existe uma variação bastante discreta na região em que se encontra a periodicidade ótima. Após a periodicidade de 20 meses, a função tende a uma reta de pouca inclinação, conforme Figura 61.

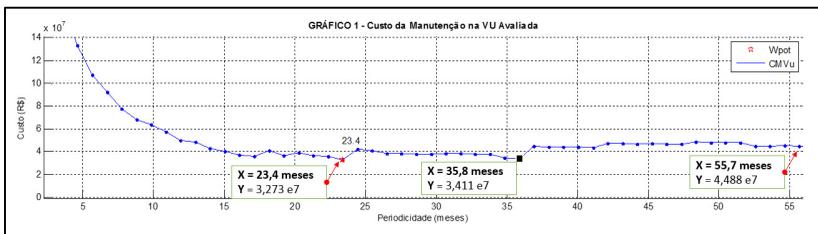


Figura 61: Detalhe do Gráfico 1 da Figura 57.

Essa variação pouco significativa ocorre porque a inclinação da função do custo da MC, " $C_{MC}$ ", é inversamente similar à inclinação da função do custo da MP, " $C_{MP}$ ", conforme apresentado na Figura 62, que representa uma ampliação do Gráfico 2 da Figura 56.

Dada a pouca inclinação da função, após a periodicidade ótima observa-se que a manutenção preventiva é pouco vantajosa para esse equipamento, quando observado no Gráfico 1 da Figura 57.

Para a tomada de decisão no planejamento da manutenção, faz-se necessário saber qual a estratégia mais econômica: efetuar a preventiva e com que periodicidade, efetuar MC ou, ainda, um misto das opções anteriores. Na Figura 61 foram identificado três pontos de periodicidades diante dos respectivos custos:

- 1) Ponto otimizado, periodicidade 23,4 meses, custo de manutenção acumulado na  $Vus$  igual a R\$32.730.000,00.
- 2) Periodicidade 35,8 meses, custo de manutenção acumulado na  $Vus$  igual a R\$34.110.000,00.
- 3) Periodicidade 55,7 meses, custo de manutenção acumulado na  $Vus$  igual a R\$44.880.000,00.

Observa-se, entre a opção 1 e 2, de fazer preventiva com 23,3 meses em vez de 35,8 meses, uma redução do custo de manutenção de aproximadamente 5%. Já, entre a opção 1 e 3, de fazê-la com 23,3 meses em vez de 55,6 meses, quando haveria a MC na maioria dos componentes, a redução é de aproximadamente 28%. Cabe ao gestor avaliar qual a sua estratégia. Apesar de a opção do ponto 1, em relação ao 2, mostrar pouca relevância da preventiva para o sistema simulado, a redução de 5% não deixa de ser uma decisão mais econômica.

A discreta inclinação da função custo (Figura 61) após a otimização indica que as reduções com o custo de manutenção, embora existam, não serão muito acentuadas, para este caso. Contudo, para outros casos, essa inclinação poderá ser significativa, indicando que a manutenção preventiva é muito relevante para esse sistema. Na sequência (seção 5.3) vê-se outra simulação onde essa inclinação é mais relevante.

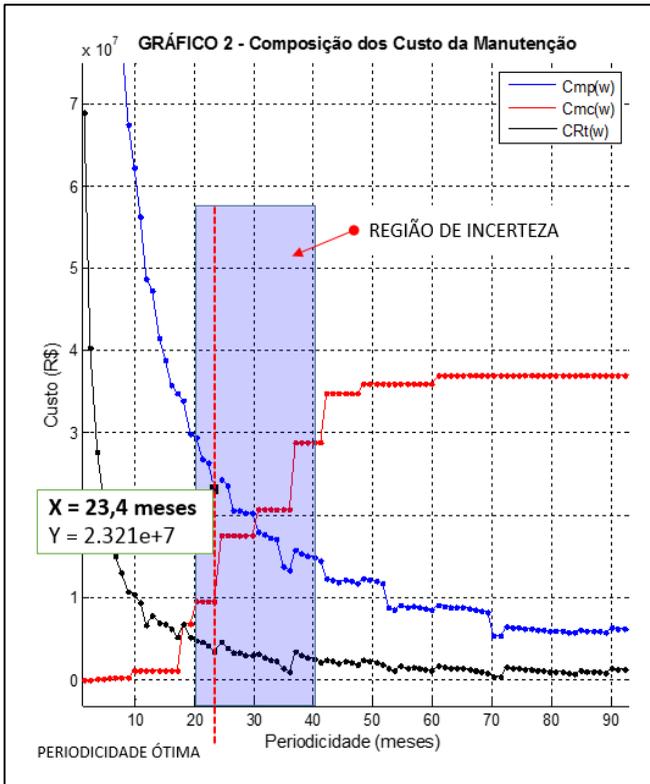


Figura 62: Detalhe do Gráfico 2 da Figura 56.

Outra observação que pode ser feita nesta simulação é referente à faixa de periodicidade compreendida entre 20 meses e 40 meses. Nesta faixa encontra-se a região de incerteza da periodicidade, parte sombreada da Figura 62. É necessário realizar o cálculo de otimização (executado pelo OtimizaMP) para definir a periodicidade adequada, haja vista a variação significativa do custo de preventiva e corretiva.

A região com periodicidades inferiores a 20 meses é a região inviável para aplicação de manutenção preventiva devido ao elevado custo residual e preventivo provocado por trocas prematuras e pelo elevado tempo de paradas planejadas no processo. Já na região superior a 40 meses, torna-se uma periodicidade inviável para execução da manutenção preventiva, apesar do custo residual ser bastante baixo e termos um melhor aproveitamento da possível vida útil dos componentes. Neste caso, haveria necessidade de corretiva na maioria dos componentes elevando o custo de manutenção devido ao tempo de parada não planejado e à baixa confiabilidade do processo.

Esse resultado soluciona o problema descrito na seção 3.1, Figura 21 relacionado a um dos objetivos do trabalho. O citado problema mostra três regiões de periodicidade: 1) região de periodicidades reduzidas que garante a confiabilidade, porém existe elevado custo residual dos componentes e elevado tempo de paradas planejadas; 2) região de incerteza, onde existe uma faixa de periodicidade mais econômica, mas não se conhece o valor ótimo; e 3) região que possui baixo custo com manutenção preventiva, porém elevados custos no processo devido à alta indisponibilidade dos sistemas.

Com o OtimizaMP, é possível apresentar ao gestor, de forma explícita, o ponto ótimo da periodicidade e as três regiões do comportamento do custo em relação à periodicidade.

### **5.3 SIMULAÇÃO: PROCESSO DE QUEIMA**

O processo de queima da indústria cerâmica é a parte do processo de fabricação dos revestimentos cerâmicos onde ocorre a queima da cerâmica a partir do processo de esmaltação. No início do processo de queima, tem-se a cerâmica crua (pó cerâmico compactado), com a umidade corrigida entre 1 a 2% e decoração (aplicação do esmalte). O forno é o principal equipamento deste processo. Dependendo do tipo de revestimento cerâmico a ser produzido, as curvas de queima dos fornos podem atingir valores de até 1.250 °C, com ciclo de queima variando de

30 a 60 minutos. Os fornos de alta produção possuem dimensões úteis de aproximadas de 4 m x 250 m, com capacidade produtiva de até 1.250 m<sup>2</sup>/h.

O processo de queima que será simulado é constituído de seis equipamentos: *Roller*, Máquina de carga, Forno, Máquina de descarga, Linha de descarga, Ventosa. Cada equipamento possui uma determinada função no processo, conforme segue:

*Roller*: equipamento similar a um empilhador. Possui a função de retirar a cerâmica crua dos carros de armazenamento e organizar em planos posicionados na entrada da máquina de carga.

Máquina de carga: equipamento responsável em transportar e alinhar a cerâmica na entrada do forno.

Forno: efetua a queima controlada na cerâmica crua para proporcionar resistência mecânica.

Máquina de descarga: executa o alinhamento das peças na saída do forno e agrupa os materiais em fila para linha de descarga.

Linha de descarga: transporta as cerâmicas até a ventosa e efetua medições de tamanho, empeno, espessura e ensaios de resistência mecânica ao longo do equipamento.

Ventosa: agrupa as cerâmicas em planos e empilha em *pallets*.

Para simulação deste processo, será aplicada a mesma metodologia apresentada na seção 5.1.

### 5.3.1 MAPEAMENTO DO PROCESSO

O processo será dividido em equipamentos e agrupado em um RBD, em série, de acordo com a Figura 63. Depois disso cada equipamento será dividido em sistemas e componentes, conforme será apresentado na Tabela 5.

As demais variáveis de entrada, como *CHC* (Custo da hora cessante) e *BF* (*Buffer*), são definidas conforme processo da empresa Portobello S.A.

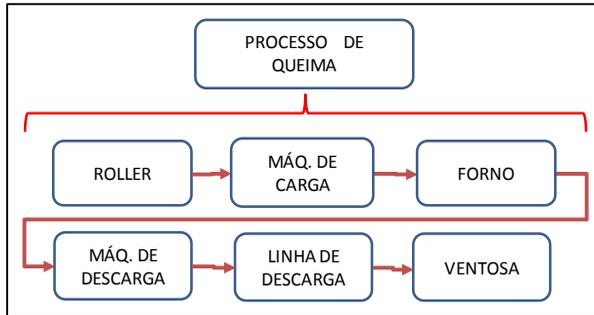


Figura 63: RBD processo de queima.

Para essa simulação, o *CHC* (custo da hora cessante) é de R\$14.000,00 e o *BF* (*Buffer*) é “zero”. Ou seja, toda parada no processo implica perda financeira.

### 5.3.2 ESTUDO DA VIDA ÚTIL

Cada equipamento foi dividido em sistemas e componentes. A vida útil média de cada componente foi estimada por meio do histórico de falhas da base de dados do CMMS, Portobello S.A.

A divisão de sistemas e componentes resultou em 49 componentes. Esses e as demais variáveis *MTTR*, bem como o custo de cada componente podem ser visualizados na Tabela 5.

Considerando-se que a maior vida útil entre os componentes é de 34.560 horas, definiu-se a *VUs* (vida útil de avaliação) no valor de 50.000 horas, que representa 69,4 meses.

PROCESSO DE QUEIMA - PCL							
Equipamento	Sistemas	Componentes	Componente	Vida Útil (h)	Custo Comp.	MTRRp	MTRC
Roller de Carga	Mesa móvel	Bancal de rolos	1	10368	4000	1	1,5
Roller de Carga	Mesa móvel	Correia/guias	2	4320	700	2	3
Roller de Carga	Mesa móvel	Polias/semi eixo	3	17280	1000	1,5	2
Roller de Carga	Mesa móvel	Motoredutor	4	25920	800	1	1,5
Roller de Carga	Mesa móvel	Braço mandrine	5	12960	7000	2	3
Roller de Carga	Movimento vertical	Engrenagem/corrente	6	12960	1800	4	6
Roller de Carga	Movimento vertical	Rolamentos de apoio	7	17280	300	2	2,5
Roller de Carga	Movimento vertical	Mancal/rolamentos	8	21600	500	1	3
Roller de Carga	Movimento vertical	Motoredutor	9	25920	4500	2	3
Maq. Carga	Rolos	Bancal de rolos	10	8640	7000	1,5	3
Maq. Carga	Motorização	Correia/guias	11	6912	1200	2	3
Maq. Carga	Motorização	Polias/semi eixo	12	17280	450	3	4
Maq. Carga	Motorização	Motoredutor	13	25920	2200	1	2
Maq. Carga	Régua de alinhamento	hastes guias	14	8640	600	2	3
Maq. Carga	Régua de alinhamento	Cilindros pneumáticos	15	17280	1200	1	2
Forno	Traine	Motoredutor	16	11232	7000	1	2
Forno	Traine	Corrente	17	8640	2500	2	3
Forno	Traine	Engrenagens	18	21600	3800	3	5
Forno	Traine	Mancais/Rolamentos	19	17280	5000	2	4
Forno	Ventilação	Correias	20	12960	7800	1	2
Forno	Ventilação	Polias	21	34560	5800	2	3
Forno	Ventilação	Mancais/Rolamentos	22	25920	3700	1	3
Forno	Ventilação	Motor	23	34560	8000	1	3
Forno	Ventilação	Balanceamento rotor	24	17280	3000	1	2
Forno	Refratário	Substituição cortinas	25	17280	7000	5	8
Maq. Descarga	Rolos	Bancal de rolos	26	6912	7000	1,5	3
Maq. Descarga	Motorização	Correia/guias	27	4320	1200	2	3
Maq. Descarga	Motorização	Polias/semi eixo	28	12960	450	3	4
Maq. Descarga	Motorização	Motoredutor	29	17280	2200	1	2
Maq. Descarga	Régua de alinhamento	hastes guias	30	6912	600	2	3
Maq. Descarga	Régua de alinhamento	Cilindros pneumáticos	31	12960	1200	1	2
Linha Descarga	Motorização	Motoredutor	32	17280	3400	2	3
Linha Descarga	Transmissão	Correias	33	4320	4500	2	4
Linha Descarga	Transmissão	Guias das correias	34	2592	1000	1,5	2
Linha Descarga	Transmissão	Polias	35	6048	1600	1,5	3
Linha Descarga	Transmissão	Eixo/mancal/Rolamentos	36	8640	1300	1	2
Ventosa	Bancal de rolos	Rolos	37	6912	3000	1	1,5
Ventosa	Bancal de rolos	Correia/guias	38	4320	600	2	3
Ventosa	Bancal de rolos	Polias/semi eixo	39	8640	800	1,5	2
Ventosa	Bancal de rolos	Motoredutor	40	17280	1500	1	2
Ventosa	Régua de alinhamento	Régua	41	8640	200	1	1,3
Ventosa	Régua de alinhamento	Cilindros pneumáticos	42	17280	1200	0,5	1
Ventosa	Régua de alinhamento	hastes guias	43	17280	600	1	2
Ventosa	Mov. Vertical	Roldanas guias	44	8640	1400	1	2
Ventosa	Mov. Vertical	Engrenagem/corrente	45	12960	1800	2	3
Ventosa	Mov. Vertical	Motoredutor	46	17280	2100	1,5	2
Ventosa	Mov. Horizontal	Roldanas guias	47	6912	1400	1	2
Ventosa	Mov. Horizontal	Engrenagem/corrente	48	8640	1800	2	3
Ventosa	Mov. Horizontal	Motoredutor	49	17280	2100	1,5	2

Tabela 5: Folha de dados do processo de queima para simulação com OtimizaMP.

### 5.3.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

De acordo com a Tabela 5, a simulação do processo de queima possui 49 componentes. Por isso, dada a grande quantidade de funções, a Figura 64, que representa as funções da vida útil de cada componente, fica pouco legível. Nos pontos 1, 2 e 3 identificados na Figura 64 é possível observar as funções de três componentes da Tabela 5:

- 1) Componente 20: Correias do ventilador do forno, CC 7.800, VU 12960 h.
- 2) Componente 23: Motor do ventilador do forno, CC 8.000, VU 34560 h.
- 3) Componente 21: Polias do ventilador do forno, CC 5.800, VU 34560 h.

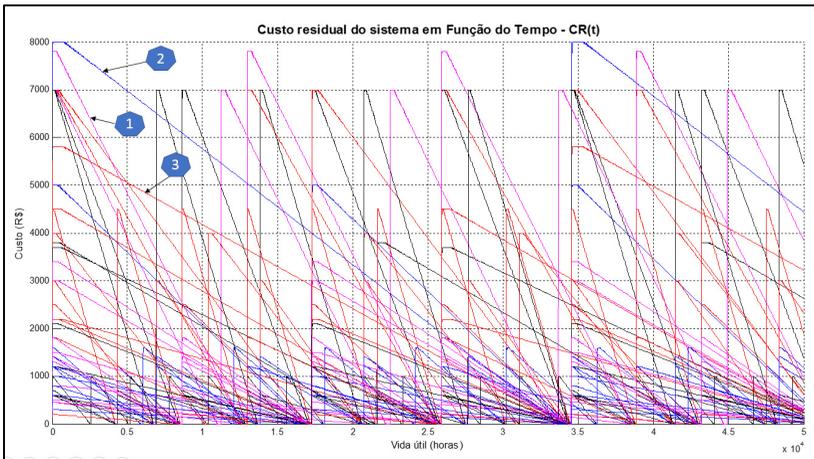


Figura 64: Custo da vida útil em função do tempo, processo de queima.

No Gráfico 1, da Figura 65, a função da linha “vermelha” mostra o custo residual total, que é a soma de todas as funções da Figura 64. Observa-se que o  $CR_t$  varia de R\$23.060,00 até R\$134.900,00. Assim, dependendo da periodicidade escolhida para execução da MP, o custo residual oscilará dentro dessa faixa.

No Gráfico 2, também da Figura 65, estão registradas as possíveis periodicidade para essa simulação.

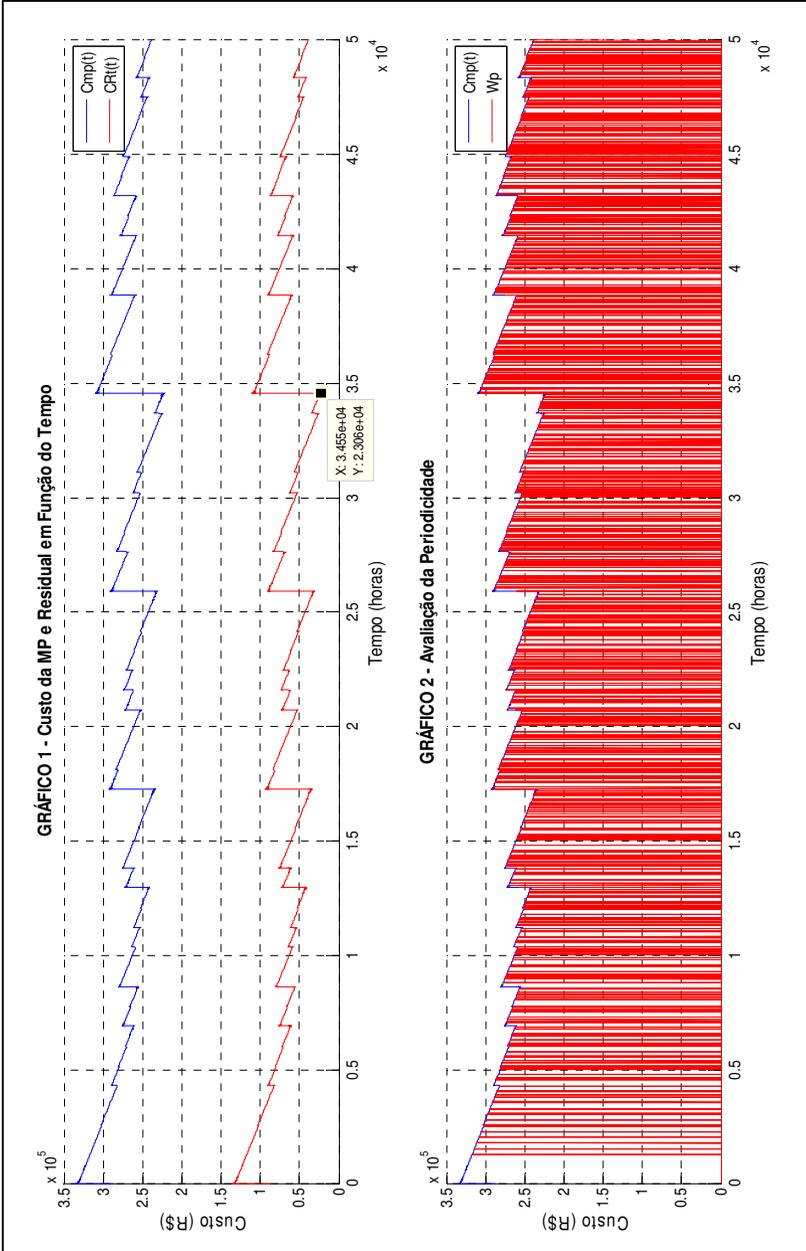


Figura 65: Custo da MP e Avaliação da periodicidade, processo de queima.

No Gráfico 1, da Figura 66, vê-se o custo residual em função da periodicidade, o ponto identificado no Gráfico, de 4,23 meses. O custo residual é de R\$1.064.000,00 para uma *VUs* (Vida útil de avaliação) de 69,4 meses.

No contexto da manutenção isso representa uma MP a cada 4,2 meses, em um ciclo de vida de 69 meses, resultando em 16 MPs, com custo residual de aproximadamente R\$66.500,00 para cada evento. Considerando que em cada MP haverá a substituição de todos componentes (soma-se a coluna do *CC* - Custo do componente) da Tabela 5, atinge-se um total de R\$129.800,00. Portanto, nessa situação, haveria um custo aproximado a 51,2% com troca prematura de materiais.

Avaliando apenas no aspecto do custo residual, essa periodicidade não seria vantajosa, dado que teríamos um custo elevado por troca prematura.

O Gráfico 2, ainda na Figura 66, retrata a composição dos custos de manutenção. Observa-se que, no intervalo da periodicidade de 5 a 20 meses, ocorre a maior variação do custo de corretiva  $C_{MC}$ , uma vez que a maioria dos componentes possui vida útil dentro dessa faixa. Logo, para cada periodicidade que ultrapasse a vida útil de um determinado componente, tem-se um evento de MC.

