



UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

TEÓFILO CORTIZO MOREIRA NETO

APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO
DE VIDA EM UMA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO
COM BASE NA GESTÃO DE ATIVOS



SALVADOR
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
ENGENHARIA INDUSTRIAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL (PEI)

TEÓFILO CORTIZO MOREIRA NETO

**Aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida em
uma Indústria de Mineração com base na Gestão de
Ativos**

DISSERTAÇÃO

**Salvador
2018**

TEÓFILO CORTIZO MOREIRA NETO

**Aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida em
uma Indústria de Mineração com base na Gestão de
Ativos**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial (PEI), Escola Politécnica, da Universidade Federal da Bahia, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Robson da Silva Magalhães

Coorientador: Prof. Dr. Abel Ribeiro de Jesus

Salvador
2018

Neto, Teófilo Cortizo Moreira

Aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida em uma Indústria de Mineração com base na Gestão de Ativos/ Teófilo Cortizo Moreira Neto. – Salvador, 2018.

116p. : il.

Orientador: Prof. Dr. Robson da Silva Magalhães

Coorientadores: Prof. Dr. Abel Ribeiro de Jesus

Dissertação (Mestrado - Engenharia Industrial) -- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI) , 2018.

1. Análise de Custo do Ciclo de Vida. 2. Gestão de Ativos. 3. Sistema de Gerenciamento de Manutenção. 4. Engenharia da Confiabilidade. 5. Custos de Manutenção I. Magalhães, Robson da Silva. II. Jesus, Abel Ribeiro de. IV. Título.

**“Aplicação do LCCA em uma Indústria de Mineração
com base na Gestão de Ativos”.**

TEÓFILO CORTIZO MOREIRA NETO

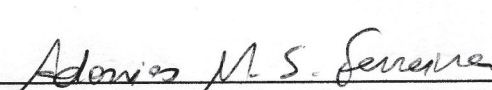
Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Dr. Salvador Ávila Filho


Doutor em Engenharia Química, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2010

Prof. Dr. Adonias Magdiel Silva Ferreira


Doutor em Engenharia Industrial, pela Universidade Federal da Bahia, 2015

Dr. Gabriel Alves da Costa Lima


Doutor em Geociências, pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 2004

Salvador, BA - BRASIL
Abril / 2018

Dedico esta dissertação a Deus e minha família que sempre me apoiou nos momentos de dificuldade, em especial a minha esposa Ana Lúcia Cortizo e minha filha Carolina Cortizo por entenderem os momentos de ausência e convívio familiar quando foi necessário.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, minha esposa e filha, meus familiares e amigos que me apoiaram neste desafio. Agradeço também aos professores e alunos da UFBA que me ajudaram ao longo do curso onde tive grande privilégio de convivência e aprendizado. Agradeço aos professores Robson Magalhães e Abel Ribeiro pela paciência e perseverança em me orientar durante o mestrado.

“Sem o trabalho, o homem permaneceria sempre na infância intelectual”
(O Livro dos Espíritos, Capítulo 3, Pergunta 676)

Resumo

O controle de custos se mostra um obstáculo dentro das grandes corporações. A aplicação de ferramentas no auxílio desse problema no setor operacional ainda possui pouca abrangência prática. A proposta desse trabalho é implementar a análise do custo do ciclo de vida ou *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA) na mineradora Salobo Metais (Grupo Vale) de forma a determinarmos uma metodologia prática aplicável ao setor industrial. O estudo de caso determinou a vida econômica de uma correia transportadora de minério de cobre. A estratégia mais usual, atualmente utilizada pela manutenção, não se mostra eficiente no gerenciamento econômico do ativo. O LCCA auxilia neste aspecto, tendo em vista que calculamos uma estimativa de eventos para se determinar o custo de manutenção, ao longo da sua vida operacional. Na metodologia proposta utilizamos para esse cálculo uma análise *Reliability, Availability and Maintainability* (RAM), que é apoiada em curvas estatísticas de confiabilidade quantitativa; ou seja, utilizam-se dados históricos para a realização de projeções futuras. O estudo de caso aconselhou um ciclo econômico de seis meses para a correia transportadora. Ao invés disto, a estratégia adotada, sem utilizar o estudo, levou a um ciclo operacional do ativo de sete meses, gerando custos desnecessários motivados principalmente pelo lucro cessante. A metodologia LCCA está embasada no conceito de ciclo de vida dos ativos promovido pela nova norma de Gestão de Ativos (GA) na ISO-55000:2014. A falta de uma metodologia prática, a dificuldade de aquisição de dados históricos confiáveis e de projeções de vida operacional mais fidedignas são fatores que contribuem para a esta falta de cultura do uso desta ferramenta. Acreditamos que, a partir do momento em que a Gestão de Ativos se torne o modelo gerencial predominante nas indústrias, essa ferramenta comece a ser mais utilizada.

Palavras-chave: Análise de Custo do Ciclo de Vida. Gestão de Ativos. Sistema de Gerenciamento de Manutenção. Engenharia da Confiabilidade. Custos de Manutenção

Abstract

Cost control is an obstacle within large corporations. The application of tools to help this problem in the operational sector still has little practical scope. The purpose of this work is to implement Life Cycle Cost Analysis (LCCA) at Salobo Metais (Vale Group) in order to determine a practical methodology applicable to the industrial sector. The case study determined the economic life of a copper ore conveyor belt. The most usual strategy, currently used for maintenance, is not efficient in the economic management of the asset. The LCCA assists in this regard, since we calculate an estimate of events to determine the cost of maintenance, throughout its operational life. In the proposed methodology we use for this calculation a Reliability, Availability and Maintainability (RAM) analysis, which is supported on statistical curves of quantitative reliability; that is, historical data are used to make future projections. The case study advised a six-month economic cycle for the conveyor belt. Instead, the strategy adopted, without using the study, led to an operational cycle of the asset for seven months, generating unnecessary costs motivated mainly by the loss of profit. The LCCA methodology is based on the asset life cycle concept promoted by the new Asset Management (AM) standard in ISO-55000: 2014. The lack of a practical methodology, the difficulty of acquiring reliable historical data and more reliable operational life projections are factors that contribute to this lack of culture in the use of this tool. We believe that, once Asset Management becomes the predominant managerial model in industries, this tool will begin to be more used.

Key words: Life-Cycle Cost Analysis. Asset Management. Maintenance Management System. Reliability Engineering. Maintenance costs

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linha de Montagem Manual	24
Figura 2 – Falhas Prematuras Após Intervenção Preventiva.	26
Figura 3 – Curvas de Falhas de uma Aeronave.	27
Figura 4 – Princípios e Atributos-Chave da Gestão de Ativos	31
Figura 5 – O Sistema de Gerenciamento de Ativos	32
Figura 6 – Interrelações-Chave	33
Figura 7 – Planejamento e Implementação do Sistema	34
Figura 8 – Contexto da PAS-55	35
Figura 9 – Influência do LCCA na Gestão de Ativos	36
Figura 10 – PDCA da Gestão de Ativos	40
Figura 11 – Análise do Custo de Ciclo de Vida de um Computador	44
Figura 12 – Árvore de Custos de Barringer e Weber	48
Figura 13 – Exemplo de Fluxo de Caixa	54
Figura 14 – Fluxo do Processo Salobo Metais	70
Figura 15 – Linhas da Britagem Primária	73
Figura 16 – Dados Estruturais do Transportador de Correias — TR-2001-01 . .	73
Figura 17 – Propriedades do Bloco Representativo da Correia	91
Figura 18 – Simulações Realizadas	92
Figura 19 – Custos Detalhados das Simulações	93

Lista de quadros

Quadro 1 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 01	111
Quadro 2 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 02	112
Quadro 3 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 03	113
Quadro 4 – Historico Preço do Cobre em 2014 (US\$/ton)	114
Quadro 5 – Historico Cotação Dólar em 2014 (US\$)	114
Quadro 6 – Tabela dos Resultados da Simulação LCCA	115

Lista de gráficos

Gráfico 1 – Períodos de Vida da Curva da Banheira	25
Gráfico 2 – Gráfico do Custo do Ciclo de Vida (LCC)	54
Gráfico 3 – Análise de Degradação para Novembro de 2014	78
Gráfico 4 – Função PDF Confiabilidade	84
Gráfico 5 – Função Taxa de Falhas	85
Gráfico 6 – Número de Falhas Acumuladas	86
Gráfico 7 – Função Densidade de Probabilidade de Reparo	89
Gráfico 8 – Função Número de Reparos Acumulados	90
Gráfico 9 – Análise LCC	96
Gráfico 10 – Custo Simulado x Custo Real	97

Lista de diagramas

Diagrama 1 – Categoria de Custos de Ciclo de Vida	50
Diagrama 2 – Etapas para Aplicação Prática do LCCA na Gestão de Ativos . .	55
Diagrama 3 – Fluxograma do Tempo na Previsão de Troca de Correias	77
Diagrama 4 – Fluxograma do Tempo na Previsão Financeira de Troca de Correias	98

Lista de tabelas

Tabela 1 – Distribuições Estatísticas	59
Tabela 2 – Valores Correspondentes ao Parâmetro β	60
Tabela 3 – Relação de Variáveis	61
Tabela 4 – Características dos Estimadores de Parâmetros	65
Tabela 5 – Dados Operacionais do Transportador de Correias	74
Tabela 6 – Histórico de Ocorrências Devido ao Desgaste da Correia	79
Tabela 7 – Resultados da Modelagem de Falha	82
Tabela 8 – Testes Estatísticos de Aderência – Modelagem das Falhas	83
Tabela 9 – Resultados da Modelagem do Reparo	87
Tabela 10 – Testes Estatísticos de Aderência – Modelagem do Reparo	88
Tabela 11 – Valores de Custos na Análise LCC	95
Tabela 12 – Comparação da Análise de Custo de Ciclo de Vida	98

Lista de abreviaturas e siglas

AB-LCC	Activity-Based Life Cycle Costing (Custo de Ciclo de Vida Baseado em Atividade)
ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
BSI	British Standard Institution (Instituto de Normatização Britânica)
CAPEX	Capital Expenditure (Capital de Investimento)
Cefet	Centro Federal de Educação Tecnológica
CMMS	Computerized Maintenance Management System (Sistema de Gerenciamento de Manutenção Computadorizado)
GA	Gestão de Ativos
GFAMAM	Global Forum on Maintenance & Asset Management (Fórum Global de Manutenção e Gestão de Ativos)
H0	Hipótese Nula
H1	Hipótese Alternativa
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
IFPA	Instituto Federal do Pará
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
K-S	Kolmogorov-Smirnov
LCCA	Life-Cycle Cost Analysis (Análise do Custo de Ciclo de Vida)
LCM	Life-Cycle Management (Gerenciamento do Ciclo de Vida)
LDA	Life Data Analysis (Análise de Dados de Vida)
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
MLE	Maximum Likelihood Estimation (Estimador de Máximo Verossimilhança)
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
MR	Median Rank (Ranques Medianos)
MTBF	Mean Time Between Failure (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTF	Mean Time To Failure (Tempo Médio para Falhar)

MTTR	Mean Time To Repair (Tempo Médio Para Reparo)
NLRR	Non Linear-Regression Rank (Regressão Não Linear Ranqueada)
NRM3	New Rules for Mensurement 3 (Novas Regras de Medida 3)
OLS	Ordinary Least Squares (Mínimos Quadrados Ordinários)
OPEX	Operational Expenditure (Investimento Operacional)
OSHAS	Occupational Health and Safety Assessment Series (Saúde Ocupacional e Séries de Avaliação de Segurança)
PAS	Publicly Available Specification (Especificação Disponível Publicamente)
PCM	Planejamento e Controle da Manutenção
PDCA	Plan-Do-Check-Act (Planejar-Fazer-Verificar-Agir)
PHM	Proportional Harzad Model (Modelo de Risco Proporcional)
PIMS	Process Information Management System (Sistema de Gerenciamento de Informações de Processo)
PRI	Período de Retorno de Investimento
RAM	Reliability, Availability and Maintainability (Confiabilidade, Disponibilidade e Manutenabilidade)
RDA	Redundance Data Analysis (Análise de Dados Redundantes)
RDB	Reliability Diagram Block (Diagrama de Bloco de Confiabilidade)
RI	Retorno de Investimento
RRX	Rank Regression on X (Regressão em Ranque em X)
RRY	Rank Regression on Y (Regressão em Ranque em Y)
SAP	Systeme, Anwendungen, Produkte in der Datenverarbeitung (Sistemas, Aplicações e Programas em Processamento de Dados)
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SGA	Sistema de Gestão de Ativos
SGM	Sistem de Gestão da Manutenção
TIR	Taxa Interna de Retono
VPL	Valor Presente Líquido

Lista de símbolos

$\bar{X}$	Média da População
β	Parâmetro de Escala
$C_u(U\$)$	Cotação do Cobre no Mercado (em Dólar)
D_n	Medida de Discrepância
esp	Frequência Esperada
η	Parâmetro de Forma
$F_0(x)$	Função Proposta
$F_n(x)$	Função de Distribuição da Amostra
$f(t)$	Função Densidade de Probabilidade de Falha
$F(t)$	Função Falha Acumulada
γ	Parâmetro de Posição
$g(t)$	Função Densidade de Probabilidade de Reparo
$G(t)$	Função de Reparo Acumulada
i	Taxa de Atratividade
λ	Taxa de Falhas
$\lambda(t) / h(t)$	Função Taxa de Falhas
L_c	Lucro Cessante
L	Função Máximo Verossimilhança
V_F	Valor Futuro
V_P	Valor Presente
$M(t)$	Função Manutenibilidade
μ	Média das Amostras
N_f	Quantidade de Itens que Falharam
n	Número de Períodos de Tempo
N	Número de Amostras

N_s	Quantidade de Itens que não Falharam
obs	Frequência Observada
P	Probabilidade de um Evento Ocorrer no Ponto P
R^2	Grau de Explicação
R_{ec}	Recuperação Metalúrgica
ρ	Correlação Linear
R_o	Rendimento Operacional
R	Coeficiente de Correlação Linear
$R(t)$	Função Confiabilidade
σ	Desvio Padrão
T_c	Teor de cobre
θ	Vetor de Parâmetros de uma Distribuição
T_x	Taxa de Produção
$\varphi(\theta)$	Distribuição Prévia de um Parâmetro
ζ	Range do Vetor de Parâmetros
Z	Parâmetro de Não-Confiabilidade em um Ponto

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Motivação e Importância	20
1.2	Objetivos	20
1.3	A Organização do Trabalho	21
2	Referencial Teórico	23
2.1	O Sistema de Gerenciamento de Manutenção	23
2.2	A Gestão de Ativos	29
2.2.1	Definição de Gestão de Ativos	30
2.2.2	O Sistema de Gerenciamento de Ativos	31
2.2.3	Análise de Risco e Confiabilidade	36
2.2.4	Os Benefícios da Gestão de Ativos	37
2.2.4.1	Aplicação da Gestão de Ativos	37
2.2.4.2	Gerenciamento Integrado	38
2.2.4.3	Apoio à Gestão Financeira	38
2.2.4.4	Desenvolvimento em Diversas Áreas da Empresa	38
2.2.5	Adequação ao Sistema de Gestão Integrado (SGI)	39
2.3	A Importância do Custo no Setor de Manutenção	40
2.4	A Terotecnologia	42
2.5	A Análise do Custo de Ciclo de Vida	43
2.6	Metodologia da Análise do Custo de Ciclo de Vida	47
2.6.1	Elementos de Custo	47
2.6.2	Estimação de Eventos	49
2.6.3	Análise Econômica	51
2.6.3.1	Valor Presente Líquido (VPL)	52
2.6.3.2	Taxa Interna de Retorno (TIR)	52
2.6.3.3	Retorno de Investimento (RI)	52
2.6.3.4	Período de Retorno de Investimento (PRI)	52
2.6.3.5	Análise Econômica no LCCA	53
2.6.4	Metodologia Prática do LCCA	55
2.7	A Engenharia da Confiabilidade no LCCA	56
2.7.1	Modelagem Paramétrica	57
2.7.2	Distribuições Estatísticas	59
2.7.3	Modelagem para Tempos de Reparo	60
2.7.4	Simulação de Monte Carlo	62
2.8	Software de Confiabilidade	63
2.8.1	Aderência de Modelos Paramétricos	64
2.8.1.1	Estimador dos Mínimos Quadrados (MQO)	65

2.8.1.2	Estimador por Regressão Não Linear Ranqueada (NLRR)	67
3	Estudo de Caso do LCCA na Manutenção de uma Correia Trans-	
	portadora	69
3.1	O Projeto Salobo	69
3.2	Problemática	71
3.3	Metodologia Aplicada	72
3.3.1	Objeto de Estudo	72
3.3.2	Levantamento dos Elementos de Custos	75
3.3.3	Estimação de Eventos	76
3.3.3.1	Estimação de Paradas da Correia	77
3.3.3.2	Análise da Curva de Confiabilidade	81
3.3.3.3	Análise da Curva de Manutenibilidade	86
3.3.3.4	Simulação de Monte Carlo	90
3.3.4	Análise Econômica	93
3.3.5	Determinação da Curva do LCCA	96
3.4	Resultados do Estudo de Caso	97
4	Conclusões	99
4.1	Limitações	100
4.2	Sugestões para Futuros Trabalhos	100
	Referências	102
	ANEXOS	109
	ANEXO A – CORRESPONDÊNCIA ENTRE A PAS 55 E O SISTEMA	
	ISO	110
	ANEXO B – TABELAS DE CÁLCULOS DO LCCA	113

1 Introdução

O presente trabalho foi elaborado com a finalidade de estelecermos uma metodologia prática, aplicável às indústrias, de implantação da análise do custo de ciclo de vida. A metodologia fornece passos simples de implementação com premissas que devem ser verificadas caso-a-caso dependendo da empresa em questão. Realizou-se um estudo de caso em um ativo específico na indústria de mineração. Para este fim, utilizaram-se conhecimentos aplicados da engenharia da confiabilidade e na adequação para o novo sistema de normas baseados na Gestão de Ativos (GA).

1.1 Motivação e Importância

O impacto do alto custo na realização de um processo é um dos grandes problemas nas indústrias. Ele se intensifica, conforme se acentua a competitividade, em um mercado globalizado. Em indústrias com alto capital mobilizado em ativos, o custo operacional é ainda mais relevante, sendo o setor de manutenção considerado como um dos maiores geradores desses custos. Diante desse cenário, propõe-se um trabalho de aplicação da Análise do Custo de Ciclo de Vida ou *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA), com o objetivo de demonstrar a sua eficácia dentro do SGM (Sistema de Gerenciamento da Manutenção).

O trabalho se baseia em um estudo de caso, aplicado em uma correia transportadora, operando em uma empresa de mineração. As mineradoras são indústrias de ativos intensivos (corporações com alta taxa de produção e elevados valores imobilizados).

1.2 Objetivos

O LCCA é uma ferramenta que consegue traduzir através de uma distribuição de custos ao longo do tempo, a vida operacional de um ativo. Ela auxilia o gestor no desenvolvimento de uma melhor visão estratégica sob ponto de vista econômico. É possível realizar os fluxos de caixa, considerando-se a situação presente de cada ativo. Com isso, o controle de custos e investimentos fica mais transparente e realista. A proposta é introduzi-la nos conceitos do Sistema de Gerenciamento da Manutenção e Gestão de Ativos, demonstrando a dificuldade para realização do controle de custos nas grandes empresas. Estabelece-se o conceito do LCCA através da revisão das melhores práticas pautadas em recentes publicações sobre essa ferramenta. Na sequência, é realizado um estudo de caso em uma correia transportadora instalada na usina Salobo Metais, uma unidade do grupo Vale S.A. Desse modo, estabelece-se como **objetivo geral** para esse trabalho desenvolver uma metodologia prática para aplicação do LCCA, como parte integrante de um Sistema de Gerenciamento da Manutenção

(SGM). Destacam-se os seguintes **objetivos específicos**:

- Conceituar o Sistema de Gerenciamento de Manutenção (SGM) e o Sistema de Gerenciamento de Ativos (SGA);
- Compreender os impactos da falta de gerenciamento de custos no setor de manutenção nas indústrias;
- Estabelecer novas visões gerenciais, tendo em vista a Gestão de Ativos e a análise do ciclo de vida dos ativos ou *Life-Cycle Management* (LCM);
- Estabelecer a metodologia prática mais adequada do LCCA;
- Desenvolver uma análise de investimento, baseado em um estudo de caso dentro do setor de manutenção;
- Descrever a proposta como um padrão a ser seguido para as empresas de segmentos industriais;

As **vantagens** da implantação do LCCA se manifestam na redução de custos, promoção da eficiência nos investimentos e aumento no retorno econômico e financeiro.

A **contribuição** desse trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia prática, direcionada às indústrias. Essa metodologia está composta por ferramentas de previsão de eventos, de forma a dar início ao controle do custo no setor de manutenção, atendendo-se aos requisitos estratégicos das empresas. A aplicação da metodologia independe da empresa estar em um ciclo econômico positivo ou negativo.

Considerando-se a empresa Salobo Metais, existem muitas dificuldades para o rastreamento e controle dos custos na manutenção, especificamente dentro de sua usina de beneficiamento. De modo a elevar sua disponibilidade aos níveis demandados, muitos recursos financeiros são aplicados todos os anos, seja em novos equipamentos, itens reservas, paradas de planta, melhorias, entre outros fatores, porém, com resultados nem sempre perceptíveis. Com o auxílio de uma rotina de coleta e análise de dados e de ferramentas corretas, é possível termos mais assertividade na tomada de decisões gerenciais, comprovando-se, de forma efetiva, os ganhos financeiros desejados.

1.3 A Organização do Trabalho

Esse trabalho está estruturado em quatro capítulos:

O Capítulo 1 introduz o tema do trabalho e determina seus objetivos.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica dos temas envolvidos na pesquisa. Define os conceitos de SGM e do SGA. Ressalta o impacto dos custos no

setor de manutenção industrial e introduz a Terotecnologia, a análise do custo de ciclo de vida, assim como a metodologia para a sua aplicação.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada nessa pesquisa e o estudo de caso. Definem-se os critérios para a escolha do equipamento para o estudo de caso e são detalhadas as etapas práticas do trabalho:

- O procedimento para a coleta de dados de campo;
- As fases para aquisição e tratamento de dados;
- A forma de calcular os eventos;
- Os sistemas e ferramentas utilizados;
- A forma de apresentação dos resultados;

O Capítulo 3 determina os métodos de referência para a aplicação do LCCA, justificando-se a motivação dessa escolha conforme apresentado no Capítulo 2.

O Capítulo 4 apresenta as considerações finais, limitações do estudo, extensão do objetivo e as conclusões.

2 Referencial Teórico

Os custos dentro do setor industrial, em especial o de manutenção, preocupa cada vez mais os administradores e acionistas. Não por acaso, com frequência, surgem ferramentas para o controle financeiro com o objetivo principal de reconhecer esses custos e controlá-los. Essa dificuldade é visível dentro da manutenção industrial, de forma que conhecer sua origem e história, assim como, saber como este setor se desenvolveu, é importante para aprendermos quais as suas principais dificuldades e limitações.

A ferramenta do LCCA pode e deve ser aplicada na manutenção industrial. Infelizmente ainda se verifica muitas barreiras culturais, mas deverão ser contornadas ao longo do tempo conforme novas mentalidades baseadas na Gestão de Ativos (GA) apareçam.

2.1 O Sistema de Gerenciamento de Manutenção

Com a implantação do sistema industrial no fim do século XIX, surgiu a necessidade de utilização de máquinas em massa para o processo de produção. Com as máquinas, surgiram as primeiras falhas de funcionamento e a necessidade de reparo, caracterizando-se a primeira geração da manutenção, denominada de manutenção corretiva. As manutenções corretivas eram realizadas pelo próprio operador da máquina. Contudo, a demanda por produtos de menor custo, promovida no século XX, acarretou uma mudança na estratégia, até então praticada. Segundo Moreira Neto (2011) o grande responsável por essa primeira transformação foi o Henry Ford:

Com a implantação da fabricação em série, instituída por Ford, as fábricas passaram a estabelecer programas mínimos de produção e, em consequência, sentiram necessidade de criar equipes que pudessem efetuar reparos em máquinas operatrizes no menor tempo possível. Assim surgiu um órgão subordinado à operação, cujo objetivo básico era de execução da manutenção corretiva.

Esse processo se estendeu até a era pós-guerra. Nessa época, segundo Brown e Sondalini (2013a), a maquinaria era precária e de funcionamento relativamente lento, com sistemas de instrumentação e controle primários, de forma que a maior parte dos processos era realizada manualmente (Figura 1).

Figura 1 – Linha de Montagem Manual

Fonte: Salanga (2017).

Até o momento, as demandas por uma grande produção não eram tão intensas, de forma que a baixa utilização dos ativos industriais não se caracterizava como um problema. Como os equipamentos eram pouco utilizados, apresentavam boa confiabilidade. Os autores ressaltam que, ainda hoje, podemos ver exemplos de máquinas feitas nesse período e que ainda operam e são, essencialmente, tão boas quanto eram no dia em que foram fabricadas. Já nessa época, após a Primeira Guerra Mundial, surgiu o conceito de confiabilidade em sistemas técnicos. Segundo Knight (1991), foram realizados estudos comparativos entre aviões com um, dois e quatro motores determinando a confiabilidade com relação aos números de falhas apresentados. Embora o conceito fosse revolucionário ainda era baseado em número de manutenções corretivas.

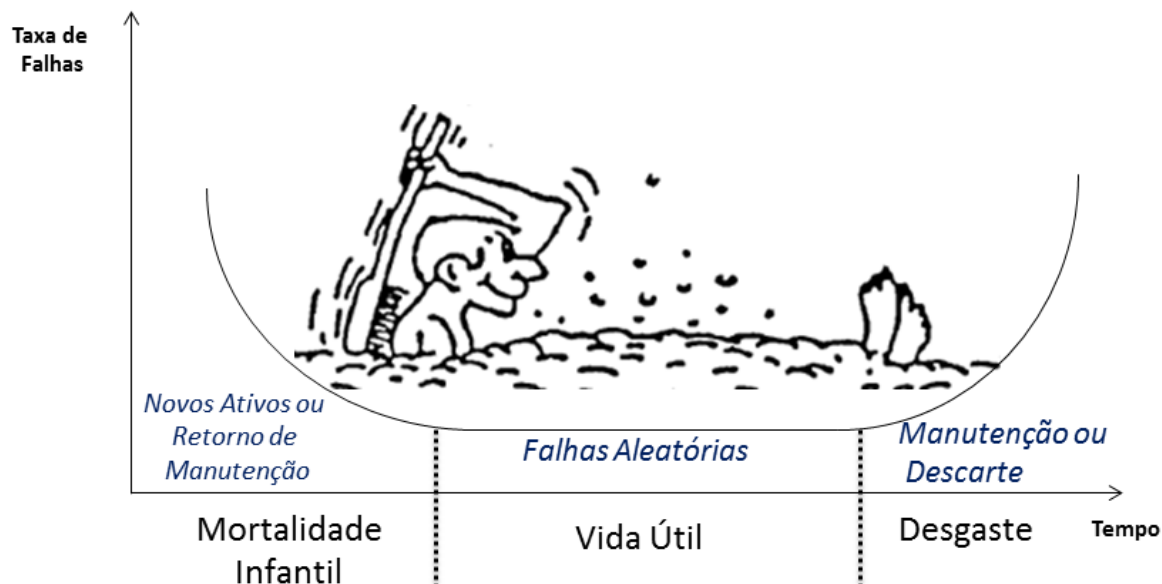
A Segunda Guerra Mundial (1939-1945) foi considerada um divisor de águas. Após a destruição causada pela guerra na Europa, as cidades e indústrias precisavam ser reconstruídas. Junto com a reconstrução veio o apoio financeiro americano a todos os países do bloco capitalista que precisavam se reerguer. Todo esse investimento gerou uma rápida recuperação e modernização das plantas industriais. A reconstrução mais difícil era demandada na Alemanha e Japão (países derrotados), e foram justamente as nações que apresentaram uma maior evolução, estabelecendo-se um novo referencial para a indústria, conforme afirmam Brown e Sondalini (2013a):

A partir da década de 1950 com a reconstrução da indústria após a guerra, particularmente as do Japão e da Alemanha, desenvolveu-se um mercado muito mais competitivo. Havia uma intolerância crescente ao tempo de inatividade. O custo do trabalho tornou-se cada vez mais significativo, levando ao acréscimo da mecanização e automação. A

maquinaria era de construção mais leve e funcionava a velocidades mais elevadas. Eles a usaram intensamente, porém, mostraram-se menos confiáveis, talvez por essa maior utilização. A produção exigiu uma melhor estratégia para os ativos, que levou ao desenvolvimento da manutenção preventiva planejada.

Moreira Neto (2011) ressalta que no período pós-guerra houve um aumento significativo da necessidade de uma produção mais ágil e, ao mesmo tempo, confiável. Os tempos de inatividade operacional gerados pela baixa utilização e por intervenções corretivas, aquela que ocorre após a falha ou quebra do ativo, não eram mais toleráveis. A manutenção preventiva surgia não só para corrigir as falhas, mas também para evitá-las. O setor de manutenção tornou-se tão importante quanto o da operação. Com a manutenção preventiva, iniciou-se uma cultura de estudo do perfil de perdas dos equipamentos. Percebeu-se que os equipamentos apresentavam maior taxa de falhas em períodos de tempos mais elevados de funcionamento. O primeiro estudo envolveu o conceito da “curva da banheira” (Gráfico 1), que é até hoje bastante utilizado. Nesse conceito, existem três fases bem definidas: a mortalidade infantil ou falhas prematuras devido à montagem ou projeto, falhas aleatórias e falhas de desgaste.

