

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA  
ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

**ANA LETÍCIA RIBEIRO SPADER**

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE  
ATIVOS FÍSICOS SUPOSTADA PELA ENGENHARIA DA  
CONFIABILIDADE**

**MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO**

**CURITIBA**

**2019**

**ANA LETÍCIA RIBEIRO SPADER**

**APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE  
ATIVOS FÍSICOS SUPOSTADA PELA ENGENHARIA DA  
CONFIABILIDADE**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Mariano

**CURITIBA**

**2019**



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **APLICAÇÃO DA ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA DE ATIVOS FÍSICOS SUPOORTADA PELA ENGENHARIA DA CONFIABILIDADE**

por

**ANA LETÍCIA RIBEIRO SPADER**

Esta monografia foi apresentada em 4 de outubro de 2019, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia da Confiabilidade, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. A aluna foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Carlos Henrique Mariano, Dr.  
Professor Orientador - UTFPR

---

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

---

Prof. Marcelo Rodrigues, Dr.  
Membro Titular da Banca - UTFPR

## **AGRADECIMENTOS**

Quero agradecer, em especial, a Fernanda Bica de Almeida pela paciência, apoio e incentivo durante o desenvolvimento e as leituras desta monografia. Também, a Ewerlyn Ane Perussolo Guelbert pela amizade, carinho e por me acolher em sua casa durante os finais de semana de aula.

Agradeço aos meus familiares e amigos pela compreensão da minha ausência em alguns eventos importantes durante as viagens à Curitiba.

Agradeço ao Prof. Dr. Rigoni, pelo apoio, sabedoria e motivação, com certeza é um profissional que ama a engenharia da confiabilidade, e isso é inspirador.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

## RESUMO

SPADER, Ana. **Aplicação da análise do custo do ciclo de vida de ativos físicos suportada pela engenharia da confiabilidade.** 2019. 84 páginas. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

No contexto atual, onde as organizações enfrentam o crescimento da concorrência com base em custo, a aplicação de ferramentas que visam controlar, minimizar e prever os custos de seus ativos ainda tem pouca abrangência nas indústrias. A tomada de decisão em relação à substituição de equipamentos ainda possui viés técnico e, em muitos casos, ocorre tardiamente, sem uma visão a longo prazo, por não considerar os custos totais de seus ativos. O objetivo deste estudo é determinar o tempo ótimo de substituição, em médio e longo prazo, e analisar a viabilidade econômica de ativos físicos de uma indústria de ferramentas motorizadas com base na análise do custo do ciclo de vida (LCCA). O método de trabalho consiste em utilizar a análise de dados de vida de eventos recorrentes paramétrica (RDA) para identificar quais equipamentos apresentam um comportamento de desgaste e prever o número de falhas corretivas esperadas para os próximos sete anos. Além disso, serão estimados os custos esperados para ações corretivas e preventivas através da análise de dados de vida (LDA) para construção de um fluxo de caixa onde foi possível verificar a viabilidade econômica utilizando o cálculo do valor presente líquido (VPL), entre os dois cenários propostos, reforma ou substituição, para os equipamentos analisados. Também, foi possível constatar, através do cálculo do custo anual equivalente (CAE), o melhor momento para aplicação do cenário mais atrativo economicamente. Dentre os nove equipamentos analisados, os resultados obtidos apontam que apenas quatro apresentavam um comportamento de desgaste. Destes, foi sugerida uma ordem de priorização com base no maior potencial de economia. Para os dois primeiros equipamentos da ordem, foi sugerida a substituição imediata, para o terceiro indicada a substituição no ano de 2022 e o último para o ano de 2023. Desta forma, o cenário mais atrativo, sob o ponto de vista financeiro, foi a substituição dos quatro ativos físicos onde apresentaram uma economia em custos de manutenção para os próximos sete anos de R\$ 990.145,00, ou seja, o valor de quase dois ativos novos. Para o contexto da empresa analisada, que possui um processo seriado com uma média de 400 equipamentos de grande porte, o estudo mostrou muito válido, pois permitiu identificar os equipamentos que se encontravam na fase de desgaste da curva da banheira, prever os custos e as falhas futuras, analisar possíveis cenários e identificar o ponto ótimo de substituição, tudo isso de forma quantitativa e baseado em metodologias robustas aplicadas pela engenharia da confiabilidade. Além disso, o estudo contribui para uma visualização clara e em termos financeiros para a escolha da estratégia mais vantajosa, facilitando a tomada de decisão de gestores e o gerenciamento de riscos e investimentos a médio e longo prazo.

**Palavras-chave:** Análise de Sistemas Reparáveis. Análise do Custo do Ciclo de Vida. Tempo Ótimo de Substituição de Ativos. Análise de Dados de Vida. Análise de Dados de Eventos Recorrentes Paramétrica.

## ABSTRACT

SPADER, Ana. **Application of life cycle cost analysis of physical assets with support by reliability engineering**. 2019. 84 pages. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

In the current context, in which organizations face the growth of cost-based competition, the application of tools to control, minimize and predict the costs of their assets is little coverage in industries. Decision making regarding equipment replacement is still driven by technical aspects and, in many cases, it happens late, without a long-term view, because it does not consider the total costs of its assets. The objective of this study is to determine the optimum replacement time in the medium and long term and to analyze the economic viability of physical assets of a motorized tool industry based on life cycle cost analysis (LCCA). The working method is it consists parametric recurrent event data analysis (RDA) to identify which equipments that has a wearout behavior and predict the number of corrective failures expected over the next seven years. In addition, will be estimated the expected costs for corrective and preventive actions through life data analysis (LDA) to build a cash flow where it was possible to verify the economic viability using the calculation of net present value (NPV), among the two proposed scenarios, reform or replacement, for the analyzed equipments. Also, it was possible to verify, by calculating the equivalent annual cost (EAC), the best time to implementation the most economically attractive scenario. Among the nine equipments analyzed, the results show that only four had a wearout behavior. Of these, an order of prioritization based on the highest potential savings was suggested. For the first two equipments of the order of prioritization, the immediate replacement was suggested, then of the third indicated the replacement in the year 2022 and the last one for the year 2023. In this way, the most attractive scenario, from a financial point of view, was the replacement of the four physical assets which presented savings in maintenance costs for the next seven years of R\$ 990,145.00, in other words, the value of almost two new assets. In the context of the analyzed company, which has a serial process with an average of 400 large equipments, the study proved quite useful, because it allowed the company to identify the equipments that were in the wearout phase of the bathtub curve, to predict the costs and the future failures, analyze possible scenarios and identify the optimal replacement point, all in a quantitative manner and based on robust methodologies applied by reliability engineering. In addition, the study contributes to a clear and financial visualization for choosing the most advantageous strategy, facilitating managers' decision making and medium and long-term risk and investment management.

**Keywords:** Repairable Systems Analysis. Life Cycle Cost Analysis. Optimum Replacement Time. Life Data Analysis. Parametric Recurrent Event Data Analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Custo de Manutenção com Base no Faturamento .....	14
Figura 2.1 - Forças Aplicadas no Processo de Brunimento .....	23
Figura 2.2 - Direções de Corte e Aspecto Superficial de Acabamento.....	24
Figura 2.3 - Cilindros de Motosserras .....	24
Figura 2.4 - Fluxo de Produção do Processo de Brunimento .....	25
Figura 2.5 - Exemplo de Brunidores.....	26
Figura 2.6 - Brunidora Horizontal .....	27
Figura 2.7 - Brunidora Vertical.....	28
Figura 4.1 - Ajustes no <i>Software Weibull++</i> da Análise RDA Paramétrica.....	48
Figura 4.2 - Dados de TTF Acumulados no <i>Software Weibull++</i> (BRU020).....	49
Figura 4.3 - Número Esperado de Falhas Acumuladas no QCP (BRU020).....	54
Figura 4.4 - Custo Esperado para uma Falha Corretiva no QCP (BRU020) .....	57
Figura 4.5 - Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva no QCP (BRU020) .....	62

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Fases da Curva da Banheira .....	30
Gráfico 3.2 - Flexibilidade da Distribuição Weibull e Fases da Curva da Banheira ...	38
Gráfico 3.3 - Função Densidade de Probabilidade da Lognormal 2P.....	40
Gráfico 3.4 - Custo do Ciclo de Vida ao Longo do Tempo .....	41
Gráfico 4.1 - Número de Falhas Acumuladas ao Longo do Tempo (BRU020).....	50
Gráfico 4.2 - Intensidade de Falhas Acumuladas ao Longo do Tempo (BRU020) ....	51
Gráfico 4.3 - Probabilidade da Weibull Mista Subpop3 (BRU020) .....	56
Gráfico 4.4 - Função Densidade de Probabilidade para uma Falha Corretiva (BRU020) .....	58
Gráfico 4.5 - Probabilidade da Weibull 3P (BRU020).....	61
Gráfico 4.6 - Função Densidade de Probabilidade do Custo Mensal de Preventiva (BRU020) .....	63
Gráfico 4.7 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU020.....	68
Gráfico 4.8 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU021.....	69
Gráfico 4.9 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU035.....	70
Gráfico 4.10 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU039.....	70



## LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Comportamento do $\beta$ em Função da Taxa de Falhas .....	38
Quadro 4.1 - Resultados de Saída <i>Software Weibull++</i> Análise RDA (BRU020).....	49
Quadro 4.2 - Resultados de Saída <i>Software Weibull++</i> Análise LDA para uma Falha Corretiva (BRU020).....	55
Quadro 4.3 - Resultados de Saída <i>Software Weibull++</i> Análise LDA para Custo Esperado Mensal de Preventiva (BRRU020) .....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Exemplo de cálculo de tempo entre falhas acumulado (BRU055) .....	46
Tabela 4.2 - Intensidades de Falhas e Parâmetros .....	51
Tabela 4.3 - Número de Falhas Esperadas Acumuladas por Equipamento .....	54
Tabela 4.4 - Teste de Aderência das Distribuições. Estatísticas do Weibull++ para Custos Corretivos (BRU020) .....	55
Tabela 4.5 - Custo Esperado de uma Falha Corretiva por Equipamento .....	58
Tabela 4.6 - Custo Anual Esperado de Falhas Corretivas por Equipamento .....	59
Tabela 4.7 - Teste de Aderência das Distribuições Estatísticas do Weibull++ para Custos Preventivos (BRU020) .....	60
Tabela 4.8 - Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva por Equipamento	63
Tabela 4.9 - Custo Anual Esperado de Manutenção Preventiva por Equipamento...	64
Tabela 4.10 - Ponto Ótimo de Substituição por Equipamento .....	65
Tabela 4.11 - Ganhos Potenciais por Equipamento (VPL e CAE) .....	67
Tabela 4.12 - Priorização e Previsão de Substituição de Equipamentos .....	71

## LISTA DE SIGLAS

ABRAMAN	Associação Brasileira de Manutenção
AVGOF	Teste Estatístico de <i>Kolmogorov-Smirnov</i>
AVPLOT	Teste Estatístico do Coeficiente de Correlação Normalizado
BRU	Brunidora
CAE	Custo Anual Equivalente
FC	Fluxo de Caixa
HPP	Processos de <i>Poisson</i> Homogêneos
ID	Identificação de Sistema
IPL	<i>Power Law</i> – Lei de Potência
LCC	<i>Life Cycle Cost</i> – Custo do Ciclo de Vida
LCCA	<i>Life Cycle Cost Analysis</i> - Análise do Custo do Ciclo de Vida
LDA	<i>Life Data Analysis</i> - Análise dos Dados de Vida
LKV	Teste Estatístico do Valor de Máxima Verossimilhança
LRU	<i>Lowest Replaceable Unit</i> – Menor Unidade Reparável
MLE	<i>Maximum Likelihood Estimator</i> – Estimador Máxima Verossimilhança
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> – Tempo Médio Entre Falhas
MTTF	<i>Mean Time to Failures</i> – Tempo Médio de Falhas
NHPP	Processos de <i>Poisson</i> Não Homogêneos
PDF	<i>Probability Density Function</i> - Função Densidade de Probabilidade
QCP	<i>Quick Calculation Pad</i> - Bloco de Cálculo Rápido ou Calculadora
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i> – Diagrama de Blocos de Confiabilidade
RDA	<i>Parametric Recurrent Event Data Analysis</i> - Análise de Dados de Eventos Recorrentes Paramétrica
RSA	<i>Reliability Systems Analysis</i> - Análise de Sistemas Reparáveis
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> – Sociedade de Engenheiros Automotivos
TMA	Taxa Mínima de Atratividade ou Taxa Mínima Atrativa
TTF	<i>Time to Failure</i> - Tempo Até Falha
VPL	Valor Presente Líquido
VUE	Vida Útil Econômica

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\beta$  – Parâmetro de forma ou inclinação, Beta, da distribuição Weibull

$u(t)$  – Intensidade de falha no tempo  $t$

$\lambda$  – Taxa de falha, Lambda

$q$  – Fator de restauração

$\eta$  – Parâmetro de escala ou vida característica, Eta, da distribuição Weibull

$\gamma$  – Parâmetro de localização, Gama, da distribuição Weibull

$f(t)$  – Função de Densidade de Probabilidade (*PDF*)

$\bar{T}$  – Função Vida Média (*MTTF*)

$\Gamma$  – Gama

$\mu$  – Parâmetro de escala, Mi, da distribuição da Lognormal

$\sigma$  – Parâmetro de forma, Sigma, da distribuição da Lognormal

$\lambda(t)$  – Taxa de falha no tempo  $t$

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Objetivo Geral	17
1.2.2	Objetivos Específicos	17
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	19
1.4.1	Método de Pesquisa	19
1.4.2	Método de Trabalho	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	21
<b>2</b>	<b>OBJETO DE PESQUISA</b>	<b>23</b>
2.1	PROCESSO DE BRUNIMENTO	23
2.2	BRUNIDORAS	25
2.2.1	Brunidoras Horizontais	27
2.2.2	Brunidoras Verticais	28
2.3	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	28
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>30</b>
3.1	CURVA DA BANHEIRA	30
3.2	TESTE DE ADERÊNCIA	31
3.3	ANÁLISE DE DADOS DE EVENTOS RECORRENTES	32
3.3.1	Processo de <i>Poisson</i> Não Homogêneo e a Lei de Potência	33
3.3.2	Modelo de Vida Econômica	36
3.4	ANÁLISE DE DADOS DE VIDA	36
3.4.1	Distribuição Weibull	37
3.4.2	Distribuição Lognormal	39
3.5	ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA	40
3.5.1	Elementos de Custo	42
3.5.2	Análise Econômica	43
3.5.2.1	Valor Presente Líquido (VPL)	43
3.5.2.2	Custo Equivalente Anual (CAE)	44
3.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	45
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>46</b>
4.1	ANÁLISE DE SISTEMAS REPARÁVEIS	46
4.1.1	Levantamento Dos Tempos Até Falha Acumulados	46
4.1.2	Análise RDA	47
4.2	LEVANTAMENTO DOS ELEMENTOS DE CUSTOS	52
4.2.1	Custos de Falhas Corretivas	53
4.2.1.1	Número Esperado de Falhas Corretivas Anual	53
4.2.1.2	Custo Esperado para uma Falha Corretiva	55
4.2.1.3	Custo Anual Esperado de Falhas Corretivas	59

4.2.2	Custos de Manutenções Preventivas .....	59
4.2.2.1	Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva.....	60
4.2.2.2	Custo Anual Esperado de Manutenções Preventivas.....	64
4.3	PONTO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO.....	64
4.4	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....	65
4.4.1	Valor Presente Líquido (VPL).....	66
4.4.2	Custo Anual Equivalente (CAE).....	68
4.5	RESULTADOS DO ESTUDO .....	71
4.6	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	73
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>74</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	75
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>76</b>
	<b>ANEXO A – ANÁLISE DE VIABILIDADE BRUNIDORAS .....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No cenário atual, o desenvolvimento constante de novas tecnologias exige que as empresas foquem na diversificação e na inserção de novos produtos/serviços no mercado. Além disso, as organizações enfrentam o crescimento da concorrência com base em custo. Isso reflete diretamente na utilização e no aperfeiçoamento das tecnologias dos processos produtivos, exigindo uma transformação drástica nas técnicas operacionais e gerenciais para redução de custos e maximização de seus ativos físicos (SLACK; BRANDON-JONES; JOHNSTON, 2018).