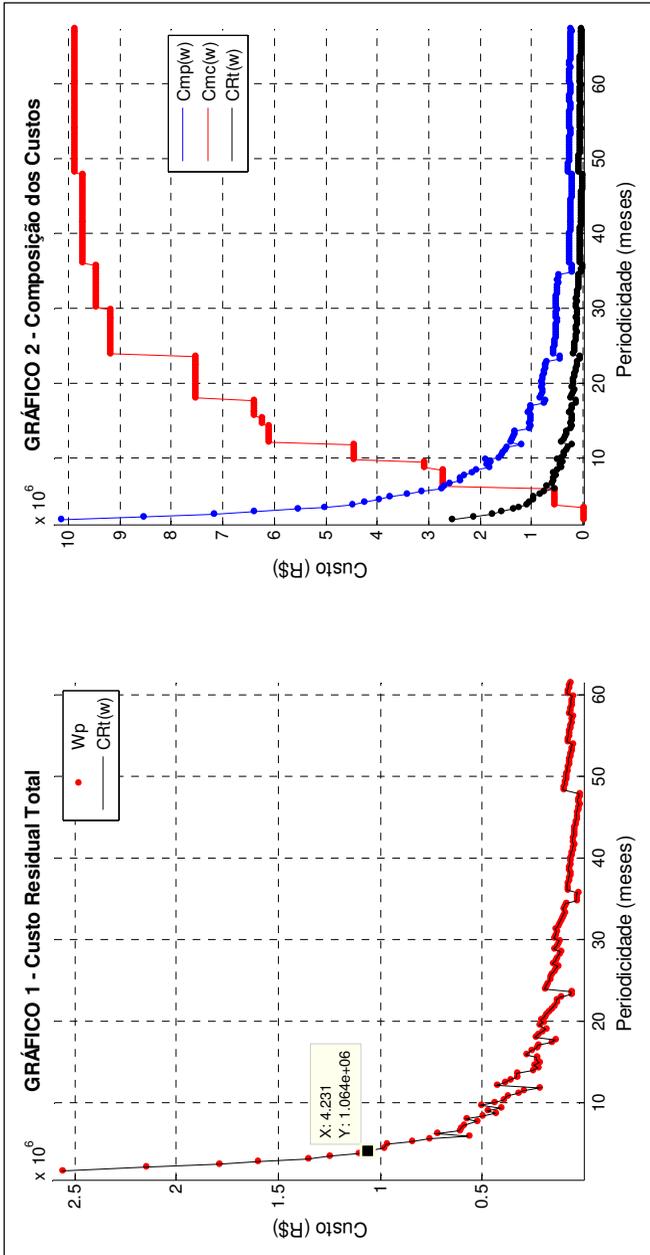


Figura 66: Custo residual e composição do custo da MP, processo de queima.

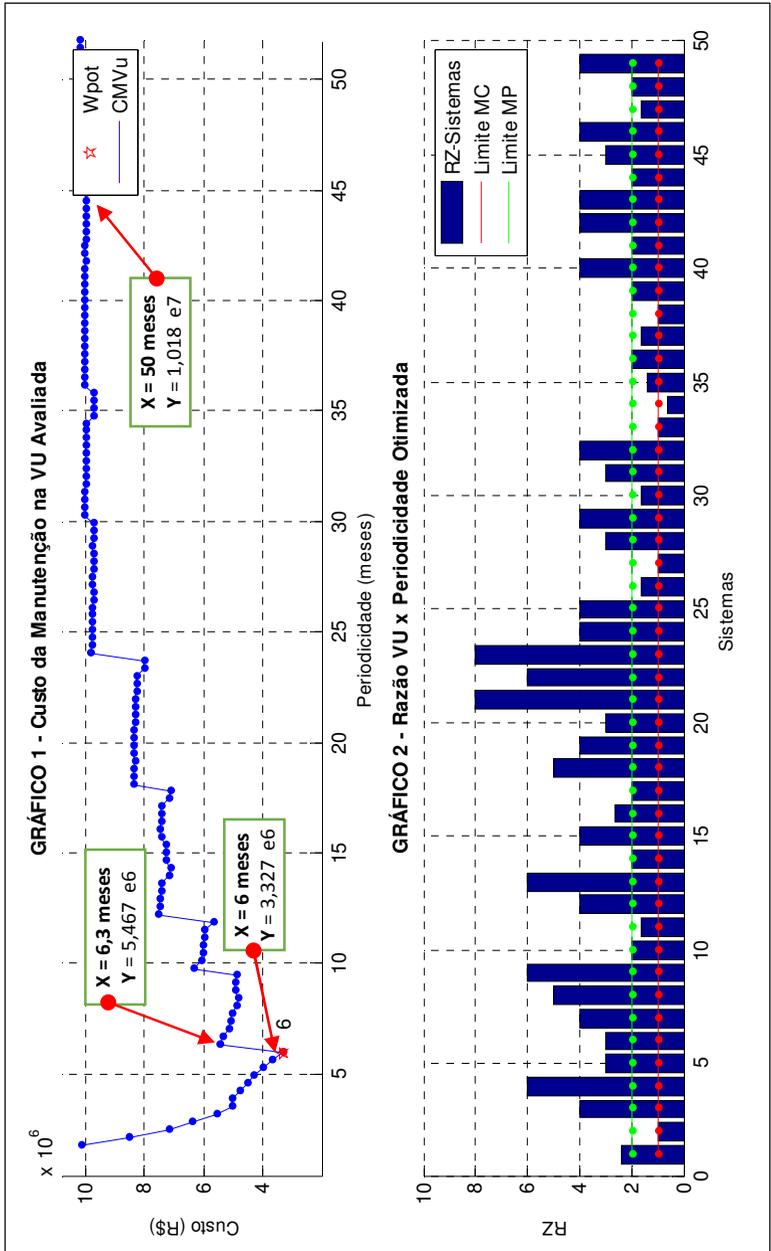


Figura 67: *CMVu*, periodicidade otimizada e Razão VU, processo de queima.

No Gráfico 1, da Figura 67, é demonstrada a função *CMVu* (Custo de manutenção para vida de avaliação). O ponto vermelho dessa função indica a periodicidade otimizada, que é de seis meses. Observa-se que a variação do custo de manutenção é bastante significativa para esse processo. Por exemplo, na periodicidade ótima, de seis meses, há um custo de manutenção de R\$3.327.000,00 para um ciclo de vida de 69,4 meses; todavia, quando a periodicidade é de 6,3 meses, esse custo aumenta para R\$5.467.000,00, um aumento de 67%.

A faixa de periodicidade que estabiliza a função *CMVu* ocorre a partir de 50 meses, quando o custo gira em torno de R\$10.180.000,00, uma variação de aproximadamente 305% em relação ao ponto ótimo, seis meses. Isso mostra o quanto a aplicação da estratégia de manutenção preventiva neste processo é lucrativa.

No Gráfico 2, da Figura 67, retrata-se a avaliação do RZ dos componentes. Observa-se que apenas o componente 34 (guia das correias/transmissão/linha de descarga – Tabela 5) possui  $RZ < 1$ , conforme apresentado na seção 4.4.3. Isso significa que esse componente terá MC; logo, os demais componentes todos serão substituídos através da MP. Já, os componentes 2, 11, 26, 27, 30, 33, 35, 37, 38 e 47, que possuem  $1 < RZ < 2$ , serão substituídos em todos os escopos de MP, isto é, serão substituídos nos 11 eventos de MP para o *VUs* de 69 meses. Os demais componentes também serão substituídos na MP, porém terão intercalação de escopo, uma vez que possuem  $RZ > 2$ .

Na Figura 68, é possível visualizar a intercalação dos oito diferentes escopos. Observa-se que os componentes que possuem  $1 < RZ < 2$ , conforme apresentados anteriormente, são os que se repetem em todos os oito escopos. Já, aqueles com  $RZ > 2$ , intercalam-se entre cada escopo, dependendo do valor do seu RZ. Por exemplo, o componente 21, que possui um  $RZ=8$ , é substituído apenas quando ocorrer a oitava MP. Por isso ele aparece apenas no escopo MP8, o que informa que o componente 21 será trocado a cada oito MP.

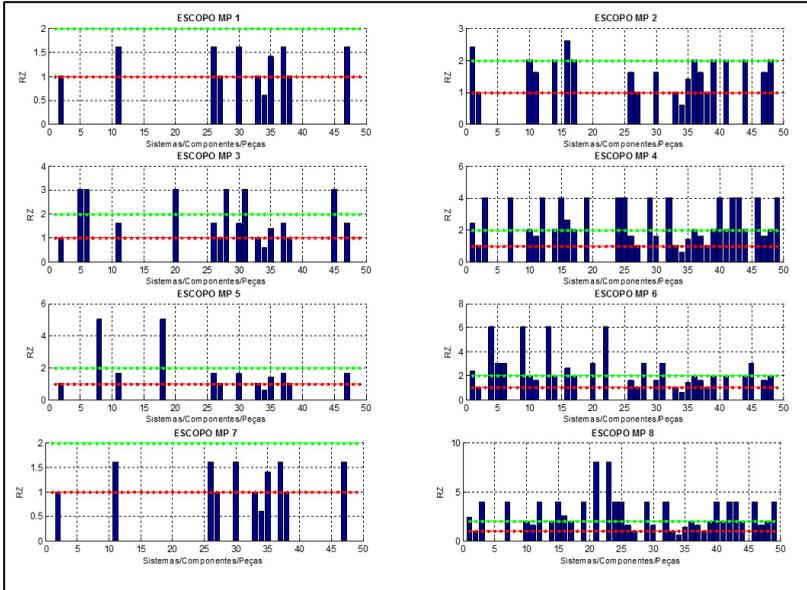


Figura 68: Intercalação do escopo para simulação do processo de queima

Essa intercalação é bastante importante para a redução dos custos de manutenção, pois evita custos com trocas prematuras.

Na Figura 69 é possível ver as reduções provocadas pela intercalação do escopo. No Gráfico 1, é possível observar a redução do custo com materiais de R\$129.800,00 para R\$22.800,00 no escopo 1. O Gráfico 4, por sua vez, demonstra uma redução representativa no custo da MP, de R\$199.800,00 para R\$50.800,00 no escopo 1.

Pode-se observar que, todos os oito escopos possuem redução significativa dos custos com MP reforçando a importância do escalonamento das preventivas neste processo.

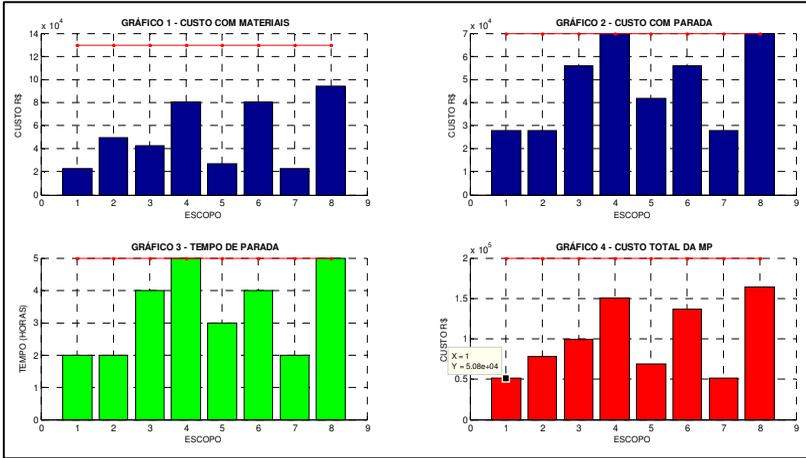


Figura 69: Redução do custo e tempo com a intercalação do escopo.

Na Figura 70, é possível observar um relatório com as principais informações da simulação, que irá auxiliar o gestor de manutenção na sua tomada de decisão.

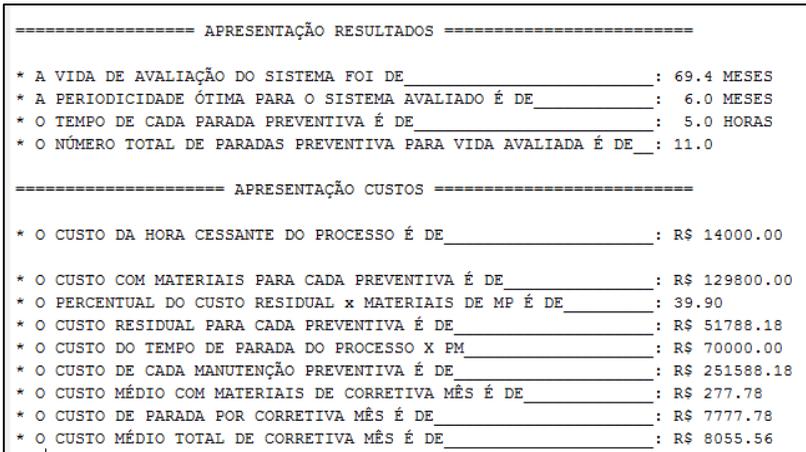


Figura 70: Relatório da simulação para processo de queima

### 5.3.1 AVALIAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A Figura 71 mostra um detalhamento do Gráfico 2 da Figura 66. Nesta figura aparecem três funções que compõem o “ $CMVu$ ” (custo de manutenção na vida útil de avaliação): “ $CRt$ ”, “ $CMP$ ” e “ $CMC$ ”.

Nessas funções, é possível fazer algumas observações importantes para a tomada de decisão, durante o planejamento da manutenção.

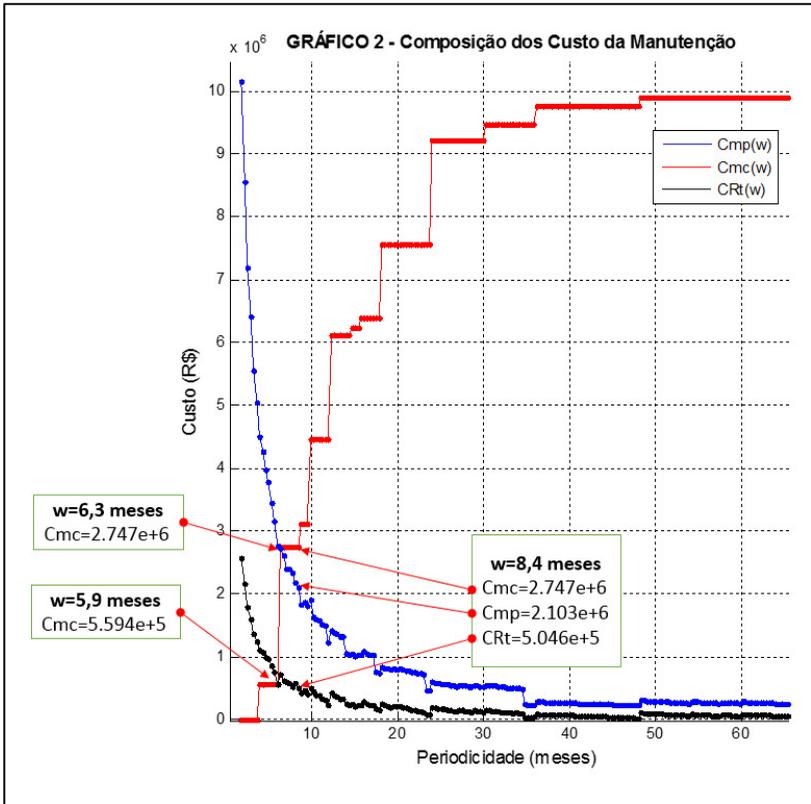


Figura 71: Avaliação das funções que compõem o custo de manutenção  $CMVu$

Observando-se as duas coordenadas da esquerda na figura, tem-se, para a função “ $C_{MC}$ ” (linha vermelha):

Coordenada 1) Periodicidade de 5,9 meses, com custo de manutenção corretiva de R\$559.400,00 para “ $VUs$ ” de 69 meses.

Coordenada 2) Periodicidade de 6,3 meses, com custo de manutenção corretiva de R\$2.747.000,00 para “VUs” de 69 meses.

Observa-se que uma pequena variação na periodicidade, de 0,4 meses, provocou ao custo com manutenção corretiva um salto de R\$559.400,00 para R\$2.747.000,00; um aumento de aproximadamente 491%. Qual a causa desse aumento acentuado?

Na Tabela 6, aparece um filtro da Tabela 5, que mostra somente os componentes com vida útil igual a 4.320 horas, equivalente a seis meses. Assim, quando a periodicidade da MP ultrapassa o valor de seis meses, esses componentes acabam sofrendo MC. Observando-se o custo total desses quatro componentes, que somam R\$7.000,00, o custo com MC não representa ser elevado. Porém, quando se avalia o tempo de parada provocado pelo tempo necessário para a execução da manutenção corretiva, *MTTRc*, verifica-se um total de 13 horas com MC.

PROCESSO DE QUEIMA - PCL							
Equipamento	Sistemas	Componentes	Componente	Vida Útil (h)	Custo Comp.	MTTRp	MTTRc
Roller de Carga	Mesa móvel	Correia/guias	2	4320	700	2	3
Maq. Descarga	Motorização	Correia/guias	27	4320	1200	2	3
Linha Descarga	Transmissão	Correias	33	4320	4500	2	4
Ventosa	Bancal de rolos	Correia/guias	38	4320	600	2	3
					7000		13

Tabela 6: Dados dos componentes com VU = 6 meses.

Isso representa várias ocorrências de corretiva ao longo da *VUs*, que neste caso é 69 meses. Portanto, durante 69 meses, haverá 11,5 eventos de corretiva, com custo de materiais de R\$7.000,00 e custo de parada de processo de ( $CHC \times MTTRc$ ) R\$182.000,00; um total de, R\$189.000,00 por evento corretivo. Considerando que serão 11,5 eventos ao longo da *VUs*, haverá um custo de R\$2.173.500,00, que é o acréscimo com MC devido a esses componentes.

Na avaliação, durante o planejamento da manutenção, é importante identificar esses componentes que provocam variações acentuadas no custo e na definição da periodicidade. Situações dessa natureza exigem estratégias da estrutura de manutenção, que proporcionem alternativas ao planejamento. Uma recomendação alinhada ao conceito RCM é elaborar projetos de melhorias para tais componentes, que proporcionem maior vida útil ou menor tempo de reparo. Dessa forma, não haverá oscilações tão acentuadas nos ajustes de periodicidade.

Ainda na Figura 71, a coordenada da direita mostra, para uma periodicidade de 8,4 meses,  $C_{MC} = R\$2.747.000,00$ ;  $C_{MP} =$

R\$2.103.000,00 e  $CRt = R\$504.600,00$ . Observa-se que, no intervalo entre periodicidade 6,3 e 8,4 meses, o “ $C_{MC}$ ” é constante, já  $C_{MP}$  e  $CRt$  sofrem uma redução. Por isso, é possível observar uma redução da função  $CMVu$ , neste mesmo intervalo. Ver Figura 72.

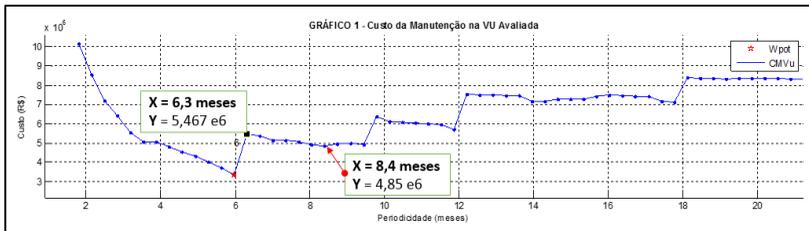


Figura 72: Detalhe Figura 67, redução da função  $CMVu$  no intervalo 6,3 a 8,4 meses.

Quando, no momento da tomada de decisão, for avaliada a manutenção, essas informações mostram que, em não havendo possibilidade de eventos corretivos, quanto maior for a periodicidade menor serão os custos de manutenção, haja vista a redução dos tempos de parada programada e o maior aproveitamento da vida útil dos componentes. Portanto, neste caso, durante o planejamento da manutenção convém ter em mente que quanto maior a periodicidade, menor serão os custos de manutenção ao longo do ciclo de vida.

O limite da máxima periodicidade que se pode dimensionar está no custo com eventos corretivos que podem ocorrer a uma determinada periodicidade.

## 5.4 AVALIAÇÃO DO TRABALHO

Além das simulações práticas apresentadas nas seções 5.2 e 5.3, como forma de avaliação do OtimizaMP e do presente trabalho, será apresentada uma simulação de um esquadrejador (equipamento do processo cerâmico) em dois cenários. Primeiro, na condição original do equipamento e, segundo, com um componente modificado a partir da identificação feita com o OtimizaMP e aplicação dos conceitos de RCM.

A folha de dados do equipamento utilizado para simulação pode ser vista na Tabela 7.

FOLHA DE DADOS - Esquadrejador						
Sistema	Componente	N. Sistema	Vida Útil (h)	Custo Comp. (R\$)	MTTRp (h)	MTTRc (h)
Transporte	Correia	1	2160	21974	2	5
Transporte	Polia sincronizada	2	8640	5061	4	8
Transporte	Polia guia	3	4320	1232	2	4
Transporte	Polia movida	4	4320	3498	2	5
Tração	Chapa de desgaste	5	1080	2581	2	6
Tração	Eixo encanelado	6	12960	5002	4	10
Tração	Bucha encanelada	7	7200	4216	7	11
Corte	Sanfonas	8	8640	19214	8	12
Corte	Roldanas régua	9	2160	16278	1	4
Corte	Mancais Desbaste	10	3600	7200	1	4
Corte	Mancais Pre-acabamento	11	5760	5400	1	4
Corte	Mancais acabamento	12	7200	5400	1	4

Tabela 7: Folha de dados do esquadrejador para simulação com OtimizaMP.