Gráfico 1 – Períodos de Vida da Curva da Banheira

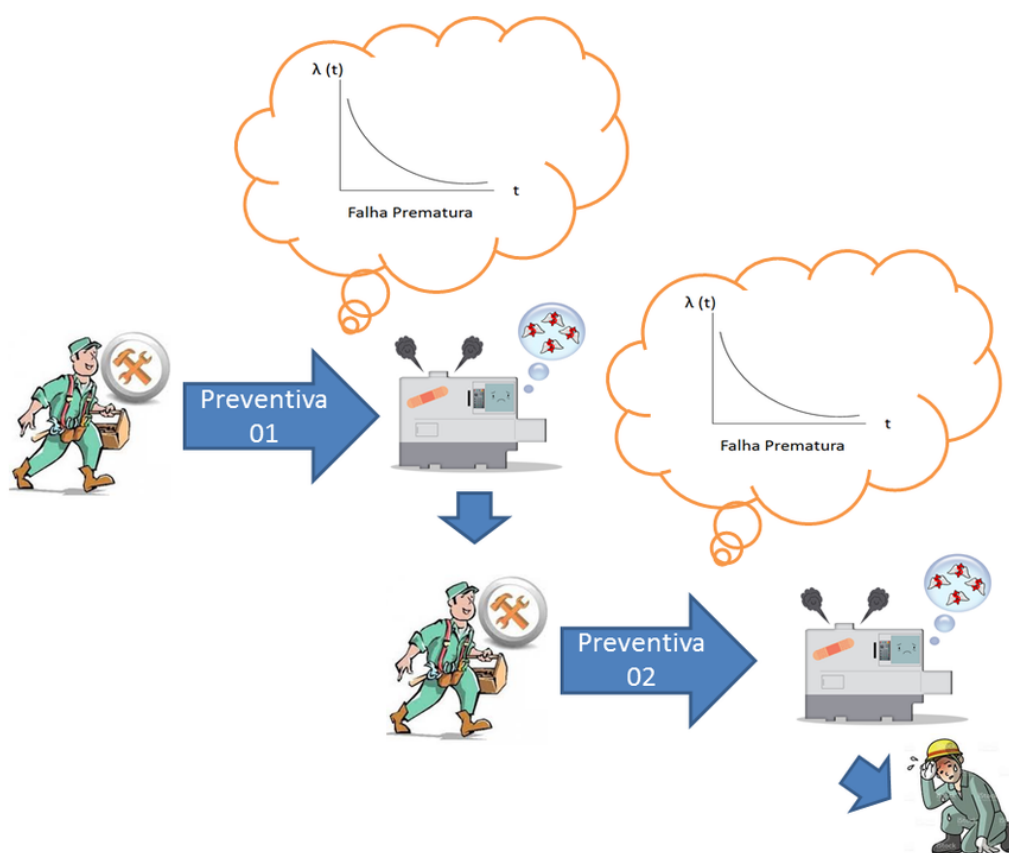


Fonte: Brown e Sondalini (2013).

Conforme Brown e Sondalini (2013a), o problema é que, após a realização de uma manutenção preventiva, buscando-se evitar a falha por desgaste nos ativos, era comum ocorrerem falhas prematuras, logo após a montagem do equipamento. Diante disso, surgiram estudos para se saber em qual momento da “curva da banheira” se valeria à pena a realização de uma intervenção. Como os equipamentos possuem

diversos componentes, com diversas distribuições de falhas diferentes, os estudos apontavam a existência de várias curvas de “mini-banheiras” (Figura 2). Essa estratégia muda após a evolução da aviação civil. A prática da manutenção preventiva planejada admitia uma taxa de falhas crescente para se realizar a intervenção. Essa estratégia para o setor de aviação se tornaria catastrófica. Junto à aviação civil, surge também as indústrias nucleares e aeroespaciais. Motivado por esse desenvolvimento, o matemático *Robert Lusser* desenvolve equações associadas à confiabilidade de um sistema em série após testes com foguetes. Isso impulsionaria uma melhoria da qualidade aliada às manutenções preventivas (LAFRAIA, 2011).

Figura 2 – Falhas Prematuras Após Intervenção Preventiva.



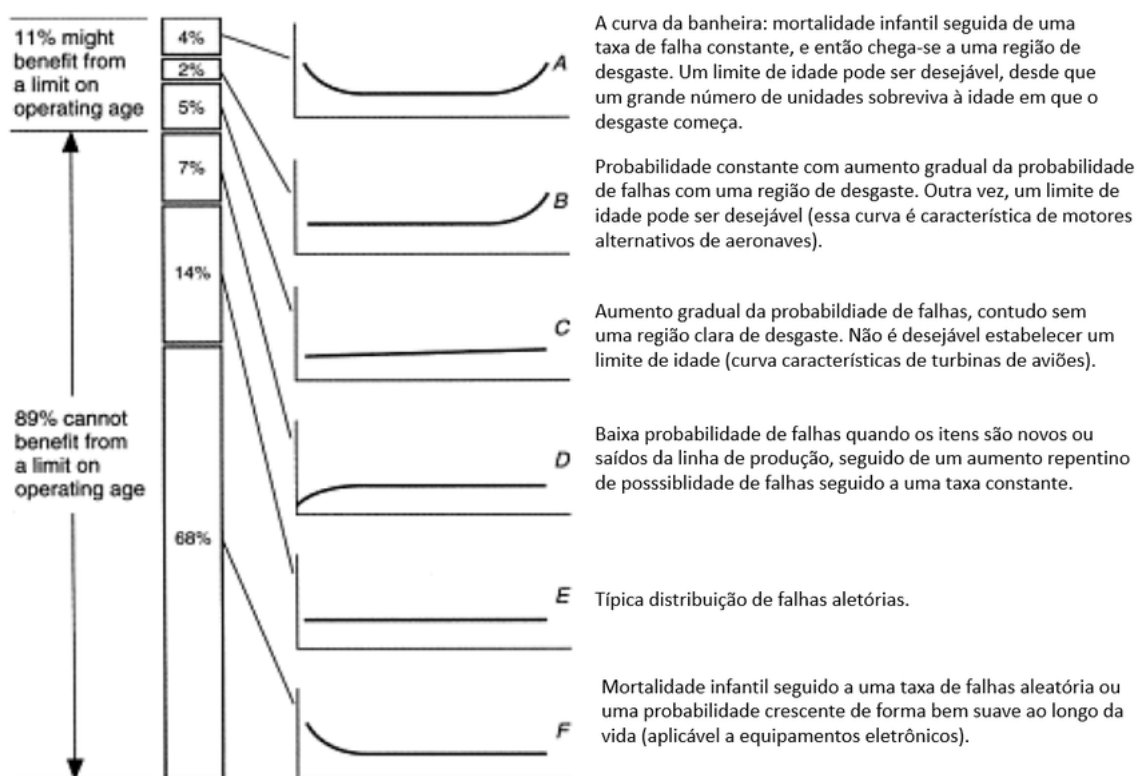
Fonte: O Autor (2017).

Por outro lado, as indústrias tradicionais ainda aplicavam a manutenção baseando-se na curva da banheira. Eles entenderam que, conforme os ativos operassem por mais tempo, percorreriam a curva ascendente de desgaste, levando-os às ocorrências de quebras mais frequentes. Em outras palavras, os ativos mais antigos, necessariamente, tornam-se menos confiáveis.

Na década de 60, com a introdução do *Boeing 747*, o setor de aviação questionou o conceito de que os equipamentos antigos possuíam maior probabilidade de falhar (BROWN; SONDALINI, 2013a). Na verdade, a maior parte dos componentes que

falhavam em um avião seguiam uma taxa de falhas constante. Conforme Anthony e Hinchcliffe (2003), em um estudo direcionado à *United Airlines*, levantou-se a informação que apenas 11% do grupo de componentes de um avião apresentavam perfil de falha por desgastes. Os outros 89% apresentavam quebras que não dependiam da idade do equipamento; eram falhas aleatórias (Figura 3).

Figura 3 – Curvas de Falhas de uma Aeronave.



Fonte: Anthony e Hinchcliffe (2003)

A manutenção preventiva não era eficaz para as falhas aleatórias, na verdade, ela era danosa, visto que toda intervenção preventiva poderia gerar falhas prematuras, diminuindo-se a confiabilidade do ativo. Para a proteção contra as falhas aleatórias, foi realizado um estudo e definidos parâmetros físicos para o acompanhamento do ativo (temperatura, vibração, espessura, ruídos etc) de forma a determinar a probabilidade de falha de um equipamento em potencial. Este foi o embrião da chamada manutenção preditiva. Os resultados foram tão positivos (diminuição das intervenções em 30 vezes, associada ao aumento da confiabilidade) que as indústrias começaram a seguir o mesmo caminho, embora, para Brown e Sondalini (2013b), uma indústria tradicional possua características bem distintas de uma companhia aérea. Ao longo dos anos subsequentes, ela seguiu esse estudo aplicado à aviação, e validou as suas conclusões. Isso resultou nos principais fundamentos da Manutenção Centrada na Confiabilidade ou *Reliability Centered Maintenance* (RCM). Nesse novo contexto, houve

a necessidade da redução da probabilidade de defeitos em produtos e sistemas, sejam por impactarem nos custos ou por gerarem acidentes (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009). Segundo Moreira Neto (2011), essa mudança na forma de gerenciar o perfil de falha levou a outras consequentes mudanças:

Com a preventiva baseada na estatística (tempo ou horas trabalhadas), observou-se que o tempo gasto para diagnosticar as falhas era maior que o de execução do reparo. A alta administração, então, resolveu selecionar equipes de especialistas para compor um órgão de assessoramento, que se denominou “Engenharia de Manutenção”, recebendo os encargos de planejar e controlar a manutenção preventiva e analisar causas e efeitos das avarias.

Com o avanço da tecnologia industrial assim como o surgimento das associações nacionais de manutenção, a engenharia de manutenção desenvolveu melhores critérios, fortalecendo o conceito de manutenção baseada em condições. O aumento de escopo desmembrou o setor, surgindo uma equipe que se dedicava apenas ao Planejamento e Controle da Manutenção (PCM). Nas décadas seguintes, a manutenção cada vez mais se aproxima do setor financeiro, ganhando um aspecto de área de gestão, no caso, o Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SGM). Esse conceito é fortalecido com o surgimento da Terotecnologia. Segundo Moreira Neto (2011):

É uma técnica que propunha a capacidade de combinar os meios financeiros, estudos de confiabilidade, avaliações técnica-econômicas e métodos de gerenciamento, de modo a obter ciclos de vida dos equipamentos cada vez menos dispendiosos.

O autor reforça que o conceito de Terotecnologia é a base da atual “manutenção centrada no negócio”, onde os aspectos de custos norteiam as decisões da área de manutenção, influenciando a estratégia das empresas. Tal técnica será melhor explicada no Capítulo 2.4.

Entre as décadas de 80 e 90, aparece uma forte tendência do mercado à adoção de normas que regulamentem a qualidade do produto e a interface com cliente. As corporações percebem que uma certificação geraria um diferencial no mercado. Há uma grande difusão do conceito de qualidade e da implantação das normas ISO 9000. Segundo Moreira Neto (2011), a manutenção eleva-se a um novo patamar de importância, quando, em 1993, entra no escopo dessas normas. A função manutenção agora era um setor vital dentro do processo de certificação. Contudo, conforme Kardec e Lafraia (2009), a manutenção, para atingir o patamar de área estratégica, precisa estar voltada para os resultados empresariais da organização. Segundo Kardec e Ribeiro (2002):

Esta nova postura é fruto dos novos desafios que se apresentam para as empresas neste novo cenário de uma economia globalizada e altamente competitiva, onde as mudanças se sucedem em alta velocidade e a manutenção, como uma das atividades fundamentais do processo produtivo, precisa ser um agente proativo.

O próximo patamar do chamado Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SGM) ocorre no ano de 2009, quando um novo conceito de gestão é criado, o Sistema de Gerenciamento de Ativos (SGA).

2.2 A Gestão de Ativos

Segundo Moreira Neto (2011), o Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SGM) evoluiu ao longo do tempo de forma a se tornar uma diretriz estratégica dentro das corporações. Essa importância é chancelada nos anos 1990, quando a ISO incluiu a função manutenção no seu processo de certificação ISO 9000. Na década seguinte, a preocupação com os custos operacionais aumentou, não só com as perdas relacionadas aos ativos físicos, mas também, com os custos gerados por acidentes, devido à falta de confiabilidade desses ativos. Tudo isso impacta negativamente na imagem da empresa. Esses eventos sempre são mais midiáticos, quando envolvem empresas de ativos intensivos. Era necessário que a função manutenção evoluísse de forma a não só gerir os ativos dentro de seu período operacional, mas por todo o seu ciclo de vida, assim como desenvolver técnicas que extraíssem o máximo deles para cumprir o plano estratégico organizacional.

Segundo ABRAMAN (2017), esse passo materializou-se em 2009, quando em Zurich, na Suíça, foi criado o *Global Forum on Maintenance & Asset Management* (GFMAM). Esse fórum teve como objetivo reunir todas as associações de Gestão de Ativos do mundo para desenvolver e padronizar publicações, normas, processos de certificação e discutir as questões comuns que afetam essas instituições. Foi criado o procedimento técnico denominado PAS-55, que estabelece 28 pontos norteadores para as empresas de modo a aperfeiçoarem o sistema de gerenciamento para todas as categorias de ativos físicos. O principal destaque desse procedimento é associar o desempenho dos ativos aos riscos e custos, todos ao longo do seu ciclo de vida, de forma a alcançar os objetivos estratégicos das corporações.

Segundo Lafraia (2013), a partir de 2010, em Londres, é criado um comitê denominado PC-251 da ISO. Esse comitê, nos três anos seguintes, promove fóruns de discussão em cinco países (Austrália, EUA, África do Sul, República Tcheca e Canadá) com o objetivo de desenvolver um modelo pelo padrão ISO partindo da instrução PAS. Essa norma é publicada em 2014 e, no mesmo ano, ela é traduzida para o português, graças aos esforços liderados pela Associação Brasileira de Manutenção

(ABRAMAN). A denominada ISO-55000 amplia os conceitos da sua antecessora PAS-55, principalmente no que tange às definições de ativos. Enquanto a PAS-55 (2008) refere-se apenas no gerenciamento de ativos físicos, afirmando: “O escopo desta PAS é focado na gestão de ativos físicos e sistemas de ativos”, a ISO-55000 inclui a possibilidade de um gerenciamento de ativos intangíveis, como uma marca, reputação da empresa ou recursos humanos, por exemplo. Percebe-se que a definição de ativo fornecido pela ISO 55000-1 (2014) é bem mais abrangente:

Um ativo é um item, coisa ou entidade que tem potencial ou valor real para uma organização. O valor poderá variar entre diferentes organizações e suas partes interessadas, ser tangível ou intangível, financeiro ou não financeiro. O período desde a criação de um ativo até o final de sua vida é a vida útil. A vida de um ativo não coincide, necessariamente, com o período em que qualquer organização é responsável por isso; em vez disso, um ativo pode fornecer valor potencial ou real a uma ou mais organizações ao em sua vida útil, e o valor do ativo para uma organização pode mudar ao longo da sua vida patrimonial.

Apesar da definição do escopo da norma (ativo) mudar da PAS para a ISO, não há grandes diferenças entre as suas prerrogativas de sistema de gestão. Ela apenas se torna mais abrangente na ISO e se adequa ao padrão de normas do Sistema de Gestão Integrado (SGI).

2.2.1 Definição de Gestão de Ativos

Segundo a PAS-55 (2008), em seu item 3.2, a Gestão de Ativos é definida como:

As atividades e práticas sistemáticas e coordenadas através das quais uma organização gerencia de forma otimizada e sustentável seus ativos e sistemas de ativos, seu desempenho, riscos e despesas associados ao longo de seus ciclos de vida com a finalidade de alcançar seu plano estratégico organizacional.

Segundo a PAS, o plano estratégico da empresa é representado por seu plano global a longo prazo. Esse incorpora a visão, a missão, os valores, as políticas empresariais, os requisitos das partes interessadas, os objetivos e o gerenciamento de riscos de uma empresa. Já, a norma ISO afirma que o gerenciamento de ativos traduz os objetivos da organização em decisões, planos e atividades relacionados a ativos, usando uma abordagem baseada em risco. Essas inter-relações são mostradas na Figura 4.

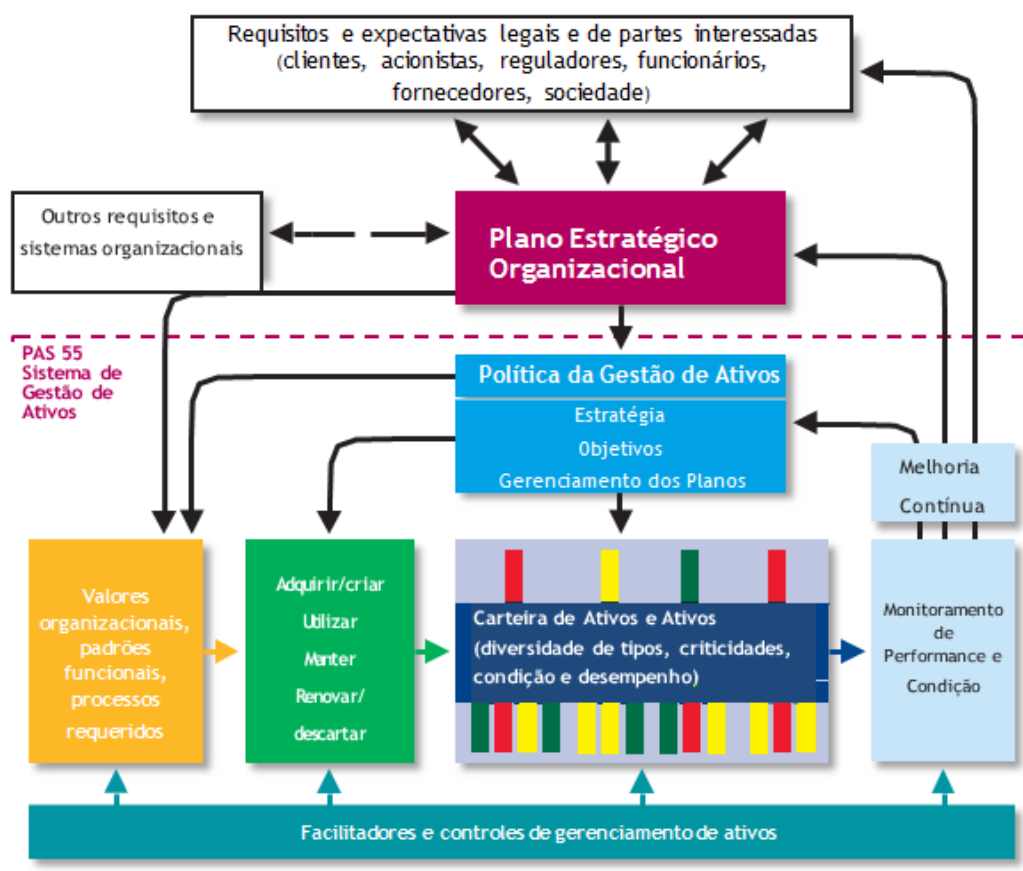
Figura 4 – Princípios e Atributos-Chave da Gestão de Ativos

Fonte: PAS-55:2008

2.2.2 O Sistema de Gerenciamento de Ativos

O plano estratégico organizacional é o ponto de partida para qualquer sistema de gerenciamento de ativos, sendo determinado pela diretoria como: objetivos e metas a curto, médio e longo prazos. Essa estratégia deve ser compartilhada e discutida com todos os envolvidos no processo da empresa. A Figura 5 mostra como o fluxo de informação influencia as políticas da corporação e como a definição do plano estratégico organizacional deve direcionar as políticas de gerenciamento de ativos. Desde que o plano estratégico foi divulgado e discutido com todas as equipes interessadas, há o “input” necessário para se determinar o planejamento estratégico do Sistema de Gerenciamento de Ativos (SGA).

Figura 5 – O Sistema de Gerenciamento de Ativos



Fonte: PAS-55 (2008).

O primeiro tópico discutido na norma talvez seja um dos mais impactantes nas empresas. É claro pela Figura 5 que uma falha na comunicação pode resultar em uma série de determinações equivocadas. A falta de comunicação só não é pior do que uma comunicação mal realizada ou divulgada. A deficiência nos desdobramentos da estratégia corporativa pode resultar em atitudes de lideranças e liderados na contra-mão dos objetivos traçados. Normalmente, cada área trabalha como se fosse autônoma, são cobrados por seus resultados individuais independente do resultado global. A estratégia deve ser bem definida e comunicada a cada gestor, da maneira correta e direta, com o objetivo de que todas as áreas caminhem no mesmo sentido, sabendo que estão inter-relacionadas. O canal de comunicação deve permanecer aberto sem interferências. Na prática, vemos eternas reuniões para discutir temas já definidos anteriormente, mas não bem compreendidos pelos colaboradores da empresa.

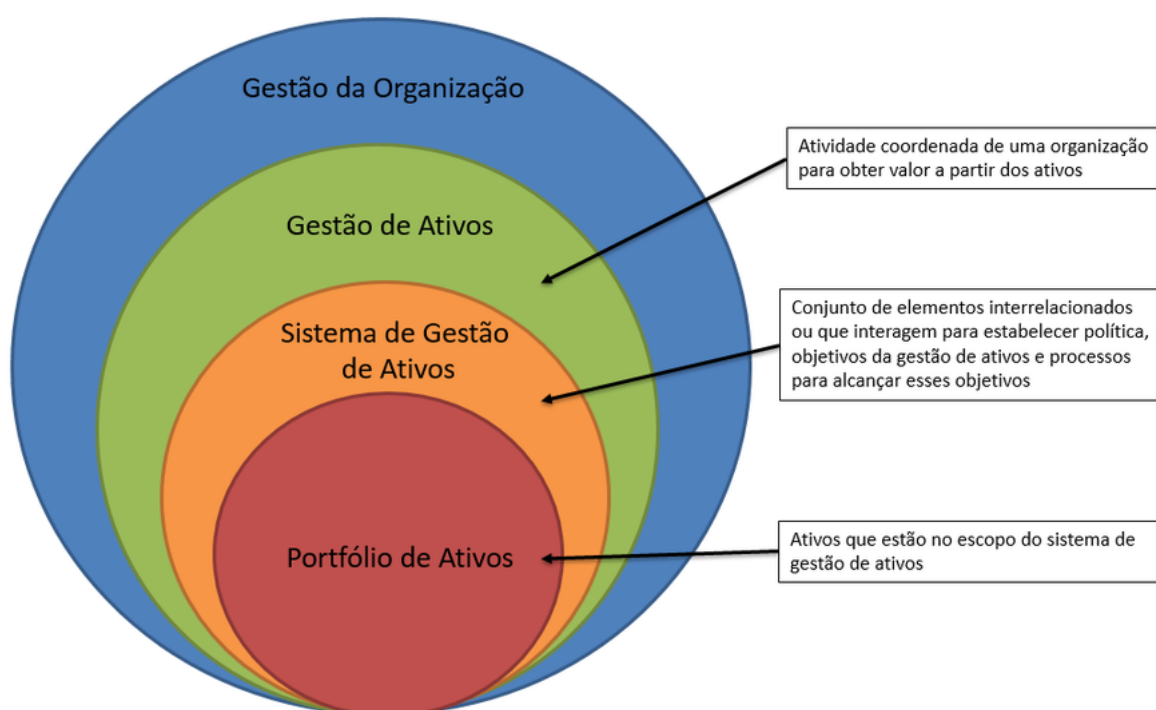
Conforme definição da ISO 55000-1 (2014), um SGA é:

... um conjunto de elementos de uma organização inter-relacionados ou interagindo entre si, cuja função é estabelecer a política e os objetivos do gerenciamento de ativos, assim como, os processos necessários para alcançar esses objetivos. Nesse contexto, os elementos do sistema

do gerenciamento de ativos devem ser vistos como um conjunto de ferramentas, incluindo políticas, planos, processos de negócios e sistemas de informação, que são integrados para garantir que as atividades sejam entregues.

A primeiro passo, segundo a Figura 5, é determinar a estratégia dos seus ativos, a partir da política definida. Nesse ponto a ISO nos revela que essa etapa consiste em atribuir valor a cada ativo. Devemos determinar quais ativos (sejam eles tangíveis ou intangíveis) devem ser considerados como relevantes para atendimento ao plano estratégico, os quais farão parte de um portfólio. A Figura 6 ilustra as etapas.

Figura 6 – Interrelações-Chave

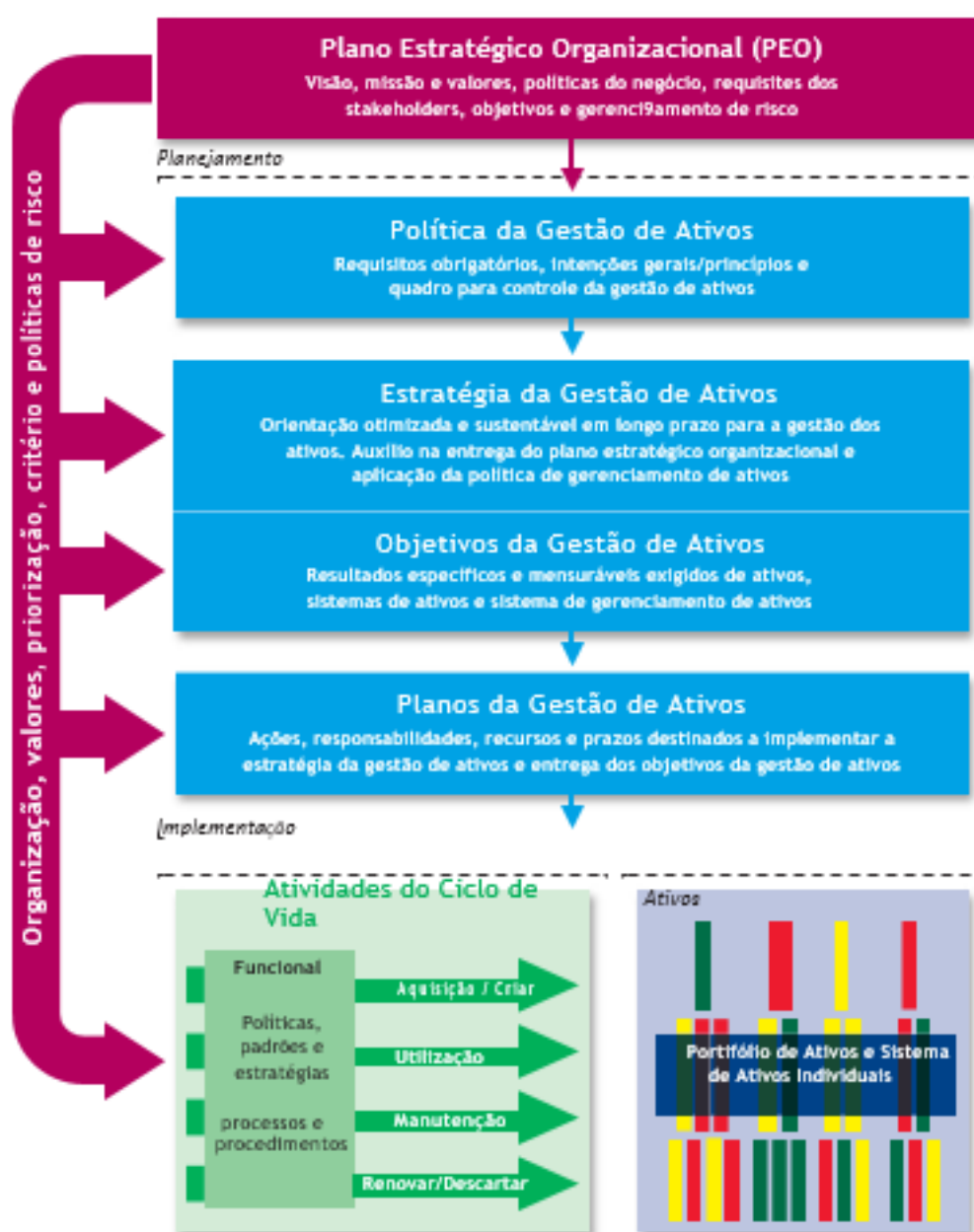


Fonte: ISO 55000 (2014)

É importante ressaltar que a importância estratégica do ativo será definida dentro de um plano com participação de equipes multidisciplinares (Figuras 6 e 7), de forma que a gestão de cada área saiba a importância de determinadas ocorrências. É comum em uma indústria, ativos que não foram inicialmente mapeados como críticos serem “promovidos” como tal após eventos de falha. A falta do cumprimento das determinações geradas pela estratégia fazem com que essas anomalias ocorram, e não raro as equipes convencem seus gestores da importância de criação de mais planos de manutenção ou aquisição de mais sobressalente sem verificar a análise anteriormente definida, aumentando os custos do setor.

Em seguida, determinam-se os objetivos individuais de cada ativo, dentro do portfólio escolhido, e geraram-se seus planos estratégicos. Pela Figura 7, considerando os ativos físicos, fica clara a importância do gerenciamento do ciclo de vida de cada ativo avaliado. Essa etapa fica mais evidente no fluxo em “atividades do ciclo de vida”.

Figura 7 – Planejamento e Implementação do Sistema



Fonte: PAS-55-1 (2008)

Segundo a PAS-55 (2008), o gerenciamento ideal do ciclo de vida dos ativos físicos depende fortemente da informação e do conhecimento, dos recursos humanos e financeiros, e, muitas vezes, tem um impacto significativo na reputação da empresa e na satisfação do cliente. Dentro da análise do gerenciamento de ciclo de vida do

ativo, destacamos os enfoques financeiro e econômico como um dos mais relevantes. A Figura 8 mostra como o LCCA está posicionado na interface entre os ativos físicos e financeiros.

Figura 8 – Contexto da PAS-55



Fonte: PAS-55 (2008).