Tal contexto promove a procura por novas formas de gerenciamento, visando impactos diretos nos aspectos competitivos das organizações, impulsionando a utilização de ferramentas e metodologias direcionadas à melhoria do desempenho operacional e técnico (PINTO; XAVIER, 2005). Desta forma, a função manutenção começa a ser considerada uma atividade estratégica, devido à crescente necessidade de disponibilidade e confiabilidade de sistemas e equipamentos aliadas ao baixo custo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A pesquisa denominada Documento Nacional (ABRAMAN, 2017), realizada em 2017 pela ABRAMAN (Associação Brasileira de Manutenção), reflete sobre a situação da manutenção no Brasil contemplando diversos setores econômicos. Seus resultados demonstram que o custo anual total de manutenção representa, em média, 4% do faturamento anual total das empresas participantes do estudo, considerando os custos de pessoal, material, serviços contratados e outros (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Custo de Manutenção com Base no Faturamento

Setores	Custo Manutenção / Faturamento (%)	Custo Manutenção / Valor Imobilizado (%)	Custo Relativo Pessoal Próprio (%)	Custo Relativo Material (%)	Custo Relativo a Contratação (%)	Outros Custos Relativos (%)
Açúcar e Alcool, Alimentos e Bebidas	4%	6%	40%	40%	20%	0%
Aeronáutico e Automotivo	3%	13%	54%	32%	15%	0%
Eletroeletrônicos - Energia Elétrica	7%	6%	44%	29%	27%	4%
Químico e Sanamento	5%	5%	46%	38%	16%	0%
Mineração e Siderúrgico	5%	10%	50%	37%	14%	0%
Petróleo e Petroquímico	4%	15%	41%	31%	28%	0%
Papel e Celulose e Plástico	3%	8%	39%	49%	12%	6%
Predial e Prestação de Serviços (EQ e MO)	4%	4%	49%	23%	28%	2%
Máquinas e Equipamentos - Metalúrgico	3%	1%	51%	37%	12%	3%
<b>Média Geral</b>	<b>4%</b>	<b>7%</b>	<b>46%</b>	<b>35%</b>	<b>19%</b>	<b>2%</b>

Fonte: ABRAMAN (2017).

A redução do custo e a alta disponibilidade dos equipamentos sempre foram as premissas básicas da manutenção. Isso contribuiu para o crescimento da utilização de ferramentas da engenharia da confiabilidade, que possuem base estatística e

possibilitam simulações de cenários com o intuito de entender o comportamento das falhas, riscos associados e o fim da vida útil de seus ativos.

Souza e Clemente (2001), afirmam que, de maneira geral, são os aspectos técnicos que orientam as empresas nas tomadas de decisão em relação à substituição de equipamentos. Desta forma, não existe uma visão a longo prazo, pois não são considerados os custos totais de sistemas e ativos, apenas os custos de aquisição inicial (BARRINGER, 2003).

A metodologia LCCA (*Life Cycle Cost Analysis*) ou análise do custo do ciclo de vida, auxilia no apoio à tomada de decisão no âmbito financeiro e econômico ao longo de todo ciclo de vida dos equipamentos. Ela é capaz de indicar qual a estratégia mais lucrativa para as organizações em termos de investimentos para novas aquisições ou renovações de seus ativos (DHILLON, 2010).

Em razão de todas as questões abordadas anteriormente, no decorrer deste estudo serão analisados os custos do ciclo de vida de equipamentos industriais reparáveis, denominados brunidoras, de uma empresa de ferramentas motorizadas. Em alguns casos, estes equipamentos ultrapassam o fim da sua vida útil e apresentam obsolescência tecnológica. Desta maneira, incidem em altos custos de material, mão de obra e indisponibilidade, não havendo viabilidade econômica devido ao custo de aquisição de um novo equipamento.

## 1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O presente trabalho visa abordar e analisar, em um caso prático, o custo do ciclo de vida de equipamentos através da LCCA. Para os dados de entrada desta análise, é necessário identificar e priorizar os equipamentos aptos para a substituição, ou seja, aqueles que apresentam comportamento de desgaste. Para isso, será aplicada a análise de dados de eventos recorrentes paramétrica (*Parametric Recurrent Event Data Analysis* - RDA), que também possibilita a obtenção do número esperado de falhas para simulações de anos futuros. Além disto, será aplicada a análise dos dados de vida (*Life Data Analysis* - LDA) para simular custos futuros de manutenção referentes a mão de obra, materiais e serviços contratados dos ativos físicos.



Estes equipamentos são similares e fundamentais ao processo por garantir alta precisão nas medidas internas dos cilindros produzidos. Alguns equipamentos possuem idade avançada ao fim da vida útil recomendada pelo fabricante e apresentam obsolescência tecnológica de componentes elétricos. Porém, estes argumentos não são suficientes quando é calculado o *payback* (tempo de retorno do investimento) e comparado o VPL (Valor Presente Líquido) entre o ativo antigo e o novo, pois este cálculo é realizado de forma pontual, sem considerar um fluxo de caixa ao longo do tempo.

Este estudo limita-se ao uso da análise de sistemas reparáveis (*Repairable Systems Analysis – RSA*), em função do banco de dados encontrados na empresa, pois os tempos até falhas são registrados ao nível de equipamento, e não por componentes e seus modos de falhas. Realizar uma análise criteriosa de cada ordem de trabalho demandaria tempo e recursos não disponíveis para este estudo, devido a quantidade de equipamentos e ordens de trabalhos, tornando inviável o uso da menor unidade substituível (*Lowest Replaceable Unit - LRU*) para tempos até falha.

Para o desenvolvimento deste estudo foram levadas em consideração as seguintes premissas:

- A empresa possui, em média, 400 equipamentos com alto valor de aquisição. Para este estudo, o critério de escolha dos equipamentos foi a obsolescência tecnológica e o risco iminente de parada por falta de componentes eletrônicos conforme análise técnica da engenharia;
- Os dados até o tempo de falha foram registrados ao nível de equipamento, não havendo distinção de sistemas e componentes; o modelo mais adequado para o cálculo em sistemas reparáveis é o modelo de lei de potência de processo de *Poisson* não homogêneo (*NHPP/Power Law*), a partir do qual é possível obter o número esperado de falhas dos equipamentos;
- Os dados até o tempo de falha são acumulativos de paradas corretivas e os reparos considerados “tão ruim quanto velho” (*as bad as old*);
- Nesta análise, serão demonstrados os resultados dos equipamentos que apresentarem  $\beta = 1$  na aplicação do modelo *NHPP/Power Law*, porém não serão analisados a nível de LRU;

- Para os equipamentos que apresentarem  $\beta < 1$ , os resultados serão demonstrados na análise, mas não serão considerados na LCCA;
- Os dados de custos serão referentes a materiais, mão de obra e contratação de serviços conforme os critérios de alocação e rateios utilizados e disponibilizados pela empresa;
- Será utilizada a LDA para análise de previsão de custos corretivos e preventivos para auxiliar na construção do fluxo de caixa da LCCA.

Neste contexto, as principais questões norteadoras a serem respondidas através deste estudo são:

- Quais equipamentos necessitam ser substituídos?
- Como definir os equipamentos prioritários de substituição?
- Quais desses equipamentos geram mais custos de manutenção?
- Qual o ganho financeiro com a substituição destes equipamentos?

## 1.2 OBJETIVOS

Este item apresenta os objetivos, geral e específicos deste trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é determinar o tempo ótimo de substituição e os ganhos potenciais, em médio e longo prazo, e analisar a viabilidade econômica das brunidoras de desbaste e acabamento de uma indústria de ferramentas motorizadas, com base em análises quantitativas da confiabilidade.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo geral deste estudo, os seguintes objetivos específicos devem ser executados e atingidos:

- Identificar o comportamento das falhas ou a fase da curva da banheira dos equipamentos;
- Projetar e calcular os custos e o número esperado de falhas dos equipamentos através das análises de RDA e LDA;
- Analisar a viabilidade econômica dos equipamentos com a LCCA, inserindo no fluxo de caixa os dados projetados com RDA e LDA;
- Analisar o custo de ciclo de vida dos ativos;
- Definir o tempo ótimo de substituição;
- Apresentar os resultados obtidos e ganhos potenciais;
- Propor um cronograma de substituições dos ativos analisados de médio e longo prazo fundamentado em análises quantitativas, aplicando conceitos da engenharia da confiabilidade.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A principal dificuldade encontrada pela área da engenharia desta organização é a necessidade de demonstrar a indisponibilidade, economias e reduções de custos no longo prazo quando comparado ao tempo de retorno do investimento. Outro ponto importante é o fato de a empresa possuir, em média, 400 equipamentos para seus diferentes processos, com custo de aquisição variando entre 3 e 20 milhões de reais. Isso torna necessária a priorização e projeção para a substituição dos ativos físicos, exigindo um planejamento a médio e longo prazo para captação de recursos financeiros e aprovação de investimentos.

Os critérios utilizados, atualmente, para definir a substituição de um equipamento são os custos elevados, obsolescência tecnológica e alta indisponibilidade. Estes critérios constatam somente o que já ocorreu e, com isso, gera-se um investimento não planejado para aquisição de um novo ativo, mais paradas corretivas e, em alguns casos, a parada total do equipamento por falta no mercado de componentes de reposição.

A LCCA proporciona um ponto de vista voltado ao negócio e à competitividade econômica, por visar o menor custo a longo prazo. Geralmente, o principal critério para investir em um novo ativo físico são os custos de aquisição e o *payback*, desconsiderando economias operacionais e de manutenção ao longo prazo que

podem superar o tempo de retorno simples do investimento inicial (BARRINGER, 2003).

De acordo com Ehrlich e Moraes (2005), todo ativo em uso é constantemente assediado por novas tecnologias, que se candidatam a substituí-lo. Neste contexto, parar de investir em um equipamento que atingiu seu ponto ótimo de troca possibilita ganhos com as reduções dos custos de manutenção e aumento da disponibilidade, garantindo uma maximização de lucro sobre este ativo.

Em um âmbito geral, com a crescente necessidade de planejamento e da competitividade através da redução de custos, criou-se uma disputa mais criteriosa para novos investimentos, com base no maior retorno de ganho potencial para a organização. Neste cenário, a realização deste trabalho foi motivada pela escassez de trabalhos referentes a aplicação da LCCA para diversos ativos e como priorizar estes investimentos ao médio e longo prazo suportada pela engenharia da confiabilidade.

## 1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Nesse tópico são apresentados o método de pesquisa e o método de trabalho.

### 1.4.1 Método de Pesquisa

O método de pesquisa vai classificar o estudo sob quatro aspectos: (i) natureza; (ii) forma de abordagem; (iii) objetivos e; (iv) procedimentos técnicos.

Este trabalho tem por finalidade gerar conhecimentos para aplicação prática, com o propósito de solucionar problemas específicos. Sendo assim, é considerado, sob o ponto de vista da sua natureza, como uma pesquisa aplicada. Quanto à abordagem do problema, classifica-se como quantitativa, baseando-se na interpretação e análise de resultados oriundos de dados numéricos tratados com o uso de recursos estatísticos (BOAVENTURA, 2009). Quanto aos seus objetivos, o trabalho é considerado uma pesquisa exploratória, proporcionando maior aproximação e entendimento de um tema, visando criar familiaridade em relação a um fato específico (SANTOS, 2000). Sob o ponto de vista de seus procedimentos técnicos, o trabalho tem caráter de pesquisa conhecido como estudo de caso, pois

caracteriza-se pelo aprofundamento em um ou poucos objetos, de modo que permita seu detalhamento. Sua maior utilização é verificada nas pesquisas exploratórias (GIL, 2010).

#### 1.4.2 Método de Trabalho

Para viabilizar o desenvolvimento deste trabalho e alcançar os objetivos propostos será seguida a lógica:

- Extrair as ordens de serviço do sistema de gerenciamento da manutenção para obter os tempos até falha (*Time To Failure* – TTF), tratar os dados para calcular os TTFs acumulados com auxílio do *software* Excel.
- Identificar o comportamento das falhas utilizando o modelo de lei de potência (*Power Law*) para equipamentos reparáveis utilizando o *software* Weibull++;
- Analisar os dados obtidos e selecionar os equipamentos com comportamento de desgaste, ou seja, com  $\beta > 1$  com auxílio do *software* Excel;
- Calcular o número de falhas esperadas para os equipamentos com  $\beta > 1$  para os próximos 7 anos com auxílio do *software* Weibull++;
- Gerar relatórios de custos do sistema de gerenciamento da manutenção, tratar e organizar os dados de custos dos ativos com auxílio do *software* Excel;
- Calcular os custos esperados para as ações corretivas e preventivas para com auxílio do *software* Weibull++;
- Criar um fluxo de caixa para a aplicação da LCCA para analisar o custo de ciclo de vida das brunidoras com os dados projetados nas etapas anteriores utilizando o *software* Excel;
- Analisar a viabilidade econômica das brunidoras com base nos cenários propostos de reforma e de substituição utilizando o *software* Excel;
- Calcular o tempo ótimo de substituição onde o custo total do ciclo de vida dos equipamentos é minimizado utilizando *software* Excel;

- Apresentar os resultados obtidos e uma proposta de cronograma para substituição das brunidoras de médio e longo prazo fundamentado em análises quantitativas da confiabilidade utilizando o *software* Excel.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este estudo foi estruturado em cinco capítulos macros, visando melhor compreensão e organização. O capítulo 1, denominado introdução, busca apresentar o tema da pesquisa, sendo primeiramente contextualizada a importância e a relevância do assunto de forma mais ampla, conduzindo até o problema do objeto de estudo. Também são abordadas as delimitações, dificuldades e as questões que nortearam esta pesquisa. Em seguida, são apresentados os objetivos, justificativas e motivações desse estudo. Finalizando o capítulo, os procedimentos metodológicos e a estruturação necessária para desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo 2 oferece um entendimento mais aprofundado do contexto onde está inserido o objeto de estudo. É descrito com detalhes o processo de brunimento dentro do contexto produtivo, as características das brunidoras de desbaste e acabamento e suas principais funções.