Os componentes 1 e 5, grifados em “amarelo”, Tabela 7, foram aqueles identificados como críticos, a partir da análise. Assim, para se obter melhor otimização do custo de manutenção, esses equipamentos devem ter sua vida útil alterada.

Nesta simulação não será analisado todo o diagnóstico do OtimizaMP. Avaliar-se-á, apenas, o efeito do *CMVu* (Custo de manutenção para vida útil avaliada) após a aplicação dos conceitos de RCM. Conforme apresentado no capítulo 2, uma das ações do RCM é efetuar análise de falha dos componentes críticos para melhorar sua confiabilidade, resultando na melhora do plano de manutenção ou projeto de componentes, com o intuito de aumentar sua vida útil.

Após a simulação do esquadrejador, aplicou-se uma análise de falha a partir da ferramenta FMEA. Observou-se que o componente 5 (chapa de desgaste, Tabela 7) possuía um desgaste prematuro que, por sua vez, causa a falha do componente 1 (correia Tabela 7). Com o objetivo de aumentar a vida útil desses componentes, a partir da mitigação das causas, estudou-se uma solução para aumentar a vida útil do componente 5. A solução encontrada foi o projeto de um guia de desgaste, com revestimento de material cerâmico (Alta-Alumina). Este novo guia custou R\$5.000,00, alterando o valor do custo do componente original que era de R\$2.581,00, conforme Tabela 7.

Aplicada essa nova solução no equipamento, a vida útil do componente 5 passou de 1.080 horas para 10.000 horas. Em decorrência, a vida útil da correia (componente 1) aumentou de 2.160 horas para 4.200 horas.

Efetuada a simulação do equipamento, antes e depois da correção do componente crítico, observou-se um aumento da periodicidade ótima,

que proporcionou uma redução do custo de manutenção ao longo do ciclo de vida do equipamento, conforme Figura 73.

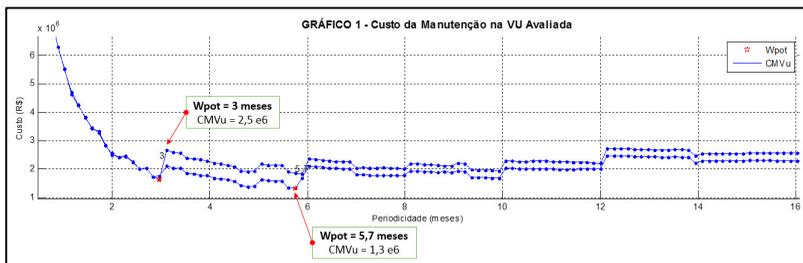


Figura 73: Resultado de duas simulações da função  $CMVu$  para o esquadrejador.

Na Figura 73 é possível observar duas curvas, uma na condição original do equipamento e outra após a modificação do componente 5, que resultou no aumento da vida útil dos componentes 1 e 5. A primeira curva indica periodicidade ótima “ $W_{pot}$ ” de 3 meses e  $CMVu$  de R\$2.500.00,00. Já, na segunda, periodicidade ótima “ $W_{pot}$ ” situa-se em 5,7 meses, com  $CMVu$  de R\$1.300.000,00. É possível observar que após a modificação do projeto do componente 5, houve uma redução do  $CMVu$  em R\$1.200.000,00, mesmo com acréscimo do custo do componente 5, que aumentou de R\$2.180,00 para R\$5.000,00.

Conclui-se, pois, que, a partir da identificação de um componente crítico (que provoca a redução da periodicidade do equipamento), com o diagnóstico do OtimizaMP e a aplicação de técnicas de RCM, pode-se melhorar a vida útil de alguns componentes. Essas melhorias reduzem os custos de manutenção e o impacto financeiro ao negócio.

Detalhes do projeto do componente 1, que resultaram no aumento da vida útil dos componentes 1 e 5, podem ser vistos no anexo 11.

Também como forma de avaliação do trabalho, foi elaborado um artigo sobre o tema desta pesquisa. O artigo apresenta, de forma resumida, o estudo desenvolvido neste trabalho, conforme anexo 13. Esse artigo foi enviado a 12 profissionais da área de manutenção industrial, que enviaram seus comentários e opiniões a respeito do trabalho. A descrição dos profissionais e suas opiniões podem ser vistas no anexo 12.

O artigo também foi enviado à revista “G&P – Gestão e Produção da Instituição UFSCar”, e foi aprovado pela equipe de edição da revista com publicação prevista até o final de 2015. O detalhe da aprovação do artigo pela revista pode ser visto no Anexo 13.

## 5.5 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível observar a influência de várias variáveis no processo de otimização da periodicidade. Em destaque, as variáveis, custo residual, MTTR e periodicidade. Na sequência será feita uma avaliação dessas importantes variáveis e da contribuição desta proposta de trabalho na definição destes referenciais para tomada de decisão no planejamento da manutenção preventiva, no contexto de uma gestão de manutenção centrada em confiabilidade (RCM).

### 5.5.1 AVALIAÇÃO: CUSTO RESIDUAL

Durante as simulações foi possível concluir que o custo residual é um fator importante no custo de manutenção, possui uma influência significativa na definição da periodicidade. Os resultados mostraram a importância de conhecer e avaliar esse fator, de acordo com a proposta feita no objetivo desta dissertação e na fundamentação do problema, apresentada no capítulo 3. Foi possível observar que o custo residual é um fator relevante na definição da escolha entre estratégia de MC ou MP para alguns processos, necessidades essas demandadas na tomada de decisão durante o planejamento da manutenção.

Pode-se observar que as simulações feitas no capítulo 4 e 5 mostram que o custo residual chega a representar de 35% a 45% do custo com materiais nas manutenções. Logo, é um fator muito importante nas tomadas de decisão.

Outro ponto relevante é que os custos residuais não podem ser eliminados, mesmo quando existe uma periodicidade otimizada, devido, sobretudo, à diferença de vida útil,  $Vu$ , entre os componentes. Porém, esses custos podem ser reduzidos significativamente com a aplicação de intercalação de escopo entre as MP e na aplicação de RCM, como projetos de melhorias que alteram a  $Vu$  dos componentes.

Foi possível observar que, para todos os processos, o custo residual em função da periodicidade tende ao formato de uma função exponencial decendente: quando a periodicidade tende a “zero”, o custo residual tende ao infinito. Ver Gráfico 1 das Figuras 56 e 66.

Conclui-se, pois, que o custo residual possui relevância no custo de manutenção durante o ciclo de vida do processo, podendo ser muito relevante para processos onde o custo com materiais é mais representativo

que os custos com paradas de manutenção. Quanto maior for a periodicidade, menores serão os custos residuais. Esse custo também pode ser evitado nas situações em que o valor de *CHC* é nulo, ou existe *BF*, que permite apenas aplicação de *MC*.

Também é possível concluir que o custo residual nas manutenções corretivas é zero, em face do aproveitamento total da vida útil do item. Todavia, na manutenção preventiva, esse custo precisa ser analisado. E é neste caso que o *OtimizaMP* torna-se preponderante porque incorpora, na análise, multicritérios de decisão, contextualizando custo de hora parada e custo com materiais.

### 5.5.2 AVALIAÇÃO: MTTR

Um dos fatores que torna a manutenção corretiva mais custosa que a manutenção preventiva, na maioria das situações, é que o tempo médio para reparo corretivo, “*MTTRc*”, é maior que o tempo médio para reparo preventivo, “*MTTRp*”. Outro fator refere-se ao fato de as preventivas possuem uma única parada para substituir vários componentes, enquanto a *MC* precisa de uma parada para a substituição de cada componente. Dessa forma, na *MC* há mais paradas gerando menor disponibilidade para o processo.

O que leva o *MTTRc* ser maior que o *MTTRp*? O *MTTRp* leva os gestores de manutenção a fazerem um planejamento das paradas. Planejam-se materiais, *MO*, ferramentas e paradas de processo junto à produção. Além disso, a preparação antecipada de material permite uma melhor negociação na compra de materiais, evitando compras emergenciais, nas situações em que não há material em estoque, proporcionando menores custos com componentes. Mesmo nas situações em que existe material no estoque, a atividade planejada de *MP* permite disponibilizar o material na área do equipamento, fazer a conferência dos itens e pré-montagem, quando necessário, evitando atrasos na execução em decorrência de erros de especificação e detalhes de montagem de componentes.

Dessa forma, trabalhos focados na mantabilidade, que reduzem o *MTTRc*, contribuem para redução dos custos de manutenção. Chama-se a atenção para os casos em que a mantabilidade foi desenvolvida de tal forma que o *MTTRc* se tornou igual ao *MTTRp*, proporcionando menores custos com manutenção corretiva. Isso porque o custo residual da *MC* tende a zero. Toda vida útil do item é consumida.

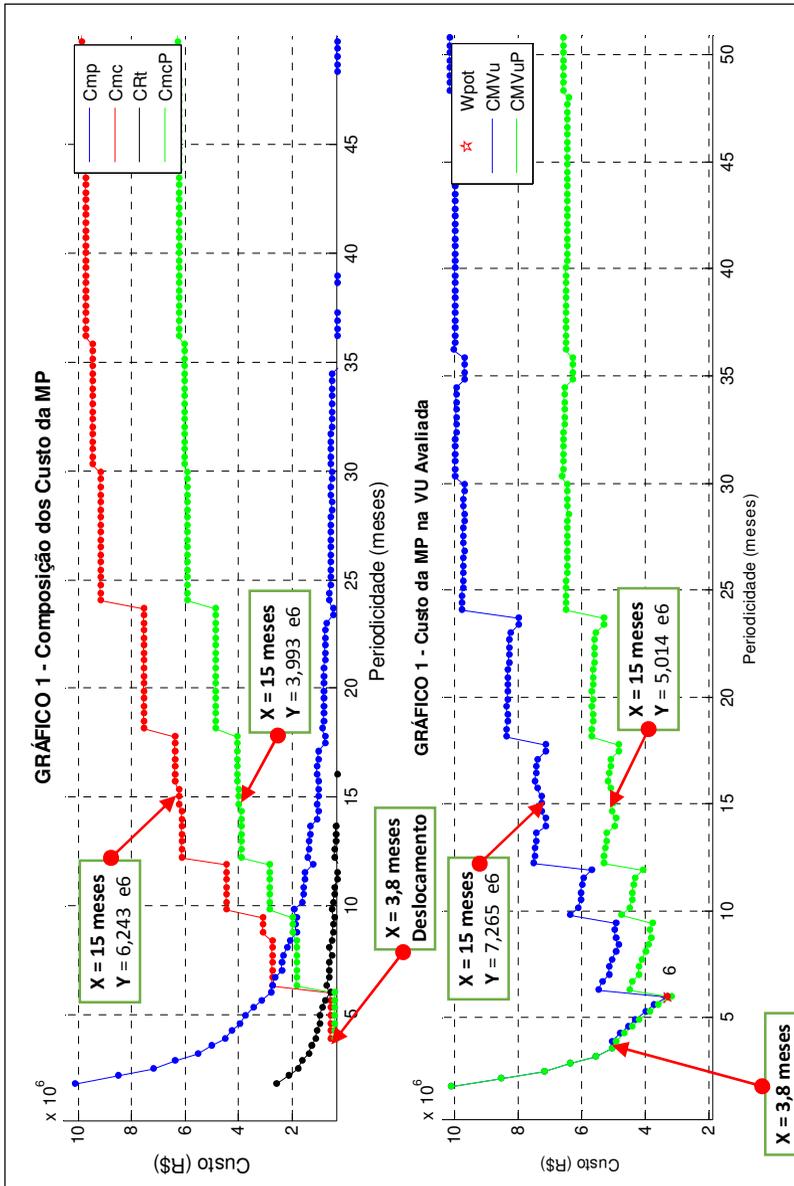


Figura 74: Avaliação da influência do MTTR, “Processo de Queima”.

Pode-se concluir que a variação entre as variáveis MTTRp e MTTRc é bastante significativa para o custo de manutenção. A Figura 74 mostra o resultado da simulação “processo de queima” apresentado na seção 5.3. Nesta nova simulação, fez-se o MTTRp igual ao MTTRc para todos os componentes da Tabela 5, permitindo observar a variação dos custos de manutenção, quando MTTRp é igual a MTTRc.

No Gráfico 1, da Figura 74, é possível observar, a partir da periodicidade de 3,8 meses, o descolamento da função  $C_{MCP}$  em relação à  $C_{MC}$ . A função  $C_{MCP}$  (linha “verde”) representa o  $C_{MC}$  do “processo de queima” com os valores de MTTRc modificados, ou seja, iguais ao MTTRp. Esse deslocamento entre as funções representa a diferença do custo com MC devido à diferença entre MTTRc e MTTRp.

Por exemplo, quando a periodicidade é de 15 meses, observa-se que ocorre uma redução do custo de manutenção corretiva, “ $C_{MC}$ ”, de R\$6.243.000,00 para R\$3.993.000,00, quando o MTTRc é igual ao MTTRp. Isso representa uma redução de aproximadamente 36% no custo com MC. Essa redução provocada na função do custo de manutenção corretiva representa também uma redução no custo de manutenção da vida útil de avaliação, “ $CMVu$ ”, da Figura 74, Gráfico 2.

No Gráfico 2, da mesma Figura 74, observa-se, a partir da periodicidade de 3,8 meses, o descolamento das funções  $CMVuP$  em relação à  $CMVu$ ; a função  $CMVuP$  (linha “verde”) representa o  $CMVu$  do “processo de queima” com os valores de MTTRc modificados, ou seja, iguais ao MTTRp. Por exemplo, quando a periodicidade é 15 meses, a redução do  $CMVu$  é de R\$7.265.000,00 para R\$5.014.000,00 (quando MTTRc = MTTRp), uma redução de aproximadamente 31%.

Essa modificação dos custos, devido à alteração da função  $C_{MC}$ , provocada pela modificação dos valores de MTTRc (neste caso, igual a MTTRp), modifica a função final da simulação,  $CMVu$ , podendo levar a uma alteração do ponto de otimização (periodicidade ótima), apesar de que, neste exemplo, a mesma periodicidade otimizada de seis meses foi mantida. Isso reforça a importância de trabalhos focados na manutenibilidade para redução do MTTRc, com o objetivo de: melhorar a qualificação da MO, planejar MO, materiais e ferramentas e reprojeter máquinas para adaptações requeridas para garantir a gestão em RCM.

Essas percepções estão, de certa forma, presentes no sentimento dos gestores de manutenção experientes. A importância do OtimizaMP está em sua capacidade de representar a informação de forma objetiva, permitindo discutir com os colaboradores de manutenção e de outros

setores da empresa, e influenciar na tomada de decisões e priorização de investimentos.

### 5.5.3 AVALIAÇÃO: OTIMIZAÇÃO DA PERIODICIDADE

A otimização da periodicidade foi um dos principais objetivos deste trabalho, porque possibilita obter o melhor custo de manutenção para viabilidade do negócio, contemplando os diversos ativos do sistema de produção. A Tabela 8 mostra o resultado e as principais características da simulação de cinco processos, feitos no OtimizaMP.

TABELA DE AVALIAÇÃO DAS SIMULAÇÕES								
PROCESSO	N. SISTEMAS	CHC (R\$)	BF (h)	VUs(h)	VUmin(Meses)	Wpot (Meses)	VUmax(Meses)	ESTRATÉGIA MANUT.
MOINHO CONTÍNUO MTC 161	20	14000	12	150000	3	23,4	180	MP e MC
PROCESSO DE QUEIMA	49	14000	0	50000	3,6	6	48	MP e MC
ESQUADREJADOR	12	7000	0	20000	1,5	3	18	MP e MC
PROCESSO DE MOAGEM	40	25000	12	80000	1,2	11,7	84	MP e MC
LINHA DE PRODUÇÃO	4	12000	0	40000	6,9	6,8	27,7	MP

Tabela 8: Avaliação das simulações para cinco processos da indústria cerâmica.

Olhando a Figura 75, é possível observar que a faixa de vida útil entre a mínima vida útil do sistema, “ $Vu_{min}$ ”, e a máxima vida útil do sistema, “ $Vu_{max}$ ”, definiu o intervalo onde as possíveis falhas ocorrem. Logo, para periodicidades que estão dentro dessa faixa, têm-se as duas estratégias de manutenção, MC e MP. Já, para periodicidades que ocorreram antes da “ $Vu_{min}$ ”, há apenas MP e, para periodicidades superiores a “ $Vu_{max}$ ”, tem-se somente MC. Na Figura 75 é possível observar melhor essa faixa.

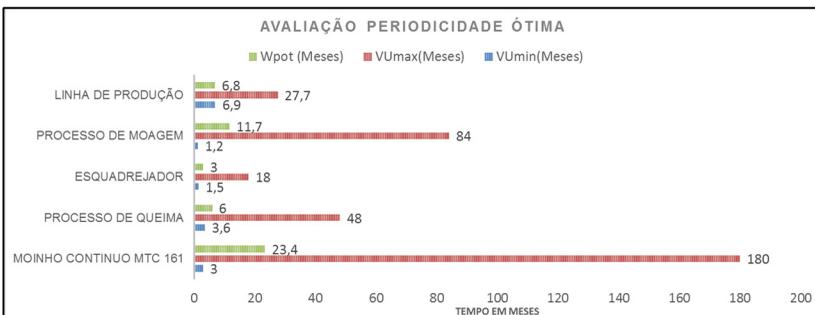


Figura 75: Faixa de ocorrência das possíveis falhas para cinco processos.

Tomando o processo “Linha de Produção” para análise, observa-se que a periodicidade ótima, “ $W_{pot}$ ”, foi de 6,8 meses. Como essa é

menor que a “ $Vu_{min}$ ”, neste caso 6,9 meses, não existe ocorrência de manutenção corretiva, porque a execução da MP ocorre a cada 6,8 meses, antes que todos componentes cheguem ao final de suas respectivas vidas úteis. Dessa forma, não teve MC. (Ver a última coluna da Tabela 8, onde a estratégia de manutenção é apenas MP.) Na Figura 75, é possível observar que “ $W_{pot}$ ” de 6,8 meses ocorre antes da “ $Vu_{min}$ ”, para o item linha de produção.

Entretanto, nos demais processos, todas as periodicidades ótimas concentraram-se dentro da faixa “ $Vu_{min}$ ” a “ $Vu_{max}$ ”. Logo, essas simulações resultaram em ocorrência de corretiva para alguns componentes, obtendo-se assim as estratégias de MP e MC. Pode concluir que:

- ✓ Se  $Vu_{min} < W_{pot} < Vu_{max}$  – tem-se ocorrência de MP e MC.
- ✓ Se  $W_{pot} > Vu_{max}$  – tem-se ocorrência de apenas MC.
- ✓ Se  $W_{pot} < Vu_{min}$  – tem-se ocorrência de apenas MP.

Para as cinco simulações da Tabela 08, mostra que “ $W_{pot}$ ”, tende a se concentrar mais próximo da “ $Vu_{min}$ ”, isso mostra que a MP é mais vantajosa na maioria das situações.

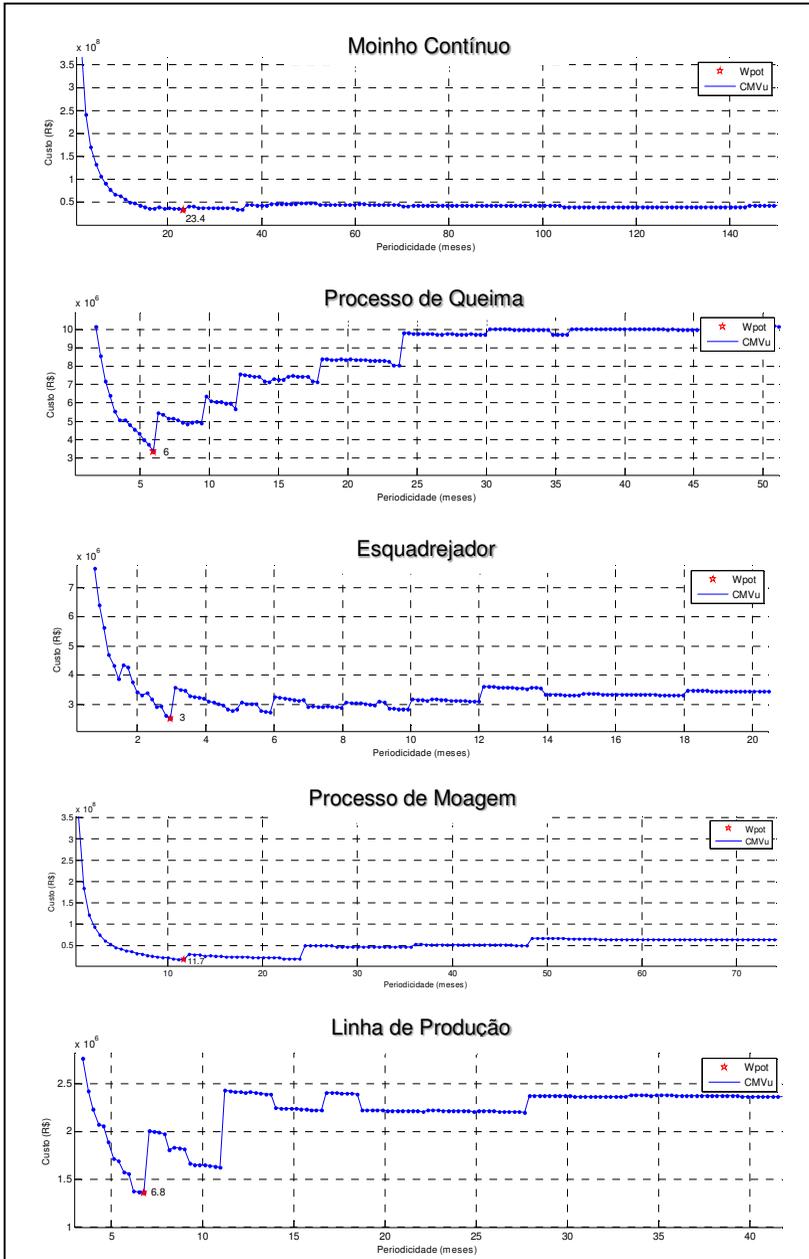


Figura 76: Curvas otimizadas do custo de manutenção para cinco processos.