Ainda na mesma figura, percebemos que há impactos entre os ativos físicos e outros ativos importantes. Uma baixa confiabilidade nesses ativos podem causar interferências além dos aspectos financeiros que é foco do trabalho. Eles podem causar desmotivação e pressões psicológicas nas equipes (aspecto humanos), falhas de informações (aspectos informacionais) e ainda, pode impactar a imagem de uma empresa, principalmente se uma falha resulta em um acidente de grandes proporções (aspecto intangíveis).

Percebe-se que o impacto do custo de ciclo de vida, embora seja financeiro, envolve mudanças na estratégia do Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SGM) e, por consequência, no Sistema de Gerenciamento de Ativos (SGA). A Figura 9 foi elaborada para melhor visualizar as áreas de influência em que o LCCA está envolvido.

Figura 9 – Influência do LCCA na Gestão de Ativos

Fonte: Autor (2017).

O custo de ciclo de vida determina estratégias dentro do SGM, tendo como influência a gestão financeira. Como essa ferramenta abrange todo o ciclo de vida econômica do ativo, ela está contida também na gestão do ciclo de vida dos ativos, um dos alicerces fundamentais do Sistema de Gerenciamento de Ativos (SGA).

2.2.3 Análise de Risco e Confiabilidade

A norma ISO 55000-1 (2014) ressalta que a Gestão de Ativos envolve o equilíbrio de custos, oportunidades e riscos, em relação ao desempenho desejado dos ativos, para atingir os objetivos organizacionais. Porém, um dos grandes problemas é a mensuração desses riscos. A avaliação qualitativa de riscos pode gerar erros de percepção e, na maioria das vezes, não ajuda na mensuração de prazos específicos para cumprimento de metas.

Esse ponto é tão relevante na Gestão de Ativos que a PAS-55 (2008) separa o item 4.4.7 apenas para discutir o gerenciamento de riscos. Ela ressalta que sua mensuração é difícil, seja pelo fato do valor poder variar em função do tempo e de condições, seja por resultados inconsistentes, devido à forma de cálculo de risco ser questionável. Esse ponto deve estar bem resolvido, visto que será preciso determinar medidas para controlar ou evitar tais riscos. O item 4.4.7.3 classifica os riscos que

devem ser mensurados:

- Risco de falha física (confiabilidade de equipamentos);
- Riscos operacionais (confiabilidade humana);
- Riscos ambientais (eventos naturais);
- Falhas externas (confiabilidade intrínseca de projeto);
- Risco de partes interessadas (requisitos de desempenho / imagem da empresa);
- Riscos associados às diferentes fases do ciclo de vida (confiabilidade dentro do LCM);

Segundo a ISO, com uma boa avaliação de riscos, o gerenciamento de ativos permite que uma organização examine a necessidade e o desempenho de ativos e sistemas de ativos em diferentes níveis. A norma enfatiza uma abordagem analítica para a gestão de um ativo nos diferentes estágios de seu ciclo de vida (que pode variar desde a concepção da necessidade do bem até sua disposição para seu descarte).

Vale ressaltar que a ferramenta do LCCA, aliada à engenharia da confiabilidade, gera maior credibilidade nos resultados da análise de riscos.

2.2.4 Os Benefícios da Gestão de Ativos

A norma ISO 55000-1 (2014) elenca quatro pontos de benefícios mais relevantes na aplicação de um gerenciamento de ativos nas empresas. Ela enfatiza que um SGA fornece uma abordagem estruturada para todas as etapas produtivas da empresa, pautadas no risco dos diferentes estágios de ciclo de vida dos principais ativos, de forma a atender ao planejamento estratégico previamente definido.

2.2.4.1 Aplicação da Gestão de Ativos

Apesar do esforço, investimento financeiro e tempo necessário para se implantar um SGA, seus benefícios já começam a aparecer antes mesmo do processo se completar. Pontos-chave, como redução de riscos, identificação de oportunidades ou melhoria de processos são mostrados desde o início da implantação do sistema. Esse fato, por si só, gera uma força motriz de autoconfiança entre os envolvidos no processo e acionistas, que percebem retornos em curto prazo.

2.2.4.2 Gerenciamento Integrado

Há grandes dificuldades dentro das indústrias em se definir corretamente os recursos de investimento. As análises de riscos geralmente utilizadas são superficiais, baseadas em experiências recentes ou interesses de determinadas áreas da empresa. Quando implantado, o SGA ajuda a compreender todos os ativos relevantes da empresa, seu desempenho e riscos associados. Pode-se apontar com segurança a necessidade de investimentos no local certo suportando as tomadas de decisões em diversas áreas da empresa. O SGA dá apoio ao gerenciamento de energia, gestão ambiental e outras atividades relacionadas à sustentabilidade.

2.2.4.3 Apoio à Gestão Financeira

Como não é comum uma gestão baseada no risco quantitativo, as indústrias possuem dificuldade em definir e manter estratégias a longo prazo. Os planos pluri-anuais são geralmente alterados, a cada nova revisão, causando incertezas sobre o gerenciamento da empresa. A Gestão de Ativos auxilia nas informações financeiras, de forma a deixá-las robustas, baseadas em processos integrados. Os riscos operacionais, aliados aos riscos financeiros, permitem planejamento a longo prazo, devido à visão de todo o ciclo de vida econômico dos ativos. O LCCA, quando bem aplicado dentro da Gestão de Ativos, possibilita um fluxo de informações de alta qualidade para a gestão financeira e, junto com as análises de riscos, permite uma taxonomia efetiva, com uma visão técnico-financeira integrada.

2.2.4.4 Desenvolvimento em Diversas Áreas da Empresa

Dentre as diversas áreas, setores ou departamentos de uma corporação beneficiadas com a implantação do Sistema de Gerenciamento de Ativos, podemos destacar:

- Recursos Humanos:

É comum haver falhas no rastreamento de competências e planejamento de treinamentos. A fonte de informação dos Recursos Humanos provém diretamente dos gestores, e o do seu conhecimento do colaborador. Com o SGA, o planejamento do desenvolvimento de competências poderá ser direcionado, de acordo com os dados fornecidos pelo sistema de gestão. Haverá um ganho na qualidade dos processos de recursos humanos.

- Sistemas de Controle Integrado:

A diversidade de bancos de dados espalhados em diferentes sistemas ainda é um problema dentro das corporações. Até mesmo os sistemas integradores como o *Systeme, Anwendungen, Produkte in der Datenverarbeitung* (SAP) ou *Sistemas, Aplicações e Programas em Processamento de Dados*, apresentam limitações. Com o SGA, os dados de controle que não costumam estar disponíveis para os sistemas de informação gerencial começarão a possuir interfaces. Essa comunicação trará mais qualidade às informações e, conseqüentemente, às tomadas de decisão subseqüentes.

- Interface com Terceiros

Como foi mencionado, a comunicação é um dos pontos mais frágeis dentro de um gerenciamento de pessoas, isso impacta os colaboradores diretos, e com ainda mais intensidade, os indiretos ou contratados. A melhoria na comunicação, informação dos ativos e sua disponibilidade pode resultar na melhoria do relacionamento com empresas terceirizadas. As tomadas de decisões possuem clara motivação e podem resultar no aumento da conscientização de todos os indivíduos e do impacto que suas atividades, até então isoladas, geram em todo o sistema.

- Cultura Motivacional

Não raro vemos empresas com problemas motivacionais, colaboradores que trabalham muito mas possuem a percepção de agregarem pouco. O retrabalho e a falta de resultados contribuem para um ambiente desmotivado e propícios a conflitos internos. Com uma gestão mais clara e objetiva, é natural que uma melhoria nos resultados apareça. A boa comunicação do processo de gestão e dos resultados possui um poder grande de estimular a criatividade e inovação das pessoas. Haverá um aumento motivacional dentro das equipes.

2.2.5 Adequação ao Sistema de Gestão Integrado (SGI)

Na criação da instrução normativa PAS-55 (2008), já existia uma Tabela de correspondência (Anexo A) entre os requisitos da PAS e os das normas ISO série 9000 e 14000, assim como a OSHAS 18000. Isso foi feito para aproximar a PAS aos modelos de gerenciamento existentes e certificáveis do sistema ISO. Após a criação da ISO 55000, em 2014, essa integração torna-se completa e natural, de forma que o sistema de Gestão de Ativos pode ser facilmente incorporado às rotinas de auditoria e certificação, dentro do SGI atual. Por fim, na Figura 10, podemos visualizar o sistema de gerenciamento de ativos, sob a ótica da cultura de melhoria contínua ou *Plan-Do-Check-Act* (PDCA).

Figura 10 – PDCA da Gestão de Ativos



Fonte: PAS-55 (2008).

Ao final, pudemos ter ideia da estruturação que as normas de Gestão de Ativos propõem. A seguir, ressaltamos a importância do custo dentro do ciclo de vida de um ativo industrial, principalmente em seu período maior, o operacional, em que o setor de manutenção é responsável.

2.3 A Importância do Custo no Setor de Manutenção

Como foi visto, o conceito de manutenção dos ativos se transformou drasticamente: de acordo com Kardec e Nascif (2001), o simples reparo de um equipamento para que a linha permanecesse produzindo, sem qualquer questionamento de eficiência e impactos financeiros, evoluiu ao longo dos anos para uma necessidade de maior disponibilidade da era pós-guerra, culminando após três gerações no investimento em automação, confiabilidade e gerenciamento do ciclo de custo de vida como prioridades para uma decisão mais efetiva quanto aos resultados esperados do negócio.

Segundo Pintelon e Gelders (1992), o conceito de manutenção se refere à maximização da disponibilidade e confiabilidade dos ativos, buscando garantir a continuidade operacional e a agregação de valor para o cliente através de produtos conformes, na quantidade certa, no prazo certo e a um custo viável, sem desperdícios e perdas e em total consonância às suas especificações técnicas e às normas de qualidade,

segurança e meio ambiente pertinentes.

As normas PAS-55 (2008) assim como a ISO 55000-1 (2014), estabelecem como pedra fundamental da Gestão de Ativos o acompanhamento do ciclo de vida dos ativos baseado no risco. O gerenciamento do ciclo de vida dos ativos ou *Life-Cycle Management* (LCM) inicia-se pela análise do custo do ciclo de vida do ativo ou *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA), estendendo-se para as demais áreas dos sistemas de gestão integrada: saúde, segurança e meio-ambiente. A adoção de uma análise de LCM irá impactar diretamente no conceito de manutenção, porque nos permite abrir uma perspectiva, inclusive, sobre a noção mais clara de falha, gerando uma classificação dos fenômenos que consideram os papéis das partes interessadas envolvidas nas várias fases do ciclo de vida do ativo (FRATE, 2013).

Ainda segundo o escopo da PAS-55 (2008) observamos que a análise do ciclo do ativo deve ser feita baseada em um método confiável de monitoramento e medição de modo a possibilitar uma correta avaliação. Este acompanhamento será mais efetivo com o auxílio de novos conceitos tecnológicos como: redes de monitoramento de sinais sincronizadas, integração de plataformas e disponibilidade das diversas informações para tomada de decisão. A virtualização do monitoramento do ativo caminha em harmonia com as novas tendências do mercado chamada indústria 4.0 ou quarta geração. Segundo Mario, Tobias e Boris (2015), este novo movimento visa integrar várias características como: implementação de sistemas *ciber*-físicos, interconectividade e virtualização das informações em nuvens de dados, possibilitando tomadas de ação em tempo real. Concluimos que a análise de ciclo de vida dentro da Gestão de Ativos está atrelada tanto a uma nova concepção de pensamento gerencial como a necessária aplicação de novas tecnologias.

Embora tenha havido uma revolução nos conceitos dentro do Sistema de Gerenciamento de Ativos, grande parte das empresas ainda não evoluiu nessa prática. Elas ainda trabalham com mentalidades antigas, arraigadas às experiências vividas e sentimentos utilizando métodos ultrapassados e de caráter subjetivo para análise de custos. Tais métodos não estão fundamentados pela técnica e afetam direta e negativamente nos resultados da empresa. Segundo Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016) ainda trabalhamos com redução máxima de custos de forma extremamente amadora sem utilizarmos ferramentas adequadas para tal. Os mesmos autores ressaltam que a falta de profissionalismo leva à geração de custos “ocultos” dentro do processo. Essa mesma falta de profissionalismo dentro da manutenção pode levar também aos “excessos de intervenções preventivas”, o que leva, frequentemente, ao aumento do custo desse setor, aumentando assim o custo do ciclo de vida de um produto ou ativo (ASJAD; KHAN, 2016).

Foster e Tran (1990) já alertavam sobre o corte de custos em trabalho de

manutenção e materiais ao invés de aplicar políticas de práticas ótimas de gestão. O resultado disto ao longo dos anos é que os custos de manutenção se tornaram o segundo maior, ou mesmo o elemento mais alto dos custos operacionais em indústria de ativos intensivos. Em suma, passaram a ser uma prioridade na área de controle financeiro (MOUBRAY, 1997).

O objetivo de gerenciar custos tornou-se um dos maiores desafios para as empresas no mundo. Sundberg (2003), por exemplo, explica que sua redução em um setor da empresa poderia aumentar as despesas em outro departamento. De fato, a redução de custos na aquisição de compra de peças poderia levar a um aumento no custo da manutenção caso a qualidade do produto fosse prejudicada. Por outro lado, se houver um trabalho de aumento de eficiência das equipes mantenedoras, as paradas por corretivas diminuirão e a consequente redução nas perdas na produção sem necessariamente aumentar o custo dentro do setor de manutenção (BARRAZA-BARRAZA; BERUVIDES; LIMON-ROBLES, 2014).

A busca pela excelência operacional perpassa por toda a cadeia produtiva da empresa, necessitando de um gerenciamento proativo e focado nos objetivos estratégicos. Daí a importância de gerenciarmos os custos de manutenção de forma racional, com técnicas e ferramentas modernas que possam subsidiar, com confiabilidade e agilidade, as tomadas de ações de forma a serem eficazes, contribuindo para a sobrevivência e competitividade da organização.

2.4 A Terotecnologia

O termo Terotecnologia surgiu nos anos 1970 pelo *British Standards Institute (BSI)*, do Ministério da Tecnologia do Reino Unido ao estabelecer novas normas voltadas para facilitar a manutenção de máquinas, equipamentos e sistemas por seus usuários (IRANI, 2011).

Ela é a gestão econômica de bens, destinada a medir os valores operacionais de ativos físicos. A técnica permite que uma empresa verifique como esses itens físicos fornecerão valor agregado às empresas ao longo de vários anos (BRANCO, 2018). Essa preocupação foi reconhecida pelos estudos do governo do Reino Unido no final da década de 1960. A Terotecnologia foi definida para descrever as áreas de administração e engenharia preocupadas com esses fatores (K; KELLY; EASTBURN, 1982). O termo em grego significa “Teconologia do Cuidar”, o que remete a um olhar no ciclo de vida do equipamento.

Para Irani (2011), um de seus pilares básicos é a busca constante de alternativas técnicas para obter esses ciclos de vida cada vez menos dispendiosos. Portanto, a Terotecnologia necessita da participação de um ou mais especialistas em manutenção

desde a concepção do ativo até sua instalação, assim como em suas primeiras horas de produção. O mesmo autor enfatiza que:

A Terotecnologia afirma que a manutenção precisa deixar de ser apenas eficiente para se tornar eficaz, ou seja, não basta apenas, reparar o equipamento ou instalação tão rápido quanto possível, e sim, manter o equipamento em operação, evitando a sua falha.

Branco (2018) reforça que esta ciência está preocupada com a confiabilidade e a durabilidade dos recursos físicos, contudo, também leva em conta os processos de instalação, comissionamento, operação, manutenção, modificação e substituição das peças. Já K, Kelly e Eastburn (1982) considera que os objetivos da Terotecnologia estão relacionados com “a otimização da manutenção total e os custos de propriedade ao longo do ciclo de vida do equipamento”

Além de estar relacionado com a gestão do ciclo de vida de ativos, a Terotecnologia impulsionou os primeiros estudos de confiabilidade aplicados à manutenção. A curva da banheira (Gráfico 1), foi utilizada como base de estudo para essa ciência determinando os ciclos de falhas de um ativo: projeto, aleatórios e de desgaste (IRANI, 2011; BRANCO, 2018).

Com o tempo, essa ciência ganhou mais relevância, tendo em vista o mercado aberto global e o aumento da concorrência forçando uma melhor gestão de custos. Segundo Ibrahim (2004), a globalização aumentou a consciência da importância da Terotecnologia e dos custos do ciclo de vida para a sobrevivência de estabelecimentos industriais.

Embora a evolução seja lenta, podemos concluir que a Terotecnologia contribuiu para que os conceitos da aplicação do custo de ciclo de vida de ativos fossem discutidos nas indústrias, como possibilitou o início do desenvolvimento da Engenharia da Manutenção de forma científica, baseado na confiabilidade dos ativos.

2.5 A Análise do Custo de Ciclo de Vida

Para todo bem adquirido, seja pessoal ou dentro das corporações, se admite um ciclo de vida útil, tempo ao qual o produto não mais conseguirá desempenhar suas funções inicialmente esperadas, seja devido ao desgaste, alto custo ao longo do período para mantê-lo ou usá-lo, ou, como é mais comum nos dias atuais, principalmente com itens eletrônicos, por obsolescência tecnológica. Na maioria das vezes, as pessoas comuns não possuem o hábito de verificar tais custos baseando sua decisão de compra ou descarte ao seu livre-arbítrio. Para o caso de uma indústria, onde os ativos possuem alto valor agregado não é inteligente agir da mesma forma o que nos leva a uma necessidade de acompanharmos o seu ciclo de vida econômico.

O conceito da análise do custo do ciclo de vida ou *Life-Cycle Cost Analysis* (LCCA), pode ser traduzido como segundo Pereira (2009):

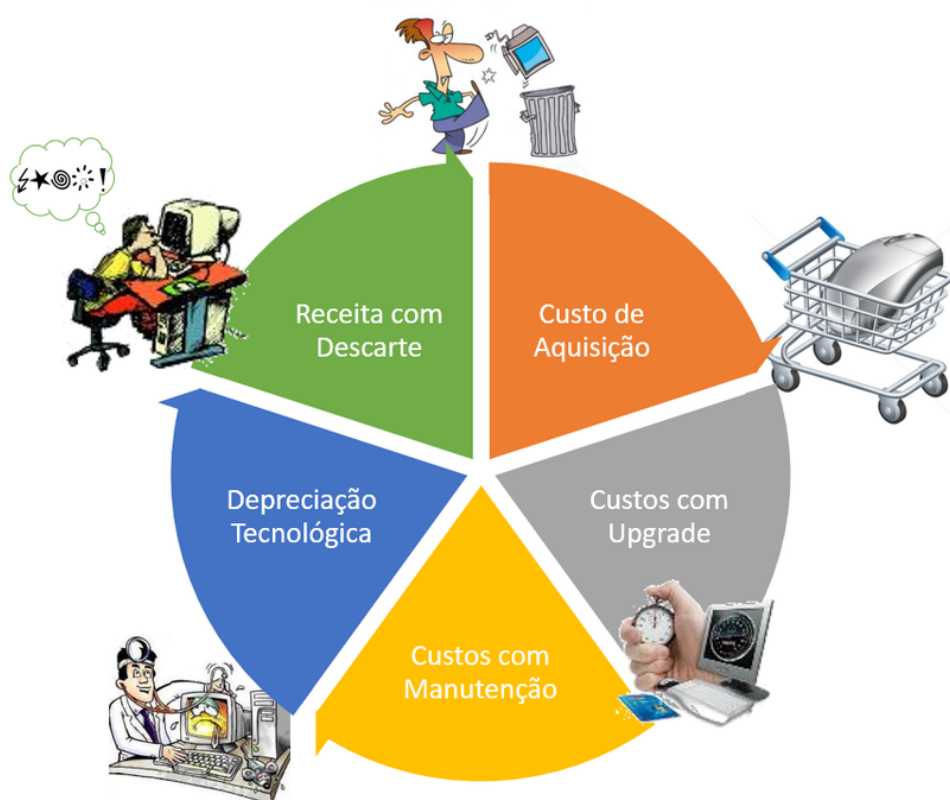
... um método de cálculo da totalidade dos custos inerentes à fruição de um produto ou à exploração de um projeto, durante toda a vida desse produto ou projeto

Já o dicionário de termos de manutenção Branco Filho (2006) define o LCCA como:

... o custo total de um equipamento, componente ou peça ao longo de sua vida, incluindo despesas de aquisição, montagem, testes, operação, manutenção, melhorias, modificações, remoção e alienação” .

Tal técnica se dispõe a verificar todos os fatores econômicos reunidos em uma verificação em um ponto no tempo (MOREIRA NETO, 2016). A Figura 11 ilustra a ideia do ciclo de vida de um computador, como exemplo.

Figura 11 – Análise do Custo de Ciclo de Vida de um Computador



Fonte: Autor (2017)

Vimos no Capítulo 2.4 que a Inglaterra iniciava seus passos nesse sentido por meio da Terotecnologia. Contudo, de acordo com Pereira (2009), os Estados Unidos

foram pioneiros na análise do custo de ciclo de vida, inicialmente dentro da área militar tendo destaque o importante papel do *U.S. Department of Defense*, órgão responsável pela aplicação do LCCA a todos os novos sistemas de armamento. Esta cultura definiu uma prática dentro deste setor, denominada *design cost* (BROWN; YANUCK, 1985). Na área civil, já em 1963 surgiu o conceito do custo do ciclo de vida ou *Life-Cycle Cost* (LCC), contudo, apenas aplicados a produtos de um tempo útil limitado (KEOLEIAN, 1994). Em 1976 o mesmo conceito foi ampliado de forma a atingir todos os ativos físicos (WHITE; OSWALD, 1976).

Apesar de o conceito fundamental estar definido, o uso da ferramenta ainda estava restrito às forças armadas até o final da década de 1970 (KAWAUCHI; RAUSAND, 1999), com raras exceções. Em 1979 o U.S. D.O.E (departamento de energia norte americano) estabeleceu padrões de eficiência energética dos eletrodomésticos no país pautados na análise LCC (WIEL; MCMAHON, 2005). Porém, somente na década de 1980 sua utilização definitivamente se iniciou fora do escopo militar vindo a surgir diversas literaturas com metodologias ao apoio à decisão (MARQUES, 2009). Entre 1980 a 1995 foi desenvolvido e aperfeiçoado um guia denominado de *Life-Cycle Costing Manual* de modo a promover a técnica, principalmente nos projetos de conservação de energia em edifícios federais nos Estados Unidos, esse guia se tornou importante apoio para aplicação de maneira fácil e acessível a um público multidisciplinar (arquiteto, engenheiros, analistas e gestores) (PEREIRA, 2009).

Com o passar do tempo, a ferramenta ganhou flexibilidade surgindo várias áreas de aplicação tal como indústrias (YULING et al., 2009), setor energético (NUGRAHA; ARIFANTO; SINISUKA, 2014), plantas químicas e petroquímicas (MÁRQUEZ et al., 2010), mineração (BALABA; IBRAHIM, 2011), setor de construção (KONG; FRANGOPOL, 2004), informática, telecomunicações e até mesmo para a gestão de meio ambiente (WILLERS; RODRIGUES; SILVA, 2013). Este último definido apenas como LCM (*Life-Cycle Management*) por não ser considerado apenas uma análise simplesmente econômica.

Embora o LCCA possua uma boa flexibilidade de aplicações, seu histórico nos mostra uma restrição na área operacional das empresas. A literatura aponta que 70 a 90% dos custos totais do ciclo de vida são definidos ainda na fase do projeto (BESCHERER, 2005), (DOWLATSHAHI, 1992), (LINDHOLM; SUOMALA, 2007) o que levou essa ferramenta a se concentrar durante um período quase exclusivamente nesta área de conhecimento. Considerando outra limitação, segundo Kayrbekova e Markeset (2011), o LCCA tem sido discutido na literatura durante muitos anos, mas “... é difícil de realizar esta análise, devido à necessidade de uma grande quantidade de dados e a incerteza inerente aos resultados”. Os autores ainda enfatizam que “há pouca evidência na literatura sobre o uso prático da ferramenta”. Já para Higham,

Fortune e James (2015), o LCCA ainda é pouco utilizado, principalmente pelo baixo conhecimento dos profissionais e clientes, falta de confiabilidade de dados em longo prazo e a existência de uma cultura de apenas acompanhar o início do ciclo de vida do produto ou ativo, abandonando a ferramenta no resto de seu uso ou funcionamento.

Como foi visto no Capítulo 2.2, novos conceitos do que se chamou de Gestão de Ativos (GA) estão ganhando espaço. Difundido com maior ênfase na Inglaterra e baseada na instrução técnica PAS-55 e posteriormente transformada em norma (ISO 55000) a PAS-55 (2008) define que dentro da rotina operacional deverão ser acompanhados os ciclos de vida dos principais ativos. Dentro desta nova percepção, o LCCA adquire novo potencial de aplicação. Segundo Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016):

... com novos paradigmas no sistema de gestão tal como a Gestão de Ativos e necessidade de maior controle de custos frente às frequentes crises financeiras, cada vez mais comuns em nosso ambiente globalizado, o acompanhamento do ciclo de vida dos ativos se destaca como uma das técnicas mais eficientes para se adequar à nova realidade.

Segundo Asjad e Khan (2016), a Gestão de Ativos é uma das maneiras de melhorar a produtividade devido à diminuição de custos, o que pode ser visto como a estratégia de gestão para diferentes fases do ciclo de vida de ativos.

Recentemente, o governo britânico decretou uma nova legislação para a construção civil, denominada *New Rules for Measurement* (NRM3) em que estabelece as novas regras para esta área até o ano de 2025. Toda a projeção deverá ser baseada em modelos de custo de ciclo de vida. A norma desafia os gerentes e investidores a encontrar uma maneira de reduzir os custos totais de todo o ciclo de vida em até 33% (GREEN, 2015). Ainda mais, isto significa que todas as equipes de projeto do setor público deverão começar um ajuste de como fazer o ciclo de vida de custeio, conforme o mesmo autor:

Isso terá enormes benefícios para o setor imobiliário do Reino Unido e da indústria de manutenção, porque vai permitir comparar os custos de todas as partes interessadas em uma base “like-for-like” ao longo das etapas principais do ciclo de vida do edifício (criação, viabilidade, design, construção, entrega e em uso, até o fim da vida).

Apesar das dificuldades encontradas, é notório o aumento da importância desta ferramenta ao longo dos anos. Isto nos permite vislumbrar o impacto de diversas aplicações dentro de setores que sempre apresentaram dificuldades em seu controle de custos aumentando a competitividade no mercado. Destacamos especificamente o setor de manutenção industrial que, como foi observado no Capítulo 2.3, ainda apresenta grande defasagem nesta área de conhecimento.

2.6 Metodologia da Análise do Custo de Ciclo de Vida

Como foi visto anteriormente, a ferramenta LCCA se mostra de grande importância para as corporações. Se bem aplicada ajuda substancialmente na previsão orçamentária de todo o ciclo de um negócio. Mas como estruturar um estudo desta natureza? A flexibilidade permite moldar o LCCA de acordo com a necessidade. Talvez esta mesma flexibilidade tenha impedido de até o momento se estabelecer uma metodologia prática que defina com poucas etapas sua implantação.

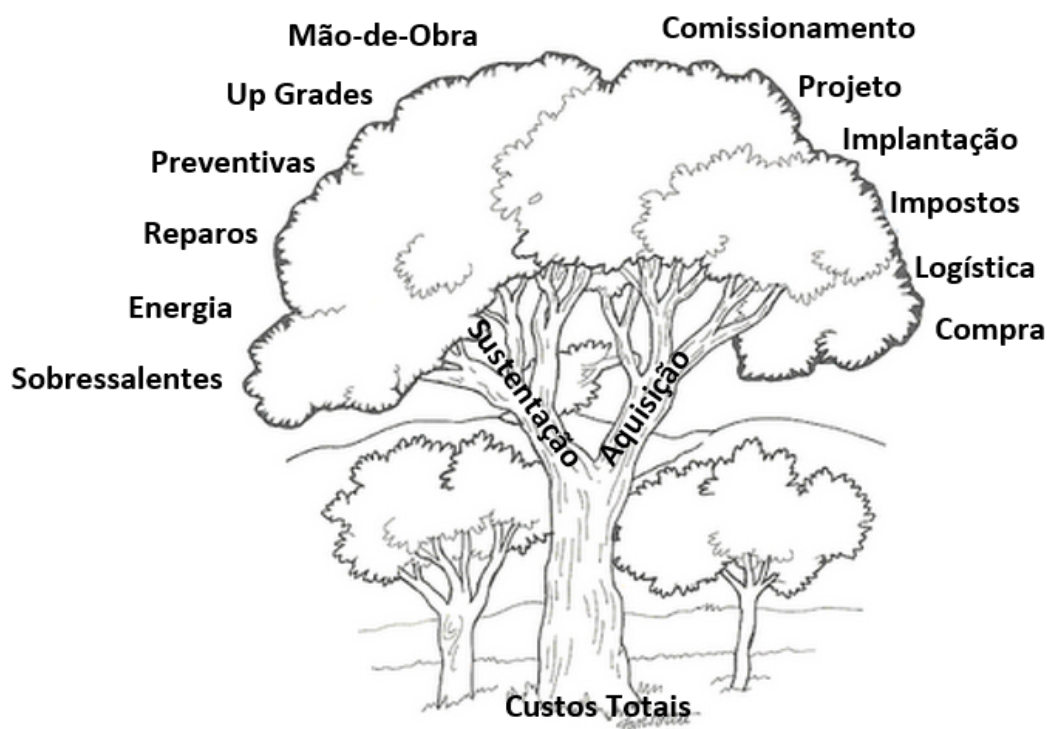
2.6.1 Elementos de Custo

Qualquer metodologia aplicável à análise de custo de vida se apoiará nos chamados “elementos de custos”. De acordo com Brick e Pilla (2004) são:

... valores determinados com base na utilização de técnicas de estimativas e de otimização que são combinadas entre si, de acordo com a natureza do problema em questão e com as necessidades e objetivos de análise”

Eles ressaltam ainda que esse cálculo é suportado por “técnicas, suposições e modelos utilizados para estimá-lo”. Já autores como Barringer et al. (1995), preferem estruturar os custos em um formato de uma árvore onde desta partem dois ramos principais: custo de aquisição e de sustentação (Figura 12).