O capítulo 3 apresenta o referencial teórico das ferramentas quantitativas da engenharia da confiabilidade empregadas neste estudo. São descritos os conceitos, premissas e aplicações da RDA para sistemas reparáveis para obter o número esperado de falhas e identificar a fase da curva da banheira em que se encontram os equipamentos. Em seguida, é apresentada a base teórica e aplicação da LDA, além das distribuições de vida de Weibull e Lognormal. Por fim, é indicada a fórmula e os custos que compõem a metodologia LCCA, conceitos de matemática financeira para entendimento dos indicadores econômicos como TMA (Taxa Mínima de Atratividade), VPL e CAE (Custo Anual Equivalente).

O capítulo 4 apresenta as etapas mais relevantes para o desenvolvimento do estudo e das aplicações das análises e ferramentas propostas no referencial teórico. É observado o cumprimento da sequência lógica proposta nos objetivos específicos e os resultados obtidos com suas considerações. São apresentados os resultados, os parâmetros, os custos do ciclo de vida e o resultado das projeções de custo de cada

equipamentos. Conseqüentemente, os tempos ótimos de substituição e viabilidade econômica em um horizonte de médio e longo prazo.

O capítulo 5 apresenta uma síntese dos resultados obtidos, assim como as discussões referentes às dificuldades encontradas no decorrer da pesquisa, os benefícios e ganhos. Ainda neste capítulo, são respondidas as questões norteadoras propostas no início do trabalho, além da proposição de questões pertinentes para trabalhos futuros.

## 2 OBJETO DE PESQUISA

Este capítulo apresenta uma breve contextualização do processo de brunimento e sua importância para a fabricação de cilindros de combustão para ferramentas motorizadas. A seção também apresenta o equipamento denominado brunidora, com suas principais características e funcionalidades.

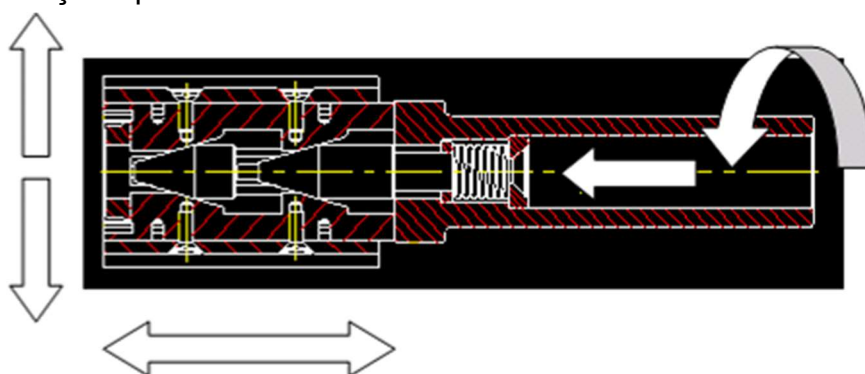
### 2.1 PROCESSO DE BRUNIMENTO

O brunimento é um processo de usinagem por abrasão de baixa velocidade, destinado a melhorar a precisão de superfícies cilíndricas, usualmente internas, onde o material é removido gradativamente devido ao contato constante entre os grãos abrasivos da ferramenta e a superfície da peça (KLOCKE; KÖNIG, 1989).

No processo de brunimento, a remoção do material é feita através da aplicação de três forças (Figura 2.1):

- Expansão da ferramenta abrasiva contra a parede da peça;
- Rotação da ferramenta de brunir (ou da peça);
- Movimento alternado (oscilação) da ferramenta em relação a peça.

Figura 2.1 - Forças Aplicadas no Processo de Brunimento



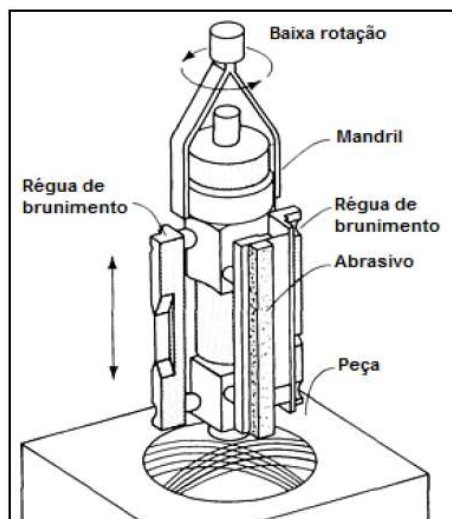
Fonte: a autora (2019).

Para realizar o brunimento, é utilizado um dispositivo denominado brunidor, composto por pedras abrasivas, com possibilidade de regulação para uma determinada faixa de diâmetro, para furos de alta precisão. A retirada gradativa de material e os movimentos simultâneos de rotação e oscilação axial, proporcionam excelente acabamento superficial e uniformidade geométrica, devido aos padrões de



cruzamento dos grãos abrasivos do brunidor (Figura 2.2), de forma rápida, eficiente e econômica (KLOCKE; KÖNIG, 1989).

Figura 2.2 - Direções de Corte e Aspecto Superficial de Acabamento



Fonte: Klocke; König (1989).

O acabamento superficial proporcionado pelo brunimento garante uma melhor retenção de lubrificantes, sendo recomendado para aplicações de guias cilíndricas, para peças móveis e componentes de sistemas de combustão (BÄHRE, SCHMITT, MOOS, 2012).

No caso analisado para este trabalho, o processo é realizado em cilindros de motosserras à combustão (Figura 2.3), fabricados em liga alumínio-silício através de um processo de fundição sob pressão em uma matriz de molde permanente. Após fundidos, eles são usinados, cromados e, posteriormente disponibilizados para o processo de brunimento.

Figura 2.3 - Cilindros de Motosserras



Fonte: a autora (2019).

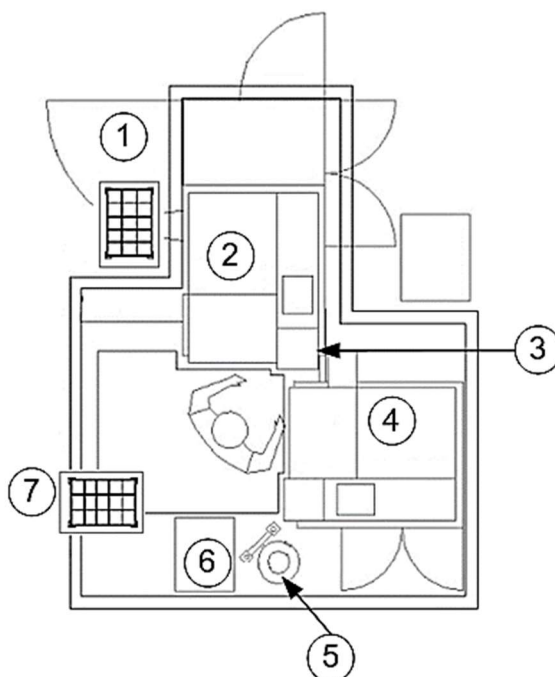
Como motosserras são ferramentas manuais, toda a sua concepção é voltada para a redução de peso dos seus componentes. Desta forma, o cilindro possui dimensões pequenas, aletas finas e paredes estreitas tornando todo o processo de fabricação mais complexo e preciso.

## 2.2 BRUNIDORAS

As brunidoras estão inseridas numa célula de trabalho composta por uma brunidora de desbaste, uma brunidora de acabamento, uma lavadora e uma centrífuga de peças. O fluxo consiste nos seguintes passos (Figura 2.4):

- Receber cilindros cromados (1)
- Brunir desbaste (2)
- Verificar diâmetro e perfil (3)
- Brunir acabamento (4)
- Lavar e centrifugar para remover excesso de óleo (5)
- Verificar diâmetro e perfil (6)
- Disponibilizar cilindro para o próximo processo (7)

Figura 2.4 - Fluxo de Produção do Processo de Brunimento



Fonte: a autora (2019).

As brunidoras são compostas por sistemas de expansão, golpe, movimentação, exaustão, rotação, refrigeração, elétrico, pneumático, segurança e de operação. No sistema de rotação temos a função principal do equipamento que executa o processo de brunir, onde encontram-se as ferramentas denominadas brunidores.

Existem duas classificações para os brunidores: o superabrasivo de grande remoção, utilizado para desbaste, e o brunidor comum de baixa remoção, utilizado para acabamento. Geralmente, usa-se o mesmo brunidor, porém sua diferença está no material de composição das pedras abrasivas (KRAR; RATTERMAN, 1990)

Os brunidores utilizados nesta aplicação são rígidos e com poucos componentes de montagem (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Exemplo de Brunidores

Nagel HD



Nagel HDL



Sunnen TC



Fonte: a autora (2019).

Quando ocorre a troca de abrasivos, a ferramenta é completamente desmontada, limpa e lubrificada. A quantidade e posição de abrasivos depende basicamente de quatro fatores:

- Comprimento de pista a brunir;
- Canais abertos ou fechados ou quantidade de abrasivo;
- Quantidade e posição de janelas ou área brunimento;
- Conicidade do perfil.

Os abrasivos utilizados para desbaste são diamantados, enquanto os voltados para acabamento são de óxido de alumínio no brunimento de cilindros cromados. A

dureza e o tipo de resina podem variar conforme a resistência do cilindro às pressões de corte.

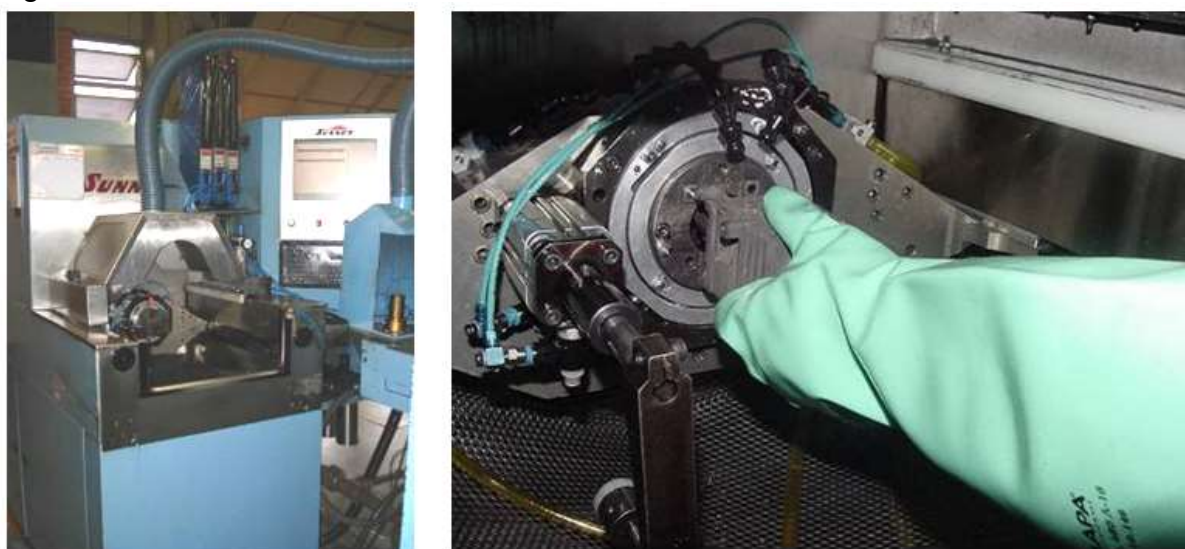
Para cilindros com paredes resistentes, são usados os abrasivos com resina dura, porém, em cilindros com paredes finas é mais indicado a utilização de resina macia. Quanto mais macia for a resina, menor será a necessidade de pressão de corte para realizar o brunimento e, por consequência, melhor será a circularidade. Porém, a vida útil também será proporcionalmente menor comparada à resina dura.

No processo de brunimento existem dois tipos de equipamentos, as brunidoras de desbaste e as de acabamento. Suas estruturas e funções mecânicas são similares. Sua utilização dependerá da aplicação, na qual devem ser considerados o material a ser removido, o tamanho e peso do cilindro.

### 2.2.1 Brunidoras Horizontais

Nas brunidoras horizontais, os cilindros são encaixados na posição horizontal (Figura 2.6). São utilizadas para brunimento de peças onde a remoção de material é menor, ou para peças leves, ou peças com grande comprimento.

Figura 2.6 - Brunidora Horizontal



Fonte: a autora (2019).

As brunidoras horizontais são recomendadas para desbastar superfícies extremamente duras, como no caso do cilindro cromado, são aquelas com sistema de expansão por motor de passo, pois possuem avanço constante, força de expansão

elevada e a possibilidade de programar parâmetros via *software*, que possibilita ajustes rápidos e específicos por modelo de cilindro a ser brunido.

### 2.2.2 Brunidoras Verticais

Nas brunidoras verticais, os cilindros são posicionados na máquina na posição vertical (Figura 2.7). São utilizadas para brunimento de peças que exigem maior remoção de material, ou peças pesadas, ou de pequeno comprimento.

Figura 2.7 - Brunidora Vertical



Fonte: a autora (2019).

As brunidoras verticais são recomendadas para acabamento em superfícies de cilindro cromado são as máquinas que possuem sistema de expansão por mola ou hidráulico, pois o acabamento não necessita de forças de cortes elevadas e basicamente têm a função de cortar os picos deixados pelo desbaste e atingir a tolerância especificada.

## 2.3 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi contextualizado o cenário operacional no qual os objetos de estudo estão inseridos. A apresentação destes equipamentos auxilia na verificação da coerência da análise proposta neste estudo. Além disso, auxilia na aplicação de

trabalhos futuros e ainda serve como referência para pesquisas e soluções que envolvam substituição de ativos ou custo do ciclo de vida.