Em relação aos custos, a Figura 76 apresenta as funções do  $CMVu$  (Custo de manutenção para vida útil de avaliação), com a periodicidade ótima para os cinco processos da Tabela 8. Com a representação gráfica dessas funções, é possível concluir que a variação do custo de manutenção ao longo do ciclo de vida dos processos é diferente, possuindo uma característica particular para cada processo, podendo ser mais influenciado pela variação da  $Vu$  entre os componentes,  $CHC$ ,  $MTTR$ , Custo com componentes ou  $BF$ , conforme será apresentado a seguir.

É possível concluir que a variação da periodicidade pode ser mais representativa em alguns processos e nem tanto em outros. Por exemplo, o Gráfico 2, “Processo de Queima”, da Figura 76, possui uma variação muito representativa do custo de manutenção em função da periodicidade, diferente do Gráfico 1, “Moinho Contínuo MTC161”, da mesma figura, que apresenta baixa variação do  $CMVu$ , após a periodicidade de 20 meses.

Nos processos dos tipos: Gráfico 2 – “Processos de queima”, Gráfico 3 – “Esquadrejador” e Gráfico 5 – “Linhas de Produção”, da Figura 76, existem pontos acentuados (degrau) na função (após a periodicidades 6; 3 e 6,8 meses). Evidenciam-se periodicidades críticas, que elevam de forma significativa os custos de manutenção, exigindo-se uma atenção redobrada no planejamento da manutenção. Por exemplo, um atraso na execução da manutenção preventiva (com periodicidade de seis meses) para o “processo de queima”, (Gráfico 2, Figura 76) devido a uma necessidade de produção ou demanda de mercado, resultaria no acréscimo do custo de manutenção de forma significativa. Outro exemplo poderia ser a solicitação de um aumento da periodicidade deste mesmo processo, durante o planejamento da manutenção, com o objetivo de reduzir o custo, mas que, na verdade, elevaria o custo.

Conclui-se que as diferenças das variáveis ( $CC$ ,  $VU$ ,  $MTTR$ ,  $CHC$ ) entre os processos resultam em diferente comportamento de custos de manutenção para cada processo. Isso, por sua vez, define as diferentes necessidades de estratégia de  $MP$  ou  $MC$ , fazendo com que alguns processos sejam muito viáveis à aplicação de manutenção preventiva e outros nem tanto.

Estes modelos de análise justificam o uso do OtimizaMP e foram alguns dos pontos positivos realçados nas avaliações dos especialistas (Anexo 12), a partir do artigo produzido (Anexo 13).



## 6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo, propõe-se fazer uma avaliação dos resultados obtidos e a conclusão final do trabalho.

A ideia inicial desta dissertação surgiu da dificuldade de definir uma periodicidade ótima nas manutenções preventivas e de questões correlatas vivenciadas na manutenção industrial, que podem ser resumidas nos seguintes questionamentos:

- ✓ Qual a influência da diferença entre o MTTR corretivo e preventivo no custo de manutenção?
- ✓ Qual o impacto financeiro das manutenções preventivas em função do custo da hora cessante?
- ✓ Qual a influência do custo residual (devido à troca prematura de componentes) no custo de manutenção?
- ✓ Qual a periodicidade de preventiva que proporciona menor custo de manutenção ao longo da vida útil do processo?

Definiu-se, então, como objetivo, o desenvolvimento de um modelo de otimização de periodicidade dos planos de manutenção preventiva de ativos industriais, por meio do estudo da vida útil dos sistemas, fundamentados pelos atributos de uso, tempo, condição e custos. Para tanto foi desenvolvido um modelo matemático e, posteriormente, foi feita sua implementação computacional.

O presente trabalho possibilitou resolver questões práticas do processo de manutenção, o qual, normalmente, é levado a efeito pelos engenheiros de projetos ou engenheiros de manutenção, ao elaborarem um plano de manutenção preventiva de um equipamento novo ou equipamento em operação, respectivamente. Serve, principalmente, a quem desejar implementar um modelo de gestão de manutenção, quer seja do tipo Manutenção Centrada em Confiabilidade, “RCM”, ou para alguns pilares da Manutenção Produtiva Total (TPM).

Observou-se, por meio das simulações, que a utilização de duas estratégias, MP e MC, foi a mais econômica para alguns processos. Para outros, contudo, deve ser aplicada apenas a estratégia de MP. Logo, conclui-se que a utilização da estratégia de MP, parcial ou total, é sempre vantajosa. Dessa forma, o estudo realizado mostrou a importância de se conhecer qual a composição de MP e MC mais econômica, dado que essa composição se encontra na região de incerteza da periodicidade ótima, conforme apresentado no capítulo 3, seção 3.1, Figura 21. O OtimizaMP

conseguiu fornecer, com precisão, a dosagem de MP e MC, solucionando um dos problemas apresentado no capítulo 3.

O OtimizaMP foi desenvolvido para facilitar o uso da modelagem matemática, nas tomadas de decisão para implementar processo de manutenção preventiva, no contexto da Manutenção Centrada em Confiabilidade. O programa foi utilizado na empresa de produção cerâmica e contribuiu para avaliar a estratégia de manutenção, na empresa, de forma dinâmica, e permitiu alterar a dosagem de MC e MP, de acordo com a necessidade do negócio, como desenvolvido nas simulações do capítulo 5.

Também foi possível observar que trabalhar com manutenção preventiva fundamentada em periodicidade não significa que os intervalos sejam fixos ao longo do ciclo de vida dos equipamentos. Pelo contrário, o OtimizaMP permite elaborar simulações ao longo do ciclo de vida, tanto para MP baseada no tempo como MP baseada na condição, considerando situações em diferentes cenários, como oscilação do mercado que reduza a produção e provoque a variação do *CHC*, devido à variação de preço de venda do produto e consequente alteração da lucratividade do processo. Assim, as simulações podem ser realizadas conforme exista mudança de cenário, para que a periodicidade e a estratégia de manutenção sejam ajustadas<sup>1</sup>. Em face dos exemplos, o OtimizaMP mostrou ser uma ferramenta útil para o gestor de manutenção durante o planejamento da manutenção e elaboração do orçamento. Os dados decorrentes da análise permitiram justificar, perante a alta direção da unidade industrial, a necessidade de um orçamento de manutenção.

Também foi possível concluir que o *software* possibilitou ao gestor de manutenção avaliar, de forma muito rápida, vários cenários de estratégia de manutenção, sopesando seus ganhos e impactos. Tais resultados não seriam possíveis caso elaborasse simulações manualmente, via calculadora ou planilha em Excel, ou pelos *softwares* corporativos disponíveis na empresa.

O emprego desse *software* demonstrou que sistemas cujos componentes têm grande variação de vida útil geram alto custo residual. Portanto, é necessário corrigir a vida útil desses componentes através de técnicas de RCM, buscando equalizar sua vida útil e, dessa forma, baixar o custo residual. Logo, o programa conseguiu mostrar, de forma explícita, a influência do custo residual, evidenciando a importância de estudá-lo.

---

<sup>1</sup> Essa observação responde, também, o questionamento feito por um dos especialistas. Ver Anexo 12, comentário do Sr. Luiz Alberto Verri.

Em relação a componentes para os quais a otimização recomenda a estratégia de MC, foi possível concluir que, como as simulações trabalham com previsão da “Vu”, é possível também planejar as MC, ou seja, transformá-las em manutenções planejadas, baseadas na falha, conforme apresentado na seção 3.2. Neste caso trata-se, ainda, de uma MC, porém, havendo a previsão do fim da “Vu” do componente (instante da falha), pode-se planejar materiais, ferramentas e MO, reduzindo assim o *MTTRc*, tornando o *CMVu* ainda menor.

Evidenciou-se, igualmente, que o aprofundamento técnico no planejamento da manutenção permite desenvolver uma visão profunda dos ciclos de vida. Ao dominar as expectativas de falhas, pode-se prover ganhos reais de disponibilidade, gestão de custos de manutenção, na perspectiva de sustentabilidade, alinhada à gestão de ativos. Assim, pode-se mostrar que a manutenção permite, sim, gerar lucratividade, contrariando muitos paradigmas segundo os quais a manutenção é somente custo.

<b>EFEITO DAS VARIÁVEIS NA ESTRATÉGIA DE MANUTENÇÃO</b>		
<i>ATRIBUTOS</i>	<i>MP</i>	<i>MC</i>
Custo residual elevado	Pior	Melhor
Variabilidade da VU elevada	Pior	Pior
$MTTRp < MTTRc$	Melhor	Pior
$MTTRp = MTTRc$	Pior	Melhor
Alta Confiabilidade	Melhor	Pior
Periodicidade Otimizada	Melhor	Melhor
Custo da Parada Superior ao Custo com materiais	Melhor	Pior
Custo da Parada Inferior ao Custo com materiais	Pior	Melhor

Tabela 9: Efeito de algumas variáveis na estratégia de manutenção.

O “chão de fábrica” é muito exigido no sentido de apresentar resultados financeiros competitivos em tempo muito curto. Além disso, na manutenção atuam muitos agentes, cujas decisões precisam ser rápidas, corporativas e bem direcionadas. Como resultado desta pesquisa de dissertação, apresenta-se por fim, na Tabela 9, o efeito de algumas variáveis na estratégia de manutenção, que foram identificadas neste trabalho. Isso significa que a análise multicritério deve ser sempre

requerida. Para tanto, é preciso de ferramenta que a ajude no momento da tomada de decisão.

A tendência do gestor é fazer análise por critérios específicos, que embora corretos não contemplam todas as possibilidades, como está especificado na Tabela 9. Por isso o uso do *software* se tornou preponderante. Possibilita fazer uma gestão mais completa e complexa para otimizar os resultados. Neste aspecto, o OtimizaMP tornou-se uma contribuição importante.

## 6.1 RECOMENDAÇÃO A TRABALHOS FUTUROS

Especialistas consultados, a partir da leitura de um artigo (Anexo 13) indicaram a assertividade da pesquisa, realçando a importância da modelagem contida no *software* POPMP, posteriormente renomeado para OtimizaMP. Eles também sugeriram implementações que foram incorporadas ao programa ou integram as recomendações para trabalho futuros, apresentadas a seguir.

Programar a ferramenta desenvolvida, OtmizaMP, em uma linguagem orientada a objeto, tipo Visual Basic ou Delphi, para tornar-se mais robusta, além de melhorar toda a ergonomia de comunicação com o usuário.

Integrar a base de informações necessárias para simulação, diretamente do banco de dados do CMMS, para poder extrair de forma automática o MTTF, MTTR, Vu e Custo de componente. O usuário faria apenas a seleção dos sistemas a serem simulados, sem a necessidade de digitar todas as informações e as variáveis necessárias.

Efetuar cálculo de vida útil dos componentes a partir do histórico de falha de registro da RCM (técnicas de preditiva e tendência acumulativa) do CMMS, montar a distribuição das ocorrências e aplicar a equação mais adequada para o cálculo de estimativa da vida útil.

Elaborar relatórios personalizados para facilitar o diagnóstico do gestor de manutenção e gerá-los em PDF.

Elaborar diagnóstico automático da efetividade da MC e MP, a partir dos registros de ocorrência do CMMS. Elaborar as simulações e fornecer sugestões de melhores estratégias.

Este trabalho focou nos atributos relacionados ao custo. Para trabalhos futuros, é importante considerar também atributos relacionados à segurança e ao gerenciamento de risco.

Por fim, uma recomendação relacionada aos processos: O trabalho considera para as simulações RBD (diagrama de bloco de confiabilidade) somente processos em série. Para trabalhos futuros, é importante considerar também RBD em paralelo, que engloba processo com redundância.



## 7 REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994. 37 p.
- AMARAL, D. CAPALDO. **Gestão do ciclo de vida dos produtos / coordenação do IFM**. Jaboticabal: Editora Novos Talentos, p.229-243, 2005. Coleção fábrica do milênio V.3, ISBN 85-88805-07-03.
- BAKER R. Risk aversion in maintenance: a utility-based approach. **IMA Journal of Management Mathematics**. Oxford University Press, v. 21, p. 319-332, 2010.
- BERTSCHE B. **Reliability automotive and mechanical engineering**. Berlim: Springer, 2008.
- BIASOTTO, EDUARDO. **Aplicação do BSC na Gestão da TPM: Estudo de caso em indústria de processo**. Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- BILLINTON, R., ALLAN, R.N. **Reliability evaluation of engineering systems**. London: Plenum Press. 1983, 343 p.
- BOYCE, WILLIAM E. **Equações diferenciais elementares e problemas de valores de contorno**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- BSI – BRITISH STANDARDS. **PAS 55: Gestão de ativos**. London, 2008. 56p.
- CASSANTEC J.H. et al. The future of a machine's condition lies in data. **Maintworld**, EFNMS, v.2, p.10-12, maio, 2015.
- CAVALCANTE, C.A.V. et al. A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v.21, p. 333-348, 2010.
- CBM - CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 26°, 2011, Curitiba / PR. **Manutenção: Capital humano, desafios para**

**a sustentabilidade**, EXPOMAN CD-ROOM, ABRAMAN setembro 2011.

CHRISTER, A.H. The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v. 15, p. 355-379, 1998.

CII – Confederation of Indian Industry. **Manual on best practices in Indian thermal power generating units**. India, 2014.

Disponível em:

<[http://asiapacificpartnership.org/pdf/PGTTF/docs/DOE%20Documents/Power\\_Plant\\_\\_\\_All\\_pages.pdf](http://asiapacificpartnership.org/pdf/PGTTF/docs/DOE%20Documents/Power_Plant___All_pages.pdf)>. Acesso em: 25 maio 2015.

D'AMICO, GUGLIELMO. A semi-Markov maintenance model with credit rating application. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v. 20, p. 51-58, 2009.

DALE, R.B. How to stop hating your PM programme. **Maintworld**, EFNMS, v.1 p.4-12, Jan., 2013..

DAVID J. S. **Realiability maintainability and risk**. Sixth edition. Oxford: Elsevier, 2001.

DIAS A. Failure analysis. In: TOTTEN, G.E.; NEGRI, V.J. **Handbook of hydraulic fluid tecnologia**. Second Edition. Ed. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2012. p.461-530, Chapter 12.

DIAS, A. **Confiabilidade: histórico, definição e relacionamento**. Florianópolis: EMC/UFSC, 2004. Notas de aula.

DIAS, A. et al. **Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores**. Florianópolis: Ed. Studio S, 2011. 304p.

FERREIRA MARCELO G.G. **Utilização de Modelos para Representação de Produtos no Projeto Conceitual**. Florianópolis, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 1997.

FOULADIRAD M., GRALL A. On-line change detection and condition-based maintenance for systems with unknown

deterioration parameters. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v. 25, p.139-158, 2014.

FRANÇA, SANDRO R. R. de OLIVEIRA. **Aplicação conjunta das metodologias TPM e MCC na indústria de processos**. Salvador, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal da Bahia, 1999. 111p.

FUENTES, F. E. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial**. Florianópolis, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 192p.

FUENTES, F. E.; DIAS, A.; SALINAS, G. Analise de riesgo em el proceso de innovación em la gestión del mantenimiento industrial. **Intekhnia**, División de Ingenierías de la Universidad Santo Tomás, Bogotá, Colombia, v. 7, p. 13-25, 2012.

FUENTES, F. E.; DIAS, A.; SALINAS, G. Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial. **Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería**. v. 20, p. 242-254, 2012.

HAI, CANH VU, et al. Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, p.1-26, 2014.

JACK N., MURTHY D.N.P. A new preventive maintenance strategy for items sold under warranty. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v.13, p.121-129, 2002.

KIM M. J., MAKIS V. A maintenance model with minimal and general repair. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v.21, p.385-393, 2010.

KOBBACY, KHAIRY A. H.; JEON, J. Generalized stationary models for scheduling single and multiple preventive maintenance routines. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v. 13, p.81-94, 2002.

KREIDER D. L. et al. **Introdução à análise linear**. Rio de Janeiro: Editora Universidade de Brasília, 1972. (Volume 2, Séries de Fourier.)

KUMAMOTO, H., HENLEY, E.J. **Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists**. New York: IEEE Press, 1996.

LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

LIANG Z., et al. A tiered modelling approach for condition-based maintenance of industrial assets with load sharing interaction and fault propagation. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, p.1-20, 2014.

LOGANATHAN K., FAISAL K., MAHMOUD H. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant. **Journal of Loss Prevention [Process Industries]**. v. 18, p.69-81, 2005.

LRS Plant. **Physics of failure - why your plant, equipment and machines fail**. Austrália, 2012. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=1oNIgAT5nK4>>. Acesso em: 10 dezembro 2014.

MÁRQUEZ A.C. et al. Modelling on-line reliability and risk to schedule the preventive maintenance of repairable assets in network utilities. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v.24, p.437-450, 2013.

MONTGOMERY, DOUGLAS C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

MOUBRAY, J. **Reliability centered maintenance**. Second Edition. New York, NY: Industrial Press Inc.; 1997.

NAKAJIMA, S. **Introdução ao TPM**, tradução de Mario Nishimura, IMC Internacional Sistema Educativos Ltda, São Paulo, 1989.

NORTON, R. L. **Projeto de máquinas: Uma abordagem integrada**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

PERCY D. F. et al. Bayesian analysis of fixed-interval preventive-maintenance models. **IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry**. Oxford University Press, v. 9, p.157-175, 1998.

PERCY D. F.; KOBACZY A.H. Using proportional-intensities models to schedule preventive-maintenance intervals. **IMA Journal of Mathematics Applied in Business & Industry**. Oxford University Press, v.9, p.289-302, 1998.

RIGONI EMERSON. **Metodologia para manutenção centrada na confiabilidade: sistema baseado na lógica fuzzy**. Florianópolis, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

SHIN K.; HAMMOND J.K. **Fundamentals of signal for sound and vibration engineers**. John Wiley & Sons, Ltd, 2008.

SMITH, A.M. **RCM: Gateway to world class maintenance**. Oxford: Elsevier, 2004.

SMITH, A.M. **Reliability centered maintenance**. Boston: McGraw Hill, 1993.

SOUZA, VALDIR CARDOSO DE. **Organização e gerência da manutenção**. 3.ed. São Paulo: All Print Editor, 2009.

VERRI, LUIZ ALBERTO. **Sucesso em Paradas de Manutenção**. 1. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2008.

VICENTE, F. Assessing the cost of unreliability. **Maintworld, EFNMS**, v.1, p. 29-32, March, 2014.

VINADÉ, CESAR AUGUSTO DO CANTO. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista**. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 217p.

WAEYENBERGH, G. CIBOCOF: **A framework for industrial maintenance concept development**. Leuven (Bélgica): Katholieke Universiteit Leuven, 2005.

WANG W. Modelling in industrial maintenance and reliability. **IMA Journal of Management Mathematics**. Oxford University Press, v. 21, p. 317-318, 2010.

WEIBULL, W. A statistical distribution function of wide applicability. **J. Appl. Mech.** v.18. p.193-197.1951.

WILLIAN J. PALM III. **Introdução ao MATLAB para engenheiros**. 3.ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2013.

YIN Z.; MAKIS V. Economic and economic-statistical design of a multivariate Bayesian control chart for condition-based maintenance. **IMA Journal of management Mathematics**. Oxford University Press, v. 22, p. 47-63, 2011.

# **ANEXOS**

**ANEXO 01 – TABELA DE DADOS PARA CONSTRUÇÃO DAS DISTRIBUIÇÕES DE FALHA DOS 10 SISTEMAS DO ESQUADREJADOR.**

INTERVALO DAS OCORRÊNCIAS (Meses)	NÚMERO DE OCORRÊNCIAS POR SISTEMA - ESQUADREJADOR									
	Correia	Pala sincronizada	Pala guia	Pala movida	Chapa de desgaste	Eixo encanelado	Bucha encanelada	Sarfonas	Foldanas regua	Mancais
1										5
1-2										11
2-3	1								2	37
3-4	4								3	43
4-5	8								5	8
5-6	3								12	9
6-7	1								11	7
7-8									6	3
8-9									4	5
9-10									2	5
10-11									7	7
11-12									2	4
12-13									1	4
13-14									4	2
14-15									2	7
15-16									5	9
16-17									2	3
17-18									11	2
18-19									6	6
19-20									5	5
20-21									2	2
21-22									8	8
22-23									2	9
23-24									5	5
24-25									3	3
									2	2

# ANEXO 02 – PLANO DE MP BASEADO NO TEMPO, DO EQUIPAMENTO MOINHO MTC161, FABRICANTE “SACMI”.

## 8 MANUTENÇÃO



### ATENÇÃO!

Todas as operações de manutenção devem ser efetuadas com a máquina parada.  
 Desconectar a máquina da rede elétrica através do interruptor geral do quadro elétrico de potência e bloquear este último com um cadeado na posição alimentação desativada.  
 Para garantir o funcionamento seguro da máquina e melhores condições de segurança é preciso usá-la corretamente.  
 É obrigatório efetuar pontualmente as intervenções de controle, verificação, etc., conforme indicado a seguir.