Figura 12 – Árvore de Custos de Barringer e Weber



Fonte: Barringer e Weber (1996)

Conforme Sousa (2013), destacam-se quatro categorias de custos a serem consideradas na indústria, a depender da área de atuação:

- Pesquisa e Desenvolvimento;
- Construção e Instalação;
- Operação;
- Manutenção;
- Descarte;

É notória a diversificação de quais elementos de custos serão considerados, tudo dependendo do nível de detalhamento que se pode mensurar. Kayrbekova e Markeset (2011), explicam que:

Caso se tenha extensa e precisa base de dados de custos, pode-se aderir a uma técnica denominada AB-LCC (activity-based life cycle costing). Ela permite mais detalhamento dos elementos de custos dentro de cada processo ou sub-processo do projeto. A vantagem lógica é a assertividade maior na previsão orçamentária, porém, só será possível com uma extensa base de dados, que geralmente não existe, na prática.

Nas indústrias consideradas de ativos intensivos, tais como mineradores e petroquímicas, o LCCA se destaca principalmente no período operacional, simplesmente porque se trata do maior tempo dentro de todo o ciclo de vida industrial. Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016), enfatiza que:

Dentre os vários elementos de custos existentes na literatura os mais impactantes dentro da rotina de uma indústria são os relacionados com operação e manutenção.

Podemos afirmar que qualquer trabalho dentro da indústria com uso do LCC só será eficaz se o profissional considerar os custos de operação e manutenção como os mais relevantes dentro dos impactos financeiros totais (BLANCK L., 2008). Como exemplo, Seif e Rabbani (2014), no seu estudo de LCC em máquinas industriais determinaram elementos focados nos custos operacionais:

- 1) Custo de aquisição: máquina nova;
- 2) Custo de detenção: máquinas novas estocadas no armazém;
- 3) Custo de manutenção corretiva: falhas imprevistas que permitem reparos;
- 4) Custo de manutenção preventiva: manutenções programadas;
- 5) Custo de operação: consumo e custo de mão-de-obra;

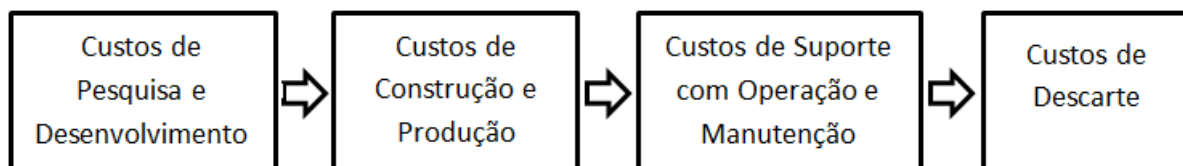
Na prática, percebemos que os custos operacionais (manutenção e operação), junto com os de estocagem de sobressalentes, são os mais importantes e também os mais difíceis de prever ou estimar.

2.6.2 Estimação de Eventos

Após determinados os elementos de custos mais relevantes, devemos realizar uma estimativa para ocorrência de eventos de falhas. Para estudarmos esta estimativa, destacamos o importante trabalho de pesquisa realizado por Korpi e Ala-Risku (2008). Em seu artigo, foram levantados oito métodos diferentes para aplicação do LCCA, dentre eles apenas três foram considerados mais relevantes na descrição do ciclo de vida do custeio: Emblemssvåg (2001) ; Woodward (1997) e Blanchard e Fabrycky (1991).

Blanchard e Fabrycky (1991) usaram um fluxo de quatro etapas para categorizar os elementos de custos de um produto individual (Diagrama 1). Embora a ideia tenha sido bem estruturada, ela foi criticada pela ausência dos custos envolvendo a fase de projetos (ELLRAM; SIFERD, 1998).

Diagrama 1 – Categoria de Custos de Ciclo de Vida



Fonte: Blanchard e Fabrycky (1991).

Dentro destes elementos de custos Blanchard e Fabrycky (1991) introduziram três maneiras diferentes para estima-los:

- 1) Estimativa através de procedimentos de engenharia (poucos elementos de custos / mais dados / boa precisão);
- 2) Estimativa por métodos ou analogia (adota-se um método pré-determinado de acordo com o tipo de ativo a ser monitorado / precisão baixa);
- 3) Método de estimativa paramétrica (precisa de muitos dados / melhor precisão / depende da experiência do estimador);

A estimativa através de procedimentos de engenharia trabalha o mapeamento até o nível mais baixo do detalhe do projeto precisando de muitos dados e da realização de muitos cálculos. Este método não desconsidera nenhuma informação. Por este mesmo motivo ele gera bons resultados de precisão na estimativa dos custos.

Na estimativa por métodos ou por analogia teremos, como o próprio nome diz, uma analogia entre estimativas já existentes de diferentes produtos verificando suas características específicas, não sendo necessário o julgamento de banco de dados o que resulta em um processo com menor esforço a ser implementado. Pode-se chegar ou não até um bom detalhamento do sistema, porém, há uma forte dependência do nível de experiência e conhecimento do responsável pela análise. Ainda assim temos altos riscos de gerar resultados com baixa precisão. Muito utilizado para ciclo de vida de novos produtos quando não há a existência de históricos.

Já na estimativa por meios paramétricos utilizaremos dados estocásticos que modelarão curvas estatísticas de vida, em que será possível gerar previsões futuras. De maneira geral requer uma boa base de dados e possui a melhor precisão. Este tipo de estimativa é sugerida pelos autores Blanchard e Fabrycky (1991).

Korpi e Ala-Risku (2008) afirmam que a estimativa por método é, frequentemente, mais usual, embora devamos ter cautela ao determinarmos o melhor método de custeio a ser utilizado. Emblemssvåg (2001) sugere o custeio baseado em atividades (ABC). No entanto, o mesmo não é facilmente aplicado porque requerem “extensas

bases de dados”. Alguns autores, como Kayrbekova e Markeset (2011) chegam a afirmar que “um LCC completo pode ser impossível devido à enorme necessidade de dados e informações”. A realidade industrial nos diz que uma quantidade grande de dados muitas vezes não é fácil. Contudo, corroborando com a estimativa por analogia dada por Blanchard e Fabrycky (1991), a prática nos mostra que nem sempre são necessários tantos dados quanto os estatísticos requisitam em estudos teóricos devido à experiência sobre o tipo de comportamento dos ativos. A modelagem de eventos futuros, comumente utilizada, segundo Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016), “é baseada em consultas aos fornecedores, informações bibliográficas ou desenvolvendo técnicas para modelar o comportamento dos equipamentos”, este último sendo menos usual, talvez por ser o único a utilizar métodos estocásticos.

Em sua pesquisa, Korpi e Ala-Risku (2008) concluíram que os autores reconhecem a importância da natureza estocástica dos cálculos. Os métodos baseados em valores determinísticos revelaram-se ineficazes por não mostrar a incerteza dos resultados ao longo do tempo, até porque “nem sempre se tem dados determinísticos dos custos sendo, portanto, necessário trabalhar com dados estocásticos” (MARQUES, 2009).

2.6.3 Análise Econômica

Após definidos os elementos de custos e como estimar os eventos ao longo do tempo, é necessário realizar uma correção financeira, de modo a temporalizar os valores futuros ao momento atual. “O LCC considera os custos futuros, o valor temporal do dinheiro e ambos precisam ser contabilizados nos cálculos” (BLANCHARD; FABRYCKY, 1991). É recomendável aplicar os fluxos de caixa futuros, descontados do valor presente, especialmente quando a vida do ativo é longa (KORPI; ALA-RISKU, 2008). Marques (2009) propõe uma análise multicritérios, utilizando os seguintes índices financeiros:

- Valor Presente Líquido (VPL);
- Taxa Interna de Retorno (TIR);
- Retorno de Investimento (RI);
- Período de Retorno de Investimento (PRI);

A seguir resumimos os conceitos básicos de cada indicador mencionado (BLANCK L., 2008):

2.6.3.1 Valor Presente Líquido (VPL)

A forma mais empírica de se analisar um investimento é subtraindo o capital recuperado pelo valor do capital investido, contudo, se faz necessário o cálculo do VPL. Ele é o valor presente dos fluxos de caixa futuros menos o valor presente do custo do investimento, ou o somatório dos termos de um fluxo de caixa descontado. Isso quer dizer que não basta simplesmente subtrair os ganhos com os valores de investimento. Deve-se considerar a perda financeira do dinheiro determinada por uma taxa de juros, também chamado de custo capital. Após atualizar os valores de investimento e ganhos ao longo do tempo, realiza-se a subtração e o resultado final é o VPL. O indicador mostrará o lucro real do investimento. Se o resultado for negativo, o investimento não vale a pena.

2.6.3.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é a taxa de juros que faz com que o VPL do projeto seja nulo. Basicamente ele determina uma taxa de juros suficiente para se igualar com os ganhos do investimento em questão. Quanto maior for o TIR, mais rentável será o projeto. Considera-se que se o valor de TIR for positivo, o investimento é viável. Se compararmos dois investimentos, o que apresentar maior indicador, será o escolhido.

2.6.3.3 Retorno de Investimento (RI)

O Retorno de Investimento ajuda a indicar o percentual do retorno de investimento em um negócio. Seu cálculo é muito simples dado na Equação 2.1:

$$RI = \frac{(\text{retorno} - \text{investimento})}{\text{investimento}} \quad (2.1)$$

Contudo, deve-se realizar a correção do valor financeiro do dinheiro ao longo do tempo utilizando o VPL. Caso isso não seja feito, o RI comparado entre dois investimentos distintos podem apresentar valores falsos em prazos diferentes.

2.6.3.4 Período de Retorno de Investimento (PRI)

O PRI mostra o tempo necessário para que o empreendedor recupere seu investimento. Serve como cálculo de atratividade do negócio. Por exemplo, se uma empresa tem um PRI de 3 anos, isso nos mostra que após esse período o investidor recuperou todo seu dinheiro inicialmente investido via lucro da empresa. A fórmula do

PRI é mostrada na Equação 2.2:

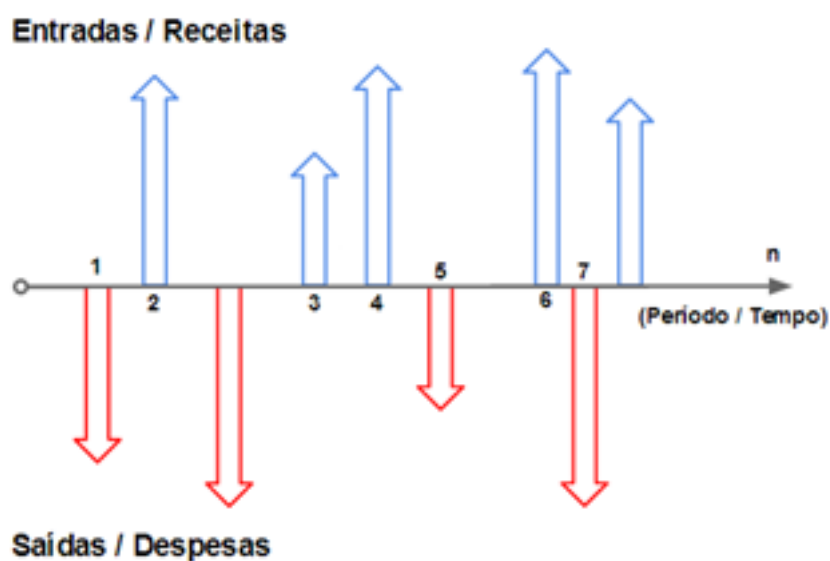
$$PRI = \frac{(\text{investimento_total})}{\text{lucro_liquido}} \quad (2.2)$$

2.6.3.5 Análise Econômica no LCCA

De fato, há vários indicadores existentes na literatura (e vastamente utilizados) que poderemos balizar em um estudo de LCCA. Contudo, o principal é definir a taxa de desconto ou de atratividade ideal a ser aplicada. Barringer et al. (1995) afirmam que o maior problema é determinar qual taxa de atratividade (atualmente denominada de custo de oportunidade de capital) usar na aplicação do LCCA, pois, depende da indústria, do setor e tamanho da entidade. Em muitos casos de aplicação industrial a taxa é estabelecida de forma arbitrária, muitas vezes se limitando à correção inflacionária do período (ASSIS; JULIÃO, 2009). Em outros casos considera-se um valor mínimo, somada à inflação (KORPI; ALA-RISKU, 2008). Muitas empresas determinam o custo de oportunidade como um valor estratégico para grandes investimentos, um capital de investimento ou (CAPEX), porém, pode haver alguma restrição por parte da empresa na divulgação deste valor. Além disto, o custo de oportunidade de capital de um CAPEX pode não ser a melhor opção quando se trata de investimento em operações ou *Operacional Expenditure* (OPEX). Mediante tantas variáveis, uma possibilidade é admitir uma taxa mínima de atratividade como menor ganho que o investidor estabelece ao realizar um investimento (PILAO; HUMMEL, 2006). Este baixo risco seria suprido por qualquer sobra de caixa, na pior das hipóteses (C. FILHO; KOPITKE, 2008). Uma alternativa mais próxima da realidade seria a utilização da taxa livre de risco, a fornecida pelo Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC), como a taxa de atratividade (MOREIRA NETO; MAGALHAES; RIBEIRO, 2016), considerando que nenhum investidor realizaria um investimento que rendesse menos do que os juros da dívida pública. Parte-se da premissa que o investidor não aplicaria seu dinheiro em uma empreitada que não lhe proporcionasse menos do que um investimento em fundos bancários poderia lhe render.

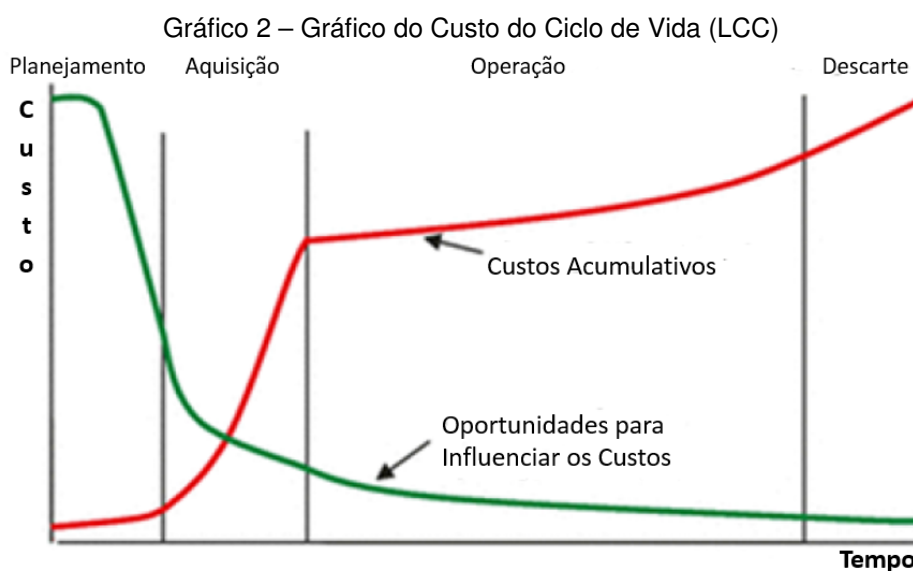
A visualização da análise econômica é facilitada quando organizamos os investimentos e gastos em um fluxo de caixa estruturado (Figura 13), de forma a evidenciar como os índices financeiros escolhidos se comportam ao longo do tempo, conforme propõe (MARQUES, 2009).

Figura 13 – Exemplo de Fluxo de Caixa



Fonte: De Paula (2013).

Outra forma de visualização está exemplificada por Hastings (2015), no Gráfico 2. Em um eixo cartesiano foram plotados dois gráficos: um com os custos totais acumulados, baseados na estimativa de eventos também corrigidos com a taxa de atratividade, e outro sobre a influência deles ao longo da vida do ativo.



Fonte: Hastings (2015)

Para avaliarmos o custo-benefício operacional, substituímos a linha de oportunidade pelo custo de um novo ativo, considerando a mesma correção. A interseção entre eles será o momento de troca econômica fornecida pelo LCC. O gráfico de Hastings (2015) ilustra os estágios de ciclo de vida do equipamento de forma esquematizada, o

total dos custos acumulados e as oportunidades de influência nestes custos. Pode-se, então, adaptá-lo para uma visualização do LCC no ciclo operacional de um ativo.

Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016) cita a existência de uma análise econômica por “payback corrigido via valor projetado no futuro”. Os custos em Valor Futuro serão calculados de ambos os gráficos e comparados. Conforme BLANCK L. (2008):

“A análise do valor futuro com estimativas de todos os custos (e receitas), possíveis de serem definidos pode ser considerada uma análise LCC”

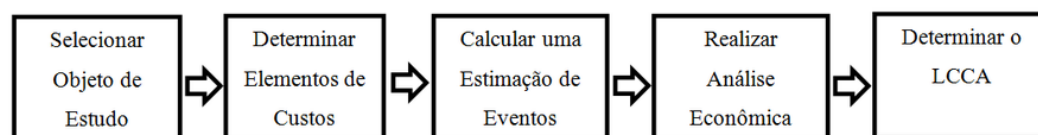
Seu cálculo pode ser obtido pela Equação 2.3. Podemos perceber que o elemento de custo projetado a tempo futuro está relacionado com a variável V_F . Já o valor presente está representado pelo V_P , assim como o “ i ” para a taxa de desconto ou atratividade e “ n ” o número de períodos de tempo a ser considerado:

$$V_F = V_P \cdot (1 + i)^n \quad (2.3)$$

2.6.4 Metodologia Prática do LCCA

Embora haja a possibilidade de diferenças nos métodos de aplicação das técnicas sobre a metodologia estudada, pode-se definir uma estrutura básica, que seja geral e simples. A metodologia para a aplicação do LCCA na Gestão de Ativos é vista no Diagrama 2:

Diagrama 2 – Etapas para Aplicação Prática do LCCA na Gestão de Ativos



Fonte: Autor (2017)

As etapas apresentadas no Diagrama 2 estão baseadas nas pesquisas realizadas. Observa-se que, apesar de variações encontradas na literatura para as definições dos elementos de custos, da forma para o cálculo econômico e de uma estimativa de eventos, os conceitos gerais são preservados. Esses conceitos nos permitem definir as seguintes etapas:

- Objeto de Estudo: defini-se qual o ativo que é relevante para aplicação da análise financeira. O ativo deve possuir características de desgaste ao longo do tempo

- ou apresentar fortes de defasagens tecnológicas, que reflitam negativamente no resultado financeiro;
- Levantamento dos Elementos de Custo: os elementos devem ser significativos em relação às características do ativo;
 - Estimação de Eventos: a técnica utilizada para se prever o comportamento de vida ao longo do tempo deve ser confiável o suficiente para se balizar uma estratégia financeira. O comportamento do ativo pode ser mais ou menos previsível, dependendo do equipamento em questão;
 - Análise Econômica: a escolha do método para avaliação econômica deve ser aderente à visão que foi determinada no estudo. Como existem diversas técnicas dentro da engenharia econômica, deve-se escolher a que melhor representa a realidade da aplicação (projeto ou manutenção);
 - Determinação do LCCA: o resultado obtido pelo LCCA na Gestão de Ativos se apresenta como um fluxo de caixa, gráficos de custos acumulados ou planilhas financeiras. O modo como expor o resultado depende do público para o qual os mesmos devem ser apresentados;

Utilizamos essa metodologia para implementar o LCCA no estudo de caso do presente trabalho.

2.7 A Engenharia da Confiabilidade no LCCA

Segundo Fogliatto e Ribeiro (2009), o tempo até a indisponibilidade de um item pode ser entendido pelo tempo desde o momento em que o mesmo entrou em operação até sua primeira falha. O estado do item entre esses dois momentos pode ser representado por uma variável aleatória $X(t)$, que se comporta de forma contínua ou por valores discretos, quando o componente trabalha por ciclos determinados. Seu estado dentro do período entre “0” (início de operação) e “tempo-t” (falha do item) pode ser definido como uma probabilidade. A probabilidade do item vir a falhar em um determinado período é denominada função falha $F(t)$. Já a confiabilidade $R(t)$ é o complemento da função falha em um determinado momento, ou, definindo de forma mais específica: “a habilidade de um item desempenhar uma função requerida em determinadas condições dado um intervalo de tempo”, esta definição vem da ISO 14224 (2006), norma criada inicialmente para atender as indústrias petroquímicas. Como se trata de grandezas quantitativas, podemos admitir as seguintes relações conceituais: função falha ($F = \frac{N_f}{N_0}$) e função confiabilidade ($R = \frac{N_s}{N_0}$). Onde, o N_f é quantidade de itens que falharam, o N_s , a quantidade de itens que não falharam, ou sem suspensão, e o N_0 , o espaço amostral.

Considerando agora as grandezas como funções contínuas e dependentes do tempo, poderemos então estabelecer relações (Equações 2.4, 2.5 e 2.6), visto que a função confiabilidade é o complemento da função falha em dado intervalo de tempo:

$$F(t) + R(t) = 1 \rightarrow R(t) = 1 - F(t) \quad (2.4)$$

$$\frac{dR(t)}{dt} = 0 - \frac{dF(t)}{dt} \rightarrow \frac{dR(t)}{dt} = -f(t) \quad (2.5)$$

$$dR(t) = - \int f(t)dt \quad (2.6)$$

Desta forma verificamos o surgimento de uma nova variável $f(t)$, fruto da derivada da função falha $F(t)$, denominada função densidade de probabilidade ou *Probability Density Function* (PDF). Como último importante parâmetro a ser mencionado, iremos tratar o conceito de taxa de falhas denominada pelo símbolo λ . Lafraia (2011) define esta variável como: “frequência com que as falhas ocorrem, num certo intervalo de tempo, medida pelo número de falhas para cada hora de operação ou número de operações do sistema ou componente”. Quando ela não é fixa, é representada como uma função do tempo denominada como $h(t)$ ou $\lambda(t)$, e matematicamente descrita pela Equação 2.7:

$$h(t) = \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (2.7)$$

2.7.1 Modelagem Paramétrica

A modelagem paramétrica consiste em aproximar valores reais a uma curva de probabilidade preexistente de modo a podermos defini-la, segundo um determinado nível de confiança, como uma função conhecida. A modelagem dos dados e determinação de seus parâmetros pode ser um trabalho extenso e complicado sem recursos computacionais específicos. Pereira (2009) sugere a utilização de dois métodos básicos: método de extrapolação e o método de regressão linear:

- 1) Método de Extrapolação: somente aplicado quando os dados resultantes do estudo apresentam uma clara linha de tendência em que os pontos do gráfico se aproximam de uma determinada reta que projetará os valores futuros;

- 2) Método de Regressão Linear: quando não puder aplicar a extrapolação será necessário calcular a equação que mais se aproxime dos pontos plotados. Devem-se calcular o coeficiente de correlação (R), assim como o grau de explicação (R^2);

Segundo o autor, os valores de correlação devem se apresentar acima de 90%, ou próximos a 100%, de modo a gerar projeções confiáveis. O método de estimação de parâmetros por regressão linear também é denominado mínimos quadrados. Sua limitação está no fato dele apenas estimar uma equação linear, ou seja, uma reta com um coeficiente de inclinação e uma constante que determina o deslocamento no eixo vertical. Para modelarmos um grupo de dados, cuja PDF não seja representada por uma função do primeiro grau, será necessário linearizá-la em um papel logarítmico, padronizado de acordo com a distribuição escolhida e em seguida estimar seus parâmetros.

Para Fogliatto e Ribeiro (2009) as técnicas de estimação de parâmetros devem apresentar as seguintes propriedades:

- Não ser tendencioso: o estimador não subestima nem superestima de maneira sistemática valores a partir dos dados reais;
- Consistente: o estimador converge rapidamente para o valor real do parâmetro à medida que o tamanho da amostra aumenta;
- Eficiente: o estimador apresenta pequena variância;
- Suficiente: o estimador considera toda a informação acerca do parâmetro que a amostra possui;

Ainda pelo mesmo autor, dentre os métodos de estimação mais difundidos e suas capacidades de aplicabilidade, podemos citar:

- Método dos momentos;
- Método dos mínimos quadrados;
- Método da máxima verossimilhança;

Além de estimadores da estatística clássica, atualmente está sendo aplicada a estatística Bayesiana em eventos de falhas de equipamentos. Lo (2015) aplica um modelo denominado modelo de risco proporcional ou *Proportional Harzad Model* (PHM). Ele rege o comportamento da deterioração de equipamentos, considerando a condição de uso e tempo de funcionamento. A autora utilizou a estimação Bayesiana para determinar os parâmetros devido à baixa qualidade dos dados.

2.7.2 Distribuições Estatísticas

No modelo de distribuição de probabilidade contínua existem diversas distribuições estatísticas que foram desenvolvidas baseadas em estudos de variados fenômenos. Algumas se modelam de forma específica aos fenômenos que foram propostos; outras, conseguem ser mais genéricas, atendendo a uma gama de distribuições de dados. Exemplificamos na Tabela 1 alguns modelos mais aplicáveis ao estudo de confiabilidade dentro de falhas de equipamentos e suas funções características (Equações 2.8 a 2.11).

Tabela 1 – Distribuições Estatísticas

Modelo	Comportamento da Taxa de Falhas	Característica	Função Representativa
Curva Normal	Crescente ao longo do tempo	Mais difundida na estatística. Em confiabilidade, retrata itens com características de desgaste ao longo do tempo	$f(t \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.8)$
Curva Log-Normal	Inicia com forte crescimento e depois se mostra decrescente com o tempo	Itens com fadiga de metais e componentes metálicos, quando submetidos a tensões alternadas em nível significativamente menores que o limite de resistência do metal	$f(t \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left[-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right]} \quad (2.9)$
Curva Exponencial	Constante	Distribuição aleatória	$f(t \lambda) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.10)$
Curva Weibull	Pode se apresentar crescente, constante ou decrescente	Modelável para vários tipos de comportamento de falhas. A mais utilizada em confiabilidade.	$f(t \beta, \gamma, \eta) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left[\frac{t + \gamma}{\eta}\right]^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t+\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$

Autor (2018)

Pode-se observar três parâmetros na curva Weibull (Equação 2.11). O mais

significativo dentre eles para uma avaliação crítica é o de escala (β). O valor deste parâmetro determinará qual o perfil do modo de falha ou como ele se comporta, se sua taxa de falhas é crescente, decrescente ou constante como podemos verificar na Tabela 2. Pode-se admitir que o modo de falha percorra a chamada “curva da banheira” (Figura 1), desde que utilizemos uma modelagem de Weibull, com, pelo menos, três valores de β distintos.

Tabela 2 – Valores Correspondentes ao Parâmetro β

Valores de β	Comportamento em Função da Taxa de Falhas
<1	Taxa de falha decrescente com o tempo — fase de mortalidade infantil.
$=1$	Taxa de falha constante — falhas aleatórias — função Exponencial.
>1	Taxa de falha levemente crescente com o tempo — início da modelagem Log-Normal.
$=2$	Taxa de falha linearmente crescente.
>2	Taxa de falha cresce a uma taxa proporcional à potência (-1).
$=3,2$	Taxa de falha crescente - distribuição Normal.

(Lafraia, 2011)

Na prática, aplica-se, geralmente, uma curva de característica exponencial com uma determinada taxa de falha aleatória fixa utilizada para modelar o comportamento operacional de um ativo físico (WOODWARD, 1997; WOODHOUSE, 1991; RIDDELL; JENNINGS, 2001). Outro método parecido foi o de taxas de falhas constantes de modo determinísticos (B.S; FABRYCKY; BLANCHARD, 1993). Embora bem similar ao anterior, eles propõem uma taxa de falhas variável, pré-determinada, entre um período de tempo a outro. Contudo, os melhores resultados foram com aplicação de distribuições Weibull (WILLIAMS; SCOTT, 2000; RAGHAVAN; CHOWDHURY, 2015).

Devido à flexibilidade apresentada, a distribuição Weibull é preferencial nas aplicações de modelagens paramétricas de comportamento de falhas em equipamentos industriais.

2.7.3 Modelagem para Tempos de Reparo

O estudo do fator taxa de falhas está relacionado ao da função densidade de probabilidade (PDF) dada pela Equação 2.5. Se determinarmos uma modelagem com os dados do reparo é possível realizar uma similaridade entre as análises (falha e reparo). Desta forma, segundo Lafraia (2011), os comportamentos de reparo, ao longo do tempo poderá ser interpretado conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Relação de Variáveis

Variáveis Confiabilidade	Variáveis Manutenibilidade
MTTF / MTBF	MTTR
$R(t)$	$M(t)$
$F(t)$	$G(t)$
$f(t)$	$g(t)$
$\lambda(t)/h(t)$	$\mu(t)$

(Lafraia, 2011)

Os tempos de reparos permitem modelar curvas análogas aos tempos entre falhas. Esse estudo é denominado de análise da manutenibilidade. A variável $\lambda(t)$, será substituído pela taxa de reparo $\mu(t)$, onde a mesma será a probabilidade do item ser corrigido. O tempo médio até falhar ou Mean Time To Failure (MTTF) será substituído pelo tempo médio até o reparo ou Mean Time To Repair (MTTR). A função densidade de probabilidade de falhas $f(t)$ será substituída pela função densidade de probabilidade de reparo $g(t)$, assim como o resultado de sua integral será o valor da função de reparo acumulada $G(t)$. Segue a Tabela de analogia entre variáveis.