No capítulo 3, serão referenciadas as técnicas utilizadas para a identificação dos equipamentos em fase de desgaste, estimação de custos e falhas para a criação do fluxo de caixa da LCCA. Desta maneira, será baseada a tomada de decisão sobre a melhor alternativa (reforma ou substituição) para os equipamentos apresentados nesta seção.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

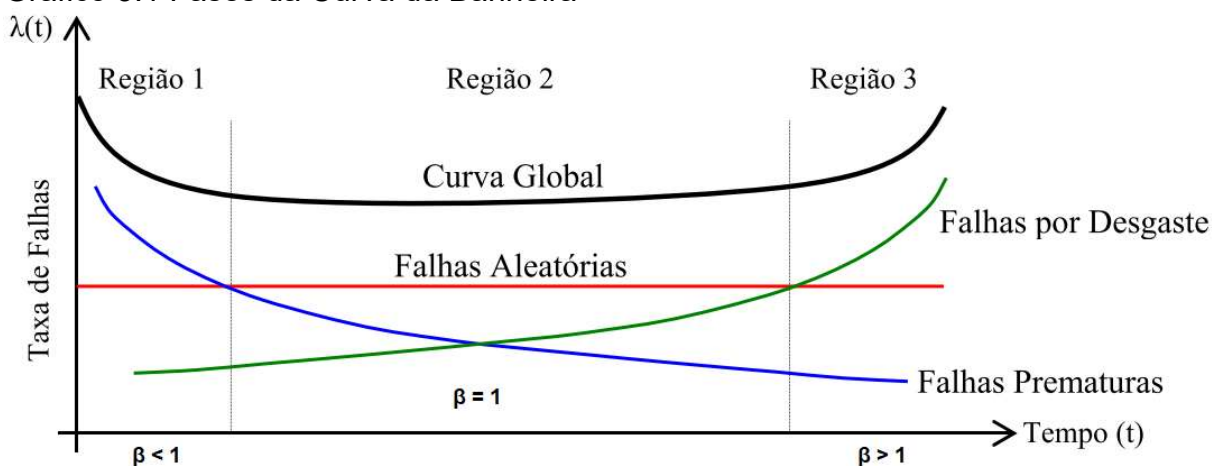
Este capítulo aborda conceitos sobre sistemas reparáveis e as fases da curva da banheira, para complementar o entendimento da utilização da fundamentação teórica da análise de dados de eventos recorrentes (RDA) e análise de dados de vida (LDA), que fornecem dados de entradas para LCCA, assim como as premissas e as distribuições estatísticas adequadas para o cálculo destes dados.

A seção também aborda os conceitos sobre vida econômica e definições de elementos de custos. Além disso, traz uma breve contextualização sobre os índices financeiros do VPL e CAE necessários para o fluxo de caixa e tomada de decisão quanto a viabilidade econômica.

#### 3.1 CURVA DA BANHEIRA

Em geral, a probabilidade de ocorrência de falhas acontece em função do tempo, diferindo entre as etapas do ciclo de vida dos equipamentos, produtos ou operações. Essa probabilidade é demonstrada por meio de uma curva (Gráfico 3.1), denominada Curva da Banheira (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Gráfico 3.1 Fases da Curva da Banheira



Fonte: Adaptado Moubray, 2001.

Essa curva é plotada representando a vida útil do equipamento no eixo x, podendo ela estar em minutos, horas, anos, ciclos ou qualquer outra unidade quantificável de tempo ou uso. No eixo y, temos representada a taxa de falha, dada

como falhas entre unidades sobreviventes por unidade de tempo (RELIASOFT, 2015b).

A análise da função da taxa de falhas é imprescindível para o entendimento do comportamento das falhas ao longo do tempo. Desta forma, para cada fase da curva da banheira, verifica-se o efeito do parâmetro de forma ( $\beta$ ) para a taxa de falha (CALIXTO, 2016). Quando  $\beta < 1$ , representa a fase de mortalidade infantil, onde ocorrem falhas prematuras, concentradas no início do ciclo de vida de um equipamento ou produto, oriundas de deficiências do projeto. Quando  $\beta = 1$ , representa a fase de vida útil, onde falhas aleatórias ocorrem em qualquer momento do tempo. Quando  $\beta > 1$ , representa fase de envelhecimento ou desgaste, onde ocorrem falhas por desgaste concentradas no final da vida útil de um equipamento (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A análise de sistemas reparáveis também utiliza esta denominação para o parâmetro  $\beta$ , mortalidade infantil ( $\beta < 1$ ), vida útil ( $\beta = 1$ ) e desgaste ( $\beta > 1$ ), para identificar o comportamento da intensidade de falhas ao longo do tempo. Quando temos  $\beta \neq 1$ , é utilizado o processo de *Poisson* não homogêneo (NHPP) e o modelo de lei de potência, que pode ser visto como uma extensão da distribuição Weibull. Quando  $\beta = 1$ , utiliza-se um processo de *Poisson* homogêneo (HPP), caracterizando a LDA (RELIASOFT, 2015a).

Para este estudo, serão considerados somente os equipamentos que se encontram na fase de desgaste para análise de viabilidade econômica, ou seja, que apresentarem  $\beta > 1$ .

### 3.2 TESTE DE ADERÊNCIA

Para um determinado evento, que pode ser representado por variáveis aleatórias ou discretas, a distribuição estatística ótima é uma equação matemática que tem a melhor conformidade ou aderência com os dados reais, ou seja, que represente o comportamento do evento e a estimação dos dados através de uma função (PALLEROSI; MAZZOLINI; MAZZOLINI, 2011).

Neste estudo, foi utilizado o *software* Weibull++ que possui um assistente de distribuição, que realiza os testes estatísticos de *Kolmogorov-Smirnov*, do coeficiente de correlação normalizado e do valor de máxima verossimilhança, respectivamente



denominados no *software* pelas siglas AVGOF, AVPLOT e LKV. Através dos valores encontrados, o *software* utiliza uma escala numérica crescente com fatores de ponderação matemática padrão do sistema para criar um *ranking* das distribuições com base na melhor aderência ou ajuste aos dados inseridos (RELIASOFT, 2015b).

Ebeling (1997) apud Marques (2004), ressaltam que conhecimento sobre o comportamento e o processo de falha, as características das distribuições e os gráficos de probabilidade colaboram para a escolha de um modelo mais adequado. Isso auxilia na validação da distribuição escolhida, da estimação dos parâmetros e da realização dos testes de aderência.

### 3.3 ANÁLISE DE DADOS DE EVENTOS RECORRENTES

De modo geral, um sistema reparável é um agrupamento de sistemas não reparáveis ou composto por diversos componentes (menor unidade substituível). Em sua maioria, os sistemas complexos, como automóveis, aeronaves ou equipamentos industriais, são reparáveis, pois não são substituídos quando falham (CROW, 1974).

Desta forma, um sistema reparável pode ser recolocado a uma condição normal de operação, mesmo após uma falha onde recebe ações corretivas, tais como alterações de ajustes ou substituição de componentes (ASCHER; FEINGOLD, 1984). Assim, seus modelos matemáticos devem descrever as ocorrências de falha durante o tempo de operação, considerando a idade dos componentes remanescentes, diferentemente do que ocorre em sistemas não reparáveis (WECKMAN; SHELL; MARVEL, 2001).

Existem dois métodos para análise de sistemas reparáveis (*Repairable Systems Analysis - RSA*). No primeiro, são necessários dados mais detalhados dos tempos até falha e de reparo para encontrar as distribuições de cada um dos componentes. Deste modo, é possível identificar componentes críticos, oportunidades de otimização e alocação da confiabilidade no sistema, além dos tempos de disponibilidade, número de falhas e custos através de simulações. No segundo caso, não exige tal grau de detalhamento, permitindo a utilização de dados ao nível de sistemas, propiciando respostas mais rápidas, como o número esperado e comportamento das falhas, o tempo ótimo de troca e a idade do sistema (RELIASOFT,

2015a). Com base nos dados encontrados na empresa, o segundo método adequa-se melhor para a realização das análises relativas a este estudo.

### 3.3.1 Processo de *Poisson* Não Homogêneo e a Lei de Potência

Normalmente, a análise da confiabilidade de um sistema reparável sob uso do cliente envolverá dados gerados por vários sistemas. Desta maneira, devemos assumir que os eventos (falhas) não são independentes e, na maioria dos casos, não são distribuídos de forma idêntica em um sistema reparável (CROW, 1974).

Quando ocorre uma falha neste tipo de sistema, os componentes restantes têm uma idade atual. O próximo evento de falha depende desta idade atual, ou seja, acumulam idade. Assim, os eventos de falha no nível do sistema são dependentes. Deste modo, os modelos sugeridos para esses casos são os processos de *Poisson* não homogêneos (NHPP), que permitem que a intensidade da falha do sistema mude com a idade do sistema (RELIASOFT, 2015a).

As metodologias usuais de análise da confiabilidade para itens não reparáveis não são apropriadas para sistemas reparáveis complexos. Neste contexto, Crow (1974) propôs o processo de Weibull ou o NHPP da lei de potência (*Power Law*) para esse tipo de análise, e desenvolveu procedimentos estatísticos apropriados para a estimação por máxima verossimilhança, adequação do teste de bondade e limites de confiança.

O modelo de lei de potência pode ser usado para análise de dados ao nível de sistemas, podendo ser o sistema total, como um helicóptero, ou podem ser subsistemas, como a transmissão do helicóptero ou as pás do rotor. Este modelo, considera que o reparo do sistema é mínimo ou “tão ruim quanto velho” (*as bad as old*), pois a substituição de um componente não altera a confiabilidade do sistema (RELIASOFT, 2015a).

Se o tempo para a primeira falha seguir a distribuição Weibull, cada falha subsequente será regida pelo modelo de lei de potência, como no caso de reparos mínimos. Deste ponto de vista, o modelo de lei de potência é uma extensão da distribuição de Weibull (CROW, 1974).

Neste caso, considera-se que as falhas do sistema seguem o processo de *Poisson* não homogêneo e a intensidade de falha para reparo mínimo segue a Lei da Potência conforme Equação 3.1, (CROW, 1974; CALIXTO, 2016):

$$u(t) = \lambda\beta t^{\beta-1} \quad (3.1)$$

A distribuição Weibull governa a primeira falha do sistema e o modelo de lei de potência controla cada falha de sistema sucessora. Se o sistema tiver uma intensidade de falha constante  $u(t) = \lambda$ , então os intervalos entre as falhas do sistema seguem uma distribuição exponencial com taxa de falha  $\lambda$ . Se o sistema opera por tempo  $T$ , então o número aleatório de falhas  $N(T)$  acima de 0 é  $T$  dada pela função de valor médio da lei de potência, apresentada na Equação 3.2, (CROW, 1974):

$$E[N(T)] = \lambda T^\beta \quad (3.2)$$

Portanto, a probabilidade  $N(T) = n$  é dada pela probabilidade de *Poisson*, conforme apresentada na Equação 3.3:

$$\frac{(\lambda T)^n e^{-\lambda T}}{n!}; n = 0, 1, 2 \dots \quad (3.3)$$

Isso é chamado de processo de *Poisson* homogêneo (HPP), pois não há alteração na função de intensidade. Trata-se de um caso especial do modelo de lei de potência para  $\beta = 1$ . O modelo de lei de potência é uma generalização do modelo HPP e permite a mudança na função de intensidade à medida em que o sistema reparável envelhece. Para o modelo de Lei da Potência, a intensidade da falha está aumentando para  $\beta > 1$  (desgaste), diminuindo para  $\beta < 1$  (mortalidade infantil) e constante para  $\beta = 1$  (vida útil) (CROW, 1974; RELIASOFT, 2015a; CALIXTO, 2016).

A RDA pode modelar dados de eventos recorrentes e pode capturar a tendência, estimar a taxa e prever o número total de recorrências. Os dados de falha e reparo de um sistema reparável podem ser tratados como um tipo de dados de recorrência. Reparos passados e atuais podem afetar o processo de falha futura. Para

a maioria dos eventos recorrentes, o tempo é um fator chave. Com o tempo, a taxa de recorrência pode permanecer constante, aumentar ou diminuir (RELIASOFT, 2015a).

Nesse modelo, o tempo de reparo é considerado insignificante, para que os processos possam ser vistos como processos pontuais. Este modelo fornece uma maneira de descrever a taxa de ocorrência de eventos ao longo do tempo. Desta maneira, é útil para a modelagem do comportamento de falha e compreensão dos efeitos dos reparos na idade desse sistema (METTAS; ZHAO, 2005).

O conceito de idade virtual é introduzido neste modelo. Onde  $t_1, t_2, \dots, t_n$  representam os sucessivos tempos de falha e  $x_1, x_2, \dots, x_n$  representam o tempo entre falhas ( $t_i = \sum_{j=1}^i x_j$ ). Suponha que após cada evento, as ações sejam tomadas para melhorar o desempenho do sistema. Existem dois tipos de modelos que consideram o fator de restauração ( $q$ ) da ação de manutenção (BIROLINI, 2007; RELIASOFT, 2015a).

O modelo Tipo I pressupõe que o reparo não possa remover os danos incorridos antes da última falha, conforme Equação 3.4.

$$v_i = v_{i-1} + qx_i = qt_i \quad (3.4)$$

O modelo Tipo II assume que o reparo remove o dano acumulado da falha corrente e das falhas anteriores, conforme Equação 3.5:

$$v_i = q(v_{i-1} + x_i) = q^i + q^{i-1}x_2 + \dots + qx_i \quad (3.5)$$

Em geral, para obter a idade virtual, o tempo exato de ocorrência de cada evento (falha) deve estar disponível. No entanto, os tempos são desconhecidos até que os eventos correspondentes ocorram. Por esse motivo, não há expressões de forma fechada para o número total de falhas e intensidade de falha, que são funções de tempos de falha e idade virtual (RELIASOFT, 2015a). O método MLE (Máxima Verossimilhança) é usado para estimar os parâmetros do modelo através da função de verossimilhança de Log (METTAS; ZHAO, 2005).

Portanto, no *software* Weibull++, uma simulação de Monte Carlo é usada para prever valores de tempo virtual, número de falha, tempo médio entre falhas (*MTBF*) e taxa de falha ( $\lambda$ ). Ao conduzir esta aproximação, a incerteza  $\lambda$  e  $\beta$  são consideradas e

a mesma simulação é usada para estimar o valor acumulado do número de falhas e os limites de confiança aproximados considerando a incerteza dos parâmetros do modelo (RELIASOFT, 2015a).

### 3.3.2 Modelo de Vida Econômica

Uma consideração na redução do custo para manutenção de sistemas reparáveis é estabelecer uma política de substituição para minimizar o custo total de vida do sistema (DHILLON, 2010). A Equação 3.6 representa o tempo ótimo de substituição em  $T_0$ :

$$T_0 = \left[ \frac{C_2}{\lambda(\beta-1)C_1} \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.6)$$

Onde  $C_2$ , representa o custo de substituição e  $C_1$  o custo de reparo. Os parâmetros de  $\beta$  e  $\lambda$ , são os mesmos calculado com o modelo de lei de potência.

No entanto, uma política de substituição só faz sentido se  $\beta > 1$ , ou seja, quando o sistema se encontra na fase de desgaste. Desta forma, é possível encontrar um ponto onde é mais barato (ponto ótimo) substituir um sistema do que continuar reparando (RELIASOFT, 2015a).