### 8.1 INTERVENÇÕES PROGRAMADAS

TEMPO DE INTERVENÇÃO		600 horas	A Cada 600 horas	A Cada 2000 horas	A Cada 3500 horas	A Cada 7000 horas
OPERAÇÕES DE MANUTENÇÃO	A) Substituição lubrificantes em geral	●			●	
	B) Controle das gaxetas		●			
	C) Controle dos injetores lubrif. Coroa		●			
	D) Controle contato pinhão-coroa		●			
	E) Verificação desgaste do revestimento			●		
	F) Limpeza filtro lubrif. pinhão-coroa				●	
	G) Limpeza filtros lubrif. redutor/suportes				●	
	H) Substituição lubrificante junta de dentes					●
	I) Controle parafusos e porcas cilindro					●
	J) Controle da instalação terra					●
MANUTENÇÃO MOTOR CC	K) Filtro de ar interno		●			
	L) Coletor elétrico		●			
	M) Esoovas		●			
	N) Enrolamentos		●			
	O) Coletor			●		
	P) Rolamentos			●		
	Q) Rolamentos				●	
	R) Parafusos ligações elétricos				●	
	S) Limpezas geral					●

- C2041
- A) Substituição completa o óleo no redutor de comando, nas instalações de lubrificação rolamentos, nos suportes pinhão.
  - B) Controlar o correto posicionamento e o bom funcionamento das guarnições de lábio (V-RING) dos suportes principais do moinho.
  - C) Controlar o bom funcionamento das válvulas de borrio da instalação de lubrificação pinhão-coroa. Na finalidade no cárter do grupo de transmissão está presente uma abertura nas proximidades da placa porta-injetores posicionada no pinhão. Para verificar o bom funcionamento dos injetores basta inserir um cartão retangular na abertura (figura 8.1/A – ALÇAPÃO DE INSPEÇÃO), e pôr em funcionamento manual a instalação de lubrificação, com a máquina parada. No final do ciclo de lubrificação extrair o cartão da fenda, e verificar as rosas de lubrificante produzidas pelos injetores. É importante verificar a nebulização, e a forma das rodadas produzidas pelos diversos injetores, para obter uma boa lubrificação do contato.

# ANEXO 03 - PLANO DE MP BASEADO NO TEMPO, DO INVERSOR DO MOINHO MTC161, FABRICANTE “ABB”.

<b>ABB</b>	<b>Maintenance Schedule</b>	4FPS1000043089 DOCMSACS600-1		
Issued by ABB Oy, Drives Service	Date 2012-11-02	Language en	Revision K	Page 1 (1)
Creator name Ari Niskanen		Distribution Public		

## ACS600 Drives

<b>Legend:</b>	
Replacement of component	R
Inspection (visual inspection, correction and replacement if needed)	I
Performance of on-site work (commissioning, tests, measurements, etc.)	P
Replacement if high ambient temperature or cyclic heavy duty load	(R)

	Years from start-up																					
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<b>Start-up</b>	P																					
<b>Cooling</b>																						
> Air Cooled Unit:																						
> Cooling fan (MD and SD R8, R9, IP54)				R			R			R			R			R			R			R
> Cooling fan (SD R2-R7)							R					R							R			
> DSU, TSU cooling fan (B1-B5)				R			R			R			R			R			R			R
> DC reactor cooling fan (B4-B5)				R			R			R			R			R			R			R
> Water Cooled Unit:																						
> Cooling Fans				R			R			R			R			R			R			R
> Add coolant inhibitor		P		P		P		P		P		P		P		P		P		P		P
> Heat Exchanger cleaning				I			P			I			P			I			P			I
> Cooling water pumps				I			R			I			R			I			R			I
> Expansion tank air pressure		I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I	I
> Expansion tank										R									R			
> Cooling water pipe connections				I			I			I			I			I			I			I
<b>Aging</b>																						
> Electrolytic capacitors (DC circuit)										(R)			R								(R)	
> Electrolytic capacitors (NGDR)								(R)				(R)									R	
> LCL filter capacitors (ISU_LCL-xxxx)								(R)				(R)									R	
> DSU, TSU RC resistors, capacitors				I			I			I			I			I			I			I
<b>Connections &amp; Surroundings</b>																						
> Flat cables (NINT, NXPP)								(R)			R			(R)							R	
> Tightness of terminals				I			I			I			I			I			I			I
> Door filters				I			I			I			I			I			I			I
> Condition of contactors				I			I			I			I			I			I			I
> Fiber optic cables (connections)				I			I			I			I			I			I			I
> Dustiness, corrosion and temperature				I			I			I			I			I			I			I
> Quality of supply voltage				I			I			I			I			I			I			I
<b>Improvements</b>																						
> Based on product notes				I			I			I			I			I			I			I
<b>Measurements</b>																						
> Basic measurements with supply voltage				P			P			P			P			P			P			P
<b>Spare Parts</b>																						
> Spare Parts				I			I			I			I			I			I			I
> DC circuit capacitor reforming				P			P			P			P			P			P			P

**Note!** Recommended service intervals and component replacements are based on the operational environment specified by ABB. **ABB recommends an annual drive inspection to be carried out in order to secure best reliability and optimum performance.** Please refer to service instructions and product manuals for more information or go to [www.abb.com/driveservices](http://www.abb.com/driveservices).

## ANEXO 04 – INSAIO DE VIDA ÚTIL DA PLACA ELETRÔNICA, DO INVERSOR MTC161, FABRICANTE “ABB”.

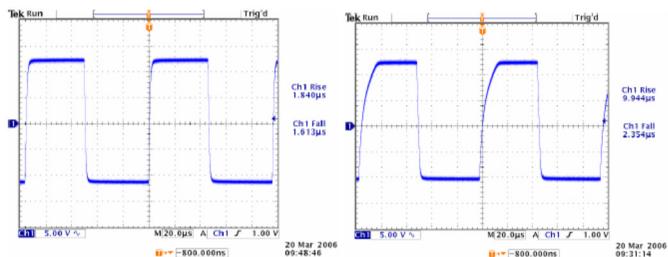
ABB Automation Products		<b>Maintenance Note</b>		DOCMNACS60029	
ABB Oy, Product Support		<b>ACS600</b>			
<b>Main Circuit Control Boards</b>					
Department	Date	Author	Checked / Approved	Revision	Page
TLC	31.12.2007	Ari Niskanen	Kari Rusanen	D	3 (3)

We recommend changing the set of NXPP-xx/NINT-xx/ flat cable every 9 years to avoid the risk of random type of signaling errors especially in corrosive environment.

### THE RESULTING EFFECT:

If the control boards do not work properly, there is a very high risk of IGBT damages in the inverter units because of:

1. Wrong timing of control pulses.
2. Low or short control pulses.
3. Power supply failures
4. Random type of signaling errors



Picture 5. NGDR control pulses specified characteristic curve (left) and degraded waveform (right).

### WHERE USED:

All ACS600 Drives

# ANEXO 05 – RELATÓRIO DE INSPEÇÃO DE MP BASEADA NA CONDIÇÃO, CMMS PORTOBELLO S.A.

INSPECTOR: Manoel  
 DATA: 13/01/2015

INSPEÇÃO REVESTIMENTO MOINHO CONTINUO

Portobello



# ANEXO 06 – DATA SHEET, PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE CONTADORES ELÉTRICOS.

## Contadores e combinações de contadores Contadores para manobra de motores



### Contadores 3RT1

#### Dados técnicos

##### Vida útil dos contatos principais

As curvas características mostram a vida útil dos contatos de contadores na manobra de cargas trifásicas resistivas e indutivas (AC-1/AC-3) em função da corrente de desligamento e da tensão nominal. As curvas estão baseadas em comandos arbitrários isto é, assíncronos com a rede de alimentação.

A corrente nominal  $I_n$  conforme categoria de emprego AC-4 (Desligamento de 6 vezes a corrente nominal) foi projetada para uma vida útil de no mínimo 200 000 manobras.

Se vida útil menor for suficiente a corrente nominal  $I_n$  AC-4 pode ser aumentada.

Existindo um serviço misto isto é, funcionamento normal (desligamento da corrente nominal de acordo com a categoria de emprego AC-3) com serviço intermitente (desligamento de múltiplas vezes a corrente nominal conforme categoria de emprego AC-4) a vida útil dos contatos deve ser calculada de acordo com a fórmula a seguir:

$$X = \frac{A}{1 + \frac{C}{100} \left( \frac{A}{B} - 1 \right)}$$

Na fórmula:

X Vida útil dos contatos em funcionamento misto em números de manobras

A Vida útil dos contatos em funcionamento normal - AC-3 ( $I_n = I_n$ ) em número de manobras

B Vida útil dos contatos em funcionamento - AC-4 ( $I_n =$  múltiplo de  $I_n$ ) em número de manobras

C O número de manobras intermitentes em relação ao número de manobras totais em porcentagem

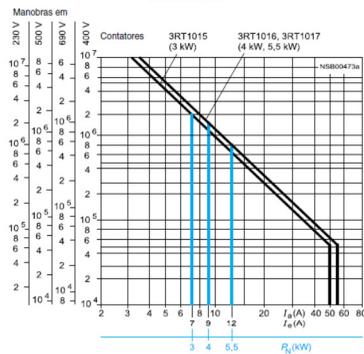
No diagrama:

$P_n$  = Potência nominal de motores trifásicos com motor em curto-circuito (gaiola) em 380/400 V

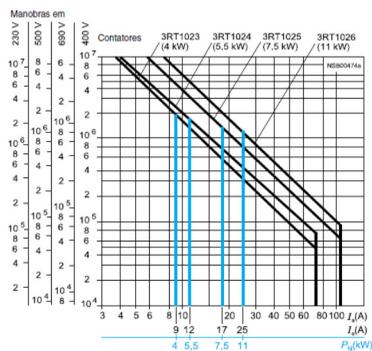
$I_n$  = Corrente de desligamento

$I_n$  = Corrente nominal

#### Tamanho S00



#### Tamanho S0



# ANEXO 07 - DATA SHEET, PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DOS ROLAMENTOS.

## Fórmula da vida nominal ajustada

Na fórmula de vida da pág. 28

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

é considerada a influência das cargas sobre a vida de um dado rolamento. Nas aplicações convencionais onde se empregam os rolamentos relacionados neste catálogo, o cálculo da vida nominal  $L_{10}$  é adequado, uma vez que as recomendações relativas à vida requerida estão baseadas na experiência, e de fato já levam em consideração certos fatores, tais como lubrificação.

Entretanto, pode ser conveniente, em certos casos, considerar com mais detalhes outros fatores que influenciam a vida do rolamento. Com este objetivo a ISO introduziu em 1977 a fórmula de ajuste da vida nominal

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 \left(\frac{C}{P}\right)^p$$

ou simplesmente

$$L_{na} = a_1 a_2 a_3 L_{10}$$

onde

$L_{na}$  = vida nominal ajustada, milhões de revoluções  
(o sub-índice n representa a diferença entre 100 % e a confiabilidade requerida<sup>1)</sup>)

$a_1$  = fator de ajuste de vida, para confiabilidade

$a_2$  = fator de ajuste de vida, para material

$a_3$  = fator de ajuste de vida, para condições de funcionamento

Um cálculo de vida nominal ajustada pressupõe que as condições de funcionamento estão bem definidas, e que as cargas sobre os rolamentos possam ser calculadas com exatidão, ou seja, o cálculo

deve considerar a composição de cargas, flexões do eixo, etc.

Para a confiabilidade geralmente aceita de 90 % e para os materiais aos quais corresponde o valor C e condições de funcionamento normais, temos  $a_1 = a_2 = a_3 = 1$ , com o que as duas fórmulas de vida tornam-se idênticas.

### Fator de ajuste de vida $a_1$

O fator  $a_1$ , para confiabilidade, é usado para determinar outras vidas diferentes da vida  $L_{10}$ , ou seja, vidas que são alcançadas ou superadas com uma probabilidade maior que 90 %. Na tabela 6 são dados os valores de  $a_1$ .

### Fator de ajuste de vida $a_2$

O fato da SKF empregar normalmente aços de melhor qualidade do que aqueles adotados pela norma ISO 281/I-1977, determinou uma nova capacidade de carga dinâmica para os rolamentos SKF. Portanto, quando forem usadas as novas capacidades de carga (valores C) deve-se adotar  $a_2 = 1$ . Poderão ser usados valores mais altos para o fator  $a_2$  se os rolamentos SKF forem feitos de aços especiais; neste caso, consultar a SKF.

Tabela 6 Valores do fator  $a_1$

Confiabilidade %	$L_{na}$	$a_1$
90	$L_{10a}$	1
95	$L_{5a}$	0,62
96	$L_{4a}$	0,53
97	$L_{3a}$	0,44
98	$L_{2a}$	0,33
99	$L_{1a}$	0,21

<sup>1)</sup> Por confiabilidade entende-se a probabilidade do rolamento alcançar ou superar uma determinada vida

# ANEXO 08 - DATA SHEET, NORMA ISSO 13849, PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL PARA COMPONENTES DE SISTEMAS DE SEGURANÇA.

## Compliance with safety principles, application notes

The products listed in the following are suitable to be used in safety-related parts of a control system according to EN ISO 13849-1:2006.

According to EN ISO 13849-2:2008, these products satisfy the

- ▶ **basic** safety principles
- ▶ **well-tried** safety principles.

For evaluating and interpreting the control system's reliability, use the following characteristics for the products:

$MTTF_d$  = see table page 4 to 9

$T_M$  = 20 years (maximum mission time according to EN ISO 13849-1:2006)

In this use, please ensure compliance with the subsequently specified application notes!

### Application notes:

The additional basic safety principles according to EN ISO 13849-2:2008 for the implementation and the operation of the products are to be complied with.

- ▶ For operation and handling of the products, comply with the information in the data sheet and the operating instructions.
- ▶ Only use the hydraulic fluids specified in the data sheets and comply with the oil cleanliness class for the whole mission time.
- ▶ If on/off spool valves are not actuated for a longer period of time, the spool may get stuck. We therefore recommend switching the valve regularly, at reasonable time intervals.
- ▶ If you use the product for safety-related structures with higher categories (2 to 14) according to EN ISO 13849-1:2006 section 6, consider the requirements (e. g. CCF, DC, PLR, software, systematic failures) specified there.
- ▶ According to EN ISO 13849-1:2006, the maximum mission time - complying with the oil cleanliness according to ISO 4406:1999,  $T_M$  = 20 years. In terms of preventive maintenance, it is recommended replacing the components already before expiry of the maximum mission time.
- ▶ **Industrial valves are usually designed for 10 million switching cycles. If the maximum number of switching cycles is exceeded within the mission time, accordingly shorter replacement intervals are to be determined.**

### Conversion of $MTTF_d$ into $B_{10d}$

according to EN ISO 13849-1:2006:

$$MTTF_d = \frac{B_{10d}}{0.1 \times n_{op}}$$

$B_{10d}$  = Mean number of cycles in which up to 10 % of the components have failed in a dangerous manner.

$n_{op}$  = Mean number of annual actuations.

### Use of valves and components with spool position monitoring:

- ▶ The signal of the position switch must not be used for direct activation of a safety-related control function!

### Use of valves with integrated electronics as safety-related parts of control systems:

- ▶ In case the safety function is required, the voltage supply of the valve electronics is to be switched off by a suitable switching element with appropriate reliability. In the table (page 5 and 8), these valves are marked with the comment "Switch off OBE voltage supply".
- ▶ If persons have to enter the hazard zone with activated valve electronics, additional measures for guaranteeing their safety have to be taken for the reasons specified above.

# ANEXO 09 - DATA SHEET, PARA CÁLCULO DE VIDA ÚTIL DE VÁLVULAS HIDRÁULICAS, “BOSCH REXROTH”.

4/10 MTTFd values | Reliability characteristics

## Directional on/off valves

Type	Size	Data sheet	MTTFd value according to EN ISO 13849 in years / (In switching cycles)	Spool position monitoring <sup>1)</sup>	Admissible spool types <sup>2)</sup> ; maximum longitudinal spool acceleration	Exceptions/ limitations
.WE 6 .6X/.EG...	6	23178	300 ( $B_{10} = 20$ million $B_{10d} = 40$ million)	Optional QM,QR	A, C, D, B, Y, E, F, G, J, L, M, P, Q, R, T, U, W, A9, B9, E67, U10, Y11, J2, X7, X34, X139, L42; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	Impulse spool design "O" and valves for alternating voltage "W" <sup>4)</sup>
.WE ...73-3X/...A12...; .WE ...73-6X/...A12...	6, 10	23183	150	Optional QM	A73, D73, B73, Y73, E73, G73, J73, R73, W73; < 10 g/11 ms <sup>3)</sup>	-
.WE 10 .3X/.C...; .WE 10 .4X/.C...	10	23327	150	Optional QM	A, C, D, B, Y, E, F, G, J, L, M, P, Q, R, T, U, W, U10; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	Impulse spool design "O" and valves for alternating voltage "W" <sup>4)</sup>
.WE 10 .5X/.E...	10	23340	300 ( $B_{10} = 20$ million $B_{10d} = 40$ million)	-	A, C, D, B, Y, E, F, G, J, L, M, P, Q, R, T, U, W, U10; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	
5-.WE 10 .3X/.C...	10	23351	150	Optional QM	A, C, D, B, Y, E, F, G, J, L, M, P, Q, R, T, U, W, J2, X84, E67; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	Valves for alternating voltage "W" <sup>4)</sup>
Z4WE 6 .-3X/E...	6	23193	150	Optional QM	D24, D27, E51, E53, E56, E63, E68, E127, E129, E130, E131, E132, E134, E135, E136, E137, E141, E144, E145, E146, E166, X188; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	
.SEC 6 .1X/.C...	6	22035	150	-	E69A, E35, E100, E13, E22, EA, EB, E, E61, E40, E89, E18	630 bar version
M-.SED 6 .-1X...	6	22049	150	Optional QMA, QMB	PK, NK, UK, CK	
M-.SED 10 .1X...	10	22045	150	Optional QMA, QMB	UK, CK	630 bar version
M-.SEW 6 .-3X...	6	22058	150	Optional QMA, QMB	P, N, U, C	
M-.SEW 10 .1X...	10	22075	150	Optional QMA, QMB	U, C	630 bar version
Z4SE 10 .-1X/C	10	<sup>9)</sup>	150	-	A, B, E	
.WEH .-./..6E...; .WH ...	10 to 32	24751	100 150	Optional QM	A, B, C, D, E, F, G, H, J, K, L, M, P, Q, R, S, T, U, V, W, Y, Z, U10; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	Impulse spool design type "O"; hydraulic spool return
Z4WEH ...; Z4WH ...	10 to 22	24753, 24761, 24768	100 150	Optional QM	E62, E63, E68, E50, E51, E52; < 15 g/11 ms <sup>3)</sup>	Valves for alternating voltage "W" <sup>4)</sup>

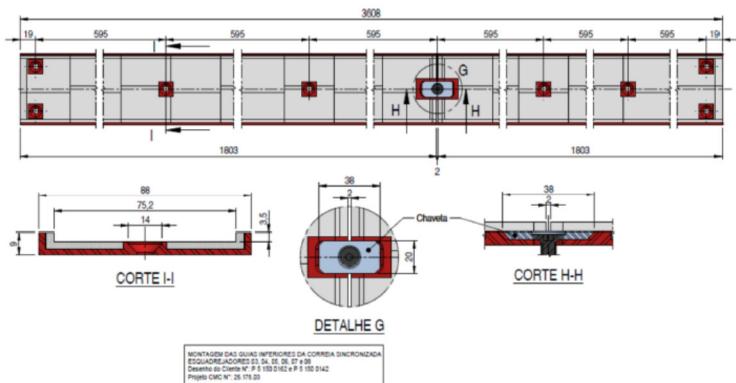
Explanation of the footnotes see page 9.

Further MTTFd values for products and special versions not listed here upon request!

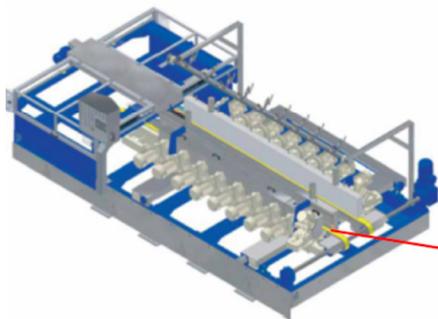
# ANEXO 10 – RELATÓRIO DOS REGISTROS DE FALHA, BOMBAS HIDRÁULICA UTILIZADAS NAS PRENSAS, CMMS PORTOBELLO.