Tal recurso é utilizado em modelagem de falhas de equipamentos industriais, Moreira Neto, Magalhaes e Ribeiro (2016) cita:

Como exemplo temos uma aplicação em transportadores de correias (TEWARI; SINGH; KHARE, 1991), utilizando-se em uma distribuição de Poisson, admitiu-se uma taxa de falha (λ) e depois de recebido o serviço de manutenção corretiva uma distribuição exponencial com taxa de reparo (μ).

Assim, pode-se modelar tanto o comportamento do equipamento como as equipes que o reparam, baseados em histórico de dados. Estas ferramentas são fundamentais para um estudo de análise da confiabilidade, disponibilidade manutenibilidade, ou *Reliability, Availability and Maintainability* (RAM). Com as curvas estatísticas de falha e reparo é possível realizar uma simulação de Monte Carlo gerando previsões de comportamento de falhas/reparo, ao longo do tempo. Quando associamos o custo dentro desta simulação é possível estimar os eventos dentro de um LCCA. Pelos mesmos autores, verifica-se que:

Com o advento de novos *softwares* e *hardwares* com maiores poderes computacionais, deu-se início a uma nova fase da engenharia de confiabilidade: trabalhar com os dados quantitativos reais, desta forma,

podem-se estabelecer características de operação e reparo levando-se em consideração as particularidades de cada instalação, determinando suas curvas de vida, seu MTBF (*Mean Time Between Failure*) e MTTR (*Mean Time To Repair*), definindo-se assim, modelos matemáticos operacionais com custos associados para simulações.

2.7.4 Simulação de Monte Carlo

Quando trabalhamos com valores estatísticos, a incerteza é considerada, sendo importante uma análise de sensibilidade para defini-la nos resultados obtidos. O uso de simulação de Monte Carlo é uma boa opção para projetarmos valores não determinísticos. Conforme Fishman (1996):

O método de Monte Carlo fornece soluções aproximadas para uma grande variedade de problemas matemáticos através da realização de experiências de amostragem estatística em um computador.

O método Monte Carlo se apoia em simulações estatísticas que utiliza sequência de números aleatórios (SILVA FILHO; LIMA, 2017). Tem sua origem em jogos de cartas onde as probabilidades eram definidas não por cálculos de modelos equacionais, mas por execução de práticas observando os resultados obtidos. De fato, sem o apoio de uma análise computacional o método se restringiria conforme o sistema se tornasse mais complexo, envolvendo cálculos igualmente complicados. Os fenômenos devem ser definidos por equações diferenciais ou funções de densidade de probabilidades, no caso de dados contínuos.

Com as distribuições de falha e reparo estimadas, utiliza-se um software especialista para criar um diagrama de bloco de confiabilidade ou *Reliability Diagram Block* (RDB). Nesse bloco as curvas de probabilidade são escritas para descrever o comportamento do ativo. A simulação de Monte Carlo produz uma semente aleatória que provocará um evento de falha segundo a curva estatística descrita, isso irá indisponibilizar o equipamento ou sistema. Assim que o evento ocorre, uma nova semente é gerada para simular a probabilidade de reparo, ela possibilita que o ativo novamente volte a ficar disponível. Esse processo é repetido centenas ou milhares de vezes, dependendo da complexidade do diagrama ou do período a ser simulado de forma a gerar uma convergência. A interação de vários blocos de confiabilidade de diversos equipamentos possibilita uma visão sistêmica do processo, o que seria muito difícil sem esse artifício. A incerteza depende do número de simulações possíveis, caso este número se aproxime de milhares de vezes, cada vez mais haverá tendência a um resultado. Isto é possível graças aos recursos computacionais.

2.8 Software de Confiabilidade

No nosso estudo de caso utilizaremos ferramentas computacionais para nos auxiliar nos cálculos das modelagens paramétricas e simulações. Os *softwares* em questão são o Weibull++ (RELIASOFT, 2018c) e BlockSim (RELIASOFT, 2018a), ambos do fabricante americano Reliasoft e licenciados na empresa VALE S.A., além do Minitab-16 (MINITAB, 2018) e MS-Excel (MICROSOFT, 2016). O BlockSim se limitará a realizar as simulações de Monte Carlo, de acordo com as PDF's modeladas dos eventos de falha e reparo da correia transportadora. Já o Weibull++ será o responsável pelas modelagens das curvas e geração das funções de probabilidades mais aderentes, cabendo aqui uma breve explicação do seu modo de funcionamento, baseado em princípios estatísticos. Embora o Minitab-16 possua um módulo de análise de dados de vida possibilitando também estimação de parâmetros de dados de falhas, ele será utilizado apenas como ferramenta de apoio, para realizar testes de aderência e criação de gráficos, assim como o MS-Excel. O *software* Weibull ++ permite diferenciar duas categorias de análises, a saber:

- Análise de Dados de Vida ou *Life Data Analysis* (LDA);
- Análise de Dados Redundantes ou *Redundance Data Analysis* (RDA);

A diferença básica da aplicação dos dois métodos é que o LDA é aplicado a equipamentos, componentes ou itens não-reparáveis. Ou seja, quando este ativo falha, será substituído por outro novo, que desempenhará a mesma curva de vida do anterior, porém, no início novamente de seu ciclo. Podemos exemplificar com a troca de um rolamento que após sua deterioração não poderá ser recondicionado. Já o RDA é aplicado a itens reparáveis, que sofrem manutenção, por isso podem não desempenhar uma retomada em operação da mesma curva de vida do ciclo anterior, pois, depende de diversos fatores aplicados à qualidade da intervenção executada. Podemos exemplificar como a manutenção em um redutor que foi aberto, seu óleo foi completado, realizada limpeza, alinhamento, ajustes de conexões e voltou a operar. Este componente pode não possuir o mesmo ciclo de vida comparado a um novo redutor que nunca havia sido utilizado. Em termos de base de dados o LDA necessita dos tempos até a falha (MTTF) enquanto o RDA utiliza tempos entre falhas (MTBF) e é organizado de forma acumulativa, mostrando ser o mesmo equipamento, componente ou item que continua seu ciclo de vida. Nas modelagens para curvas de reparo ou de manutenibilidade é usual se utilizar a técnica LDA, considera-se como premissa que não há deterioração entre os procedimentos de reparo.

2.8.1 Aderência de Modelos Paramétricos

Assim que os dados de falhas são inseridos no software Weibull++, um assistente de distribuição é selecionado e o mesmo realizará os seguintes procedimentos:

- Coeficiente de Correlação
- Teste do Qui-Quadrado
- Teste Kolmogorov-Smirnov

Após escolhido o modelo probabilístico mais aderente, deve-se estimar quais os parâmetros que representam os dados em determinada curva escolhida. Segundo o site de informações do fabricante, o Weibull++ possibilita alguns modelos de estimadores de parâmetros, podendo destacar os seguintes como os mais usuais (RELIASOFT, 2017):

- Mínimos Quadrados Ordinários (MQO);
- Máxima Verossimilhança ou *Maximum Likelihood Estimator* (MLE);
- Bayesiana;
- Regressão Não Linear Ranqueada ou *Non Linear Regression Rank* (NLRR);

Dentre eles, os três primeiros são estimadores lineares, enquanto o NLRR é não linear. Verifica-se algumas particularidades no uso desses modelos na Tabela 4 (RELIASOFT, 2017):

Tabela 4 – Características dos Estimadores de Parâmetros

Características	Mínimos Quadrados Ordinários (MQO)	Máxima Verossimilhança (MLE)	Bayesiana	Regressão Não Linear Ranqueada (NLRR)
Quantidade de Dados	Poucos dados disponíveis (<30 amostras)	Muitos dados disponíveis (acima de 30 amostras)	Poucos dados, mas conhecimento preditivo do fenômeno	Consegue trabalhar com poucos dados.
Censura de Dados	Pouco ou nenhum dado censurado	Muitos dados censurados e poucos ou nenhum de falhas	Há muitas censuras	Poucas censuras
Restrições	Não foram selecionados os modelos Weibull 3P / Mista / Gama e Gama G	Não seja o modelo Weibull 3P com beta (β) próximo a 1	Seja modelo Weibull 3P com Beta próximo a 1	Sem restrição. Pode-se trabalhar com Weibull-3P com Beta igual a 1

Autor (2018)

Como o MQO e o NLRR foram os estimadores selecionados para o estudo de caso, é interessante uma abordagem melhor dessas técnicas.

2.8.1.1 Estimador dos Mínimos Quadrados (MQO)

Sabemos pela Tabela 4, que o software Weibull++ utiliza o estimador de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) com poucos dados disponíveis, mas também com poucos dados censurados. Segundo Berkley University (2018):

Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) ou OLS (do inglês Ordinary Least Squares) é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados (tais diferenças são chamadas resíduos).

O estimador de mínimos quadrados é baseado na regressão linear de resultado de dados de falha em um gráfico logarítmico que varia para cada distribuição escolhida. Ele é mostrado como opção de regressão em ranque em “x” ou Rank Regression on X (RRX), ou ainda a regressão em ranque “y” ou Rank Regression on Y (RRY). O primeiro realiza a estimativa baseada na soma dos quadrados das distâncias entre

os pontos reais e a reta estimada (variância) em relação ao eixo “x”. O segundo faz a mesma coisa para o eixo “y”. A reta que apresentar o somatório com menor valor será a escolhida por este método. A equação da reta é dada pela Equação 2.12:

$$x = \hat{a} + \hat{b} \quad (2.12)$$

Os parâmetros ou os coeficientes são encontrados conforme Equações 2.13 e 2.14:

$$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} - \hat{b} \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N} = \bar{x} - \hat{b}\bar{y} \quad (2.13)$$

e

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N}}{\sum_{i=1}^N y_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^N y_i)^2}{N}} \quad (2.14)$$

Em uma base de dados, será necessário o fornecimento dos valores dos do eixo “x” e “y”, de forma a se estimar seus parâmetros. Como não existe nos Mínimos Quadrados os valores para o eixo de “y” (não-confiabilidade) e somente os de “x” (tempos até a falha), o software precisa realizar um estimador de dados para o eixo “y”. Ele é baseado no Median Rank (MR), fileiras medianas ou classificação mediana. Com a ordem disposta na reta dos “x” (tempos de falhas), é calculada sua posição na curva pelas distâncias médias entre um a outro intervalo, com um nível de confiança de 50%. Note que este método é mais preciso quando os dados estão completos. Caso tenhamos censuras, o Median Rank pode apresentar erros de resultados. Dependendo do número de censuras, é recomendável utilizarmos outro estimador de parâmetros, ao invés dos Mínimos Quadrados Ordinários. O Median Rank poderá ser calculado via sua fórmula original pela Equação 2.15, baseado em um binômio de newton (distribuição binominal cumulativa). Ela determina a probabilidade de ocorrer o evento no ponto P, dependendo do número de amostras N e o parâmetro Z, sendo este a não confiabilidade no ponto k.

$$P = \sum_{k=j}^N x_i \binom{N}{k} Z^k (1 - Z)^{N-k} \quad (2.15)$$

Deve-se encontrar o valor Z para uma probabilidade P fixada em 50%. Este valor será o MR ou Median Rank. Para a opção de cálculos manuais pode-se utilizar a Equação 2.16 aproximada de Bernard:

$$MR = \frac{j - 0,3}{N + 0,4} \quad (2.16)$$

2.8.1.2 Estimador por Regressão Não Linear Ranqueada (NLRR)

Apesar de uma vasta aplicação, o estimador MLE possui limitações para calcular os parâmetros de uma Weibull 3-P. Segundo Cousineau (2009):

A distribuição de Weibull não atende às condições de regularidade, de modo que além de ser tendenciosa, os estimadores de máxima verossimilhança também podem ser altamente variáveis de uma amostra para outra (eficiência fraca).

O mesmo autor ainda ressalta que:

Os resultados mostraram que o MLE normal é o pior método para estimar uma Weibull-3P e deve ser evitado a todo custo, a menos que o tamanho da amostra seja muito grande.

A plataforma Synthesis utiliza o estimador não linear para os casos em que o MLE se torne limitante, trata-se da Regressão Não Linear Ranqueada ou *Non Linear-Regression Rank* (NLRR). Segundo o tutorial Minitab 18 (2018), uma função de regressão linear deve ser linear nos parâmetros. Observa-se que esse fato limita a equação a uma forma básica. Considera-se a função como linear quando há termos aditivos seguidos da multiplicação de parâmetros. Nos casos práticos há diversos dados a serem correlacionados, gerando-se a Equação 2.17 linear onde: β_k são os parâmetros a serem encontrados e x_k são seus preditores:

$$y = \beta_0 + \beta_1.x_1 + \beta_2 + \dots + \beta_k.x_k \quad (2.17)$$

Já a equação não linear pode se apresentar por diversas formas. Podemos exemplificar equações que precisam ter estimadores não lineares como:

Equação 2.18, de Michaelis-Menten (2 parâmetros e 1 preditor)

$$y = \frac{\theta_1.x_1}{\theta_2 + x_1} \quad (2.18)$$

Outro exemplo a Equação 2.19, de Nernst (3 parâmetros e 2 preditores)

$$y = \theta_1 - \theta_2.(ln(x_1 + \theta_3) - ln(x_2)) \quad (2.19)$$

Segundo Schittkowski (2013):

A regressão não linear é uma forma de análise de regressão em que dados observacionais são modelados por uma função que é uma combinação não linear dos parâmetros do modelo e depende de uma ou mais variáveis independentes. Os dados são ajustados por um método de aproximações sucessivas.

Segundo o tutorial Minitab 18 (2018), as formas não lineares potenciais incluem côncavo, convexo, crescimento exponencial ou decadência, sigmoidal (S) e curvas assintóticas. Deve-se especificar a melhor função que atenda aos requisitos de seu conhecimento anterior e os pressupostos de regressão não linear.

Existem outras formas de calcular a otimização de curvas, assim como outros estimadores de parâmetros. Focamos apenas nos que o *software* utilizado disponibiliza em sua plataforma.

3 Estudo de Caso do LCCA na Manutenção de uma Correia Transportadora

O estudo de caso foi realizado na mina de cobre Salobo Metais, pertencente ao grupo VALE S/A. Ela é o maior projeto de desse minério do Brasil. Com meta de processamento de 24 milhões de toneladas por ano (MTPA) de minério bruto *Run Of Mine* (ROM). Possuindo duas linhas de processamento denominados Salobo 1 e Salobo 2, o projeto está sendo ampliado com mais uma linha nomeada de Salobo 3. A previsão é que esta nova linha entre em operação em 2022, elevando-se o ROM do projeto para 36 MTPA. A seguir, detalha-se o histórico do Salobo Metais S/A e a sua evolução.

3.1 O Projeto Salobo

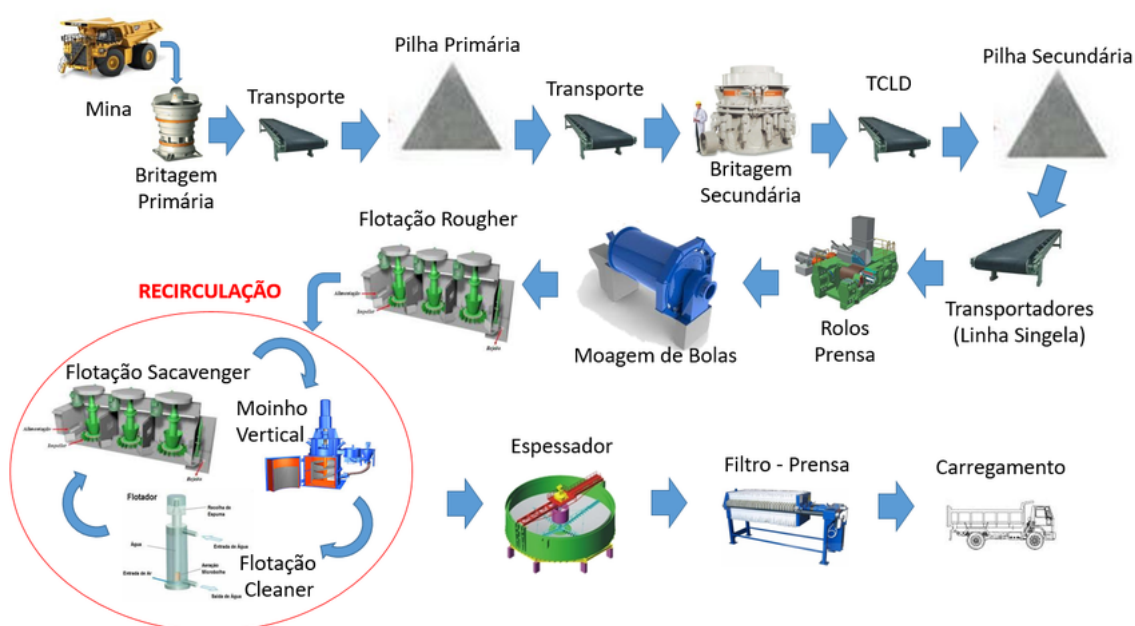
Segundo o *site* oficial da empresa VALE S/A (2015), a mina do Salobo é o segundo projeto de cobre desenvolvido pela Vale no Brasil. A mina está localizada em Marabá, sudeste paraense, e entrou em operação em novembro de 2012. O empreendimento tem capacidade nominal estimada de 100 mil toneladas anuais de cobre em concentrado. Com a expansão da operação a capacidade de produção do empreendimento foi duplicada para 200 mil toneladas anuais do produto.

O Salobo envolve a operação integrada de lavra a céu aberto, beneficiamento, transporte e embarque. O escoamento da produção é feito por rodovia, da mina até o terminal ferroviário da Vale, em Parauapebas (PA), de onde é transportada pela Estrada de Ferro Carajás ao terminal marítimo de Ponta da Madeira (MA).

O cobre é um dos metais mais utilizados no mundo hoje, superado apenas pelo ferro e pelo alumínio, sendo largamente empregado na geração, na transmissão de energia, em fiações e em praticamente todos os equipamentos eletrônicos, tais como a televisão e o telefone celular.

A mina do Salobo é a céu aberto. Depois de lavrado, o minério é transportado por caminhões fora-de-estrada até a britagem, onde tem o seu tamanho reduzido. Na etapa seguinte, esse minério chega aos rolos prensa ou *roller press*, um equipamento formado por dois rolos, que giram em sentidos opostos, fragmentando o produto, graças à ação de rotação e da pressão exercida por eles. Logo após, o minério passa por moinhos e uma bateria de ciclones até chegar às áreas de flotação e filtragem, etapa final do processo, que resulta em um concentrado, que varia entre 36% e 40% de cobre. Todo o processo descrito está resumido na Figura 14.

Figura 14 – Fluxo do Processo Salobo Metais



Autor (2018)

Um diferencial tecnológico está presente na usina do Salobo, agregando mais eficiência à operação e menos consumo de energia e de água, isso ocorre em função do *roller press*, que pode resistir ao grande esforço no beneficiamento de um minério tão resistente como o cobre. A planta do Salobo permite ainda o reaproveitamento de cerca de 98% de toda a água utilizada no processo de beneficiamento do minério.

O Salobo contribui diretamente para o desenvolvimento socioeconômico de Marabá (PA) e Parauapebas (PA), municípios que estão na área de influência do empreendimento. O projeto promove a instalação de empresas prestadoras de serviços nessas cidades, ampliando a oferta de trabalho e renda na região. Durante a fase de implantação do Salobo, iniciada em 2007, a Vale investiu cerca de R\$ 15 milhões em educação, saúde e infraestrutura nos municípios de Marabá e Parauapebas.

Foram realizadas reformas de postos de saúde, compra de equipamentos hospitalares, entre outros. Os municípios foram contemplados com reforma, construção e ampliação de escolas, ginásios esportivos e quadras poliesportivas. Em Marabá, foi desenvolvido também um programa de cooperação técnico-educacional com o antigo Centro Federal de Educação Tecnológica do Pará (Cefet), atual Instituto Federal do Pará (IFPA), que resultou na implantação de cursos técnicos profissionalizantes de nível médio em mecânica, eletrotécnica e química.

A mina do Salobo está dentro da Floresta Nacional Tapirapé-Aquiri, que possui uma área superior a 190 mil hectares e completou 25 anos de fundação em 2014.

A Vale protege este importante patrimônio natural, promovendo a conservação da biodiversidade dessa área, juntamente com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio).

Em junho de 2014, a Vale, por meio do Salobo, assinou convênio com o ICMBio, para a ampliação do viveiro da secretaria de agricultura do município, e na capacitação e assistência técnica de produtores para a prática de atividades agrícolas e extrativas de forma sustentável.

Com a revitalização e ampliação do viveiro, que também conta com a parceria da Prefeitura Municipal de Marabá, a previsão é de que sejam produzidas entre 800 mil a um milhão de mudas por ano. As plantas serão usadas no programa de arborização urbana, em recuperação de áreas e como fonte de geração de renda alternativa para famílias de agricultores.

O convênio, no valor de R\$ 1,45 milhão, estabelece ainda a implantação de programa de extrativismo e de educação ambiental voltado para Lindoeste, comunidade na região do município de São Félix do Xingu. Com o convênio, ficou assegurada a capacitação e o suporte técnico aos pequenos produtores para a boa prática da atividade agroecológica, ou seja, produção agrícola, mas de uma forma sustentável.

3.2 Problemática

O Salobo Metais S/A possui um grande gargalo em sua usina de beneficiamento de cobre na chamada “linha singela” (grupo de correias transportadoras em série que possuem a função de transportar o minério de uma linha de britagem a outra). Qualquer indisponibilidade, por quaisquer modos de falha, interrompe o ciclo produtivo, causando sérios lucros cessantes. Dentre os modos de falha responsáveis por essas perdas, pode-se destacar o acelerado desgaste das correias. Isso se dá devido às características do minério transportado (alta dureza) e geometria do chute, que permite a queda do material direto na correia, após o processo de britagem. Especificamente na correia TR-2001-01, os desgastes pontuais são de características prematuras e provocam furos, rasgos ou falhas em suas emendas. A correção para esse problema passa por um reprojeto do chute ou instalação de alimentadores de sapatas dentro da câmara do britador. Ambos já foram discutidos e orçados, mas ainda não foram priorizados dentro do investimento corrente da empresa.

O atual acompanhamento desse modo de falha consiste na análise da degradação e inspeções visuais. A primeira técnica consiste na marcação prévias de pontos a serem monitorados na correia e suas respectivas medições de espessura pelo método ultrassom. Conforme a correia se desgasta, sua espessura diminuiu gerando uma curva aproximada de deterioração. O problema é que essa técnica não consegue alcançar

uma boa previsibilidade, visto que o desgaste por abrasão não é tão significativo quanto os danos e sobrecargas provocados pela queda do minério no transportador. A análise para a definição do momento da troca da correia se limita ao bom senso adotado nas inspeções sensíveis, em conjunto com a observação das constantes ocorrências de paradas para reparos. Nenhuma análise de custos é considerada para aplicação dessa estratégia, sendo prioritária a disponibilidade final do equipamento, independente do custo associado a obtenção dessa disponibilidade. Faz-se necessário o uso de uma ferramenta que auxilie na tomada de decisão gerencial, estabelecendo-se o momento ideal para a troca. Esse trabalho propõe que a estratégia de manutenção seja pautada no ciclo de vida da correia com o enfoque econômico.

3.3 Metodologia Aplicada

Aplicamos no estudo de caso metodologia prática do LCCA sugerida na Seção 2.6.4, Diagrama 2. Dessa forma, seguindo o fluxograma, conseguimos determinar cada etapa do processo realizada, desde a razão da escolha do objeto de estudo e quais elementos de custos relevantes, assim como qual o método de estimativa de evento mais adequado, e também qual a melhor forma de mostrar o ciclo econômico, levando em consideração o público-alvo.

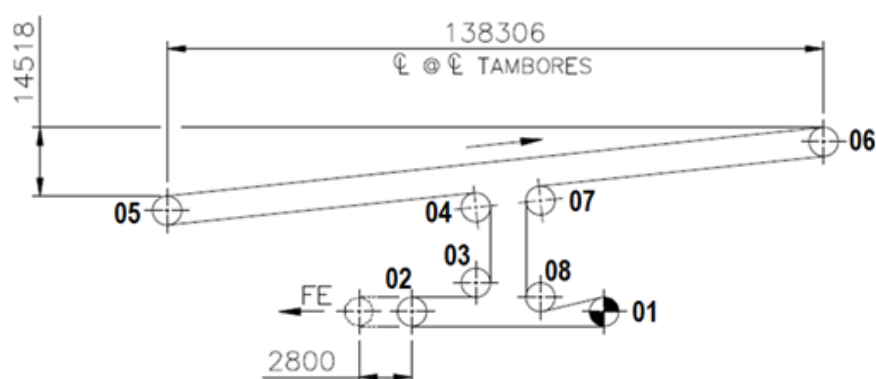
3.3.1 Objeto de Estudo

O objeto de estudo em questão é uma correia transportadora (destaque na Figura 15). A correia está localizada na primeira linha operacional da britagem primária, onde existem duas linhas operacionais. As rochas são reduzidas em dimensões máximas de 200 mm, conforme a Tabela 5, e transportadas pela correia TR-2001-01 (objeto do estudo em questão) para a pilha de minério primário.

Figura 15 – Linhas da Britagem Primária

Fonte: Autor (2017)

A Figura 16 apresenta alguns dados de projeto do transportador, destacando-se algumas características mais relevantes como: oito tambores, leve inclinação em direção à descarga e tensionamento por esticador.

Figura 16 – Dados Estruturais do Transportador de Correias — TR-2001-01

Fonte: Autor (2017)

Já os dados técnicos são mostrados na Tabela 5. Ela descreve capacidades e especificações da correia transportadora.

Tabela 5 – Dados Operacionais do Transportador de Correias — TR-2001-01

Capacidade Nominal (t/h)	Capacidade de Projeto (t/h)	Velocidade Nominal em operação (m/s)	Tipo de Correia	Largura (mm)	Granulometria (mm)
3500	8239	2,69	EP-420/5 Lonas	2200	<200

(Próprio Autor, 2017)

A correia transportadora TR-2001-01 foi selecionada por apresentar características importantes para a aplicação de uma análise de custo de vida em equipamentos industriais. A principal delas é ser um ativo com perfil de desgaste. Desse modo, sabemos que há uma tendência em aumentarmos os custos com as manutenções corretivas, ao longo do tempo, de forma que, em algum momento eles inviabilizarão a operação do equipamento. Outro ponto importante é o custo do lucro cessante. Esse fator é tão significativo quanto a capacidade de produção do ativo. Essas correias de mineração são projetadas para altas taxas de produção, o que diminui os custos fixos, viabilizando o lucro. Uma parada operacional gera uma interrupção de produção de várias toneladas de produto. O último fator considerado é a falta de previsibilidade da atual estratégia de manutenção, o que conduz às tomadas de decisão com um alto grau de incerteza.

Essa correia possui características de ciclo de vida por desgaste, irregular e acelerado, principalmente pelas constantes quedas de minério, atingindo regiões específicas da correia, fragilizando o equipamento e criando pontos críticos de desgastes. Em um estudo de transportador de correia na indústria de mineração de carvão, Bugarić et al. (2009) observa que:

... falhas repentinas ocorrem durante o funcionamento da correia transportadora, quando grandes pedaços caem sobre ela, o que leva a uma condição de desgaste além do limite normal.

O autor verifica ocorrências de sobrecargas nesses eventos e destaca:

... notadamente, determinou-se que o desgaste da correia é de quatro a cinco vezes mais lento em seu regime normal do que durante uma sobrecarga.

O estudo de caso realizado tem o objetivo de realizar se a avaliação econômica do LCCA indicaria a troca da correia em ciclos de vida diferentes do praticado pela manutenção. Para tal, foram levantados os dados referentes a um ciclo de vida entre

dois momentos de trocas da correia pela equipe de vulcanização do Salobo, eventos ocorridos em 2014.

Para se atingir a esse objetivo, a previsão LCCA deve ser comparada com outras previsões baseadas:

- Na análise de degradação;
- Em inspeções visuais.

3.3.2 Levantamento dos Elementos de Custos

Após selecionar o equipamento-alvo, no caso uma correia transportadora, foram levantados os elementos de custos mais significativos do objeto de estudo. Para a obtenção dos custos envolvendo mão-de-obra e equipamentos, foi utilizada a plataforma o sistema de aplicações e programas de processamento de dados ou *Systeme, Anwendungen, Produkte in der Dateverarbeitung* (SAP). Foram utilizados os módulos do SAP (Manutenção) e SAP (Aprovisionamento). Os dados de preço de cobre e valores de taxas indexadoras foram obtidos na *internet* detalhada no Anexo B.

Os elementos de custos considerados foram baseados em uma distribuição de Seif e Rabbani (2014), detalhada na Seção 2.7. Ela foi utilizada devido à sua simplicidade, e a aplicabilidade em máquinas industriais, porém, com algumas adaptações:

- Como a correia foi comparada com outra idêntica, os custos operacionais foram similares, não sendo levados em consideração;
- O componente “correia transportadora de lona” desse transportador foi considerado como crítico na empresa, assim classificado como “Garantia Operacional” no sistema de Suprimentos. Isso quer dizer que sempre deverá existir uma correia reserva no estoque, para qualquer eventualidade. Nessa condição não há razão para se monitorar o custo de armazenamento.

Com base nessas condições, a adaptação ideal os elementos de custo aplicados a esse estudo de caso está descrita abaixo:

- 1) Custo de aquisição: máquina nova;
- 2) Custo de manutenção corretiva: falhas imprevistas que permitem reparos;
- 3) Custo de manutenção preventiva: manutenções programadas;
- 4) Custo de mão-de-obra.

Vale ressaltar que o lucro cessante (custo de não-produção) devido à indisponibilidade do equipamento está embutido nos custos listados nos itens 2) e 3). Esse custo tem maior relevância por se tratar de uma indústria de ativos intensivos, tendo cada equipamento um volume de produção bastante elevado.