## 3.4 ANÁLISE DE DADOS DE VIDA

A análise de dados de vida (*Life Data Analysis* - LDA) trata do estudo e modelagem da vida útil observada de um item, ou seja, o tempo em que o item operou com sucesso ou o tempo em que operou antes de falhar. Estes dados podem ser medidos, além de gerar previsões ou probabilidades sobre a vida de todos os itens na população, ajustando uma distribuição estatística (modelo) aos dados de vida de uma amostra representativa de unidades (LAFRAIA, 2001; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009; RELIASOFT, 2015b).

A distribuição parametrizada para o conjunto de dados pode então ser usada para estimar características importantes da vida do item, como confiabilidade ou

probabilidade de falha em um momento específico, a média vida e taxa de falhas (RELIASOFT, 2015b).

Estes modelos, geralmente denominadas distribuições de vida, têm o objetivo de modelar matematicamente ou representar um determinado comportamento dos dados. A função densidade de probabilidade (*Probability Density Function - PDF*) é uma função matemática que descreve a distribuição (LAFRAIA, 2001; FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

A partir da função densidade de probabilidade, provém as demais funções utilizadas na análise dos dados de vida, denominadas métricas da confiabilidade, que são a função de probabilidade acumulada, da confiabilidade, de taxa de falha, de vida média e mediana. As distribuições mais usuais para descrever tempos até falhas de sistemas e componentes são a Weibull, Exponencial, Gama e Lognormal (FOGLIATTO, RIBEIRO, 2009).

#### 3.4.1 Distribuição Weibull

A distribuição Weibull é amplamente conhecida e utilizada na área da engenharia da confiabilidade, devido sua flexibilidade de ajuste podendo modelar os principais comportamentos de falhas através da variação do parâmetro  $\beta$  (LAFRAIA, 2001).

Esse modelo é definido pelos parâmetros de forma ( $\beta$ ), vida característica ou parâmetro de escala ( $\eta$ ) e parâmetro de deslocamento ( $\gamma$ ) (RELIASOFT, 2015b). Para este estudo, mostraremos somente as equações utilizadas neste caso, a função densidade de probabilidade (*PDF*) apresentada pela Equação 3.7 e a função da vida média (*Mean Time To Failures - MTTF*) na Equação 3.8:

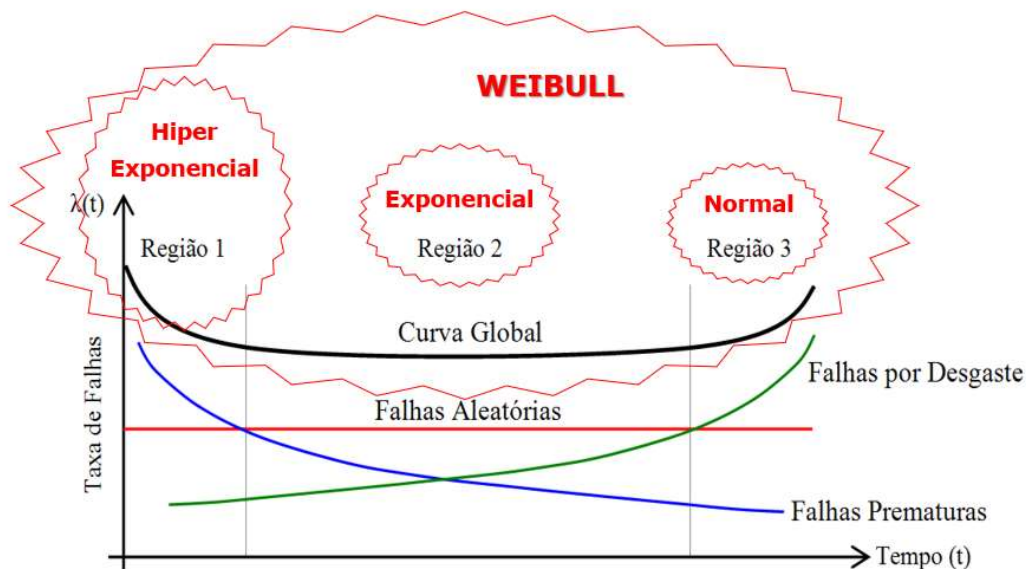
$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.7)$$

$$\bar{T} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) \quad (3.8)$$

As Equações 3.7 e 3.8 são para uma distribuição Weibull 3 parâmetros. Para o caso onde a Weibull é 2 parâmetros, o Gama é igual a zero ( $\gamma = 0$ ). A versatilidade

permite a este modelo assumir características de outras distribuições estatísticas com base no valor do parâmetro de forma  $\beta$ , conforme a Gráfico 3.2 (LAFRAIA, 2001; RELIASOFT, 2015b).

Gráfico 3.2 - Flexibilidade da Distribuição Weibull e Fases da Curva da Banheira



Fonte: Rigoni; Mariano, (2018).

A oscilação do parâmetro de forma  $\beta$  na equação de Weibull permite delinear o aspecto da distribuição e representar uma curva típica de falhas prematuras, aleatórias ou por desgaste, conforme Quadro 3.1. No que remete ao parâmetro de escala  $\eta$ , é o período para que ocorram cerca de 63,2% das falhas (CALIXTO, 2016).

Quadro 3.1 - Comportamento do  $\beta$  em Função da Taxa de Falhas

Valores de $\beta$	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.

Fonte: Lafraia, (2001).

Uma função derivada desta distribuição é a Weibull Mista aplicada para componentes e sistemas com múltiplos modos de falhas para representar populações mistas (RELIASOFT, 2015b). Dada pela Equação 3.9, onde, para 2 subpopulações,  $S=2$ ; para 3,  $S=3$ ; e para 4,  $S=4$ .

$$f(T) = \sum_{i=1}^S p_i \frac{\beta_i}{\eta_i} \left(\frac{T}{\eta_i}\right)^{\beta_i-1} e^{-\left(\frac{T}{\eta_i}\right)^{\beta_i}} \quad (3.9)$$

Este modelo, utiliza distintas distribuições Weibull para diferentes estágios de vida do equipamento, permitindo uma visão geral do comportamento de vida do mesmo através de uma curva global (CALIXTO, 2016). Para este estudo, esta distribuição será aplicada para calcular o custo esperado de custos de manutenção, que serão utilizados nos dados de entradas do fluxo de caixa da análise de viabilidade econômica.

#### 3.4.2 Distribuição Lognormal

A distribuição lognormal é utilizada frequentemente na modelagem de modos de falha de estresse por fadiga, em ciclos até falha, desgaste e tempos até reparo em sistemas reparáveis. Nesse caso, é admissível pressupor que a probabilidade de finalizar uma ação de reparo aumente com o tempo (FOGLIATTO; RIBEIRO, 2009).

Da mesma forma, em geral, os custos de manutenção (material, mão de obra e serviços) aumentam conforme o equipamento avança para a fase de envelhecimento, então é razoável supor que os custos possuem um comportamento de ocorrer com o passar do tempo (LAFRAIA, 2001).

A função densidade de probabilidade (*PDF*) desta distribuição é dada pela Equação 3.10 e a função da vida média (*MTTF*) pela Equação 3.11:

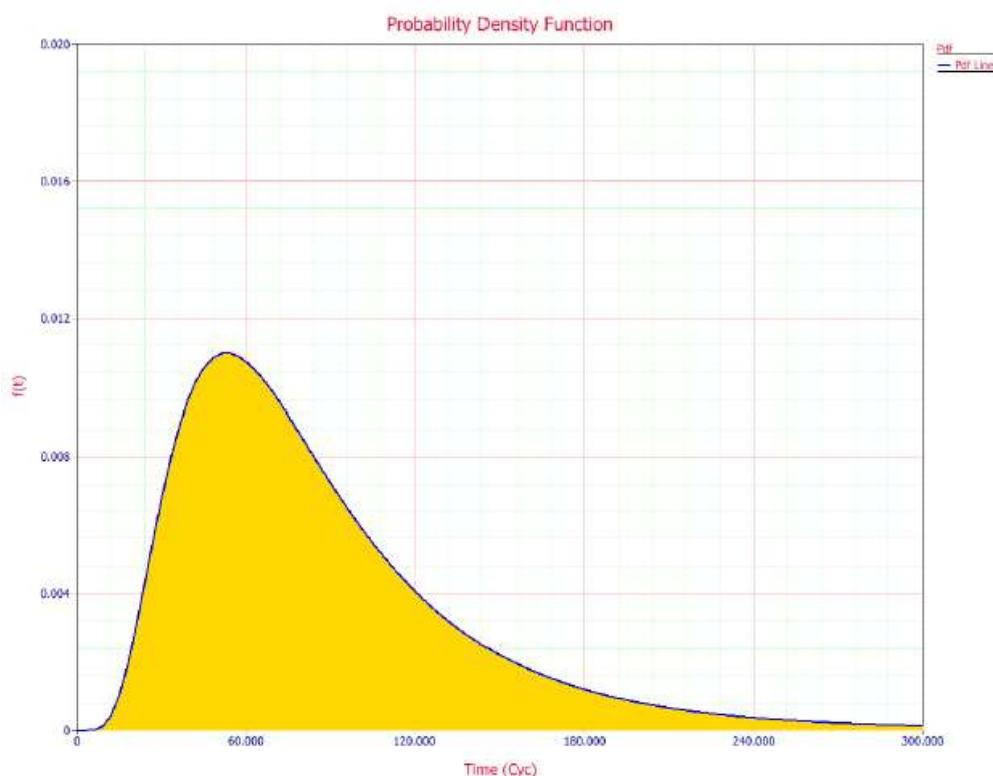
$$f(t') = \frac{1}{\sigma' \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t' - \mu'}{\sigma'}\right)^2} \quad (3.10)$$

$$\mu' = \ln(\bar{T}) - \frac{1}{2} \ln\left(\frac{\sigma^2}{\bar{T}^2} + 1\right) \quad (3.11)$$



Enquanto a distribuição Normal é simétrica com relação ao tempo, a distribuição Lognormal é assimétrica e deslocada para a esquerda (Gráfico 3.3), permitindo um ajuste melhor em comportamentos assimétricos de dados de vida (RELIASOFT, 2015b).

Gráfico 3.3 - Função Densidade de Probabilidade da Lognormal 2P



Fonte: Reliasoft, 2015b.

A distribuição lognormal é uma distribuição definida por 2 parâmetros de escala  $\mu'$  e de forma  $\sigma'$  (RELIASOFT, 2015b). Para este estudo, será utilizada a Lognormal 2P para calcular o valor esperado de custos de manutenção que será utilizado como dado de entrada para o fluxo de caixa da LCCA.

### 3.5 ANÁLISE DO CUSTO DO CICLO DE VIDA

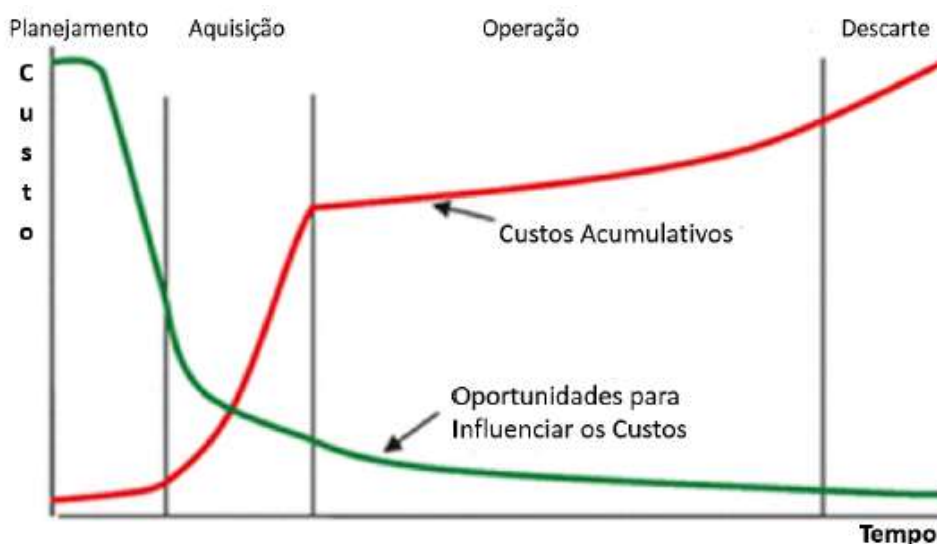
O custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost - LCC*) é o custo total de propriedade de equipamentos, incluindo os valores de aquisição, operação, manutenção e descarte (*Society of Automotive Engineers - SAE*, 1999). O LCC é um método de avaliação composto por somatórios de estimativas de custo, desde o início até o

descarte de equipamentos, definido por um estudo analítico onde realiza-se estimativas dos custos totais anuais durante a vida do ativo (BARRINGER, 2003).

Segundo Branco Filho (2006), o custo total de um equipamento deve incluir todos os custos decorrentes durante a vida do ativo, desde de aquisição, operação, manutenção até a alienação/descarte, incluindo melhorias e modificações consideradas importantes para as decisões de custo-benefício.

Uma forma de visualização da influência do tempo nos custos ao longo do ciclo de vida do ativo foi sugerida por Hastings (2015) no Gráfico 3.4.

Gráfico 3.4 - Custo do Ciclo de Vida ao Longo do Tempo



Fonte: Hastings, (2015).

A finalidade da análise do custo do ciclo de vida (*Life Cycle Cost Analysis - LCCA*) é selecionar a abordagem mais econômica, visando possíveis cenários para obter o menor custo ao longo da vida útil do equipamento ou projeto. Geralmente, os custos de operação, manutenção e descarte excedem os custos de aquisição inicial (BARRINGER, 2003). Quando alcançado um LCC total minimizado, atinge-se um melhor equilíbrio em relação aos elementos de custo (LANDERS, 1996).

Admite-se para ativos físicos um ciclo de vida útil, onde as funções inicialmente esperadas não apresentam o mesmo desempenho, seja devido ao desgaste, ao alto custo de mantimento ou obsolescência tecnológica. Muitas organizações optam por manter seus ativos, simplesmente pelo fato de o custo de aquisição inicial ser alto, não considerando os custos totais dos seus equipamentos atuais (MOREIRA NETO, 2018).

Desta forma, as organizações devem sintetizar os resultados da LCC em forma de valor presente líquido (VPL), considerando depreciação, impostos e valor do dinheiro ao longo do tempo. Porém, órgãos governamentais não exigem a inclusão de depreciação ou impostos, mas devem considerar o valor do dinheiro no tempo (BARRINGER, 2003).

### 3.5.1 Elementos de Custo

A LCCA se destaca no período operacional, pois se trata do maior tempo dentro de todo o ciclo de vida do ativo. Desta forma, os elementos de custos mais significativos em uma indústria são aqueles relacionados com operação e manutenção (MOREIRA NETO; MAGALHÃES; RIBEIRO, 2016).

Podemos afirmar, portanto, que qualquer trabalho realizado dentro da indústria só será eficaz se considerar como sendo os mais relevantes, dentro dos impactos financeiros totais, os custos operacionais e de manutenção (BLANK; TARQUIN, 2008).