HISTÓRICO DE FALHA BOMBA HIDRÁULICA - FONTE: CMMS ENGINMAN					
Equipamento	VU dia	VU Ciclo	VU Millions Cols	N. Falhas	Confiabilidade
PH 20	29	668160	0,66816	1	99%
PH 19	31	714240	0,71424	2	98%
PH 20	34	783840	0,78384	3	97%
PH 12	35	1098000	1,098	4	96%
PH 18	52	1198080	1,19808	5	94%
PH 10	107	1232640	1,23264	6	93%
PH 13	76	1522400	1,5224	7	92%
PH 10	153	1762560	1,76256	8	91%
PH 19	80	1843200	1,8432	9	90%
PH 09	191	2200320	2,20032	10	89%
PH 24	72	2622880	2,62288	11	88%
PH 19	125	2980000	2,98	12	87%
PH 19	130	2995200	2,9952	13	86%
PH 28	217	3124800	3,1248	14	84%
PH 13	159	3205440	3,20544	15	83%
PH 04	109	3267040	3,26704	16	82%
PH 28	265	3816000	3,816	17	81%
PH 10	360	4147200	4,1472	18	80%
PH 33	269	4360960	4,36096	19	79%
PH 00	212	4279200	4,2792	20	78%
PH 09	409	4711680	4,71168	21	77%
PH 13	236	4757760	4,75776	22	76%
PH 18	217	4949680	4,94968	23	74%
PH 10	435	5011200	5,0112	24	73%
PH 09	447	5140440	5,14044	25	72%
PH 19	230	5299200	5,2992	26	71%
PH 29	263	5302480	5,30248	27	70%
PH 16	244	5623760	5,62376	28	69%
PH 19	269	6197760	6,19776	29	68%
PH 19	271	6243840	6,24384	30	67%
PH 40	376	6497280	6,49728	31	66%
PH 41	376	6497280	6,49728	32	64%
PH 15	297	6842880	6,84288	33	63%
PH 19	301	6935040	6,93504	34	62%
PH 24	207	7183200	7,1832	35	61%
PH 15	312	7188480	7,18848	36	60%
PH 31	315	7257600	7,2576	37	59%
PH 20	317	7303680	7,30368	38	58%
PH 30	381	7480760	7,48076	39	57%
PH 12	272	7833600	7,8336	40	56%
PH 10	685	7891200	7,8912	41	54%
PH 31	345	7948800	7,9488	42	53%
PH 15	351	8637040	8,63704	43	52%
PH 20	405	9131200	9,1312	44	51%
PH 09	825	9504000	9,504	45	50%
PH 18	415	9561600	9,5616	46	49%
PH 11	485	9776000	9,776	47	48%
PH 14	462	10444800	10,4448	48	47%
PH 10	952	10967040	10,96704	49	46%
PH 28	786	11318400	11,3184	50	44%
PH 11	574	11571840	11,57184	51	43%
PH 18	528	12165320	12,16512	52	42%
PH 17	529	12188160	12,18816	53	41%
PH 12	426	12268800	12,2688	54	40%
PH 21	359	12407040	12,40704	55	39%
PH 22	361	12476160	12,47616	56	38%
PH 34	838	13279200	13,2792	57	37%
PH 32	923	13291200	13,2912	58	36%
PH 20	591	13816640	13,81664	59	34%
PH 29	705	14222800	14,2228	60	33%
PH 19	632	14561280	14,56128	61	32%
PH 11	743	14978880	14,97888	62	31%
PH 16	653	15045120	15,04512	63	30%
PH 13	752	15183840	15,18384	64	29%
PH 11	776	15644160	15,64416	65	28%
PH 21	461	15932160	15,93216	66	27%
PH 21	463	16002280	16,00228	67	26%
PH 31	724	16080640	16,08064	68	24%
PH 21	483	16692480	16,69248	69	23%
PH 19	747	17210880	17,21088	70	22%
PH 24	539	17236640	17,23664	71	21%
PH 28	1204	18777600	18,7776	72	20%
PH 29	892	19998720	19,99872	73	19%
PH 30	1007	20301120	20,30112	74	18%
PH 21	596	20397704	20,39776	75	17%
PH 20	899	20712960	20,71296	76	16%
PH 34	1438	22777920	22,77792	77	14%
PH 17	1067	24353280	24,35328	78	13%
PH 14	1092	25119680	25,11968	79	12%
PH 18	1141	26086640	26,08664	80	11%
PH 35	2397	27613440	27,61344	81	10%
PH 16	1199	27624960	27,62496	82	9%
PH 36	2548	28811760	28,81176	83	8%
PH 19	1720	29044000	29,044	84	7%
PH 18	1351	31127040	31,12704	85	6%
PH 38	2056	35276800	35,2768	86	4%
PH 29	1811	36509760	36,50976	87	3%
PH 22	1083	37424640	37,42464	88	2%
PH 37	2250	38880000	38,88	89	1%
PH 12	1399	40291200	40,2912	90	0%

# ANEXO 11 - DATA SHEET, PROJETO GUIAS DOS ESQUADREJADORES COM REVESTIMENTO ALTA-ALUMINA.



## PROJETO DA GUIA DE DESLIZAMENTO COM REVESTIMENTO DE ALTA-ALUMINA



EQUIPAMENTO ESQUADREJADOR



FOTO DA GUIA COM REVESTIMENTO  
DE ALTA-ALUMINA

## ANEXO 12 – COMENTÁRIOS DOS ESPECIALISTAS DE MANUTENÇÃO, A PARTIR DA LEITURA DO ARTIGO.

Nome	Graduação	Instituição	Especialização	Empresa	Cargo
Rafael Pinto Lucena	Engenheiro Mecânico	UFRG	Mestre	Braskem - Huston EUA	Engenheiro de Confiabilidade
Nilo de Castro Maia	Engenheiro Mecânico	Unicamp	Mestre	Karsten	Diretor
Alexandre Simon Shyu	Engenheiro Mecânico	UFSC	Graduado	Portobello	Trainee
Paulo Brisolla Tavares	Engenheiro Mecânico	UNIMEP	Pós/MBA	TUPER	Gerente de Manutenção
Sandro R. Roxo de Oliveira Franca	Engenheiro Produção Mecânica	UFBA	Mestre	Braskem	Gerente de Manutenção
Rui Aviz	Engenheiro Produção Mecânica	UFSC	Graduado	Portobello	Trainee
John Suzuki	Engenheiro Mecânico	ITA	Pós/MBA	Portobello	Diretor
Luiz Verrí	Engenheiro Eletricista	UNICAMP	Mestre	Petrobras	Gerente de Manutenção
Giovani Maia	Engenheiro Eletricista	UFPR	Pós/MBA	MAC - Consultoria	Diretor
Luiz Felipe	Engenheiro Mecânico	UFSC	MBA	Tractebel	Gerente de Manutenção
Cesar Augusto Felix	Engenheiro Produção	UNISINOS	MBA	Cegelec	Gerente de Manutenção
Fábio Mendes	Engenheiro Mecânico	UFSC	Graduado	Tractebel	Engenheiro de Manutenção

### Rafael Pinto Lucena – Eng. de Confiabilidade – Braskem Huston/EUA

“Gostei do trabalho está com uma abordagem do "negocio" não limitando-se a manutenção, a manutenção existe para atender o negócio.

Sei que várias janelas de oportunidades vão abrindo quando se faz um trabalho desses, talvez para deixar como oportunidade a ser estudada no futuro, ou até no trabalho final do mestrado, se achar melhor, pode colocar a oportunidade de atuar na melhoria de 1 componente específico de forma a melhorar o resultado global. Por exemplo, a troca do rolamento X e o item de menor vida útil, uma atuação específica nesse item, revendo lubrificação, matérias, enfim aumentando sua vida útil, pode ter um impacto muito grande no "negocio" pois aumenta a utilização residual dos demais itens, que "perdem vida útil em função do custo da indisponibilidade.

Não para agora, mas no teu trabalho de conclusão fica muito legal, até para mostrar dentro da Portobello, de uma forma que o pessoal entenda, ter uma linha como exemplo, tipo assim, como era, como ficou utilizando os dados reais, e após a implementação de melhorias pontuais (baixo valor e alto impacto em função do custo da indisponibilidade.

Outra coisa, que a manutenção é bastante demandada e que teu modelo ajuda na decisão, é em caso de alteração de cenário de venda, mercado em baixa, o custo da "não produção" muda e pode ser mais vantajoso alterar a estratégia de manutenção - quando vale a pena deixar quebrar?

Outra vantagem do teu trabalho é mostrar que a manutenção ajuda a salvar R\$!!! Está no teu trabalho, mas se tu conseguir destacar esse ponto, acho que é a cereja do bolo. A visão, ainda em prática no mercado,

é que manutenção é despesa, teu trabalho pode mostrar que a manutenção é parceiro estratégico, alinhado com os objetivos da organização e stakeholders.”

**Nilo de Castro Maia – Diretor – Karsten**

“O artigo mostra claramente uma ferramenta útil e de fácil aplicação para otimizar políticas de manutenção preventiva em sistemas ou linhas de produção longos e complexos. Estes sistemas normalmente requerem paradas grandes e custosas e têm impacto tão profundo nos volumes e custos que muitas vezes fazem parte do planejamento anual das empresas. Acredito que a ferramenta desenvolvida poderá ser usada como ponto de partida para a análise e posterior definição da melhor estratégia a ser utilizada. Pelo fato de trabalhar com mais de um sistema permite uma análise mais completa da cadeia, o que permitirá otimizar custos e aumentar a disponibilidade total.”

**Alexandre Simon Shyu – Trainee de Engenharia – Portobello S.A.**

“Bom na minha visão caso fosse gestor de manutenção e fizesse uso do software OtimizaMP:

Acredito que uma vez detendo o conhecimento da vida útil dos componentes/equipamentos, é de extrema importância ter uma forma de programar com eficácia a troca dos mesmos. Assim, a capacidade de cálculo do software apresenta resultados extremamente satisfatórios para análise da programação das preventivas e até mesmo a informação se é interessante realizar a preventiva naquele equipamento. Penso que como gestor essa informação é essencial e todas essas iterações realizadas no software não poderiam ser realizadas a mão ou demandariam muito tempo. Além do mais a o software tem a capacidade de incluir vários parâmetros, condições limites e requisitos que pesam muito na hora da programação e sem o software não existiria uma forma de otimizar tão bem esses diversos parâmetros. Atrelado a isso a fundamentação base do OtimizaMP serve como um guia/justificativa quando se realiza o orçamento da manutenção e quando vende-se a ideia da importância da manutenção para os níveis mais altos da empresa.

Por fim, vejo que o software demanda muito do “background” do usuário e como bem ele conhece a o sistema produtivo para que possa interpretar os resultados e saiba quais parâmetros de entrada devem ser inseridos no programa, e a qualidade dos resultados tem uma relação

direta com a confiabilidade do banco de dados da vida útil de cada componente.”

**Paulo Brisolla Tavares – Gerente de Manutenção - Tuper**

“Realmente este artigo seu é muito bom mesmo. Gostei bastante e gostaria inclusive de convidá-lo para apresentá-lo numa das Quintas-Feiras a noite aqui na UNIVILLE de São Bento do Sul na turma do 5º ano de Engenharia Mecânica na disciplina de MI – Manutenção Industrial que eu dou aula.”

**Sandro R. Roxo de O. França – Gerente de Manutenção - Braskem**

“Primeiramente, gostaria de destacar sinceramente que o trabalho é muito bom, interessante e útil. Gostei muito mesmo! Uma primeira razão é que seu foco é na otimização de custos, vis-a-vis o desafio de equilibrar as necessárias práticas de manutenção preventiva, com todos os custos envolvidos, inclusive da vida residual. Esse equilíbrio é fundamental, pois a racionalização de custos na gestão de ativos é um dos fatores básicos de contribuição á uma das vertentes chaves de governança de gestão das organizações: a sua Sustentabilidade.

Portanto, o aprofundamento técnico no planejamento da manutenção, que permita uma visão profunda dos ciclos de vida e suas expectativas de falhas são investimentos que poderão trazer ganhos reais de disponibilidade x gestão de custos de manutenção, na perspectiva de Sustentabilidade. Dessa mais, mais do que um ...”fator decisivo na viabilidade operacional de um equipamento ou processo...”, esse modelo apresentado pode ser decisivo na Sustentabilidade da organização e modelo de negócio.

Mas gostaria muito de destacar, embora com todos esses comentários, que particularmente adorei o artigo. Seja pela sua utilidade no equilíbrio disponibilidade x custos, seja no ganho de conhecimento técnico, pelo aprofundamento no tema.”

**Rui Aviz – Eng. Trainee – Portobello S.A.**

“Fiz alguns comentários do teu artigo, são só alguns detalhes pra você avaliar. Quanto ao conteúdo, reafirmo a excelente impressão que tive quando você me explicou ai na empresa.

Bacana a classificação dos tipos de manutenção, simples e clara!  
Figura 02: Gostei do Gráfico... Probabilidade da falha.”

**John SuzuKi – Diretor – Portobello S.A.**

“Gostei muito do tema e é perceptível que você tomou o cuidado de tratar do assunto de uma forma realística e prática.

É interessante ver que o modelo permite estabelecer um ponto ótimo, mas também verificar que, pelo gráfico, existe uma faixa onde a variação de periodicidade implica em pouca variação no custo de manutenção, mas também que a partir de alguns limites o aumento de custo é exponencial. Do ponto de vista prático, ambas conclusões (do ponto ótimo e da faixa de pouca variação) são muito úteis.

Como evolução, realmente verificar a utilização prática e amigável em sistemas mais complexos (que representa melhor o mundo real), levantando as vantagens mas também as desvantagens/desafios, parece ser um bom caminho.”

**Luiz Alberto Verri – Gerente de Manutenção - Petrobras**

“Eu achei muito interessante; mas gostaria de fazer uma colocação, que na verdade é uma pergunta:

A discussão que remete o seu artigo era uma discussão muito popular quando a preventiva era a grande forma de atuar fora da corretiva. Com o avanço da preventiva sob condição, que alguns autores subdividem em preditiva (com o uso de medições de algumas variáveis) e detectiva (com a observação cautelosa e aguda de operadores e mantenedores), me parece que a preventiva sistemática (por tempo) perdeu sua importância.

Será verdadeira essa minha percepção?

Se não for (talvez para seu tipo de indústria a MP por tempo seja uma necessidade), seria interessante explicitar que para equipamentos do tipo X, Y e Z (dizer quais os tipos), é muito difícil detectar defeitos (pela sob condição) que irão se transformar em falhas, e ao mesmo tempo, temos com relativa facilidade disponíveis os MTTR e a vida útil média de seus componentes (eu particularmente acho difícil esses dados; mesmo no tempo em que a preventiva sistemática era incontestada, esses dados eram muito difíceis de se obter). Colocando essas informações no artigo, ele ficaria bem mais próximo da vida prática, e portanto muito mais útil.”

### **Giovane Maia – Diretor – MAC consultoria manutenção**

“Em primeiro lugar, quero parabenizar você pelo belo artigo, cuidadoso com as palavras, e atingindo detalhes em pontos importantes da abrangência dada ao conteúdo.

Observei que a proposta de avaliação da periodicidade da preventiva prescreve requisitos de maturidade importantes, tanto das empresas, como dos seu modelo de gestão, nível técnico das equipes, entre outros características de cunho estrutural, como por exemplo a necessidade de pessoas e competências que pensem no médio e longo prazos, dentro do cotidiano da manutenção.

Sendo assim, visando agregar ao seu artigo, sugiro os seguintes pontos para a sua ponderação:

Estudar a Inclusão de um tópico referente aos pré-requisitos necessários de estrutura organizacional para que este trabalho seja efetivamente aplicado;

Estudar a Inclusão de um sub-item na parte da conclusão, denominado recomendações para a aplicação, que diferentemente dos pré-requisitos (citados acima), indicam os cuidados com pontos específicos, alternativas de ferramentas para o cálculo das variáveis, visão de projeto piloto, treinamentos recomendados, literaturas especiais para consulta, e também indicar o seu interesse em receber feed-backs para os resultados de colegas que tenham se inspirado em seu belo artigo, de forma a propor sinergia em torno do tema e sua aplicação.”

### **Cesar Augusto Felix – Gerente de Manutenção – Cegelec**

“Tive a oportunidade de ler seu artigo, e fiquei contente pelo que a sua Modelagem Matemática virá a representar, a nível de contribuição, para as tomada de decisões nas empresas, onde conseguiremos através da reunião e estruturação de variáveis dentro de um sistema, otimizar a periodicidade das manutenções preventivas, em função do custo. Sei o quanto não é fácil gerenciar a manutenção de uma grande empresa e ter disponibilidade e dedicação, que tivesses para elaborar um trabalho tão rico. Parabéns.”

### **Fábio Mendes – Eng. de Manutenção – Tractebel Energia**

“Muito interessante o artigo! Aproveito para parabenizar o Rodrigo Correa pelo trabalho! Gostaria de receber a dissertação de mestrado do Rodrigo sobre o tema. Temos interesse em ler o documento e, posteriormente, discutir o assunto com vocês.”

## ANEXO 13 – ARTIGO DESENVOLVIDO DURANTE A PESQUISA.

### TÍTULO: MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Este artigo foi enviado para editora da revista “GESTÃO & PRODUÇÃO” da UFSCar, que foi aprovado e possui previsão de publicação até final de 2015. Conforme e-mail abaixo:

**Rodrigo Fernandes Correa**

**De:** Gestão & Produção <no-reply@submitcentral.com.br>  
**Enviado em:** sexta-feira, 19 de junho de 2015 15:08  
**Para:** rodrigo.correa@portobello.com.br  
**Cc:** acires.dias@ufsc.br  
**Assunto:** Gestao a Producao - GP-2001-15.R1: Parecer Final  
**Prioridade:** Alta

Prezado(a) Sr. Rodrigo Fernandes Corrêa,

Tenho o prazer de lhe informar que o artigo abaixo referenciado foi ACEITO para publicação na Gestão & Produção, em conformidade com o parecer final que lhe é encaminhado.

Parecer final:  
\*\*\*\*\*

Aceitar sem necessidade de revisão

Os autores realizaram todas as alterações solicitadas.  
\*\*\*\*\*

Código: GP-2001-15.R1  
Título: MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA Autores: Sr. Rodrigo Fernandes Corrêa, Prof. Dr. Acires Dias

Agradecemos sua contribuição, e esperamos continuar contando com a sua valiosa colaboração.

Na oportunidade, renovamos-lhe nossos protestos de distinta consideração.

Atenciosamente,

-----  
Sandra Marcia Gonçalves Pereira  
Assistente Editorial  
-----

revista Gestão & Produção  
ISSN 0104-530X versão impressa  
ISSN 1806-9649 versão online

Departamento de Engenharia de Produção  
Caixa Postal 676  
13565-905 São Carlos SP Brasil

Tel.: +55 16 3351-8471 ramal 245  
Fax: + 55 16 3351-8240  
<http://www.dep.ufscar.br/revista/>

# MODELAGEM MATEMÁTICA PARA OTIMIZAÇÃO DE PERIODICIDADE NOS PLANOS DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

**Rodrigo Fernandes Corrêa**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
EMC - Departamento de Engenharia Mecânica  
[rodrigo.fc@posgrad.ufsc.com.br](mailto:rodrigo.fc@posgrad.ufsc.com.br)

**Acires Dias**

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
EMC - Departamento de Engenharia Mecânica  
[acires@ufsc.com.br](mailto:acires@ufsc.com.br)

**Resumo:** *Propõe-se, com este trabalho, apresentar o desenvolvimento de um modelo de otimização de periodicidade dos planos de manutenção preventiva de ativos industriais, por meio do estudo da vida útil dos sistemas, fundamentados pelo uso, tempo, condição, custos. A modelagem matemática utilizada foi implementada computacionalmente por meio do MATLAB. O objetivo do modelo é proporcionar maior confiabilidade às instalações, alinhadas ao resultado financeiro do negócio. A linha de pesquisa está integrada ao processo de gerenciamento de manutenção centrada em confiabilidade (MCC).*

**Palavras chave:** *Manutenção preventiva, periodicidade, vida útil, modelagem matemática, custo residual, custo de manutenção.*

## 1. Introdução

O custo de manutenção é fator decisivo na viabilidade operacional de um equipamento ou processo. Dentro do contexto industrial, o custo de manutenção chega a representar, em média, 20% dos custos fixos dos produtos.

Um dado publicado na ABRAMAN (2011) mostra que o custo de manutenção da indústria brasileira representa, em média, 3,95 % do PIB brasileiro.

Várias estratégias de manutenção são empregadas nos complexos industriais, tendo, como destaque, modelos de gestão que buscam ações preventivas como TPM (Total Productive Maintenance), RCM (Reliability Centered Maintenance), preventiva baseada na condição, no tempo, em paradas, dentre outras. De acordo com Smith (1993), o grande desafio para otimização do custo nessas estratégias está em “o que fazer” e “quando fazer”; ou seja, qual escopo e com que periodicidade. A definição correta de uma periodicidade define o custo em todas as técnicas preventivas.

Esta abordagem é muito importante para as empresas motivando diversos estudos. Christer (1998) abordou o tema sobre otimização da periodicidade de manutenção preventiva, a partir da taxa de falha dos equipamentos; Ferreira (2007) abordou a modelagem matemática usando método de multicritério, rede bayesianas, para otimizar a utilização de técnicas de manutenção mais apropriadas a um determinado processo preventivo/corretivo. Já Hai (2014) tratou da modelagem matemática com algoritmo genético para verificar a dependência de componentes que sofrem manutenção preventiva e que afetam positivamente e negativamente o custo de manutenção.

Dada a importância da otimização da periodicidade nas manutenções preventivas, objetiva-se, com este trabalho, desenvolver um modelo matemático que auxilie no dimensionamento de periodicidade nos planos de manutenção preventiva (MP) e responder questionamentos de pesquisa como:

- ✓ Qual a influência da diferença entre o MTTR corretiva e MTTR preventivo no custo de manutenção?
- ✓ Qual o impacto financeiro das manutenções preventivas em função do custo da hora cessante?

- ✓ Qual a influência do custo residual (devido troca prematura de componentes) no custo de manutenção?