3.3.3 Estimação de Eventos

Esse trabalho aplica o método de estimativa paramétrica, conforme recomenda Blanchard e Fabrycky (1991). Utilizam-se ferramentas computacionais, cuja base de dados de eventos é modelada em curvas de densidade de probabilidade ou *Probability Density Function* (PDF).

Coletamos os dados de eventos no sistema de gerenciamento de manutenção ou *Computerized Maintenance Management System* (CMMS). O *software* utilizado para essa função é a plataforma de gerenciamento integrada SAP (módulo SAP-Manutenção). Também se utilizou os dados do sistema de monitoramento da operação denominado *Knowledge Management* (KM) da empresa ABB. Esta etapa do trabalho se constituiu em levantar e tratar os dados no período selecionado. Compararam-se os dados registrados nas paradas corretivas no SAP com os registros operacionais do KM. Este último sistema garante o tempo real de parada, já que se comunica diretamente ao banco de aquisição de dados da usina. Essa base de dados provém do Sistema de Gerenciamento de Informação de Processo ou *Process Information Management System* (PIMS). No entanto, o apontamento do modo de falha é manual, permitindo a ocorrência de desvios. Os registros da manutenção no SAP fornecem os serviços realizados durante as paradas corretivas e preventivas, o que ajuda no acerto das informações qualitativas do KM.

Nem todas as paradas do transportador foram consideradas na estimação de eventos. Consideramos aquelas provindas dos modos de falha relacionadas ao desgaste da correia. Com o apoio da engenharia da confiabilidade, definiu-se curvas de probabilidade para estimar as ocorrências de falhas. Foi utilizado o *software* Weibull ++, da Reliasoft, para modelar as curvas. Utilizou-se o BlockSim, do mesmo fornecedor, para realizarmos as simulações de Monte Carlo, com o intuito de prever os eventos de paradas, os relacionados aos custos e calculados previamente.

Os dados de falhas foram agrupados em forma de planilha, permitindo os cálculos de tempos de falha e reparo, respectivamente, assim como a modelagem da confiabilidade. Assim que os dados foram colocados no *software* Weibull ++, ele nos forneceu um cálculo de otimização estatística, que atendeu aos requisitos de Fogliatto e Ribeiro (2009) (Seção 2.7.1). A Seção 2.7.2 orienta quais as principais distribuições paramétricas que representam o comportamento de falhas em equipamentos e, na Seção 2.8.1, sabemos como obter as curvas parametrizadas mais aderentes. De modo

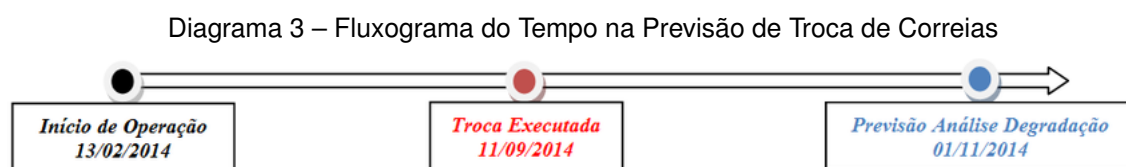
análogo, conforme explicado na Seção 2.7.3, realizamos a mesma tratativa para obter as curvas estatísticas baseadas nos tempos de reparo. Com as PDF's disponíveis, utilizamos o software BlockSim para realizar as simulações de Monte Carlo, gerando-se eventos de falhas e reparos ao longo do tempo. Essas simulações de falhas e reparos nos forneceram os dados necessários para associar aos elementos de custos, sendo então exportados para o MS-Excel (Anexo B).

As previsões estatísticas foram correlacionadas aos elementos de custos somados, geraou-se uma informação de fluxo de valores em dólar, permitindo-se uma visualização gráfica e uma comparação de resultados. A interseção dos custos foi considerado o ponto LCC, que serve de suporte técnico-econômico para tomada de decisão da gestão de manutenção.

A seguir, apresentamos todos os cálculos necessários para estimar os eventos de falhas em um equipamento. Usa-se como base o equipamento escolhido para o estudo de caso.

3.3.3.1 Estimação de Paradas da Correia

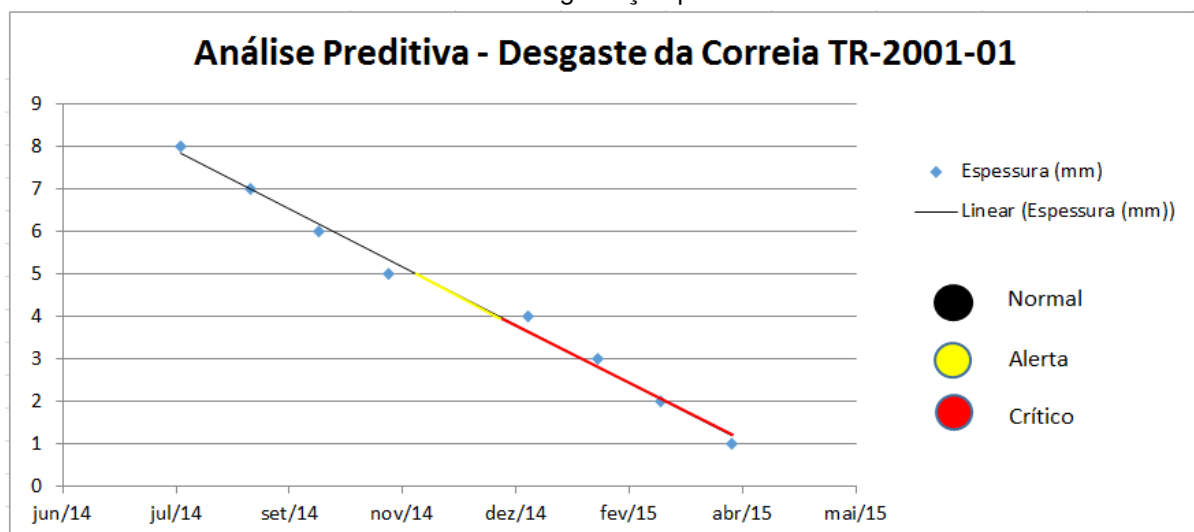
No dia 13/02/2014, é programada uma parada para troca da correia e em apenas sete meses depois (11/09/2014), ocorre nova substituição (Diagrama 3).



Fonte: Autor (2017)

Ao longo desse período, a correia apresentou furos que foram corrigidos, cortes em suas bordas laterais e falhas em sua emenda. Este processo causa uma perda financeira por lucro cessante e reparos, custos que não são contabilizados para a estratégia do ativo. O acompanhamento do desgaste deste ativo não considera os fatores monetários, apenas os técnicos, considerados pela análise de degradação mecânica. Essa técnica de manutenção preditiva determina vários pontos de medições de espessura na correia. A redução da espessura nesses pontos medidos por ultrassom permite a previsão do desgaste ao longo do tempo. Desta forma, é possível estimar a vida útil da correia a partir de um ponto de espessura nominal até ao valor mínimo admissível. Observamos que, para este caso, a análise gerou uma previsão para troca em apenas novembro de 2014 (Gráfico 3).

Gráfico 3 – Análise de Degradação para Novembro de 2014



Fonte: Autor (2017)

Entre os meses de fevereiro e setembro de 2014, levantou-se o histórico das paradas corretivas (Tabela 6) decorrentes da degradação da correia. Nota-se que a degradação da correia intensificou-se no final de junho de 2014.

Tabela 6 – Histórico de Ocorrências Devido ao Desgaste da Correia

Data da Parada	Data de operação	Tempo de Man. (h)	Tempo de Op. (h)	Tempo Acum. Op. (h)
13/02/2014 07:16:40				
30/06/2014 21:02:40	01/07/2014 7:00:00	9,96	3292,83	3292,83
10/07/2014 11:54:10	10/07/2014 12:22:30	0,47	220,90	3513,73
28/07/2014 5:00:30	28/07/2014 14:55:40	9,92	424,63	3938,36
28/07/2014 22:30:20	29/07/2014 13:12:00	14,69	7,58	3945,94
30/07/2014 23:21:10	31/07/2014 1:42:00	2,35	34,15	3980,09
04/08/2014 5:35:40	04/08/2014 6:27:10	0,86	99,89	4079,99
06/08/2014 10:42:00	06/08/2014 10:43:30	0,03	52,25	4132,24
18/08/2014 10:56:40	18/08/2014 11:00:20	0,06	288,22	4420,46
18/08/2014 14:57:10	18/08/2014 15:25:10	0,47	3,95	4424,40
24/08/2014 9:55:20	24/08/2014 9:56:30	0,02	138,50	4562,91
24/08/2014 12:09:10	24/08/2014 12:21:50	0,21	2,21	4565,12
26/08/2014 2:01:20	26/08/2014 4:30:50	2,49	37,66	4602,77
26/08/2014 11:14:00	26/08/2014 17:32:10	6,30	6,72	4609,49
31/08/2014 9:18:50	31/08/2014 9:48:20	0,49	111,78	4721,27

(Autor, 2017)

A Tabela 6 traz as seguintes informações:

- **Data da Parada:** a data e hora em que o transportador parou para a manutenção corretiva, ocasionada por problemas relacionados com desgaste da correia. Os modos de falha que encontramos foram: furos, defeito na emenda e corte de bordas laterais da correia;
- **Data de operação:** a data e hora em que o transportador voltou a operar, após a atuação da manutenção corretiva;
- **Tempo de Man. (h):** tempo despendido pela manutenção corretiva para realizar o reparo (*Time To Repair* — TTR);
- **Tempo de Op. (h):** tempo de operação da correia entre falhas sucessivas (*Time Between Failures* — TBF);
- **Tempo Acum. Op. (h):** tempo de operação acumulado. Esse tempo é necessário para realizar análise de dados redundantes ou *Redundance Data Analysis* (RDA).

Como se trata de um item reparável, utilizamos a técnica RDA. A técnica de estimação de parâmetros utilizada foi dos Mínimos Quadrados conforme visto na Seção 2.8.1.2. Os valores encontrados em nosso modelo de confiabilidade foram as curvas Weibull 2P (Equação 3.1) para operação e Weibull 3P (Equação 3.2) para manutenção. Uma curva Weibull com o seu parâmetro de escala $\beta > 1$ nos indica que o equipamento analisado está apresentando características de desgastes. Sua taxa de falhas $\lambda(t)$ está aumentando com o passar do tempo (LAFRAIA, 2011). Quanto maior for o beta, maior será a taxa de desgaste. Um beta próximo a oito (8) informa que a correia apresenta alta taxa de falhas, levando-se a altas probabilidades de paradas para corretiva ao longo do tempo. Esta característica está condizente com o comportamento real da correia.

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left[\frac{t}{\eta} \right]^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)} \Rightarrow 0,0022 \times \left[\frac{t}{3366,34} \right]^{6,58} \times e^{-\left(\frac{t}{3366,34}\right)^{7,58}} \quad (3.1)$$

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \times \left[\frac{t + \gamma}{\eta} \right]^{\beta-1} \times e^{-\left(\frac{t+\gamma}{\eta}\right)^\beta} \Rightarrow 0,1953 \times \left[\frac{t + 0,018}{2,15} \right]^{-0,58} \times e^{-\left(\frac{t+0,018}{2,15}\right)^{0,42}} \quad (3.2)$$

Baseado no valor de β , conseguimos também desenhar uma nova curva da banheira adaptada aos tempos de reparos conforme conceitos definidos na Seção 2.7.3.

3.3.3.2 Análise da Curva de Confiabilidade

Após estimarmos as curvas de confiabilidade realizamos análises provenientes dos seus resultados numéricos obtidos. A Tabela 7 mostra os resultados da modelagem da plataforma Synthesis (RELIASOFT, 2018b), que suporta o Weibull ++ e o BlockSim, consequência da Equação 3.1. Verifica-se que o fator de restauração do item se apresentou como zero. Isto significa que a qualidade das manutenções realizadas durante as intervenções não conseguiu recuperar a vida do ativo. A escala vai de 0% até 100%. O valor 100% é atingido quando o reparo consegue restituir o ativo de forma que ele esteja “tão bom quanto novo”, ou como se o mesmo fosse substituído por outro em seu início de vida útil. Nesse estudo de caso, pode-se afirmar que o fator de restauração foi “tão ruim quanto velho”. Ou seja, as equipes não conseguiam regenerar o ativo dando sobrevida a ele.

Tabela 7 – Resultados da Modelagem de Falha

MODELAGEM DE FALHA		
Tipo de Relatório	Resultados de RDA Paramétrica	
Informações do Usuário		
Nome:	Teófilo Cortizo	
Empresa	Vale	
Data:	09/04/2017	
Entrada do Usuário		
Função IF	IPL	
Parâmetros		
Beta	7,58	
Lambda	1,79E-27	
q	1	
Valor LK	-74,58	
Beta (W)	7,58	
Eta (W)	3366,35	
FR	0	
Local VAR/COV MATRIX		
	Var Beta=4,423	Cov Lambda Beta=6,7079E-26
	Cov Lambda Beta=6,7079E-26	Var Lambda=1,0175E-51

(Autor, 2017)

Todas as análises realizadas são interpretações do resultado da modelagem obtida. Contudo, os resultados da Tabela 7 provém de cálculos estatísticos que precisam ser validados. Para tal, realizamos os testes de aderências estatísticas vistas na Seção 2.8.1. O resumo dos testes de aderência ao modelo paramétrico Weibull encontrado estão na Tabela 8:

Tabela 8 – Testes Estatísticos de Aderência – Modelagem das Falhas

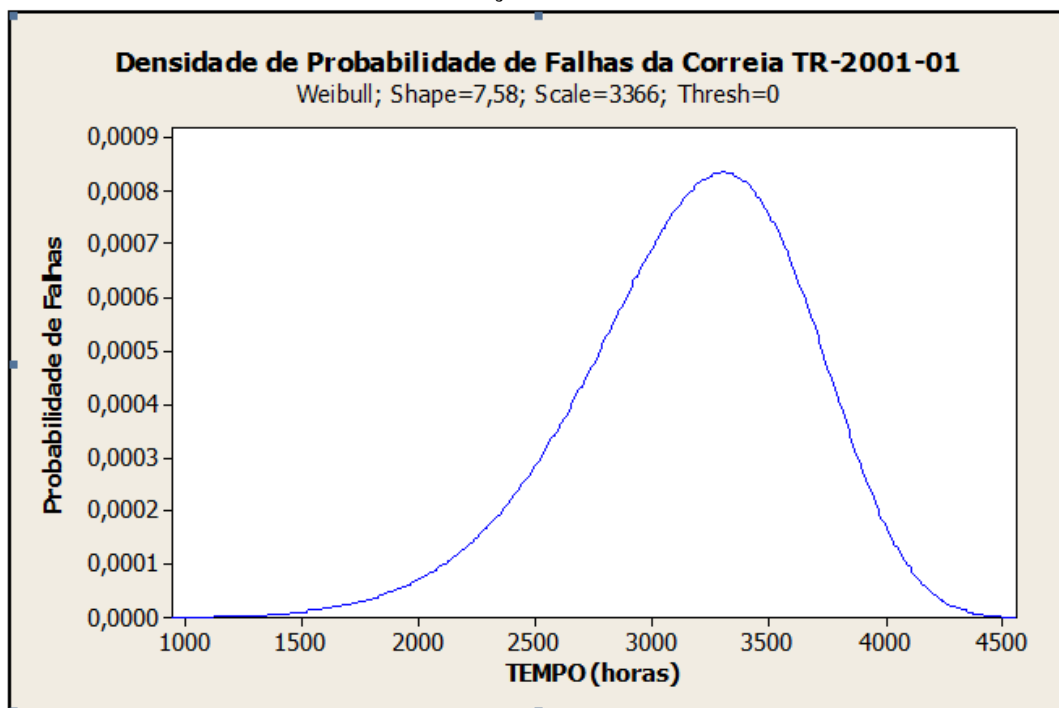
Relatório de Resultados Simplificado - Modelo confiabilidade	
Tipo de Relatório	Teste de Aderência
Informações do Usuário	
Nome:	Teófilo Cortizo
Empresa:	Vale
Data:	14/04/2017
Teste de Aderência	
Kolmogorov-Smirnov - $P(D_Critical < D) =$	2,99%
Kolmogorov-Smirnov - $P(D_Critical > D) =$	97,01%
Coeficiente de Correlação=	97,87%
$P(Chi-Squared_Critical < ChiSquared) =$	10,34%

(Autor, 2017)

Verificamos que a função de confiabilidade, modelada como uma curva paramétrica Weibull 2 parâmetros apresentou boa aderência no teste K-S e Qui-Quadrado, com um alto coeficiente de correlação. Os cálculos foram feitos se considerando um nível de confiança de 90%, portanto, o nível de significância foi estabelecido como 10%. Assim sendo, a probabilidade do valor do Qui-Quadrado ser maior que o valor crítico deve ser menor que 10%. O resultado calculado para o nível de significância foi de 10,34%, valor que excedeu em 0,34% o limite para passar no teste.

Levando-se em consideração que temos poucas amostras coletadas e que o teste se aplicou a uma modelagem de distribuição contínua, adotou-se o pressuposto de que o resultado se mostra satisfatório. Os métodos de estimação de parâmetros foram baseados em regressão com ranques medianos. No Gráfico 4, observa-se a função distribuição de falhas (PDF), gerada pelo *software* Minitab 16. O parâmetro de escala (β) se apresenta bem maior que o valor 3,2, não se caracterizado como uma curva Normal. Isto se deve ao fato do gráfico apresentar assimetria à esquerda, onde a moda dos dados se mostra maior que a média, ou seja, a probabilidade das falhas é maior no final da vida do equipamento.

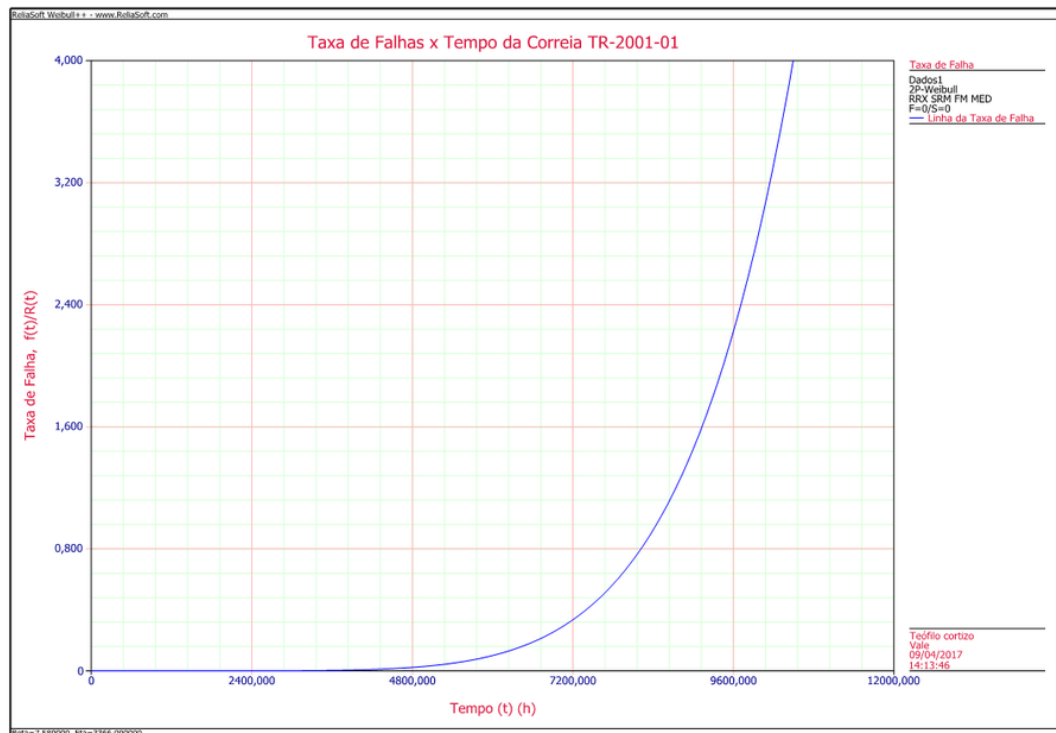
Gráfico 4 – Função PDF Confiabilidade



Fonte: Autor (2017)

Apesar do Gráfico 4 mostrar uma probabilidade de falha acentuada no final da vida, ela apresenta tempos baixos (a moda se situa antes de 3500 horas de funcionamento). Por isso o item possui características de desgaste acelerado. Já no Gráfico 5 é apresentada a função taxa de falhas $\lambda(t)$. Ela se eleva ao longo do tempo com uma inclinação acentuada. Interpretamos que a probabilidade de falhas é muito alta no fim de vida, e que entra em conformidade com o PDF previsto.

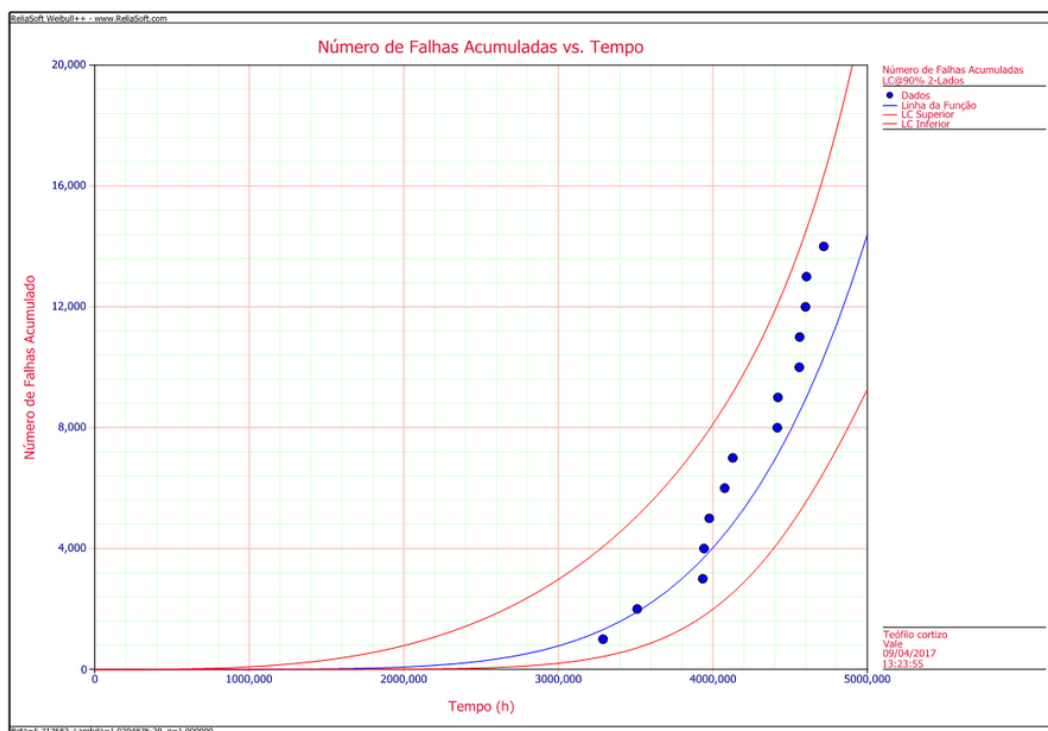
Gráfico 5 – Função Taxa de Falhas



Fonte: Autor (2018)

O Gráfico 6 apresenta o ajuste dos pontos das amostras com a curva de falhas parametrizada. As linhas vermelhas foram estabelecidas como os limites de confiança, tendo-se em vista um nível de confiança em 90%.

Gráfico 6 – Número de Falhas Acumuladas



Fonte: Autor (2018)

Análise de Dados Recorrentes Paramétrica

Número de Falhas Acumuladas

- Limite Superior (0,95) = 20,505970
- Num. Falhas = 12,994364
- Limite Inferior (0,05) = 8,234357

3.3.3.3 Análise da Curva de Manutenibilidade

Analogamente, foi realizada uma modelagem em Análise de Dados de Vida ou *Life Data Analysis* (LDA) para os tempos de reparo de forma a conseguirmos a curva de probabilidade de reparo do componente conforme Tabela 9. Como os resultados gerados modelaram uma curva Weibull 3P, o estimador de parâmetros utilizado foi o NLRR conforme Seção 2.8.1.2.

Tabela 9 – Resultados da Modelagem do Reparo

Relatório de Resultados Simplificados		
Tipo de Relatório	Resultado Weibull ++	
Informações do Usuário		
Nome:	Teófilo Cortizo	
Empresa:	Vale	
Data:	09/04/2017	
Parâmetros		
Distribuição:	Weibull-3P	
Análises:	NLRR	
Método do IC:	FM	
Ranqueado:	MED	
Beta:	0,423931	
Eta (h):	2,105431	
Gama (h):	0,01825	
Valor de LK:	-25,048697	
Rho:	0,990225	
F\ S:	14\0	
Valor VAR/COV MATRIX		
	Var-Beta=0,009029	CV Eta Beta=0,0018150
	CV Eta Beta=0,0018150	Var-Eta=2,508809

(Autor, 2017)

Assim como na modelagem da confiabilidade, também deveremos validar os resultados de aderência da curva de manutenibilidade. Os testes de aderência ao modelo estão resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Testes Estatísticos de Aderência – Modelagem do Reparo

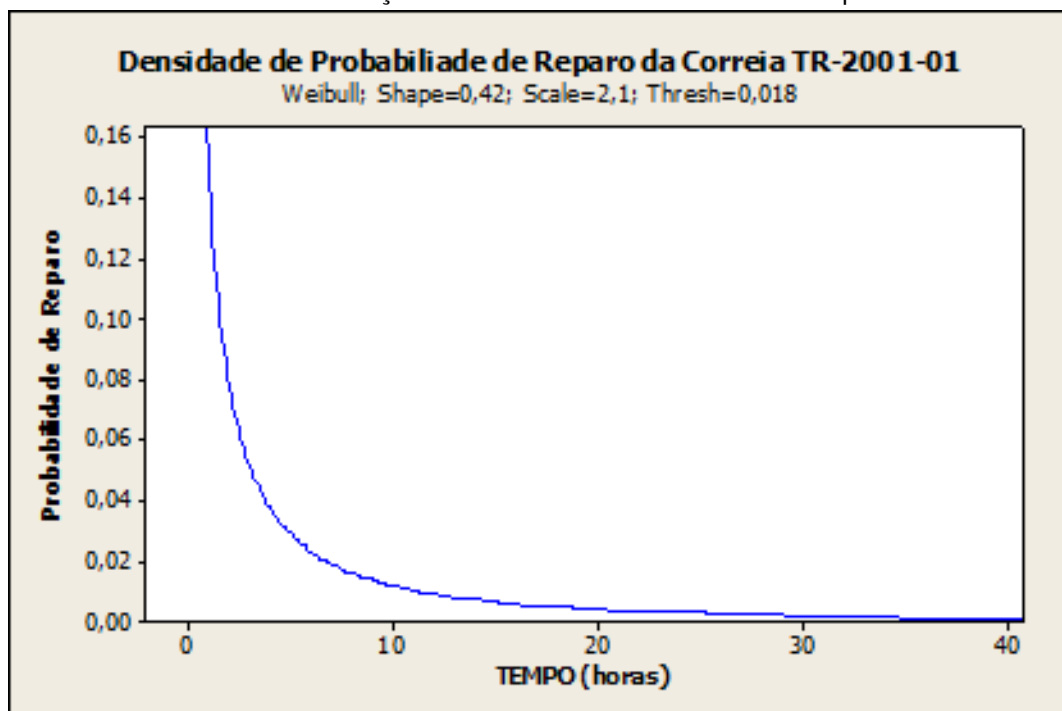
Relatório de Resultados Simplificado - Modelo Manutenibilidade	
Tipo de Relatório	Teste de Aderência
Informações do Usuário	
Nome:	Teófilo Cortizo
Empresa	Vale
Data:	14/04/2017
Teste de Aderência	
Kolmogorov-Smirnov - $P(D_Critical < D) =$	0,0%
Kolmogorov-Smirnov - $P(D_Critical > D) =$	100%
Coeficiente de Correlação	99,02%
$P(Chi_Squared_Critical < Chi-Squared) =$	9,77%

(Autor, 2017)

Na Tabela 10, verificamos que os testes K-S e correlação linear apresentaram excelente aderência no teste de hipóteses. O Qui-Quadrado está abaixo dos 10% esperados, de forma que os requisitos estatísticos foram atendidos.

O gráfico PDF do Gráfico 7 mostra uma distribuição com leve deslocamento à direita. Trata-se do efeito do parâmetro de posição. A probabilidade de existir um reparo diminui com o tempo. A maior parte dos reparos ocorre logo em seguida à parada do equipamento.