Moreira Neto (2018), no seu estudo de LCCA, com foco no ciclo de vida operacional, determinou como principais elementos de custos:

- Custo de aquisição: valor do equipamento novo;
- Custo de manutenção corretiva: falhas imprevistas que permitem reparos;
- Custo de manutenção preventiva: manutenções programadas;
- Custo de operação: consumo e custo de mão de obra;

A SAE (1999), ressalta a importância e defende que os custos relacionados à confiabilidade e à manutenção devem ser premissas básicas nas decisões iniciais de aquisição, visando alcançar o menor custo do ciclo de vida de ativos.

Para este estudo, os custos de operação (consumo e mão de obra), serão inclusos respectivamente com o tipo de manutenção realizada. Também constará no fluxo de caixa da LCCA o valor de reforma para o sistema elétrico das brunidoras. Como mencionado anteriormente, estes equipamentos apresentam obsolescência tecnológica, e este é um cenário que deve ser analisado para a escolha da melhor alternativa sob o ponto de vista financeiro.

### 3.5.2 Análise Econômica

A LCCA possui algumas métricas ou indicadores utilizados para suportar a parte matemática financeira, pois como qualquer outro ativo, o dinheiro sofre depreciação ao longo do tempo, resultante de variáveis macroeconômicas (BARRINGER, 2003). A LCCA contabiliza no cálculo do fluxo de caixa custos futuros e o valor do dinheiro no tempo considerando uma taxa mínima, ou seja, resume as transações ao longo da vida do investimento em termos de valores presentes através do VPL (FABRYCKY; BLANCHARD, 1991).

Para Casarotto Filho e Kopittke (2010), o cálculo da vida econômica envolve o balanço de dois custos: o de investimento inicial, que tende a tornar a vida útil do bem o maior possível, e os de operação/manutenção, que por serem crescentes, tendem a encurtar a vida útil do bem. Assim, os autores afirmam que a determinação da vida econômica consiste em encontrar os custos anuais equivalentes (CAE) do ativo para todas as alternativas possíveis. O ano para qual o CAE é mínimo indicará a vida econômica do ativo.

#### 3.5.2.1 Valor Presente Líquido (VPL)

O valor presente líquido (VPL) é um método que considera todas as variações esperadas do fluxo de caixa, descontada à uma taxa, para o ano zero ou presente levando em conta a perda financeira ou custo de capital (OLIVEIRA, 1982). Conforme é demonstrado na Equação 3.12, o VPL faz a análise do fluxo de caixa calculando a somatória do valor presente (FC) de cada período (t) a uma taxa de juros (i), denominada de Taxa Atrativa Mínima (TMA), e deduzindo o valor inicial (FC<sub>0</sub>) deste fluxo (DHILLON, 2010):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \left( \frac{FC_t}{(1+i)^t} \right) - FC_0 \quad (3.12)$$

De acordo com Souza e Clemente (2001), a TMA é uma taxa considerada de baixo grau de risco, disponível para aplicação do capital de investimento. Os autores ressaltam a importância de existir pelo menos duas alternativas de aplicação do capital considerando entre investir no projeto ou investir na TMA. Desta forma, o fluxo

de caixa é fundamental na avaliação da rentabilidade esperada do investimento. Portanto, um projeto de investimento será considerado rentável quando apresentar um VPL positivo (GALESNE; FENSTERSEIFER; LAMB, 1999).

Em contrapartida, ao aplicar essa metodologia para analisar projetos que envolvam apenas custos, as alternativas de maior atratividade econômica serão aquelas que apresentarem um custo mais próximo de zero (TORRES, 2004).

Para este estudo, não estamos considerando receitas no fluxo de caixa. Conseqüentemente, os VPLs apresentados serão negativos, mas isso não invalida o estudo. Caso os dois projetos apresentem um VPL negativo, será considerado como mais atrativo o VPL mais próximo de zero, pois ele representará um menor prejuízo. Além disso, será considerada uma TMA de 8% definida pela empresa e uma taxa de correção orçamentária anual de 5% para correção de valores de itens de estoque e mão de obra para os custos de manutenção corretiva e preventiva.

### 3.5.2.2 Custo Equivalente Anual (CAE)

O custo anual equivalente (CAE) consiste em encontrar uma série anual uniforme de custos que se equiparem aos fluxos de caixa dos investimentos descontados a TMA correspondente ao custo de capital sobre o investimento (DUARTE et al., 2007). A Equação 3.13 representa matematicamente o cálculo do custo anual equivalente:

$$CAE = VPL \cdot \left( \frac{(1+i)^n \cdot i}{(1+i)^n - 1} \right) \quad (3.13)$$

O CAE é aplicado tanto para avaliar a viabilidade econômica das alternativas analisadas quanto para a decisão do momento ou ano em que a alternativa mais atrativa deve ser executada. Este método considera tanto a vida útil física como o conceito de vida útil econômica do ativo indicando a viabilidade e o ponto ótimo de substituição (BLANK; TARQUIN, 2008).

O ponto mínimo do CAE representa a vida útil econômica do ativo (VUE), definida como o tempo, em anos, no qual ocorre o ponto ótimo da otimização dos custos do equipamento. Através da comparação dos CAEs mínimos, é possível

identificar o momento ideal da substituição (BLANK; TARQUIN, 2008; CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2010; EHRLICH; MORAES, 2005).

### 3.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a fundamentação teórica e premissas das técnicas de RDA e LDA, assim como seus modelos e as distribuições estatísticas. Também foram referenciados os elementos de custos e sua importância para a LCCA, além de apresentadas as formulações para os cálculos de vida econômica e tempo ótimo de substituição. Por fim, são apresentados os conceitos que as delimitam todas essas técnicas.

Com base no que foi apresentado neste referencial, será desenvolvido o método de trabalho proposto, através da análise de sistemas reparáveis será identificando os equipamentos em fase de desgaste. Após será estimado os custos por falhas corretivas, preventivas e tempo ótimo que minimiza o custo do total do ciclo de vida destes equipamentos. Em seguida, serão realizados os cálculos de VPL e CAE em um fluxo de caixa para obter a análise de viabilidade e por último os resultados obtidos com base nos princípios descritos no presente capítulo.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, serão apresentados a aplicação do referencial teórico, a coleta e a análise dos dados de falhas, o desenvolvimento e execução das análises de RDA e LDA para estimativa de número de falhas esperadas e custos de manutenção. E por último, será apresentada a aplicação da LCCA com base nos dados estimados, a viabilidade econômica e a comparação entre os cenários propostos através do CAE com suas respectivas conclusões.

### 4.1 ANÁLISE DE SISTEMAS REPARÁVEIS

Para este estudo, temos nove brunidoras, nas quais será realizada, primeiramente, o levantamento e tratamento dos dados, após a análise de dados de eventos recorrentes para identificar e priorizar quais equipamentos estão na fase de desgaste e, desta forma, aptos a serem analisados pela LCCA.

#### 4.1.1 Levantamento Dos Tempos Até Falha Acumulados

Utilizando o sistema de gerenciamento da manutenção, denominado SAP PM/R3, foram levantadas todas as ordens de manutenção das nove brunidoras, totalizando mais de 2.000 linhas em dados, contemplando todos os anos de operação de cada equipamento.

É necessário preparar os dados antes de inserir no *software* Weibull++. Desta forma, os mesmos foram agrupados em forma de planilha, conforme exemplo da Tabela 4.1, para auxiliar no cálculo dos tempos entre falhas acumulado.

Tabela 4.1 - Exemplo de cálculo de tempo entre falhas acumulado (BRU055)

Data/Hora da Parada	Data/Hora de Retorno	Tempo de Reparo (h)	Tempo de Operação (h)	Tempo entre Falhas Acumulado (h)
15/05/2019 14:13	15/05/2019 18:13	4,00	0,00	0,00
16/05/2019 18:45	16/05/2019 19:45	1,00	24,60	28,6
22/05/2019 06:55	22/05/2019 07:10	0,25	159,80	160,8
22/05/2019 21:44	23/05/2019 01:14	3,50	175,45	175,7
24/05/2019 21:29	24/05/2019 22:59	1,50	220,00	223,5
27/05/2019 06:58	27/05/2019 08:28	1,50	279,50	281

27/05/2019 16:34	27/05/2019 20:34	4,00	289,20	290,7
18/06/2019 13:28	18/06/2019 18:58	5,50	811,60	815,6

Fonte: a autora (2019).

Os dados são considerados completos, pois o tempo até falha é conhecido. Para realizar a análise paramétrica (RDA), consideramos o tempo acumulado entre falhas. Conforme visto na seção 3.3.1, neste modelo, o tempo de reparo é considerado insignificante para que os processos possam ser vistos como processos pontuais (METTAS; ZHAO, 2005). Desta forma, consideramos apenas o tempo entre falhas acumulados.

#### 4.1.2 Análise RDA

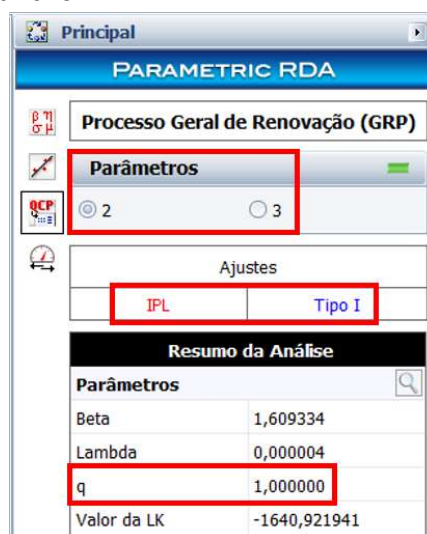
Com o apoio do *software* Weibull++, utilizamos a técnica RDA paramétrica para sistemas reparáveis, conforme visto no referencial teórico na seção 3.3, esta técnica utiliza um modelo de distribuição *Power Law* ou IPL, denominação do *software*, Figura 4.1. Para realizar a demonstração das etapas da análise, será utilizado o equipamento BRU020 como exemplo. Estes mesmos passos foram utilizados nas demais brunidoras.

O *software* possui alguns ajustes que podem ser inseridos pelo usuário, que são:

- Parâmetros:
  - Opção 2: O usuário deve inserir o valor do fator de restauração ( $q$ );
  - Opção 3: O *software* calcula o fator de restauração ( $q$ ).
  
- Modelo de Idade Virtual:
  - Tipo 1: Restaura desde o último reparo;
  - Tipo 2: Restaura deste o início.



Figura 4.1 - Ajustes no Software Weibull++ da Análise RDA Paramétrica



Fonte: a autora (2019).

Os parâmetros utilizados nesta análise foram o modelo de idade virtual tipo 1 e o parâmetro de opção 2, pois conforme estabelecido nas premissas deste estudo, na seção 1.1, e no referencial teórico na seção 3.3.1, o fator de restauração será considerado “tão ruim quanto velho”, ou seja, o conceito de reparo mínimo, neste caso  $q = 1$ , conforme Figura 4.1.

Após, foram inseridos os tempos entre falhas acumulados do equipamento na coluna Tempo até Evento (h), preenchida a coluna Evento com “F” para falhas anteriores ao último evento e “E” para o Evento Final, considerando que a observação terminou no momento da última falha. Por último, foi inserida a identificação do sistema (ID), conforme Figura 4.2. O *software* permite analisar um único sistema ou vários sistemas ao mesmo tempo.

Figura 4.2 - Dados de TTF Acumulados no Software Weibull++ (BRU020)

	Sistema ID	Evento (F=Falha, E=Evento Final)	Tempo até Evento (h)
223	1	F	60492,9
224	1	F	60945,7
225	1	F	60949,8
226	1	F	60951,5
227	1	F	61006,4
228	1	F	61074,7
229	1	F	61144,7
230	1	F	61324,4
231	1	F	61678,2
232	1	F	62243,4
233	1	F	62489,7
234	1	F	64913,4
235	1	F	67129,9
236	1	F	67209,1
237	1	F	67265,7
238	1	F	67289,7
239	1	F	68296,3
240	1	F	68361,6
241	1	F	68473,8
242	1	F	68667,7
243	1	F	68979
244	1	F	69256,4
245	1	F	69625,8
246	1	F	69635,4
247	1	F	70875
248	1	F	71212,6
249	1	F	71707,2
250	1	F	71765,9
251	1	E	71850,6
252			

Fonte: a autora (2019).

Após configurado e preenchidos os campos necessários, temos a saída da análise, conforme Quadro 4.1, onde obtemos o  $\beta = 1,609334$  da brunidora BRU020.

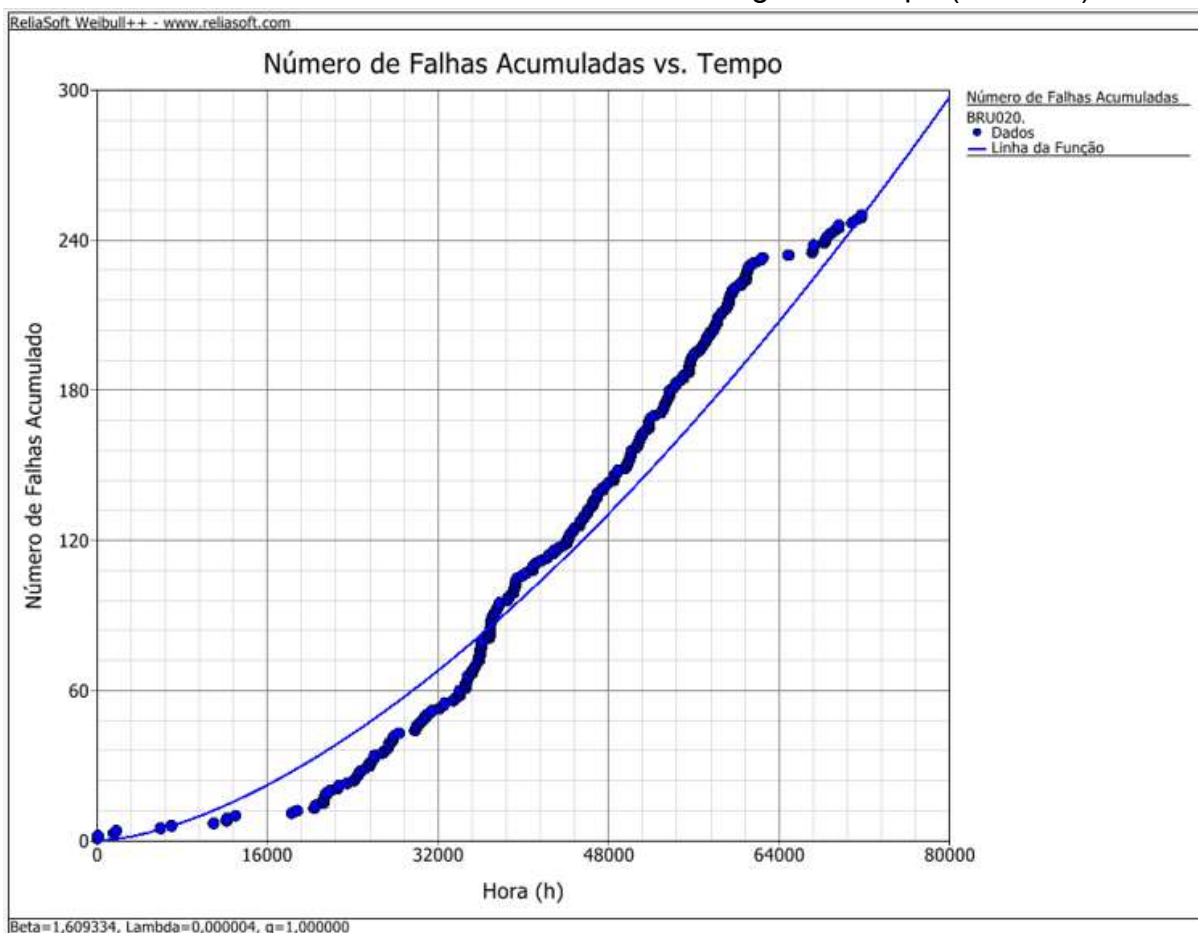
Quadro 4.1 - Resultados de Saída Software Weibull++ Análise RDA (BRU020)

<b>Relatório de Resultados</b>	
Tipo de Relatório	Resultados da RDA Paramétrica
<b>Informações do Usuário</b>	
Nome	Ana Spader
Empresa	UTFPR
<b>Entrada do Usuário</b>	
Função IF	IPL
<b>Parâmetros</b>	
Beta	1,609334
Lambda	0,000004
q	1
Valor da LK	-1640,921941

Fonte: a autora (2019).