- ✓ Qual a periodicidade de preventiva que proporciona menor custo de manutenção ao longo da vida útil do processo?

Troca prematura é um termo utilizado neste trabalho para designar substituição do item antes que atinja o final da vida útil.

## 2. Periodicidade no Plano MP

Apesar de a manutenção preventiva possibilitar antecipação da correção da avaria, antes que a falha ocorra, ela também gera indisponibilidade no processo, pois para cada evento de manutenção existe a necessidade de parada do processo, fazendo com que a configuração da periodicidade e do tempo de execução de uma manutenção preventiva se torne complexa, devido a esse e a outros fatores como:

- ✓ A periodicidade de manutenção preventiva de cada equipamento deve ser combinada com todos os equipamentos do processo, para gerar um melhor aproveitamento do tempo de parada do processo.
- ✓ Dificuldade de definir quais componentes serão trocados, a partir do conhecimento da vida útil dos mesmos.
- ✓ Dimensionamento de mão de obra (MO) para a execução das atividades.
- ✓ Concentração do maior número de atividades possíveis para aproveitar a parada do processo.

A definição da periodicidade ótima, que proporcione menor custo e maior confiabilidade nos sistemas, é um dos desafios da manutenção preventiva.

## 2.1. Definição da periodicidade na MP

Atuar de maneira conservadora em relação à confiabilidade gera um alto custo na manutenção devido à troca prematura de componentes e à utilização de MO de manutenção excessiva. A experiência de um dos autores, por 17 anos na manutenção industrial, em nível de mecânico de manutenção corretiva e preventiva, como planejador, analista, engenheiro, coordenador e gerente de manutenção, permitiu experimentar decisões que, para aumentar a confiabilidade, exigiram questionamentos, tais como: “intensifica-se a manutenção preventiva; aumenta-se o escopo ou reduz-se a periodicidade?”

Ao agir de maneira conservadora relativamente ao custo de manutenção, com o objetivo de obter um bom aproveitamento dos componentes para utilizar ao máximo sua vida útil, pode-se também comprometer a confiabilidade do sistema devido à incerteza existente quanto à vida útil de cada componente, (região de periodicidade 17 a 20 da Figura 01). Por consequência, haverá possibilidade de reduzir o custo da manutenção e elevar o custo do processo, devido à baixa confiabilidade, gerando indisponibilidade no processo.

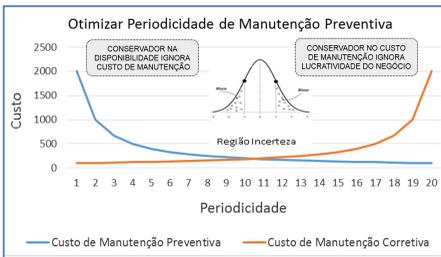


Figura 01 – Efeito dos custos na periodicidade de manutenção preventiva (CORRÊA, 2014).

Como indicado na Figura 01, a região da periodicidade ótima (entre 9 e 12), que proporcione melhor resultado financeiro do sistema, depende de vários fatores, como: custo da manutenção preventiva, lucratividade do processo e principalmente conhecimento da vida útil dos sistemas. Para isso é necessário um aprofundado controle estatístico das falhas e tempo de ocorrência.

Ainda conforme a Figura 01, a redução da periodicidade proporciona melhor confiabilidade, porém pode inviabilizar a lucratividade do processo em função do aumento dos custos de manutenção.

## 2.2. Vida útil na manutenção preventiva

Para Smith (1993), manutenção preventiva é a atuação dos serviços ou de tarefas de inspeção que tem sido planejada para a realização de pontos específicos no tempo e conservar a função de operação dos equipamentos ou sistemas.

Para Bertsche (2008), manutenção preventiva é um método de manutenção, onde as tarefas são realizadas preventivamente; ou seja, a um predeterminado tempo, ou depois de uma periodicidade determinada, ou de uma quantidade de horas de funcionamento essas atividades são executadas.

Para ambos os autores, a manutenção preventiva pode ser baseada no tempo, na condição ou na falha.

É baseada no tempo, quando for definido um tempo determinado de uso ou um número de ciclos para a execução de determinados reparos, ajustes ou substituição de componentes.

É baseada na condição quando aplicadas técnicas de inspeção visual, de rotina ou mais aprofundadas como técnicas de análise de vibração, análise termográfica, análise de óleo e ultrassom, também definidas como preditivas.

É baseada na falha, quando o reparo ocorrer após detectar a avaria. Considerando que a falha não danificará outros componentes e não gerará consequências à segurança e ao meio ambiente, planejam-se ferramentas, peças e MO e aguarda-se a ocorrência da falha para efetuar o reparo.

Essas ações preventivas são maneiras de prever o momento da falha do equipamento, ou seja, de prever o término de sua vida útil.

Conforme a Figura 02, quanto maior a intensidade da inspeção menor a incerteza da estimativa da vida do componente, até o ponto em que se possa atuar no instante exato da falha “baseado na falha”, quando, então, há um aproveitamento de 100% da vida útil do componente.

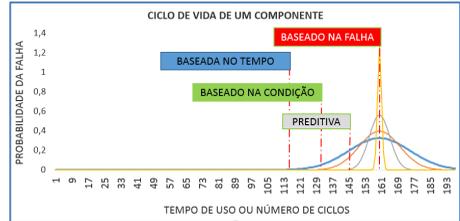


Figura 02 – Definição da periodicidade em função da vida útil (CORRÊA, 2014).

Ao deixar o componente falhar, na visão do custo de manutenção, tem-se um melhor aproveitamento do componente, com utilização de 100% da sua vida útil. Nesse sentido, não haveria um custo prematuro do componente, devido a esse aproveitamento; porém, na maioria das situações, a política de manutenção predominante seria a corretiva.

De acordo com Souza (2009), normalmente a avaliação da vida útil dos componentes é baseada na experiência passada e em dados estatísticos fornecidos pelos fabricantes. Em virtude da incompatibilidade de ajuste com o programa de produção, muitos equipamentos não podem ser revisados em determinadas épocas, sacrificando componentes que poderiam estar em boas condições caso fosse feita a troca no tempo certo. Razões como essas são as que geram as principais críticas da política de manutenção preventiva.

Observa-se, na Figura 03, a distribuição estatística de 10 sistemas para o equipamento esquadrejador; pode-se perguntar: como se pode definir a periodicidade de uma intervenção de um equipamento a partir da distribuição da vida útil de seus sistemas?

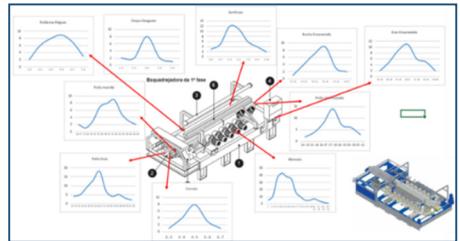


Figura 03 – Distribuição da função “vida útil” para os sistemas de um equipamento (CORRÊA, 2014).

Pode-se definir a periodicidade da manutenção preventiva deste equipamento, com base apenas no conhecimento da vida útil de cada sistema?

Caso a resposta fosse “sim”, haveria a definição das paradas do equipamento em função do tempo, gerando uma parada para cada “moda” da distribuição que representa a vida útil de cada sistema, conforme apresentado na Figura 04.

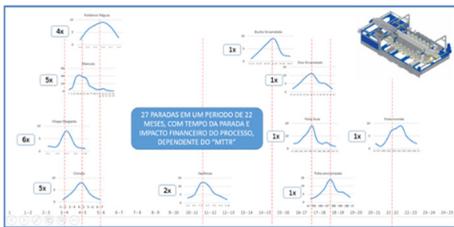


Figura 04 – Distribuição da função “vida útil” dos sistemas, distribuído no tempo (CORRÊA, 2014).

A Figura 04 apresenta 27 paradas no equipamento, para um período de 25 meses. Como neste exemplo não está sendo considerado o MTTR (tempo médio para reparo) e nem o custo da hora cessante do processo ao qual o equipamento está inserido, o custo gerado pela parada do processo não é significativo; ou seja, o custo de manutenção é gerado apenas pelos custos de peças e MO. É importante observar nesta figura, que alguns sistemas são substituídos mais de uma vez, ao longo da vida útil de avaliação, ou seja, o sistema que possui uma vida média de 4 meses para uma vida útil de avaliação de 25 meses é necessário ser substituído 6 vezes, gerando 6 paradas de processo.

Dessa forma, a definição de periodicidade mais favorável financeiramente é atuar de forma corretiva, efetuando os reparos em cada componente no término de sua respectiva vida útil. Número de ter-se uma indisponibilidade elevada devido ao grande número de paradas.

### 2.3. Avaliação da periodicidade

Para entender melhor as observações apresentadas anteriormente, observe-se a avaliação de uma prensa hidráulica, representada em seis sistemas com seus respectivos MTTR, vida útil e custo de reparo, conforme tabela 01.

PREENSA HIDRÁULICA			
Sistemas	MTTR (h)	Vu (h)	Custo Peças
Bombeamento	6	20000	R\$ 38.000,00
Filtragem	4	3000	R\$ 3.500,00
Fluido hidráulico	10	5000	R\$ 13.000,00
Cilindro principal	30	15000	R\$ 40.000,00
Comando hidráulico	15	25000	R\$ 20.000,00
Multiplicador	12	30000	R\$ 12.000,00

Tabela 01 – Representação de uma prensa hidráulica dividida em sistemas (CORRÊA, 2014).

Cada sistema possui uma vida útil estimada a partir de dados estatísticos com uma incerteza para cada valor apresentado: cada vida útil foi estimada a partir de uma distribuição probabilística podendo ser normal, lognormal ou Weibull.

Foi, também, considerado o custo residual do componente, i.e., o valor do componente que foi substituído sem ter sido utilizada sua vida útil por completo. A provável vida útil total menos a vida efetiva de trabalho.

Nesta abordagem trata-se o custo de manutenção do processo conforme equação abaixo:

- ✓  $CM$  – Custo de manutenção (R\$)
- ✓  $CCn$  – Custo do componente “n” (R\$)
- ✓  $CRn$  – Custo residual do componente “n” (R\$)
- ✓  $MTTRn$  – tempo médio para o reparo do sistema “n” (h)
- ✓  $CHC$  – Custo hora cessante do sistema (R\$/h)
- ✓  $CP$  – Custo da parada (R\$)
- ✓  $CP = (MTTRn \times CHC)$
- ✓  $CM = CCn + CRn + CP$

O custo residual visto na Figura 05 está representado por meio da função de uma reta descendente. Sempre que um componente for substituído antes do término de sua vida útil estimada, ao custo do

reparo estará sendo adicionado o custo residual do componente substituído.

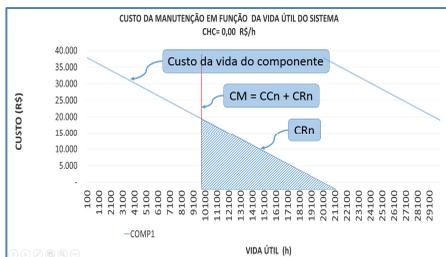


Figura 05 – Representação do custo residual para um sistema (CORRÊA, 2014).

No exemplo da Figura 05, o componente “COMP1” possui uma vida útil estimada de 20.000 horas. Optando-se por substituí-lo preventivamente antes das 20.000 horas, (conforme exemplo da Figura 05 que mostra uma troca em 10.000 horas), tem-se um custo residual. Quando se optar por substituir um componente ou fazer um reparo de um sistema antes do término de sua vida útil, o custo da manutenção será: o custo de um componente novo (peças necessárias para o reparo) mais o custo residual do sistema ou componente, que ainda não atingiu o término de sua vida útil.

Imagine-se, agora, que a presa hidráulica apresentada como exemplo na tabela 01 esteja inserida em um processo cujo custo da hora cessante do processo seja R\$ 0,00 por hora de parada. Nesse caso, pode-se parar o processo a qualquer momento sem efeito financeiro no processo. Do ponto de vista de custo de manutenção mais econômico, a opção seria substituir cada componente, somente no término de sua vida útil, havendo, assim, um maior aproveitamento dos sistemas e inexistência de custo residual nas manutenções.

Para essa situação, haveria 14 paradas no processo, totalizando 120 horas de parada, conforme apresentado na Figura 06: ao término da vida útil de cada componente, tem-se uma parada de processo para atuação da manutenção.

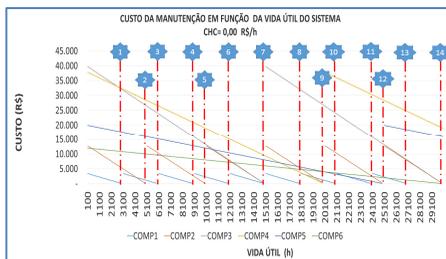


Figura 06 – Representação de custo residual dos seis sistemas de uma prensa (CORRÊA, 2014)

Para o exemplo apresentado na Figura 06, atua-se de acordo com a política de manutenção corretiva (MC), levando em consideração que a falha gerada no equipamento devido à utilização exaustiva da vida útil de cada equipamento não ocasiona nenhum efeito colateral, como: danos a outros sistemas, segurança ou meio ambiente. Do ponto de vista econômico, para o cenário apresentado anteriormente, atuar de maneira corretiva seria o mais viável para a lucratividade do processo.

Existem outros fatores que devem ser considerados nessa análise como; disponibilidade de MO para atuar corretivamente, especialidade da MO, ferramental, peças de reposição e MTTR, o que será exemplificado com maiores detalhes a seguir.

Pode-se fazer uma nova análise para o mesmo equipamento, sendo que desta vez ele esteja instalado em um processo cujo custo da hora cessante seja de R\$ 7.000,00 por hora de parada. Nesse caso, obviamente, a estratégia deveria ser outra.

Para entender melhor serão comparados os dois sistemas, representado na Figura 07, por COMP3 e COMP5.

Quando substituído o componente COMP3 com 15.000 horas, que representa sua vida útil, o custo da manutenção será, custo do componente COMP3 + custo de parada (CP).

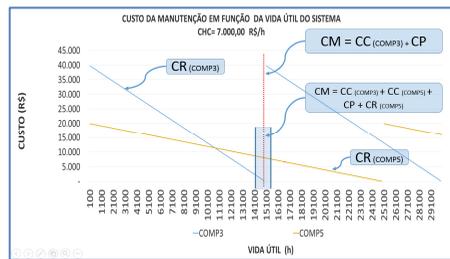


Figura 07 – Custo de manutenção com CHC maior que zero e custo residual (CORRÊA, 2014).

Se nesta intervenção se optasse em substituir também o componente “COMP5”, com o intuito de aproveitar a parada do processo, o custo desta manutenção seria: custo dos componentes COMP3 e COMP5 + custo da parada (CP) + custo residual do componente COMP5 (CRcomp5). De acordo com os dados apresentados na tabela 01, o custo desta manutenção seria:

$$CP = MTTR_{max} \times CHC = 15 \times 7000 = R\$ 105.000,00.$$

$$CM = CC_{comp3} + CC_{comp5} + CP + CR_{comp5}$$

$$CM = 13.000 + 20.000 + 105.000 + 8000$$

$$CM = R\$ 146.000,00$$

Outra opção seria substituir cada componente no tempo final de sua vida útil. Para essa situação haveria duas paradas no processo, conforme representado pela figura 08.

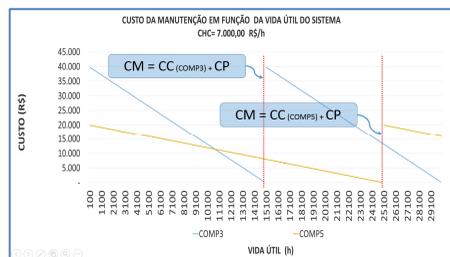


Figura 08 – Custo da manutenção com CHC maior que zero sem custo residual (CORRÊA, 2014).

No exemplo acima, haveria uma parada no instante 15.000 horas, e outra parada no instante de 25.000 horas.

Para 15.000 hora tem-se o CM como:

$$CP = MTTR_{comp3} \times CHC = 10 \times 7000 = R\$ 70.000,00.$$

$$CM = CC_{comp3} + CP$$

$$CM = 13.000 + 70.000 = R\$ 83.000,00$$

Para 25.000 hora tem-se o CM como:

$$CP = MTTR_{comp5} \times CHC = 15 \times 7000 = R\$ 105.000,00.$$

$$CM = CC_{comp5} + CP$$

$$CM = 20.000 + 105.000 = R\$ 125.000,00$$

No período de 25.000 horas tem-se um custo de manutenção de duas paradas, totalizando em R\$ 208.000,00.

Quando se comparam os dois cenários apresentados nas Figuras 07 e 08, pode-se observar: na Figura 07, no período de 25.000 horas, tem-se apenas uma parada no processo, totalizando um custo de manutenção, para o período, de R\$ 146.000,00. Já na Figura 08, no

mesmo período de 25.000 horas, têm-se duas paradas, totalizando um custo de manutenção de R\$ 208.000,00.

Pode-se observar, por meio dos exemplos citados, que o cenário representado na Figura 07 possui um custo de manutenção menor, consequentemente mais lucrativo para o negócio; portanto, a substituição de componentes ou revisões prematuras dos sistemas, dependendo da lucratividade do processo, são necessárias.

### 3. Modelagem

A modelagem matemática possui como objetivo a estruturação de variáveis do sistema a ser estudado de forma a obter cálculos para otimização da periodicidade das manutenções preventivas.

Para essa modelagem, o modelo leva em consideração algumas características dos sistemas:

1 - Toda intervenção de manutenção preventiva leva em consideração a substituição de todos componentes avaliados.

2 - O tempo de execução da manutenção preventiva é baseado no componente que possui o maior tempo de reparo preventivo MTTRp, dentro do sistema avaliado.

3 - Os eventos de manutenção corretiva ocorrem de forma que não causem nenhum dano à segurança, ao meio ambiente ou danos a componentes subjacentes; ou seja, o dano provocado no evento corretivo é unicamente do componente, causando apenas impacto financeiro.

4 - Todos os sistemas são representados por um RBD (Diagrama de Bloco de Confiabilidade) em série, sendo que qualquer falha em um único componente exige que se pare todo processo.

O modelo é baseado na vida útil estimada, tempo médio para reparo e hora cessante do processo de cada componente a ser avaliado. Para ter-se um resultado consistente neste modelo, somente devem ser avaliados sistemas para os quais se possuem informações sobre a vida útil de componentes bem definidas.

Nos processos produtivos (sistemas) pode existir uma infinidade de componentes, porém este modelo se propõe a fazer uma avaliação de periodicidade ótima a partir de componentes mais significativos que possuam uma maior representatividade no custo do reparo e no tempo de parada do processo.

3.1 Declarações das variáveis

Para iniciar a modelagem, primeiramente serão informadas todas as variáveis envolvidas no modelo, como segue:

$MTTR_{pn}$  = Tempo médio para reparo preventivo do componente “n”.

$MTTR_{cn}$  = Tempo médio para reparo corretivo do componente “n”.

$MTTR_{max}$  = Máximo tempo médio para reparo preventivo do sistema.

$V_{un}$  = Vida útil média do componente “n”.

$VU_{Tn}$  = Vida utilização do componente “n”.

$V_{umax}$  = Máxima vida útil do sistema.

$V_{umin}$  = Mínima vida útil do sistema.

$V_{us}$  = Vida útil de avaliação do sistema.

$CC_n$  = Custo do componente “n”.

$CR_n$  = Custo residual da vida útil do componente “n”.

$CRT$  = Custo residual total da vida útil do sistema.

$CHC$  = Custo hora cessante do sistema.

$CR_{pp}$  = Custo do reparo preventivo.

$CR_{pc}$  = Custo do reparo corretivo.

$CM_{Vu}$  = Custo de manutenção para vida útil avaliada.

$N_c$  = Número de sistema.

$W_p$  = Periodicidade de preventiva.

$W_{pot}$  = Periodicidade de preventiva otimizada.

$CR(w)$  = Custo residual total da vida útil do sistema em função da periodicidade.

### 3.2 Equações

Conforme mencionado anteriormente, o custo residual do componente representado pela variável  $CR_n$ , é uma função decrescente periódica em função do tempo. Cada período representa a substituição do componente.

Para modelar esse evento, a função que melhor representa é uma série de Fourier, do tipo dente de serra, conforme equação 01.

$$y(t) = \frac{2L}{\pi} \sum (-1)^{(n-1)} \times \sin \frac{n \times \pi \times t}{L} \quad (01)$$

Para modelar o CRn (Custo residual da vida útil do componente "n"), na série, foi necessário realizar alguns ajustes na equação original, conforme será apresentado na equação 02.

$$CR_n(t) = \frac{CC_n}{1,5} + \frac{CC_n}{2} \sum_{n=1}^{1000} \frac{(-1)^n}{n} \times \sin \left[ n \times \frac{\pi}{0,5 \times V_{un}} \times \left( t + \frac{V_{un}}{2} + VUT_n \right) \right] \quad (02)$$

Observa-se, inicialmente, que a equação original (01) se trata de uma série crescente e a necessidade aqui é decrescente. Também foi necessário inserir um termo adicional, para deslocar a amplitude da equação que varia positivamente e negativamente em torno do ponto "zero". Nesta modelagem necessita-se apenas de valores positivos que representam o  $CR_n(t)$ . O número de termos para modelar cada série é predefinido nos valores de 1 a 1000, variando em uma unidade. Foram adicionados os termos,  $\frac{V_{un}}{2}$  e  $VUT_n$  que representam o ângulo de fase na função, deslocando toda a função para o início da vida útil de cada componente avaliado e ajustando a vida de utilização do sistema em função do instante a ser avaliado.