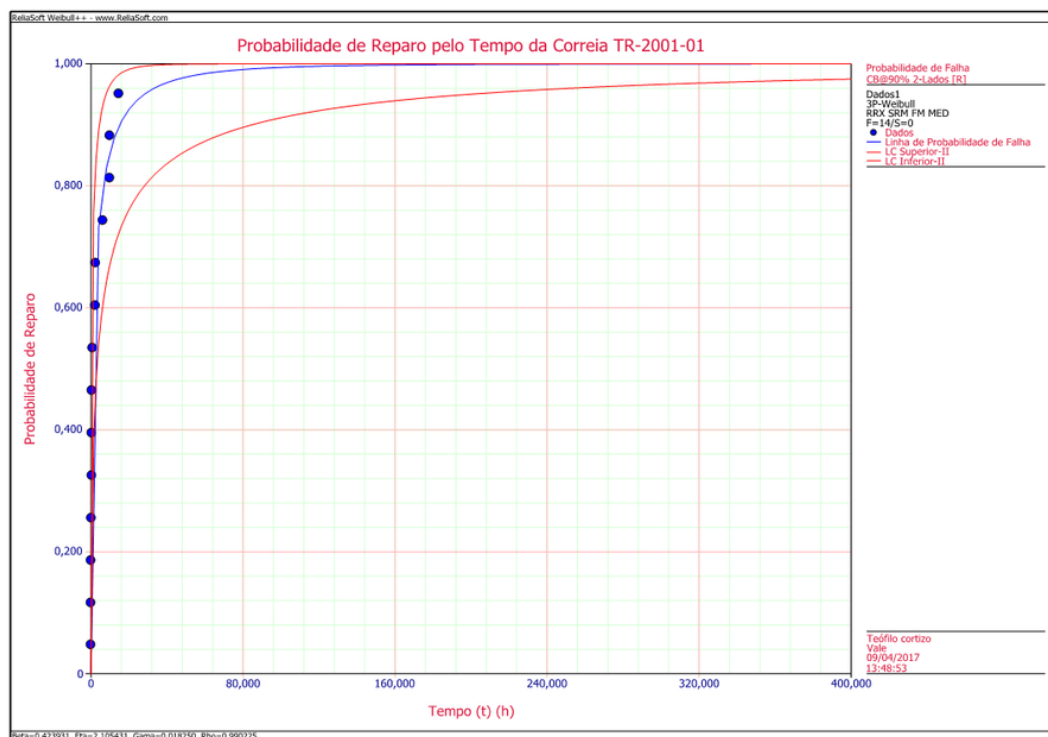
Gráfico 7 – Função Densidade de Probabilidade de Reparo



Fonte: Autor (2017)

A curva de probabilidade de reparo mostrou-se aderente graficamente, a plotagem dos pontos reais do Gráfico 8, nos quais se destacam as linhas vermelhas como os limites de confiança, dentro de um nível de confiança de 90%.

Gráfico 8 – Função Número de Reparos Acumulados

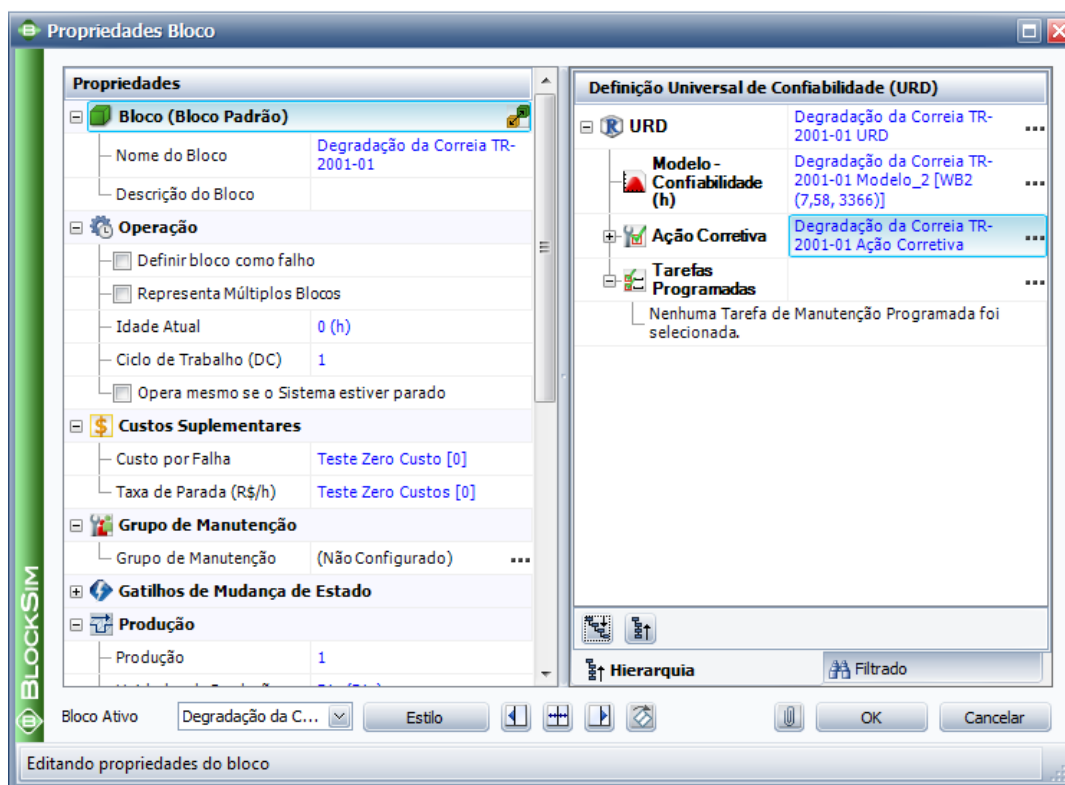


Fonte: Autor (2018)

3.3.3.4 Simulação de Monte Carlo

Com o conhecimento das curvas PDF de falha e reparo utilizamos o *software* BlockSim para gerar uma simulação de ocorrências de eventos seguindo as mesmas distribuições obtidas. Isto foi feito visando a construção de um bloco que represente a correia transportadora, assim como os parâmetros de curvas de falha e reparo, associando-se cada parada simulada a um custo por interrupção corretiva (Figura 17). Este custo está melhor detalhado na Seção 3.3.4, *vide* Tabela 11.

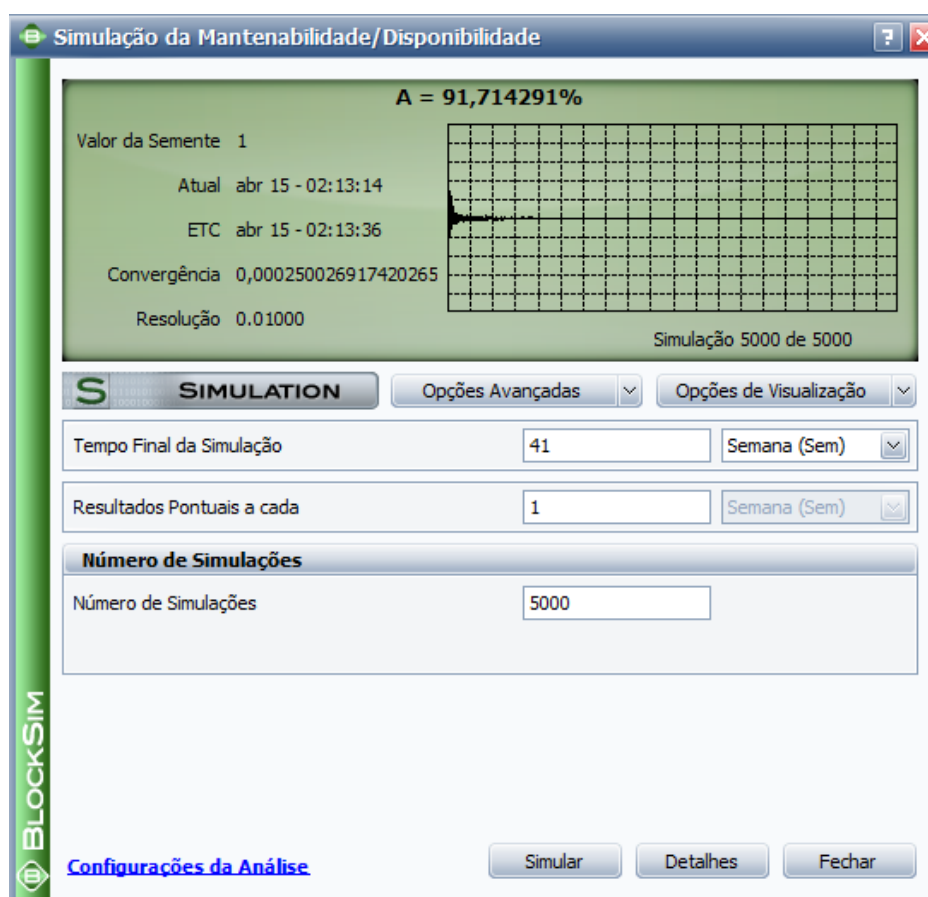
Figura 17 – Propriedades do Bloco Representativo da Correia



Fonte: Autor (2017)

Realizou-se 5000 simulações (Figura 18) adotadas 41 semanas de funcionamento. Segundo a análise preditiva, esse é o tempo considerado como limite para a vida do ativo.

Figura 18 – Simulações Realizadas



Fonte: Autor (2017)

Esta simulação gerou uma estimativa de custo acumulado no tempo. Os custos foram divididos por semanas, de forma a desenvolver a curva de LCC, considerados cada intervalo de tempo fixo. A simulação nos traz um resultado detalhado, conforme se observa na coluna, destacada, na Figura 19.

Figura 19 – Custos Detalhados das Simulações

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
	Tempo (h)	A(t)	R(t)	(1-A(t))%	(1-R(t))%	Custo(t) de Mão-de-Obra	Custo(t) de Sobressalentes	Custo(t) Total	Média A(t)	Média A(t) - t(t-1)	Falhas do Sistema (t)
3	168	1	1	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	1	1	0
4	336	1	1	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	1	1	0
5	504	1	1	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	1	1	0
6	672	1	1	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	1	1	0
7	840	1	1	0	0	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00	1	1	0
8	1008	1	0,9998	0	0,02	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 617,69	0,999993	0,999957	0,0002
9	1176	1	0,9998	0	0,02	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 617,69	0,999994	1	0,0002
10	1344	1	0,9996	0	0,04	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 661,63	0,999994	0,999997	0,0004
11	1512	0,9998	0,9986	0,02	0,14	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.008,97	0,999992	0,999976	0,0014
12	1680	1	0,9956	0	0,44	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.489,46	0,99999	0,999966	0,0044
13	1848	0,9998	0,9894	0,02	1,06	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 4.134,12	0,999974	0,999815	0,0106
14	2016	0,9994	0,9802	0,06	1,98	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 8.189,73	0,999952	0,999717	0,02
15	2184	0,9992	0,959	0,08	4,1	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 15.942,05	0,999914	0,999458	0,042
16	2352	0,999	0,9306	0,1	6,94	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 29.468,73	0,999853	0,999055	0,0718
17	2520	0,9986	0,8894	0,14	11,06	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 44.596,87	0,999792	0,998943	0,1164
18	2688	0,9984	0,8308	0,16	16,92	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 76.303,17	0,999667	0,997784	0,1852
19	2856	0,9968	0,746	0,32	25,4	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 115.407,82	0,999526	0,997267	0,288
20	3024	0,9944	0,6414	0,56	35,86	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 177.042,50	0,999313	0,995693	0,4376
21	3192	0,9916	0,5132	0,84	48,68	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 267.689,33	0,999015	0,993665	0,6648
22	3360	0,9908	0,3674	0,92	63,26	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 397.427,64	0,998611	0,990933	0,9792
23	3528	0,9892	0,2398	1,08	76,02	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 561.902,99	0,99813	0,988506	1,4048
24	3696	0,9828	0,1332	1,72	86,68	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 797.176,61	0,997468	0,983558	1,9868
25	3864	0,9738	0,0604	2,62	93,96	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.096.393,21	0,996669	0,979089	2,7652
26	4032	0,9706	0,0212	2,94	97,88	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 1.492.782,58	0,995653	0,972298	3,7984

Fonte: Autor (2018)

A coluna hachurada na Figura 19 registra os valores dos custos acumulados ao longo do tempo. Esses valores são os resultados da simulação realizada. Realizaram-se as devidas correções financeiras para a taxa de desconto e inflação, obtendo-se o valor ajustado (Anexo B).

3.3.4 Análise Econômica

Com os dados de previsões de falhas e seus custos associados dentro de uma planilha de Excel, admitimos uma aplicação de LCC baseado em projeções dos valores futuros mediante uma taxa de desconto (BLANCK L., 2008). Sendo assim, com os resultados obtidos pela simulação, geramos uma coluna com a correção dada pela Equação 2.3, vista na Seção 2.6.3.5.

A taxa de atratividade “ i ” da Equação 2.3 é a soma de uma taxa indexadora escolhida adicionada à inflação do período, conforme sugere Korpi e Ala-Risku (2008). A taxa indexadora escolhida foi a SELIC, conforme o período estudado (MOREIRA NETO; MAGALHAES; RIBEIRO, 2016). O período “ n ” de tempo considerado tem discretização semanal, considerando-se a alta frequência do número de eventos apresentada pela correia. Como a SELIC é anual, foi necessário transformá-la em valor semanal,

facilmente obtido pela relação apresentada na Equação 3.3:

$$i\%_{semanal} = (1 + i\%_{anual.})^{1/52} - 1 \quad (3.3)$$

No Quadro 6 do Anexo B, verifica-se uma coluna de custos operacionais projetados e corrigidos, e outra com o investimento para aquisição de um novo item, igualmente corrigido, obtém-se um gráfico de projeções (Gráfico 2) baseado na ideia geral de Hastings (2015). A visualização adotada pelo autor, mostrando os valores acumulados operacionais ao longo do tempo, facilita uma análise gráfica quando inserido o valor corrigido de uma nova correia. Assim, identifica-se o ponto onde as curvas se interceptam, facilitando a localização do LCC.

Segundo Brasil (2002), o lucro cessante está definido como

Prejuízos causados pela interrupção de qualquer das atividades de uma empresa ou de um profissional liberal, no qual o objeto de suas atividades é o lucro. Exemplos de lucros cessantes são: não vender um produto por falta no estoque; uma máquina que para e deixa de produzir; um acidente de trânsito que tira ônibus ou táxis de circulação; um advogado que tem seu voo trocado e perde a hora de uma audiência, etc.

Podemos perceber que para o presente trabalho, temos uma interrupção de produção devido a uma máquina que deixou de funcionar por determinados períodos. Contudo, a produção do cobre passa por toda uma linha de cominuição, transporte e tratamento químico para aglomeração do minério. O rendimento operacional total leva em consideração todos os rendimentos das etapas unitárias. Elas consistem na britagem primária ($R_o B_p$), britagem secundária ($R_o B_s$), usina de beneficiamento ($R_o U_b$), flotação ($R_o F_t$) e filtros prensa ($R_o F_p$). Cada uma possui um determinado rendimento operacional que, para sermos mais realista, deve ser levado em consideração. O minério de cobre deve passar por todas elas para estar disponível ao cliente. Dessa forma, definimos o rendimento operacional (R_o) como o produto de todos os rendimentos individuais das áreas produtivas mostrado na Equação 3.4.

$$R_o = R_o B_p \cdot R_o B_s \cdot R_o U_b \cdot R_o F_t \cdot R_o F_p \quad (3.4)$$

Dessa forma, a Equação 3.5 nos mostra o rendimento operacional geral da planta R_o :

$$R_o = 38\% \cdot 75\% \cdot 90\% \cdot 90\% \cdot 40\% = 9\% \quad (3.5)$$

Conforme apresentado anteriormente, utilizamos os elementos de custo, descritos na Seção 3.3.2. Para tanto, foram necessários dados prévios do câmbio do dólar

e cotação do preço do cobre mostrados nos Quadros 4 e 5 do Anexo B. Apesar do produto da usina produzir minério em 39% de teor de cobre (T_c), o material processado pelo britador primário e transportado pela correia em estudo possui valores médios bem abaixo, de 0,9% de Cu, e sua recuperação (R_{ec}) no final do processo de flotação é em torno de 88%. Sabemos que a taxa de produção (T_x) em regime é de 3500 t/h. Determinamos anteriormente o rendimento operacional da planta (R_o) em apenas 9%. Se considerarmos o preço da tonelada do cobre na cotação de mercado [$C_u(US\$)$], em 2014, de US\$ 6.824,48, podemos calcular o lucro cessante (L_c) com o produto desses fatores, conforme a Equação 3.6, de forma que verificamos o resultado na Equação 3.7:

$$L_c = T_x \cdot R_o \cdot T_c \cdot R_{ec} \cdot C_u(US\$) \quad (3.6)$$

$$L_c = 3.500 \times 9\% \times 0,9\% \times 88\% \times 6.824,48 = US\$17.468,39 \quad (3.7)$$

Já o lucro cessante da troca da correia é calculado com base na Equação 3.6 multiplicado por 24 horas, tempo necessário para realizar o procedimento. A seguir vemos o quadro com os valores dos elementos de custos convertidos ao câmbio do dólar em 2014 (R\$ 2,36)

A Tabela 11 sintetiza todos os custos envolvidos no processo.

Tabela 11 – Valores de Custos na Análise LCC

Descrição do Custo	Valores (US\$)
Custo de uma manutenção Corretiva (h)	44,26
Lucro Cessante (h)	17.468,39
Total de Custos de uma Parada Corretiva (h)	17.512,95
Custo de uma Correia Nova	114.842,14
Custo da Troca da Correia	4.740,59
Lucro Cessante pela Troca da Correia	419.241,26
Total de Custos para Troca da Correia	538.823,99

(Autor, 2017)

Com os custos de aquisição e manutenção foram traçados os valores distribuídos em um fluxo de caixa ao longo do tempo. Os valores das duas variáveis foram corrigidos para o valor futuro baseada em uma taxa de atratividade. A taxa de atratividade utilizada

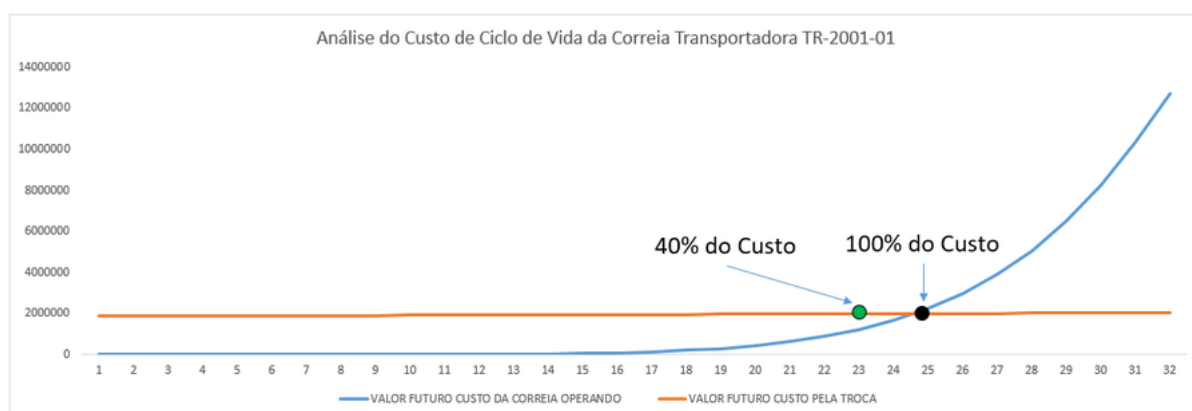
correspondeu à inflação dos períodos (6,41% a.a.) somado ao valor médio da taxa SELIC entre os meses avaliados (10% a.a.), de forma a termos uma taxa total de 16,41% a.a.

3.3.5 Determinação da Curva do LCCA

O *software* BlockSim não só realizou a simulação de Monte Carlo gerando a previsão de eventos futuros de falhas e reparos como também registrou os custos gerados por estas paradas. Para isto, associamos os resultados de falhas da Figura 19 com os cálculos de custos da Tabela 11. Deste modo, importamos os dados do BlockSim com uma previsão de custos ao longo do período sem ainda a correção financeira. O ajuste econômico foi realizada importando os dados para o MS-Excel com a correção da Equação 2.3. Os resultados podem ser melhores apreciados no Quadro 6 de cálculos do Anexo B deste trabalho. A análise leva em consideração que um ativo que opere apresentando custos de manutenção acumulativos igual ao valor de um novo ativo deverá ser descartado por motivos econômicos. Segundo S/A (2017), a regra praticada é se um ativo for enviado para uma reforma externa e seu custo de manutenção for de 40% em relação a um novo ativo, deverá passar por uma avaliação gerencial por, talvez, ser mais viável a aquisição de um novo equipamento.

O anexo mostra as correções dos valores, ao longo do tempo, tanto para os valores simulados de vida como para os custos fixos da aquisição e instalação de uma nova correia. A partir dela construímos o gráfico, conforme Seção 3.3.4, que mostra duas séries temporais: a de custos totais da correia em operação e a de custo corrigido de uma nova correia. Este gráfico está mostrado no Gráfico 9 com valores em mil US\$.

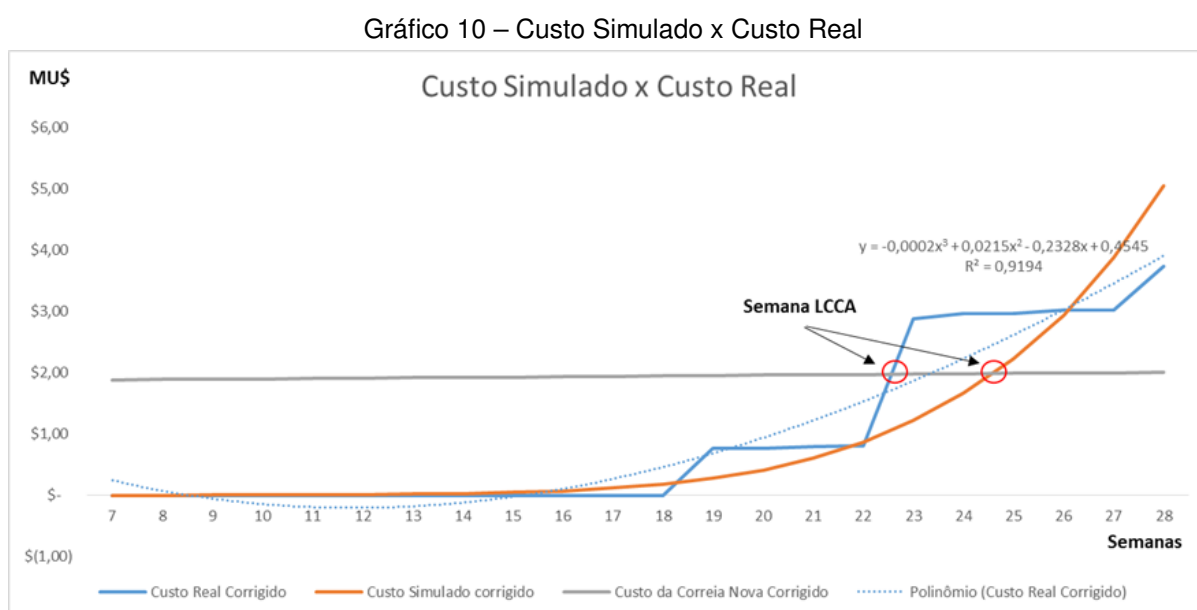
Gráfico 9 – Análise LCC



Autor (2018)

Observamos pelo gráfico acima a análise de custo de ciclo de vida entre fevereiro a setembro de 2014. O ponto ótimo do LCCA foi localizado na interseção (ponto negro)

das curvas entre as semanas 24 e 25. Se levarmos em consideração a regra interna de reforma de componentes, o LCCA se posicionaria ainda na semana 23 (ponto verde). Consideramos que após a semana 24 não será economicamente viável mantermos a correia transportadora operando. No Gráfico 10, verifica-se o erro entre os valores de custos acumulados reais com os valores simulados. Considerando a vida da correia em 30 semanas (momento da troca executada), o erro será de, aproximadamente, duas semanas, resultando em apenas 6% de desvio.



Fonte: Autor (2017)

Na prática, é possível manter uma rotina de tratamento de dados e correção das modelagens de curvas semanalmente viabilizando o LCCA dentro da gestão da manutenção, desde que o ativo mapeado apresente uma característica de desgaste.

3.4 Resultados do Estudo de Caso

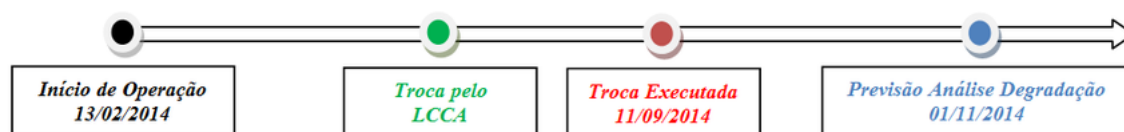
Após os cálculos, obtemos os resultados na Tabela 12 provindos do Anexo B. Os valores em parênteses nos indicam que teremos perdas devido ao excesso de paradas, por se adotar uma estratégia de troca posterior indicada pela análise econômica.

Tabela 12 – Comparação da Análise de Custo de Ciclo de Vida

Troca da Correia	Data	Custo Gerado pela Simulação
Previsto pelo LCCA	31/07 a 07/08/2014	US\$ 0,00
Realizado pela Manutenção	11/09/2014	(US\$ 6.241.777,86)
Previsto pela Análise Degradação	01/11/2014	(US\$ 28.602.833,27)

(Autor, 2017)

Os números apresentados são bastantes elevados, devido à capacidade produtiva instalada da planta, o maior responsável por esses valores provém do alto lucro cessante. Ao final, pudemos elaborar o fluxograma (Diagrama 4), que nos ajuda a localizar de forma temporal cada uma das ações aqui mencionadas.

Diagrama 4 – Fluxograma do Tempo na Previsão Financeira de Troca de Correias

Fonte: Autor (2017)

Constatamos, via estudo LCCA, que os valores de custos estão muito elevados para serem ignorados em uma estratégia de manutenção. Este fator se torna ainda mais relevante se considerarmos no Sistema de Gerenciamento de Ativos.

4 Conclusões

Pudemos observar que a vida econômica da correia transportadora nos indicou um momento de troca do ativo diferente das técnicas utilizadas no Salobo (sensitiva e preditiva). Com o cálculo do LCCA vimos que a troca econômica da correia apontou uma data anterior ao praticado gerando altos custos com lucros cessantes. Este fato nos mostra como a metodologia pode influenciar de forma positiva e sustentável a estratégia de manutenção.

A metodologia propõe poucos passos e objetividade no resultado, características positivas para um setor tão dinâmico como a manutenção industrial de ativos. Os elementos de custos considerados relevantes são facilmente rastreados pela área de Planejamento e Controle de Manutenção. O levantamento de dados, etapa mais frágil da metodologia, consegue ser realizado, desde que haja uma prioridade nos registros e correções diária dos mesmos. Estas correções deverão ser integradas à rotina de reuniões entre manutenção e operação. A correta apropriação de paradas impacta nos indicadores de ambos os setores. É necessária uma diretriz clara sobre de quem é a responsabilidade da parada e sua correta descrição.

De posse das informações, a estimação de eventos aplicada nos ajuda a ter mais assertividade nas previsões, mesmo com poucos dados. A engenharia da confiabilidade, aliada a uma boa experiência prática sobre os comportamentos de falhas dos ativos, pode produzir bons resultados dentro de níveis de confiança aceitáveis. Um bom software de confiabilidade facilitará os cálculos, permitindo uma rotina de acompanhamento e evolução da previsão de falhas do ativo.

A análise econômica utiliza ferramentas básicas de matemática financeira, aliada a indexadores conhecidos e largamente utilizados em investimentos. O produto final, em forma gráfica, prediz a época da troca econômica, facilita a visualização dos gestores e possibilita um planejamento a médio e longo prazos. Também é possível transformar o produto em fluxos de caixa, de forma a gerar relatórios direcionados a diretores e acionistas auxiliando seus investimentos e perspectiva de lucros.

A metodologia do LCCA proposta foi aplicada com êxito, atendendo aos objetivos gerais da pesquisa. Ela mostrou os caminhos necessários, de forma a termos aplicabilidade em outros ativos dentro da empresa. Seu fluxo simples e estimação de eventos confiável possibilita uma boa previsibilidade na projeção de custos e investimentos, ao longo do ciclo de vida dos ativos. A extensão do uso da ferramenta em outros ativos similares acarretará em maior confiança na metodologia, auxiliando,

também na mudança de cultura gerencial da empresa. Isto diz respeito à tomada de decisões gerenciais e subsídio técnico-financeiro no direcionamento dos investimentos a longo e curto prazos.

4.1 Limitações

O presente trabalho apresenta algumas limitações de aplicação, como já foi mencionado anteriormente. Há dificuldades e resistências de se aplicar esta técnica, por parte das empresas, muitas vezes por falta de uma previsibilidade, como foi visto no Capítulo 2. A utilização de confiabilidade quantitativa necessita de histórico de dados que pode não existir, caso haja uma falta de cultura de registro de eventos.

O LCCA depende que registros de paradas por reparos corretivos ocorram para se modelar uma projeção de custos. Muitas vezes, por insegurança gerencial, a fim de atingir metas de Disponibilidade Física (DF), pode ocorrer trocas da correia de forma prematura. Esta opção inviabiliza a análise de confiabilidade quantitativa.

Neste estudo de caso, algumas dificuldades de mesma natureza foram contornadas tais como:

- Obtenção dos custos com mão-de-obra e materiais;
- Falta de dados limitando a escolha do equipamento a ser estudado;
- Dificuldade da divulgação da taxa de atratividade utilizada em investimentos por ser uma informação estratégica;
- Muitos apontamentos de falhas estavam errados (correção de banco de dados);

4.2 Sugestões para Futuros Trabalhos

Apesar das dificuldades apresentadas, por falta de uma padronização, é possível seguir um fluxo geral, apresentado no Diagrama 2 da Seção 3.3. A metodologia se mostrou viável dentro da indústria, tendo em vista suas particularidades. Todo equipamento que apresente característica de falha por degradação ou desgaste pode ser modelada em uma curva paramétrica e assim ser simulada para gerar custos de operação / manutenção, viabilizando uma análise LCCA dentro do Sistema de Gerenciamento da Manutenção (SGM) e do Sistema de Gestão de Ativos (SGA).

Uma grande justificativa de se estabelecer as metodologias de LCCA é aproximar a empresa das melhores práticas dentro de uma Gestão de Ativos. No caso, auxiliar

no cumprimento dos objetivos traçados nas normas PAS-55-1:2008, assim como a ISO 55000:2014. Novos estudos podem ser aplicados, direcionando a ferramenta LCCA, para cumprir requisitos das recomendações da Gestão de Ativos, em outros equipamentos ou em outras indústrias, utilizando a metodologia proposta.