Podemos visualizar no Gráfico 4.1, conforme visto na seção 3.3.1 do referencial teórico, que esse modelo fornece uma maneira de descrever a taxa de ocorrência de eventos ao longo do tempo (METTAS; ZHAO, 2005).

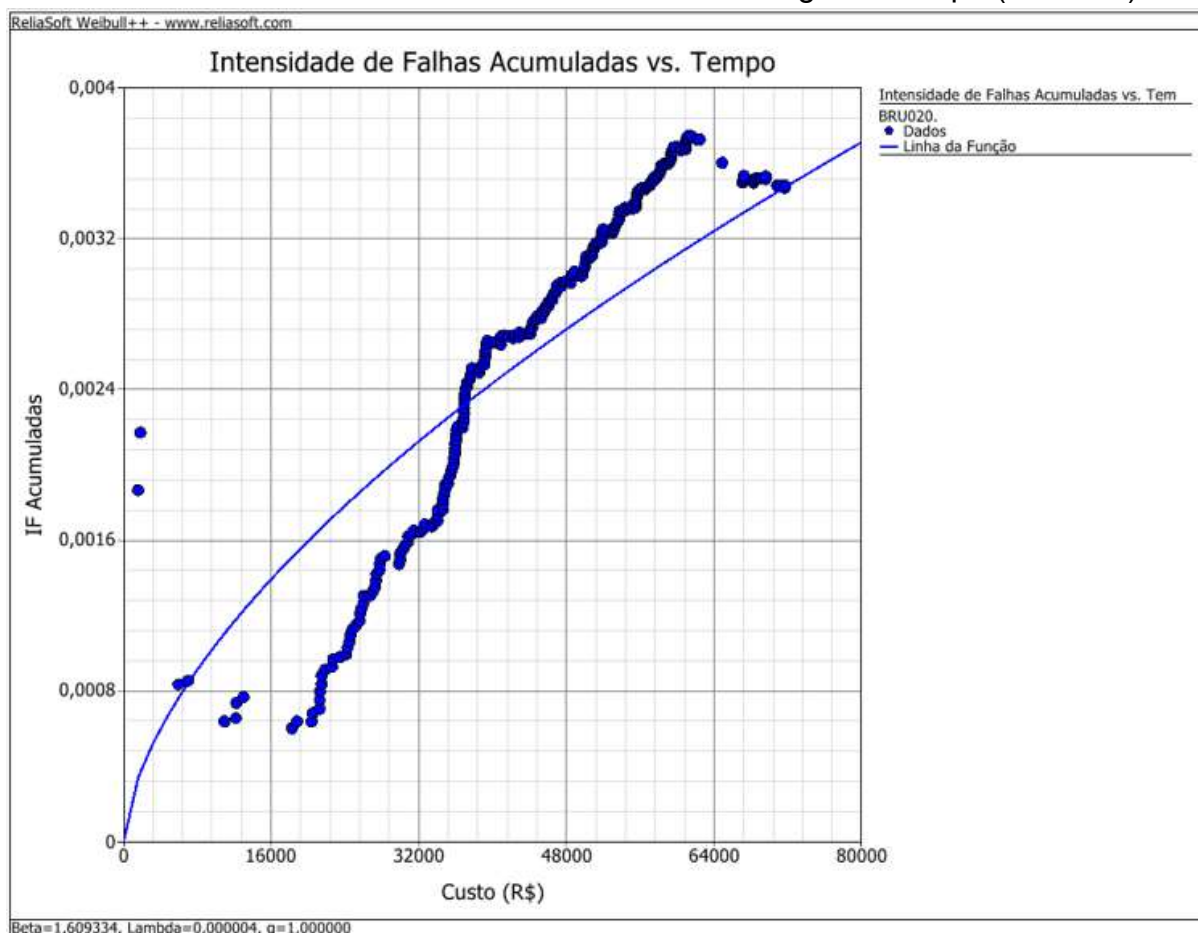
Gráfico 4.1 – Número de Falhas Acumuladas ao Longo do Tempo (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

No Gráfico 4.2, temos a intensidade de falhas acumuladas ao longo do tempo. Conforme visto na seção 3.3.1, este modelo de distribuição é particularmente útil na modelagem da intensidade e do comportamento de falha de um sistema e na compreensão dos efeitos dos reparos na idade desse sistema (METTAS; ZHAO, 2005).

Gráfico 4.2 - Intensidade de Falhas Acumuladas ao Longo do Tempo (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Após realizadas as análises, foram encontradas as intensidades de falhas de cada equipamento e identificados seus respectivos betas ( $\beta$ ), conforme Tabela 4.2.

Tabela 1.2 - Intensidades de Falhas e Parâmetros

Equipamentos	Parâmetros			
	$\beta$	$\lambda$	$q$	LK
BRU011	1,021117	0,003318	1	-1902,979563
BRU014	1,025204	0,001616	1	-1107,578585
BRU019	1,067981	0,001805	1	-1828,679651
BRU020	1,609334	0,000004	1	-1640,921941

BRU021	1,526378	0,000015	1	-2311,903312
BRU035	1,926061	7,450758E-8	1	-917,329103
BRU039	1,729814	0,000002	1	-1698,189812
BRU049	0,889258	0,028501	1	-1536,541579
BRU055	0,605991	0,103234	1	-34,577190

Fonte: a autora (2019).

Conforme a Tabela 4.2, as brunidoras BRU011, BRU014 e BRU019, apresentaram um parâmetro de escala de  $\beta = 1$ , onde a intensidade de falha indica a fase de vida útil. Desta forma, é necessário o desdobramento a nível de componentes para a realização da análise de LDA, conforme visto na seção 3.3.1. Além, como estabelecido nas premissas, na seção 1.1, este estudo não irá abordar esta análise, devido à ausência de dados ao nível de componentes.

Conforme a seção 3.3.1 do referencial teórico, os equipamentos BRU049 e BRU055 apresentaram um parâmetro de escala de  $\beta < 1$ , onde a intensidade de falha indica a fase de mortalidade infantil. Sendo assim, eles não serão analisados neste estudo, pois não apresentam desgaste e, com isso, não são interessantes para a análise LCCA.

Já as brunidoras BRU020, BRU021, BRU035 e BRU039 apresentaram um parâmetro de escala de  $\beta > 1$ , onde a intensidade de falha indica a fase de desgaste ou fase de deterioração. Ou seja, estes equipamentos estão apresentando características de desgaste e suas taxas de falhas  $\lambda(t)$  estão aumentando ao longo do tempo, assim como suas probabilidades de paradas corretivas (LAFRAIA, 2001). Com isso, estas brunidoras atendem a premissa para realizarmos a análise LCCA.

Também foi realizada a validação em campo de todos os equipamentos. Através de uma reunião com representantes da Engenharia de Manutenção da empresa, verificou-se que os resultados das análises estavam condizentes com os comportamentos apresentados pelos equipamentos.

## 4.2 LEVANTAMENTO DOS ELEMENTOS DE CUSTOS

Após selecionar os equipamentos que se encontram na fase de desgaste e estão aptos a serem substituídos, é necessário descobrir qual equipamento irá gerar mais despesas de manutenção nos próximos anos, para auxiliar na construção de um

fluxo de caixa para a LCCA e, assim, priorizar a substituição do equipamento com maior incidência de custos.

#### 4.2.1 Custos de Falhas Corretivas

Geralmente, os custos referentes a falhas corretivas são baseados no histórico de eventos passados dos equipamentos. Este estudo propôs unir a RDA paramétrica para obter um número de falhas corretivas, utilizando os tempos entre falhas, e a LDA para obter um custo esperado em reais, utilizando os custos por falhas corretivas.

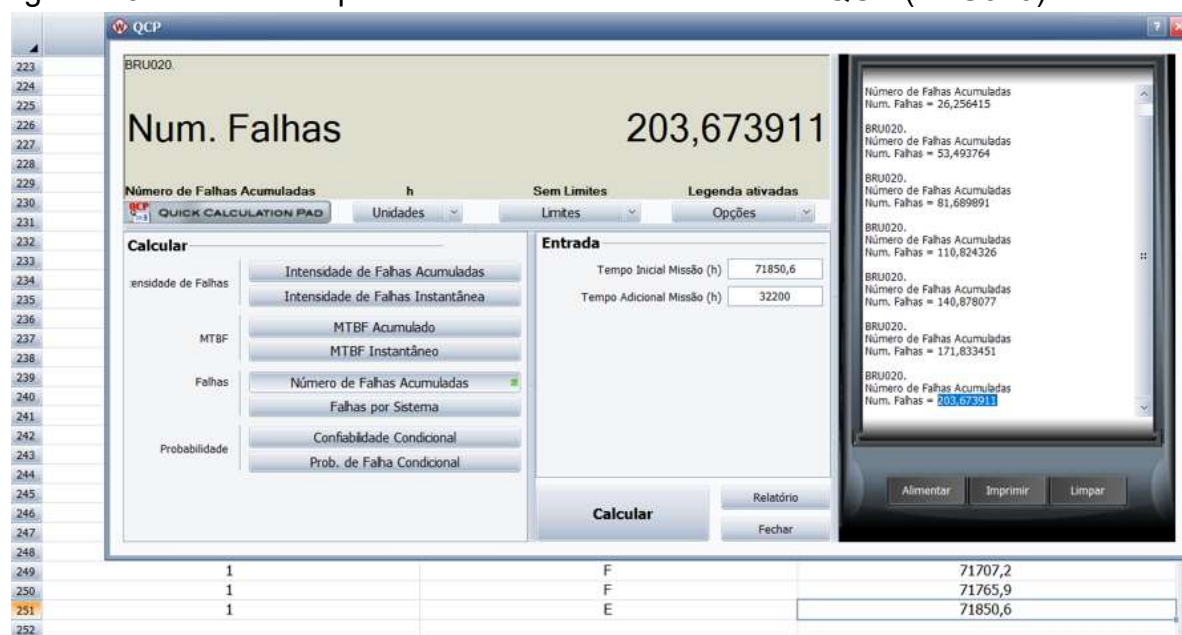
##### 4.2.1.1 Número Esperado de Falhas Corretivas Anual

A RDA nos permite calcular o número esperado de falhas de eventos corretivos, considerando um tempo de missão adicional. Desta forma, podemos obter uma quantidade esperada de falhas corretivas de cada equipamento para auxiliar na previsão dos custos corretivos no fluxo de caixa da LCCA.

Seguiremos utilizando o exemplo da BRU020 para demonstração da análise RDA paramétrica no *software* Weibull++. Para realizar uma projeção em 7 anos, foi considerado o tempo de ocupação dos equipamentos de 4600 horas por ano. Utilizando a calculadora de cálculo rápido, denominada QCP (*Quick Calculation Pad*) no *software*, calculamos o número esperados de falhas por equipamento.

O *software* utiliza os parâmetros encontrados de  $\beta$  e  $\lambda$ , conforme visto na seção 3.3.1, por meio da simulação de Monte Carlo para prever os números de falhas, *MTBF* e taxa de falha. Como podemos observar na Figura 4.3, tendo como base o tempo inicial da missão, ou seja, o último evento observado, no caso da BRU020  $t = 71850,6$  horas, acrescenta-se o tempo adicional de missão, acumulando o tempo de ocupação de 4600 horas para cada ano. Dessa forma, no sétimo ano teremos o total de 32200 horas acumuladas.

Figura 4.3 – Número Esperado de Falhas Acumuladas no QCP (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Para análise, consideramos um valor arredondado para cima para número de falhas. Sendo assim, para o primeiro ano teremos um número esperado acumulado de 27 falhas, para o segundo ano 54 falhas e assim sucessivamente até o sétimo ano com 204 falhas, no caso da BRU020.

Após realizadas as análises para todos os equipamentos, temos a Tabela 4.3, com o resumo do número de falhas acumuladas esperadas encontradas para os próximos sete anos de cada equipamento.

Tabela 4.3 - Número de Falhas Acumuladas Esperadas por Equipamento

Equipamentos	Número de Falhas Acumuladas Esperadas						
	Ano 1 4600h	Ano 2 9200h	Ano 3 13800h	Ano 4 18400h	Ano 5 23000h	Ano 6 27600h	Ano 7 32200h
BRU020	27	54	82	111	141	172	204
BRU021	38	77	117	159	201	245	289
BRU035	20	40	61	84	108	133	159
BRU039	43	89	136	187	239	295	352

Fonte: a autora (2019).

Na próxima seção será calculado o custo esperado para uma falha corretiva e, com os resultados encontrados anteriormente, poderemos mensurar o custo anual de corretiva com base no número esperado de falhas para compor o fluxo de caixa para LCCA.

#### 4.2.1.2 Custo Esperado para uma Falha Corretiva

Os dados de vida analisados neste estudo serão os custos de manutenção dos equipamentos. Como são variáveis independentes, pode-se aplicar a LDA para calcular a vida média, denominada como *MTTF* no software Weibull++. Desta forma, obteremos o custo esperado em reais para uma falha corretiva, considerando a mão de obra, sobressalentes e serviços gastos em cada evento.