Um exemplo desta função pode ser observado na Figura 09.



Figura 09 – Custo residual de dois sistemas para número de termos da série de Fourier, n=5.

Após a definição da equação que representa o custo de cada componente em função da sua vida útil, para obter-se o custo da vida útil de todos os sistemas a serem avaliados, aplica-se a equação 03.

$$CR_T = \sum CR_n(t) \quad (03)$$

A partir da obtenção do custo da vida útil do sistema em função do tempo, precisa-se conhecer o custo do reparo preventivo em função do tempo, ou seja, qual o custo do reparo para um determinado instante. Esse pode ser calculado por meio da equação 04.

$$CRP_p(t) = \sum CC_n + MTTR_{max} \times CHC + CR_T \quad (04)$$

Cabe, aqui, lembrar que o custo do reparo instantâneo considera a troca de todos componentes.

Para o presente estudo não interessa o custo instantâneo para executar um determinado reparo, mas sim qual o custo dos reparos em função da periodicidade.

O sistema irá simular várias periodicidades em função de uma vida útil determinada, denominada  $V_{us}$  (vida útil de avaliação do sistema). A  $V_{us}$  é a vida que absorve a vida útil máxima do componente de um determinado sistema. Portanto a  $V_{us}$  será duas vezes maior que a máxima vida de um determinado componente do sistema avaliado, ou definida pelo usuário, podendo ser digitado o seu valor durante a entrada dos dados no programa.

A vida inicial da avaliação, ou seja, a menor periodicidade avaliada, é definida por um quarto do valor da menor vida de um determinado componente do sistema avaliado. Conforme equação 05.

$$W_p = F \times V_{u_{min}} \Rightarrow \left[ \frac{V_{u_{min}}}{4}, 2 \times V_{u_{max}} \right] \quad (05)$$

Para cada periodicidade avaliada no intervalo definido na equação 05, obtém-se o custo do reparo preventivo em função da periodicidade, conforme a equação 06. As periodicidades simuladas para a equação 06 surgem da equação 05, que incrementa um fator "F" igual 0,5.

$$CRP_p(W_p) = \sum CRP_p \quad (06)$$

Observa-se que conforme as periodicidades são incrementadas, o custo de manutenção obtém outra variável, gerada pelos eventos corretivos. Assim, para cada periodicidade que ultrapassa o tempo da vida útil de um determinado componente, há um evento corretivo que pode ser calculado pela equação 07.

$$CRP_c(W_p) = \sum [(CC_n + MTTR_{cn} \times CHC) \times \left( \frac{2 \times V_{u_{max}}}{V_{u_n}} \right)] \quad (07)$$

O custo de manutenção total para a vida de avaliação do sistema em função da periodicidade pode ser calculado pela equação 08.

$$CM_{V_u} = CRP_p(W_p) + CRP_c(W_p) \quad (08)$$

Com a função obtida na equação 08, é possível definir a periodicidade ótima para o sistema avaliado, que é o menor valor da função gerada através da equação 08.

#### 4. Aplicação numérica

A modelagem foi desenvolvida por meio do software MATLAB. O principal objetivo do programa é proporcionar aos especialistas e gestores da área de manutenção a facilidade de avaliação dos diversos cenários de processo industrial que compõem os custos de manutenção preventiva. Além disso, dá visibilidade à viabilidade econômica dos projetos de processos industriais.

##### 4.1 Entradas de Dados

Para avaliar a modelagem matemática e o programa implementado, será utilizado um simples modelo de um processo industrial cerâmico, conforme Figura 10. As variáveis de entrada, também podem ser exemplificadas nesta figura.

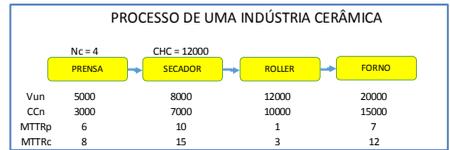


Figura 10 – Modelo de um sistema para simulação da modelagem no MATLAB.

Na Figura 11, é possível observar a página de entrada de dados do programa elaborado, denominado de POPMP (Programa para Otimizar Periodicidade de Manutenção Preventiva).

```

***** PROGRAMA PARA OTIMIZAR PERIODICIDADE MP (POPMP) *****
** Projeto Dissertação Mestrado: Eng. Rodrigo Fernandes Correa **
** Eng. Mecânica UFSC: Orientador Dr. Eng. Acires Dias *****
** Área: Projeto de Sistema Mecânicos *****
** Linha de Pesquisa: Confiabilidade e Manutenibilidade de Sistema
** mecânicos *****

***** ENTRADA DE DADOS *****

DIGITE O VALOR HORA CESSANTE DO PROCESSO (R$/h)-----:12000
DIGITE O TEMPO DE AMORTECIMENTO DO PROCESSO "buffer" (h)----:0
DIGITE O NÚMERO DE SISTEMAS -----:4
DIGITE A VIDA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA -----:10000

* DIGITE VIDA UTIL DO SISTEMA 1 (Hora) -----:5000
* DIGITE CUSTO DE PECAS DO SISTEMA 1 (R$) -----:3000
* DIGITE MTTRp (Preventiva) DO SISTEMA 1 (Hora) ----:6
* DIGITE MTTRc (Corretiva) DO SISTEMA 1 (Hora) ----:8

* DIGITE VIDA UTIL DO SISTEMA 2 (Hora) -----:8000
* DIGITE CUSTO DE PECAS DO SISTEMA 2 (R$) -----:7000
* DIGITE MTTRp (Preventiva) DO SISTEMA 2 (Hora) ----:10
* DIGITE MTTRc (Corretiva) DO SISTEMA 2 (Hora) ----:15
  
```

Figura 11 – POPMP, modelagem no MATLAB.

#### 4.2 Resultados

Na Figura 12, pode-se observar a função do custo residual de cada componente do sistema, em função de sua vida útil, as quais foram modeladas em uma série de Fourier, do tipo dente de serra, conforme equação 02.

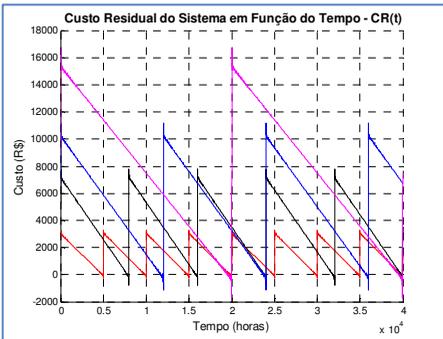


Figura 12 – POPMP, custo residual em função da vida útil.

Na Figura 13, foi obtido o custo residual total do sistema, calculado pela equação 03, e o custo do reparo preventivo calculado pela equação 04, em função do tempo. Observa-se que neste ponto do programa, há apenas os custos de manutenção instantâneos em função do tempo, e não em função da periodicidade, que é o principal objetivo do POPMP.

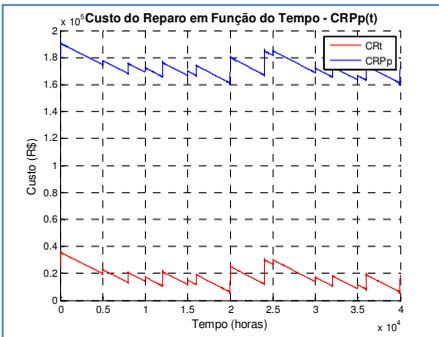


Figura 13 – POPMP, custo do reparo preventivo x tempo.

A partir deste ponto o programa começa a simular as periodicidades, inicialmente considerando um quarto da vida útil mínima do sistema, sendo a vida útil mínima do sistema, neste exemplo, 5.000 horas. O sistema inicialmente irá projetar uma periodicidade de 1.250 horas, conforme Figura 14.

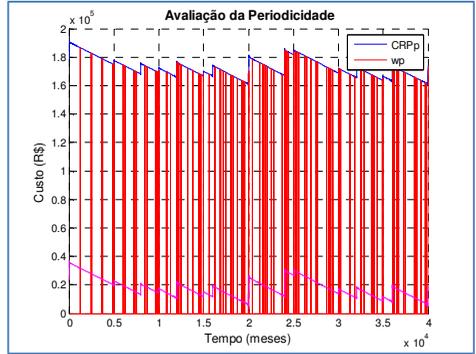


Figura 14 – POPMP, avaliação da periodicidade.

A partir deste ponto, o programa começa a incrementar a periodicidade em 0,5 vezes o valor da vida útil mínima conforme equação 05. Ver Figura 15.

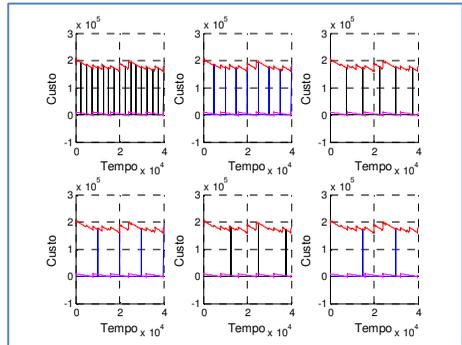


Figura 15 – POPMP, interação das periodicidades.

Para cada periodicidade simulada, o sistema calcula o custo residual total, levando em consideração que todos os componentes serão substituídos no evento preventivo para uma determinada periodicidade.

Na Figura 16, observa-se o comportamento do custo residual total em função da periodicidade. É possível observar que quanto menor a periodicidade preventiva, maior são os custos residuais. Isso significa que quanto menor a periodicidade, a vida útil total dos componentes será menos utilizada, havendo, assim, maior ocorrência de trocas prematuras.

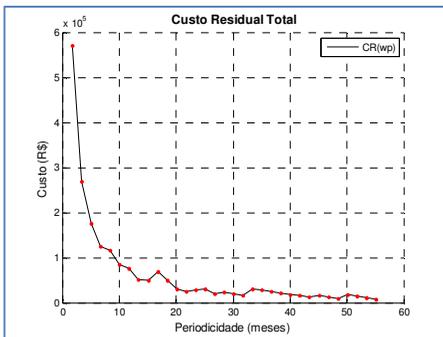


Figura 16 – POPMP, custo residual total em função da periodicidade.

Para cada periodicidade simulada, sendo que o número de periodicidade simulada depende da diferença entre a vida útil mínima e máxima do sistema, o sistema calcula o custo do reparo preventivo em função da periodicidade, conforme equação 06. Ver Figura 17.

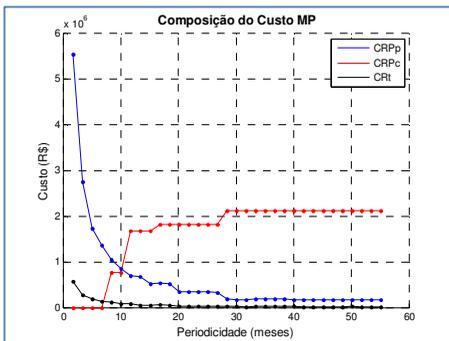


Figura 17 – POPMP, custo do reparo preventivo em função da periodicidade.

Depois de calculado o custo do reparo preventivo em função da periodicidade, o sistema calcula o custo do reparo corretivo em função da periodicidade conforme equação 07. Cabe lembrar que, para cada componente que possuir vida útil menor que a periodicidade avaliada, o programa considera um evento corretivo, calculando seu custo a partir do custo do componente,  $TMPRc$  (tempo médio para reparo corretivo) do respectivo componente, e hora cessante do processo, ver Figura 17, variável  $CRPc$  da legenda.

Finalizando com a equação 08, chega-se ao custo de manutenção total para a vida útil de avaliação em função da periodicidade. Ver Figura 18.

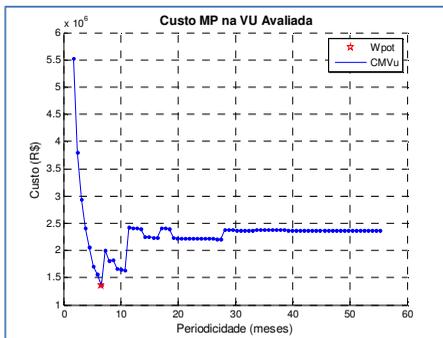


Figura 18 – POPMP, custo da manutenção na vida útil avaliada em função da periodicidade.

Pode-se observar que para o sistema avaliado na modelagem proposta, a periodicidade otimizada se localiza na periodicidade 6,7 meses (aproximadamente 4.824 horas). Assim, se for elaborado um plano de manutenção planejando-se uma parada de 10 horas (ver  $MTTRp$  máximo Figura 10) a cada 6,7 meses, com a substituição de todos os quatro componentes do sistema, obter-se-á o menor custo de manutenção para a vida de 55,6 meses do sistema.

CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA AVALIADO				
SISTEMA	VU	CP	MTTRp	MTTRc
* SISTEMA 1 =	5000	3000	6	8
* SISTEMA 2 =	8000	7000	10	15
* SISTEMA 3 =	12000	10000	1	3
* SISTEMA 4 =	20000	15000	7	12

APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	
* A VIDA DE AVALIAÇÃO DO SISTEMA FOI DE	55,6 MESES
* A PERIODICIDADE ÓTIMA PARA O SISTEMA AVALIADO É DE	6,7 MESES
* O TEMPO DE CADA PARADA PREVENTIVA É DE	10,0 HORAS
* O NÚMERO TOTAL DE PARADAS (MP) PARA A VIDA AVALIADA É DE	8,0

APRESENTAÇÃO DOS CUSTOS	
* O CUSTO DA HORA CESSANTE DO PROCESSO É DE	R\$ 120000,00
* O CUSTO DE PEÇAS PARA CADA MP É DE	R\$ 35000,00
* O CUSTO RESIDUAL PARA CADA MP É DE	R\$ 15675,65
* O CUSTO DO TEMPO DE PARADA DO PROCESSO X MP	R\$ 1200000,00
* O CUSTO DE CADA MANUTENÇÃO PREVENTIVA É DE	R\$ 170675,65
* O CUSTO MÉDIO DE MANUTENÇÃO CORRETIVA (MC/MÊS) É DE	R\$ 0,00

Figura 19 – POPMP, saída dos resultados.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 19, o custo acumulado total de manutenção para periodicidade de 6,7 meses, é de aproximadamente R\$ 1.359.000,00 para uma vida de 55,6 meses. Cada parada terá um custo total de manutenção de aproximadamente R\$ 170.675,65. Pode-se observar que o custo mais representativo é o custo de parada de processo de R\$ 120.000,00 e, para a simulação feita, não se tem nenhuma ocorrência de corretiva para os sistemas avaliados, devido à periodicidade ótima possuir tempo inferior à menor vida útil de componente que, no modelo, é de 5.000 horas, aproximadamente 6,9 meses.

### 4.3 Influências CHC

Outra observação importante que se pode obter na simulação é a influência da *CHC* (custo da hora cessante do sistema).

Para obter-se essa avaliação, o sistema irá considerar o mesmo modelo da Figura 10, inserindo uma análise de sensibilidade à simulação. Inicia-se a simulação com *CHC* igual a “zero” e incrementar-se um valor de R\$ 2.000,00 a cada simulação, conforme Figura 20.

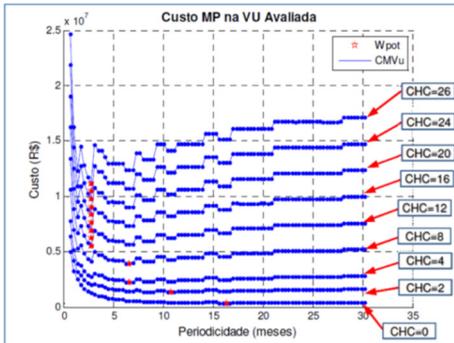


Figura 20 – POPMP, influência *CHC* na periodicidade.

Observa-se que os valores de *CHC* estão representados por milhar, *CHC* x R\$ 1.000.

Conforme for incrementado o valor do *CHC*, observa-se uma redução convergente da periodicidade; isso ocorre devido ao custo residual “*CR*” (devido a substituições prematuras) perder sua significância em relação ao *CHC*. Nesse sentido, para processos em que o custo da hora cessante possui uma razão superior ao custo dos componentes, a substituição prematura de componentes é aconselhável para aumentar a disponibilidade do equipamento, evitando eventos corretivos. Ressalta-se que para processos em que *CHC* possui uma razão superior aos custos de componentes, os eventos corretivos possuem custos mais significativos, devido ao *MTTRc* ser na maioria das situações superior ao *MTTRp*. Por este motivo, quanto mais significativo for o *CHC*, menor será a periodicidade, para evitar os eventos corretivos.

Outra observação a ser feita refere-se à ocorrência de *CHC* muito baixo: observe-se a curva onde *CHC* = 0, a periodicidade tende a aumentar, ultrapassando até mesmo a vida útil do componente que possui a maior vida útil. Isso significa que para processos em que o *CHC* é pouco significativo, a tendência é aplicar a estratégia de manutenção corretiva (MC), cujo custo residual será igual a “zero”, por não haver trocas prematuras.

### 4. Conclusões

Este artigo mostra uma modelagem matemática para otimizar a periodicidade de MP por meio da modelagem dos sistemas industriais. Sua aplicação possibilita observar a variação do impacto financeiro em função da periodicidade e concluir que a troca prematura de componentes se faz necessária para determinado tipo de processo. Na Figura 16 é possível observar o comportamento do custo residual em função da periodicidade, informação essa necessária para tomada de decisão do gestor de manutenção.

Nas Figuras 17 e 18 é possível observar o comportamento do custo de manutenção corretiva, preventiva e qual periodicidade que proporciona menor custo de manutenção ao longo da vida útil do processo.

É possível também observar o ponto de vista prático da modelagem. Sabe-se que a maioria das equipes de manutenção de diversos segmentos desenvolve conhecimento do comportamento e da vida útil de seus sistemas; porém, quando existe necessidade de rearranjar todos esses sistemas para calcular uma periodicidade ótima, que proporcione maior resultado financeiro ao processo, esses profissionais encontram dificuldade, pois a modelagem é trabalhosa. De posse de uma modelagem, o gestor de manutenção possui condições de otimizar o plano de manutenção preventiva e os tempos de parada.

Pode-se, assim, concluir que a modelagem matemática implementada como um programa computacional “POPMP” é de extrema importância para calcular a periodicidade ótima de manutenção preventiva dos processos industriais e para proporcionar uma boa visibilidade dos custos de manutenção dos processos. Esta modelagem assegura uma periodicidade de manutenção preventiva que proporciona a confiabilidade adequada para cada processo, em função da lucratividade de cada negócio, sem sobrecarregar os custos de manutenção ou os custos gerados por baixa disponibilidade.

## 5. Referências bibliográficas

- ABRAMAN - (Associação Brasileira de Manutenção), CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 26°. Curitiba, 2011.
- BIASOTTO EDUARDO. **Aplicação do BSC na Gestão da TPM: Estudo de caso em indústria de processo.** Florianópolis, 2006. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2006.
- BERND BERTSCHE. **Reliability automotive and mechanical engineering.** Berlin: Springer, 2008.
- CHRISTER, A.H. **The delay-time modelling of preventive maintenance of plant given limited PM data and selective repair at PM.** IMA, 1998.
- DAVID J. S. **Reliability maintainability and risk.** Sixth edition. Oxford: Elsevier, 2001.
- DIAS, A. *et al.* **Metodologia para análise de risco: mitigação de perda de SF6 em disjuntores.** Florianópolis: Ed. Studio S, 2011. 304p.
- DIAS A. Failure analysis. In: TOTTEN, G.E.; NEGRI, V.J. **Handbook of hydraulic fluid technology.** Second Edition. Ed. CRC Press. Taylor & Francis Group, 2012. p.461-530, Chapter 12.
- ESPINOSA FUENTES, FERNANDO FELIX. **Metodologia para inovação da gestão de manutenção industrial** Florianópolis, 2006. Tese (Doutorado em engenharia mecânica) – Programa de Pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2006. 192p.
- FERREIRA, R.J.P. **A preventive maintenance decision model based on multicriteria method PROMETHEE II integrated with Bayesian approach.** IMA, Journal of Management Mathematics, 2010.
- HAI, CANH VU, *et al.* **Maintenance planning and dynamic grouping for multi-component systems with positive and negative economic dependencies.** IMA, OXFORD Journal, 2014.
- LAFRAIA, J. R. B. **Manual de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade.** Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.
- KUMAMOTO, H., HENLEY, E.J., Probabilistic risk assessment and management for engineers and scientists. New York: IEEE Press, 1996.
- RIGONE EMERSON. Metodologia para manutenção centrada na confiabilidade: sistema baseado na lógica fuzzy. Florianópolis, 2009. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 2009.
- SMITH, A.M. **Reliability centered maintenance.** Boston: McGraw Hill, 1993.
- SMITH, A.M. RCM: **Gateway to world class maintenance.** Oxford: Elsevier, 2004.
- SOUZA, VALDIR CARDOSO DE. Organização e gerência da manutenção. 3.ed. São Paulo: All Print Editor, 2009.
- VINADÉ, CESAR AUGUSTO DO CANTO. **Sistematização do processo de projeto para confiabilidade e manutenibilidade aplicado a sistemas hidráulicos e implementação de um sistema especialista.** Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) –Programa de Pós-Graduação em engenharia mecânica Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2003. 217p.
- WAEYENBERGH, G. CIBOCOF: **A framework for industrial maintenance concept development.** Leuven, Belgica: Katholieke Universiteit Leuven, 2005.
- WILLIAN J. PALM III, **Introdução ao MATLAB para engenheiros.** 3.ed. São Paulo: Mc Graw Hill, 2013.