Referências

- 14224, I. *ISO 14224 Petroleum and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment*. 2006. Acesso em: 2017-02-19T00:00:00+00:00.
- 55000-1, I. *ISO 55000 - Asset management*. 2014. 25 – p. Disponível em: <<http://www.iranrpm.ir/wp-content/uploads/2014/03/ISO-55000-2014.pdf>>.
- ABRAMAN. *GESTÃO DE ATIVOS E PAS 55*. 2017. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/sidebar/pas55>>.
- ANTHONY, S.; HINCHELIFFE, G. *RCM: Gate to World Class Maintenance*. [s.n.], 2003. 300 – p. ISBN 0-7506-7461-X. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books%3Fhl%3Dpt-BR%26lr%3D%26id%3DBnQN2ODPHNAC%26oi%3Dfnd%26pg%3DPP1%26dq%3Dairplane%2C%2BHINCHCLIFFE%2C%2B2003%26ots%3DZDOyNhZIPZ%26sig%3D8NO4B9lkaY8ywVX4QLGWuVQ1WYs%23v%3Donepage%26q%3Dairplane%252C%20HINCHCLIFFE%252C%202003%26f%3Dfalse>>.
- ASJAD, M.; KHAN, S. Analysis of maintenance cost for an asset using the genetic algorithm. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer India, p. 1 – 13, 3 2016. ISSN 0975-6809. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13198-016-0448-9>>. Acesso em: 2016-10-17T00:00:00+00:00.
- ASSIS, R.; JULIÃO, J. Gestão da manutenção ou gestão de activos? (Custos ao longo do ciclo de vida). 2009.
- BALABA, B.; IBRAHIM, M. Y. Industrial informatics applications: Optimising life cycle costs of an Underground Mining Longwall Conveyor. In: 2011 IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2011. IEEE, 2011. p. 1218 – 1223. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm%3Farnumber%3D5984332>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.
- BARRAZA-BARRAZA, D.; BERUVIDES, M. G.; LIMON-ROBLES, J. Maintenance-related costs in maintenance management. *Proceedings of the American Society for Engineering Management*, n. 1992, 2014.
- BARRINGER, H. P. et al. Life-cycle cost tutorials. 1995. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary%3Fdoi%3D10.1.1.546.7966>>. Acesso em: 2016-09-22T00:00:00+00:00.
- BERKLEY UNIVERSITY. *Econometrics Laboratory Software Archive*. «Regression Analysis». 2018. Disponível em: <<https://eml.berkeley.edu/sst/regression.html>>. Acesso em: 2018-02-19T00:00:00+00:00.
- BESCHERER, F. Established Life Cycle Concepts in the Business Environment – Introduction and terminology,. *Laboratory of Industrial Management Report Series*, 2005.
- BLANCHARD, B.; FABRYCKY, W. *Life cycle cost and economic analysis*. Ise. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1991. Disponível em: <http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/H104135.pdf>.

BLANCK L., T. A. *Engenharia Economica*. 2008.

BRANCO FILHO, G. *Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade*. 4^o. ed. Buenos Aires - AR: [s.n.], 2006. 273 – p. ISBN 85-7393-545-6.

BRANCO, R. ENTENDA O QUE É TEROTECNOLOGIA. p. 1 –, 2018. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br/conteudo/2471-entenda-o-que-e-terotecnologia/>>.

BRASIL. *Lei 10.406 de 10 jan. de 2002*. 2002. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10406.htm%23capituloiiiperdadanos>. Acesso em: 2018-04-14T00:00:00+00:00.

BRICK, E. S.; PILLA, L. H. L. de. *Modelo conceitual de um processo de Análise de Custo de Ciclo de*. 2004. Disponível em: <<http://www.producao.uff.br/conteudo/rpep/volume22003/015relpesq103.doc>>.

BROWN, P.; SONDALINI, M. Asset Maintenance Management. The Path toward Defect Elimination. The Evolution of Maintenance Practices. p. 1 – 10, 2013. Disponível em: <<http://www.lifetime-reliability.com/free-articles/maintenance-management.html>>.

BROWN, P.; SONDALINI, M. Asset Maintenance Management. The Path toward Defect Elimination. The Evolution of Maintenance Practices. p. 1 – 10, 2013. Disponível em: <<http://www.lifetime-reliability.com/free-articles/maintenance-management.html>>.

BROWN, R.; YANUCK, R. *Introduction to life-cycle costing. [Contains glossary]*. [S.l.]: The Fairmont Press, Inc.,Atlanta, GA, 1985. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.

B.S; FABRYCKY, W.; BLANCHARD. Life cycle costing and economic analysis. 1993.

BUGARÍĆ, U. et al. Reliability of Rubber Conveyor Belts As a Part of the Overburden Removal System Case Study : Tamnava-East Field Open Cast Mine. v. 3651, p. 925 – 932, 2009.

C. FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. *Análise de Investimentos*. 10^o. ed. São Paulo: [s.n.], 2008.

COUSINEAU, D. Fitting the Three-Parameter Weibull Distribution: Review and Evaluation of Existing and New Methods. v. 16, n. 1, p. 9 –, 2009.

DOWLATSHAHI, S. *Purchasing's role in a concurrent engineering environment*. 1992. 21 – 25 p.

ELLRAM, L. M.; SIFERD, S. P. Total cost of ownership : A key concept in strategic cost management decisions. 1998.

EMBLEMSVÅG, J. Activity-based life-cycle costing. *Managerial Auditing Journal*, v. 16, p. 17 – 27, 2001.

FISHMAN, G. S. *Monte Carlo : Concepts, Algorithms, and Applications*. [S.l.]: Springer New York, 1996. 698 – p. ISBN 9781441928474. Acesso em: 2016-12-21T00:00:00+00:00.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. *Confiabilidade e manutenção industrial*. [S.l.: s.n.], 2009. 265 – p. ISBN 9788535251883. Acesso em: 2017-01-14T00:00:00+00:00.

FOSTER, G. D.; TRAN, H. van. Maintenance and Money. *Information Strategy; the Executive's Journal*, v. 6, n. 7, p. 40 – 45, 1990.

FRATE, L. D. Failure of Engineering Artifacts: A Life Cycle Approach. *Science and Engineering Ethics*, Springer Netherlands, v. 19, n. 3, p. 913 – 944, 9 2013. ISSN 1353-3452. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11948-012-9360-0>>. Acesso em: 2016-10-17T00:00:00+00:00.

GREEN, A. Unlocking the 2025 vision. *Construction Journal*, v. 3, p. 3 –, 2015. Disponível em: <<http://search.proquest.ez10.periodicos.capes.gov.br/technology/docview/1808126465/abstract/593D294146FD4FA1PQ/12%3Faccountid%3D14536>>.

HASTINGS, N. A. J. *Life Cycle Costing*. Springer International Publishing, 2015. 149 – 158 p. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-14777-2_8>.

HIGHAM, A.; FORTUNE, C.; JAMES, H. Life cycle costing: Evaluating its use in UK practice. *Structural Survey*, v. 33, n. 1, p. 73 – 87, 2015. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri%3Feid%3D2-s2.0-84928578358%26partnerID%3D40%26md5%3D096779372613657d10e86f8bc82b2b26>>.

IBRAHIM, M. New concept and implementation of inter-continental flexible training of terotechnology and life cycle costs. In: . Hammamet: [s.n.], 2004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1490287/>>.

IRANI, B. M. S. A. *TEROTECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO – AUMENTO DA CONFIABILIDADE E FACILITAÇÃO DA INTERVENÇÃO DOS MANTENEDORES (MANUTENIBILIDADE), PARA FUTURAS MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS*. 2011. Tese (Doutorado).

K; KELLY, A.; EASTBURN. Terotechnology. A modern approach to plant engineering. v. 129, n. 2, 1982. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-a-1.1982.0021>>.

KARDEC, A.; LAFRAIA, J. R. *Gestão Estratégica e Confiabilidade*. [S.l.: s.n.], 2009. 90 – p. ISBN 9788573037326.

KARDEC, A.; NASCIF, J. *Manutenção - Função Estratégica*. 4^o. ed. QUALIMARK, 2001. 1 – 5 p. ISBN 9788541400404. Disponível em: <<http://qualitymark.com.br/manutencao-funcao-estrategica-4a-edicao>>.

KARDEC, A.; RIBEIRO, H. *Gestão Estratégica e manutenção autônoma*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

KAWAUCHI, Y.; RAUSAND, M. Life Cycle Cost (LCC) analysis in oil and chemical process industries. 1999. Acesso em: 2016-09-22T00:00:00+00:00.

KAYRBEKOVA, D.; MARKESSET, T. Activity-based life cycle cost analysis as an alternative to conventional LCC in engineering design. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, Springer-Verlag, v. 2, n. 3, p. 218 – 225, 2011. ISSN 0975-6809.

KEOLEIAN, G. A. *Product Life Cycle Assessment to reduce health risks and environmental impacts*. Michigan - US: NOYENS PUBLICATION, 1994. 46 – p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books%3Fhl%3Dpt->

BR%26lr%3D%26id%3D24HNCgAAQBAJ%26oi%3Dfnd%26pg%3DPP1%26dq%3DProduct%2BLife%2BCycle%2BAssessment%2Bto%2Breduce%2Bhealth%2Brisks%2Band%2Benvironmental%2Bimpacts%26ots%3DU9HY9mE0ji%26sig%3DSYCdZnynhV5FW8idNfD8hTjCIM%23v%3Donepage%26q%3DProduct%20Life%20Cycle%20Assessment%20to%20redu>.

KNIGHT, C. Four Decades of Reliability Progress. 1991. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/154429/%3Freload%3Dtrue>>.

KONG, J. S.; FRANGOPOL, D. M. Cost–Reliability Interaction in Life-Cycle Cost Optimization of Deteriorating Structures. *Journal of Structural Engineering*, v. 130, n. 11, p. 1704 – 1712, 2004.

KORPI, E.; ALA-RISKU, T. Life cycle costing: a review of published case studies. *Managerial Auditing Journal*, v. 23, n. 3, p. 240 – 261, 2008. ISSN 0268-6902. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/10.1108/02686900810857703%255Cnhttp%3A/www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/02686900810857703>>.

LAFRAIA, J. R. *Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade*. [S.l.: s.n.], 2011. 374 – p. ISBN 9788573037920.

LAFRAIA, J. R. A Futura Norma Internacional de Gestão de Ativos ISO 55000. v. 000, 2013. Disponível em: <<http://www.abraman.org.br/sidebar/pas55>>.

LINDHOLM, A.; SUOMALA, P. Learning by costing. *International Journal of Productivity and Performance Management*, Emerald Group Publishing Limited, v. 56, n. 8, p. 651 – 672, 11 2007. ISSN 1741-0401. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17410400710832985>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.

LO, H. Estimating Parameters of Deterioration Models Using Bayesian Estimation Project Report. 2015. Disponível em: <http://umdcc.ece.dal.ca/ECED6530/downloads/RandomProcess_HannaLo.pdf>. Acesso em: 2017-03-12T00:00:00+00:00.

MARIO, H.; TOBIAS, P.; BORIS, O. Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review. S t. Gallen, Lukasstr, n. 01, p. 15 –, 2015. Disponível em: <http://www.snom.mb.tu-dortmund.de/cms/de/forschung/Arbeitsberichte/Design-Principles-for-Industrie-4_0-Scenarios.pdf>.

MARQUES, S. G. *MANUTENÇÃO INDUSTRIAL E CUSTO DO CICLO DE VIDA – EXTRACÇÃO OLEAGINOSAS*. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade Nova Lisboa - PO.

MÁRQUEZ, C. et al. Reliability stochastic model applied to evaluate the economic impact of the failure in the Life Cycle Cost Analysis (LCCA). Case of study in the oil industry,. *European Safety and Reliability Annual Conference: Reliability, Risk and Safety: Back to the Future*, 2010.

MICROSOFT. *MS-Excel*. 2016.

MINITAB. *Minitab 16*. 2018.

- MINITAB 18. *Conhecimento Regressão Não Linear*. 2018. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/nonlinear-regression/understanding-nonlinear-regression/>>. Acesso em: 2018-02-19T00:00:00+00:00.
- MOREIRA NETO, T. C. A História da Evolução do Sistema de Manutenção. *Web Artigos*, 2011. Disponível em: <<http://www.webartigos.com/artigos/a-historia-da-evolucao-do-sistema-de-gestao-de-manutencao/75650/>>.
- MOREIRA NETO, T. C. Análise do Custo de Ciclo de Vida de uma Correia Transportadora com Uso de Análise RAM em uma indústria de mineração para suportar a estratégia de manutenção. 2016.
- MOREIRA NETO, T. C.; MAGALHAES, R. S.; RIBEIRO, A. Aplicação Prática da Análise do Custo do Ciclo de Vida em Ativos Industriais como Ferramenta para Implantação de uma Gestão de Ativos. *SODEBRÁS*, v. 11, n. 124, p. 3 –, 2016. Disponível em: <<http://www.sodebras.com.br/edicoes/N124.pdf>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.
- MOUBRAY, J. *Reliability-centered maintenance*. [S.l.]: Industrial Press, 1997. ISBN 0831130784. Acesso em: 2016-09-20T00:00:00+00:00.
- NUGRAHA, H.; ARIFianto, Y.; SINISUKA, N. I. The applicability of BFA and LCCA to analyze reliability of power system. In: . [s.n.], 2014. p. 1 – 6. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm%3Farnumber%3D6798474>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.
- PAS-55. PAS 55-1-2008 - Asset Management. *Bsi*, 2008.
- PEREIRA, A. J. C. *A NÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DA ETA QUEIMADELA*. 2009. Tese (Doutorado) — Universidade do Porto - PO.
- PILAO, N. E.; HUMMEL, P. R. *Matemática Financeira e Engenharia Econômica*. São Paulo: Editora Pioneira Thomson, 2006.
- PINTELON, L.; GELDERS, L. Maintenance management decision making. *European Journal of Operational Research*, v. 58, n. 3, p. 301 – 317, 1992. ISSN 03772217. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037722179290062E>>.
- RAGHAVAN, S.; CHOWDHURY, B. State Diagram-Based Life Cycle Management Plans for Power Plant Components. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 6, n. 2, p. 965 – 972, 3 2015. ISSN 1949-3053. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm%3Farnumber%3D7024912>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.
- RELIASOFT. *Parameter Estimation - ReliaWiki*. 2017. Disponível em: <http://reliawiki.org/index.php/Parameter_Estimation>. Acesso em: 2017-03-05T00:00:00+00:00.
- RELIASOFT. *BlockSim*. 2018.
- RELIASOFT. *Synthesis Platform*. 2018.
- RELIASOFT. *Weibull ++*. 2018.
- RIDDELL, H. A.; JENNINGS. Asset investment & life cycle costing. 2001.

- S/A, V. *PGS - 003034 - Reforma de Componentes da Usina*. Marabá: [s.n.], 2017. 8 – p.
- SCHITTKOWSKI, K. *Numerical Data Fitting in Dynamical Systems: A Practical Introduction with Applications and Software*. [s.n.], 2013. Disponível em: <https://books.google.com.br/books%3Fid%3DdsrTBwAAQBAJ%26pg%3DPA175%26dq%3DData%2BFitting%2Bin%2BDynamical%2BSystems%26hl%3Dpt-BR%26sa%3DX%26redir_esc%3Dy%23v%3Dsnippet%26q%3DNonlinear%20regression%26f%3Dfalse>.
- SEIF, J.; RABBANI, M. Journal of Quality in Maintenance Engineering Component based life cycle costing in replacement decisions. *Journal of Quality in Maintenance Engineering Structural Survey Managerial Auditing Journal*, v. 20, n. 3, p. 73 – 87, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/JQME-08-2013-0053%20http%3A/%20http%3A/dx.doi.org/10.1108/02686900810857703>>. Acesso em: 2016-12-25T00:00:00+00:00.
- SILVA FILHO, A. C. da; LIMA, F. G. USANDO O MÉTODO DE MONTE CARLO PARA ENCONTRAR RAÍZES DE EQUAÇÕES. 2017. Disponível em: <<http://legacy.unifacef.com.br/novo/publicacoes/IIforum/Textos%20EP/Fabiano%20e%20Antonio%20Carlos.pdf>>. Acesso em: 2017-03-12T00:00:00+00:00.
- SOUSA, B. J. de. *INVESTIMENTO DE ATIVOS UTILIZANDO A FERRAMENTA LCCA-ANÁLISE DE CUSTO DO CICLO DE VIDA- EM COMPRESSORES DE BAIXA PRESSÃO*. 2013. Tese (Doutorado).
- SUNDBERG, A. Management aspects on Condition Based Maintenance – the new opportunity for maritime industry. *9th International Conference on Marine Engineering Systems*, n. May, 2003.
- TEWARI, P. M.; SINGH, I.; KHARE. Reliability analysis of a conveyor belt system, with only one server, subject to failures and idleness after repair. 1991. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.
- VALE S/A. *Conheça Salobo, o maior projeto de cobre da Vale*. 2015. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/aboutvale/news/Paginas/conheca-salobo-maior-projeto-cobre-vale.aspx>>. Acesso em: 2017-09-24T00:00:00+00:00.
- WHITE, G.; OSWALD, P. Life Cycle Costing. Management Accounting. *Management Accounting*, v. 57, n. 7, p. 39 – 42, 1976.
- WIEL, S.; MCMAHON, J. E. Energy-Efficiency Labels and Standards: A Guidebook for Appliances, Equipment, and Lighting - 2nd Edition. *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2005.
- WILLERS, C. D.; RODRIGUES, L. B.; SILVA, C. A. da. Avaliação do ciclo de vida no Brasil: uma investigação nas principais bases científicas nacionais. *Produção*, Associação Brasileira de Engenharia de Produção, v. 23, n. 2, p. 436 – 447, jun 2013. ISSN 0103-6513. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php%3Fscript%3Dsci%7B_%7Darttext%7B%26%7Dpid%3DS0103-65132013000200016%7B%26%7Dlng%3Dpt%7B%26%7Dnrm%3Diso%7B%26%7Dtling%3Den>.
- WILLIAMS, D. R.; SCOTT. Reliability and life cycle costs. 2000.
- WOODHOUSE, J. Managing industrial risk. 1991.

WOODWARD, D. G. Life cycle costing—Theory, information acquisition and application. *International Journal of Project Management*, Pergamon, v. 15, n. 6, p. 335 – 344, 12 1997. ISSN 02637863. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263786396000890>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.

YULING, W. et al. Reliability and maintainability optimization of mechanical system based on the life cycle cost. In: INTERNATIONAL TECHNOLOGY AND INNOVATION CONFERENCE 2009 (ITIC 2009), 2009. IET, 2009. p. 114 – 114. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp.2009.1492>>. Acesso em: 2016-09-04T00:00:00+00:00.

Anexos

ANEXO A – CORRESPONDÊNCIA ENTRE A PAS 55 E O SISTEMA ISO

Quadro 1 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 01

PAS 55:2008	OHSAS 18001:2007	ISO 14001:2004	ISO 9001:2000
0 Introdução	0 Introdução	0 Introdução	0 Introdução
1 Escopo	1 Escopo	1 Escopo	1 Escopo
2 Referências Normativas	2 Referências Normativas	2 Referências Normativas	2 Referências Normativas
3 Termos e definições	3 Termos e definições	3 Termos e definições	3 Termos e definições
4 Requisitos do sistema de gerenciamento de ativos (somente título)	4 Elementos do sistema de gerenciamento OH&S (somente título)	4 Requisitos do sistema de gestão ambiental (somente título)	4 Sistema do gerenciamento da qualidade (somente título)
4.1 Requisitos Gerais	4.1 Requisitos Gerais	4.1 Requisitos Gerais	4.1 Requisitos Gerais
4.2 Política de gestão de ativos	4.2 Política do OH&S	4.2 Política ambiental	5.1 Compromisso da gestão 5.3 Política da qualidade
4.3 Estratégias, objetivos e planos dos ativos (somente título)	4.3 Planejamento (somente título)	4.3 Planejamento (somente título)	5.4 Planejamento (somente título)
4.3.1 Estratégia da gestão de ativos	-	-	-
4.3.2 Objetivos da gestão de ativos	4.3.3 Objetivos e programações	4.3.3 Objetivos, metas e programações	5.4.1 Objetivos da qualidade
4.3.3 Planos da gestão de ativos	4.3.3 Objetivos e programações	4.3.3 Objetivos, metas e programações	5.4.2 Planejamento do Sistema da qualidade 7.1 Realização do plano de produção
4.3.4 Planejamento de contingência	4.4.7 Preparação para emergências e responsabilidades	4.4.7 Preparação para emergências e responsabilidades	-
4.4 Permissões e controle da gestão de ativos	-	-	-
4.4.1 Estrutura, autoridade e responsabilidades	4.4.1 Recursos, papéis, responsabilidade, prestação de contas e autoridade	4.4.1 Recursos, papéis, responsabilidade e autoridade	5.1 Compromisso de gestão 6.1 Prestação de recursos 6.3 Infraestrutura
4.4.2 Terceirização das atividades da gestão de ativos	-	-	-
4.4.3 Treinamento, consciência e competência	4.4.2 Competência, treinamento e conscientização	4.4.2 Competência, treinamento e conscientização	6.2.1 (Recursos Humanos) Geral 6.2.2 Competência, treinamento e conscientização
4.4.4 Comunicação, participação e consultoria	4.4.3 Comunicação, participação e consultoria	4.4.3 Comunicação	5.5.3 Comunicação interna 7.2.3 Customer communication

Fonte: PAS-55 (2008)

Quadro 2 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 02

PAS 55:2008	OHSAS 18001:2007	ISO 14001:2004	ISO 9001:2000
4.4.6 Gerenciamento da informação	4.4.5 Controle de documentos 4.3.1 Identificação de ameaças, avaliação de riscos e determinação de controles	4.4.5 Controle de documentos 4.3.1 Aspectos ambientais	4.2.3 Controle de documentos
4.4.7 Gerenciamento do risco			-
4.4.7.1 Processo da gestão do risco			
4.4.7.2 Metodologia da gestão do risco			
4.4.7.3 Identificação e avaliação do risco			
4.4.7.4 Uso e manutenção de informações de risco de			
4.4.8 Requisitos legais e outros	4.3.2 Requisitos legais e outros	4.3.2 Requisitos legais e outros	5.2 Foco no cliente
4.4.9 Gestão de mudanças	4.3.1 Identificação de ameaças, avaliação de riscos e determinação de controles	4.3.1 Aspectos ambientais	7.2.1 Determinação dos requisitos relacionados ao produto
			5.2 Foco no cliente
			7.2.2 Revisão dos requisitos relacionados ao produto
			8.5.1 Melhoria contínua
4.5 Implementação do (s) plano (s) de gerenciamento de ativos (somente título)	4.4 Implementação e operação (somente título)	4.4 Implementação e operação (somente título)	7 Realização do produto (somente título)
4.5.1 Atividades do ciclo de vida	4.4.6 Controle Operacional	4.4.6 Controle Operacional	7.1 Planejamento da realização do produto
			7.2 Processos relacionados ao cliente
			7.3 Projeto e desenvolvimento
			7.4 Compras
			7.5 Produção e prestação de serviços
4.5.2 Ferramentas, instalações e equipamentos	-	-	7.6 Control of monitoring and measuring devices
4.6 Avaliação e melhoria do desempenho (somente título)	4.5 Verificação (apenas título)	4.5 Verificação (apenas título)	8 Medição, análise e melhoria (somente título)
4.6.1 Monitoramento de desempenho e condição	4.5.1 Monitoramento de desempenho e condição	4.5.1 Monitoramento e medição	8.1 Geral
			8.2.3 Monitoramento e medição de processos
			8.2.4 Monitoramento e medição do produto

Fonte: PAS-55 (2008)

Quadro 3 – Correspondência entre PAS e Sistema ISO - Parte 03

PAS 55:2008	OHSAS 18001:2007	ISO 14001:2004	ISO 9001:2000
4.6.3 Avaliação da conformidade	4.5.2 Avaliação da conformidade	4.5.2 Avaliação da conformidade	8.2.3 Monitoramento e medição de processos
			8.2.4 Monitoramento e medição do produto
4.6.4 Auditoria	4.5.5 Auditoria interna	4.5.5 Auditoria interna	8.2.2 Auditoria interna
4.6.5 Ações de melhorias	4.5.3.2 Não conformidade, Ação corretiva e preventiva	4.5.3 Ação e não-conformidades	8.3 Controle de produto não conforme
4.6.5.1 Ações preventivas e corretivas			8.4 Análise de dados
4.6.5.2 Melhoria contínua			8.5.2 Ações corretivas
			8.5.3 Preventive action
4.6.6 Registros	4.5.4 Controle de registros	4.5.4 Controle de registros	4.2.4 Controle de registros
4.7 Revisão de gerenciamento	4.6 Revisão de gerenciamento	4.6 Revisão de gerenciamento	5.1 Compromisso de gestão
			5.6 Revisão de gerenciamento (sistema-título)
			5.6.1 Geral
			5.6.2 Revisão das entradas
			5.6.3 Revisão das entregas
			8.5.1 Melhoria contínua

Fonte: PAS-55 (2008)

ANEXO B – TABELAS DE CÁLCULOS DO LCCA

Quadro 4 – Historico Preço do Cobre em 2014 (US\$/ton)

fev/14	7.149,21
mar/14	6.650,04
abr/14	6.673,56
mai/14	6.891,13
jun/14	6.821,14
jul/14	7.113,38
ago/14	7.001,84
set/14	6.872,22
out/14	6.737,48
nov/14	6.712,85
dez/14	6.446,45

Média \$ 6.824,48

Fonte: Index Mundi (2017)

Quadro 5 – Historico Cotação Dólar em 2014 (US\$)

fev/14	2,38
mar/14	2,28
abr/14	2,33
mai/14	2,23
jun/14	2,22
jul/14	2,23
ago/14	2,27
set/14	2,33
out/14	2,45
nov/14	2,55
dez/14	2,64

Média \$ 2,36

Fonte: ACI (2017)

Quadro 6 – Tabela dos Resultados da Simulação LCCA

Data de Referência	Custo(t) Total	Custo Futuro da Correia Operando	Custo Futuro pela Troca por uma Nova
13/02/14	\$ -	\$ -	\$ -
20/02/14	\$ -	\$ -	\$ 1.850.445,46
27/02/14	\$ -	\$ -	\$ 1.856.052,46
06/03/14	\$ -	\$ -	\$ 1.861.676,44
13/03/14	\$ -	\$ -	\$ 1.867.317,47
20/03/14	\$ -	\$ -	\$ 1.872.975,59
27/03/14	\$ -	\$ -	\$ 1.878.650,85
03/04/14	\$ 2,70	\$ 2,76	\$ 1.884.343,31
10/04/14	\$ 144,91	\$ 148,46	\$ 1.890.053,02
17/04/14	\$ 955,28	\$ 981,65	\$ 1.895.780,03
24/04/14	\$ 1.510,23	\$ 1.556,62	\$ 1.901.524,39
01/05/14	\$ 3.965,29	\$ 4.099,48	\$ 1.907.286,16
08/05/14	\$ 8.071,94	\$ 8.370,38	\$ 1.913.065,39
15/05/14	\$ 14.780,59	\$ 15.373,52	\$ 1.918.862,12
22/05/14	\$ 25.805,13	\$ 26.921,64	\$ 1.924.676,43
29/05/14	\$ 41.582,23	\$ 43.512,81	\$ 1.930.508,35
05/06/14	\$ 67.263,99	\$ 70.600,20	\$ 1.936.357,94
12/06/14	\$ 112.789,52	\$ 118.742,45	\$ 1.942.225,26
19/06/14	\$ 176.526,20	\$ 186.406,22	\$ 1.948.110,35
26/06/14	\$ 270.254,65	\$ 286.245,29	\$ 1.954.013,28
03/07/14	\$ 385.921,70	\$ 409.994,79	\$ 1.959.934,09
10/07/14	\$ 565.405,34	\$ 602.494,37	\$ 1.965.872,85
17/07/14	\$ 807.399,74	\$ 862.969,91	\$ 1.971.829,59
24/07/14	\$ 1.136.110,53	\$ 1.217.984,02	\$ 1.977.804,39
31/07/14	\$ 1.546.602,28	\$ 1.663.081,78	\$ 1.983.797,30
07/08/14	\$ 2.064.808,34	\$ 2.227.043,31	\$ 1.989.808,36
14/08/14	\$ 2.719.708,02	\$ 2.942.287,83	\$ 1.995.837,63
21/08/14	\$ 3.581.028,26	\$ 3.885.836,99	\$ 2.001.885,18
28/08/14	\$ 4.639.550,93	\$ 5.049.713,44	\$ 2.007.951,05
04/09/14	\$ 5.952.147,18	\$ 6.497.980,52	\$ 2.014.035,30
11/09/14	\$ 7.545.049,03	\$ 8.261.915,84	\$ 2.020.137,98
18/09/14	\$ 9.399.772,48	\$ 10.324.047,61	\$ 2.026.259,16
25/09/14	\$ 11.541.394,55	\$ 12.714.664,40	\$ 2.032.398,88
02/10/14	\$ 14.043.973,98	\$ 15.518.530,23	\$ 2.038.557,21
09/10/14	\$ 16.871.403,56	\$ 18.699.316,86	\$ 2.044.734,20
16/10/14	\$ 20.064.851,72	\$ 22.306.140,76	\$ 2.050.929,90
23/10/14	\$ 23.570.698,96	\$ 26.282.997,98	\$ 2.057.144,38
30/10/14	\$ 27.418.501,89	\$ 30.666.210,96	\$ 2.063.377,69
06/11/14	\$ 31.620.561,90	\$ 35.473.164,83	\$ 2.069.629,89
13/11/14	\$ 36.146.237,53	\$ 40.673.112,56	\$ 2.075.901,03
20/11/14	\$ 41.045.205,43	\$ 46.325.562,44	\$ 2.082.191,17
27/11/14	\$ 46.204.300,18	\$ 52.306.374,70	\$ 2.088.500,37

Fonte: Autor (2017)

UFBA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA
CEP: 40.210-630
Telefone: (71) 3283-9800
E-mail: pei@ufba.br
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