Após inserir os custos corretivos no *software*, realizamos um teste para verificar qual distribuição ajusta-se melhor aos dados. Com base no Valor de LK da Tabela 4.4, podemos observar que a melhor distribuição para o caso da BRU020 foi a Weibull Mista Subpopulação 3, pois apresenta menor valor de LK.

Tabela 4.4 - Teste de Aderência das Distribuições Estatísticas do Weibull++ para Custos Corretivos (BRU020)

Distribuição	Valor de LK
Exponencial-1P	-1173,963425
Exponencial-2P	-1170,914902
Normal	-1363,097562
Lognormal	-1138,373786
Weibull-2P	-1169,757017
Weibull-3P	-1166,945851
Weibull Mista Sub3	-1127,011955

Fonte: a autora (2019).

Após escolhida a distribuição, obtemos o Quadro 4.2, onde podemos observar os resultados encontrados para Weibull Mista com seus betas ( $\beta$ ) e etas ( $\eta$ ), além da porção de cada subpopulação para a análise.

Quadro 4.2 - Resultados de Saída *Software* Weibull++ Análise LDA para uma Falha Corretiva (BRU020)

Relatório de Resultados			
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++		
Informações do Usuário			
Nome	Ana Spader		
Empresa	UTFPR		
Parâmetros			
Distribuição	Weibull Mista		
Análises	MLE		
Método do IC	FM		

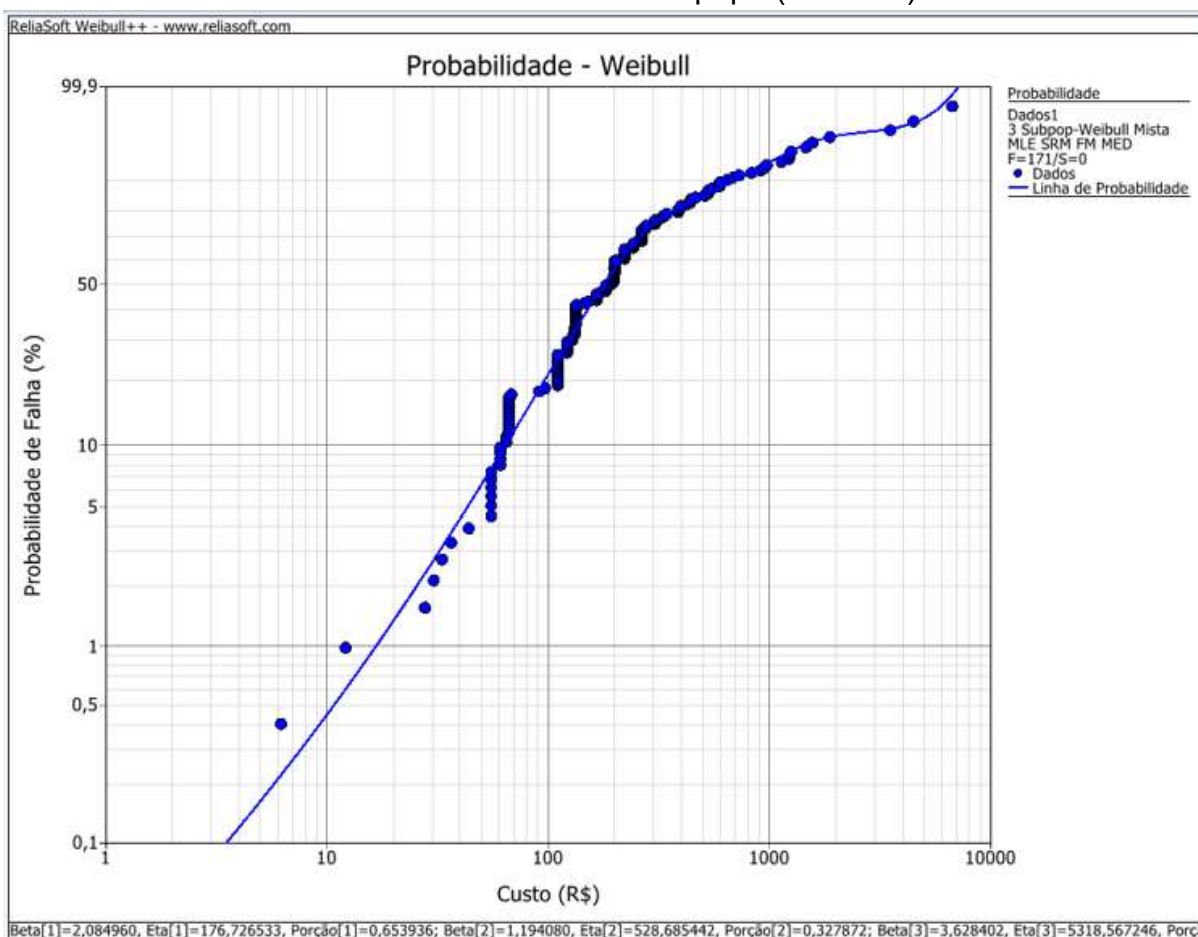


Ranqueando	MED		
Parâmetros	Subpopulação 1	Subpopulação 2	Subpopulação 3
Beta	2,08496	1,19408	3,628402
Eta (R\$)	176,726533	528,685442	5318,567
Porção	0,653935656	0,32787244	0,018192
Valor da LK	-1127,011955		

Fonte: a autora (2019).

Outra forma de verificar a aderência dos dados à distribuição é através do gráfico de probabilidade. Conforme o Gráfico 4.3, podemos observar uma boa aderência a distribuição Weibull Mista Subpopulação 3.

Gráfico 4.3 - Probabilidade da Weibull Mista Subpop3 (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Com base nestas observações de aderência, utilizamos a calculadora do *software* QCP para calcular o custo esperado de uma falha corretiva, o *software* denomina como Vida Média, conforme Figura 4.4.

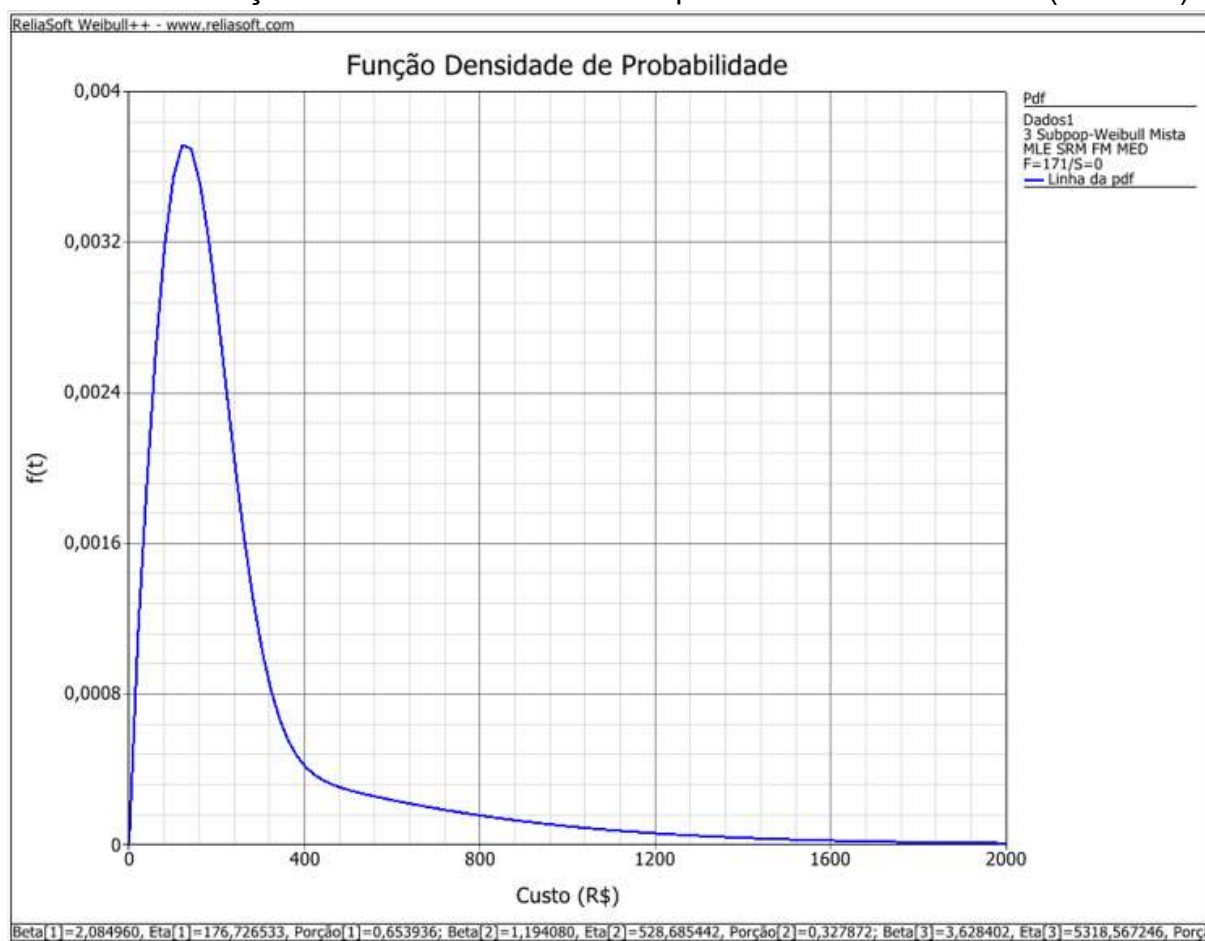
Figura 4.4 - Custo Esperado para uma Falha Corretiva no QCP (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

O custo esperado encontrado para uma falha corretiva, no caso da BRU020, é de R\$352,85. Também podemos verificar a aderência deste resultado através do gráfico da Função Densidade de Probabilidade (*PDF*), conforme o Gráfico 4.4. Podemos observar uma maior densidade dos dados entre R\$0,00 e R\$400,00.

Gráfico 4.4 - Função Densidade Probabilidade para uma Falha Corretiva (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Após realizadas as análises para todos os equipamentos, temos a Tabela 4.5, com os resultados encontrados para o custo esperado de uma falha corretiva de cada equipamento.

Tabela 4.5 - Custo Esperado de uma Falha Corretiva por Equipamento

Equip.	Custo Esperado por Falha Corretiva	Distribuição	$\mu$	$\sigma$	$\beta$	$\eta$	Valor de LK
BRU020	R\$ 352,85	Weibull mista	-	-	S <sub>1</sub> - 2,08 S <sub>2</sub> - 1,19 S <sub>3</sub> - 3,62	S <sub>1</sub> - 176,72 S <sub>2</sub> - 528,68 S <sub>3</sub> - 5318,5	-1127,01
BRU021	R\$ 374,67	Lognormal 2P	5,38	1,04	-	-	-1689,73
BRU035	R\$ 414,79	Lognormal 2P	5,35	1,16	-	-	-657,08
BRU039	R\$ 236,87	Lognormal 2P	4,99	0,97	-	-	-1404,39

Fonte: a autora (2019).

Na Tabela 4.5, temos as distribuições que apresentaram melhor aderência a cada conjunto de dados. Para a BRU020, apresentamos os parâmetros de forma ( $\beta$ ) e escala ( $\eta$ ) das três subpopulações da Weibull Mista. Para os demais equipamentos, apresentamos os parâmetros de escala ( $\mu$ ) e forma ( $\sigma$ ) da Lognormal 2P. Também foram demonstrados os valores de LK resultante do teste estatístico de aderência de Máxima Verossimilhança, conforme visto na seção 3.2.

#### 4.2.1.3 Custo Anual Esperado de Falhas Corretivas

Com os resultados obtidos nas seções 4.2.1.1 e 4.2.1.2, podemos calcular o custo anual esperado por falhas corretivas e, assim, integrar ao fluxo de caixa da LCCA. Para este cálculo, foram utilizados o número de falhas esperadas para os próximos 7 anos de cada equipamento e multiplicados pelo custo esperado de uma falha corretiva. Na Tabela 4.6, podemos ver de forma resumida os resultados encontrados.

Tabela 4.6 - Custo Esperado Anual de Falhas Corretivas por Equipamento

Equip.	Custo Anual Esperado de Falhas Corretivas						
	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7
BRU020	R\$ 9.527	R\$ 19.054	R\$ 28.934	R\$ 39.166	R\$ 49.752	R\$ 60.690	R\$ 71.981
BRU021	R\$ 14.237	R\$ 28.849	R\$ 43.836	R\$ 59.572	R\$ 75.308	R\$ 91.793	R\$108.279
BRU035	R\$ 8.296	R\$ 16.592	R\$ 25.302	R\$ 34.842	R\$ 44.797	R\$ 55.167	R\$ 65.952
BRU039	R\$ 10.185	R\$ 21.082	R\$ 32.215	R\$ 44.295	R\$ 56.612	R\$ 69.877	R\$ 83.379

Fonte: a autora (2019).

Estes custos por falhas corretivas serão integrados ao fluxo de caixa da LCCA, juntamente com os custos esperados de manutenções preventivas que serão calculados na próxima seção.

#### 4.2.2 Custos de Manutenções Preventivas

Geralmente, os custos referentes a manutenções ou ações preventivas são mais fáceis de serem mensurados, pois existe um plano básico de manutenção. Porém, quando existem atividades de manutenção baseadas na condição, este custo pode variar. Desta forma, a LDA auxilia na obtenção de um custo esperado de manutenções preventivas mais assertivo, com base nos dados de cada equipamento.

#### 4.2.2.1 Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva

Para realizar o cálculo do custo mensal esperado em reais referente aos custos preventivos, utilizaremos a LDA. Estes custos contemplam valores referentes a mão de obra, sobressalentes, inspeções, análises preditivas e manutenções baseadas na condição. Para este caso, optou-se por agrupar os dados em meses ao invés de anos, para obter uma quantidade maior de dados para a análise. Assim, será obtido o custo mensal esperado de preventivas em reais.

Após inserir os custos preventivos no *software*, realizou-se um teste para verificar qual distribuição ajusta-se melhor aos dados, com base no Valor de LK da Tabela 4.7. Pode-se observar que a melhor distribuição para o caso da BRU020 foi a Weibull 3P, pois apresenta menor Valor de LK, conforme visto na seção 3.2 do referencial teórico.

Tabela 4.7 - Teste de Aderência das Distribuições Estatísticas do Weibull++ para Custos Preventivos (BRU020)

<b>Distribuição</b>	<b>Valor de LK</b>
Exponencial-1P	-116,648058
Exponencial-2P	-122,7121326
Normal	-127,8199183
Lognormal	-113,4515184
Weibull-2P	-115,845925
Weibull-3P	-109,2285732

Fonte: a autora (2019).

Após escolhida a distribuição, chegou-se ao Quadro 4.3, onde pode-se observar os resultados encontrados para Weibull 3P com seu beta ( $\beta = 0,489905$ ) e eta ( $\eta = 809,261013$ ), além do gama ( $\gamma = 120,255$ ) que indica um custo mínimo de R\$ 120,25 em qualquer ação de manutenção preventiva.

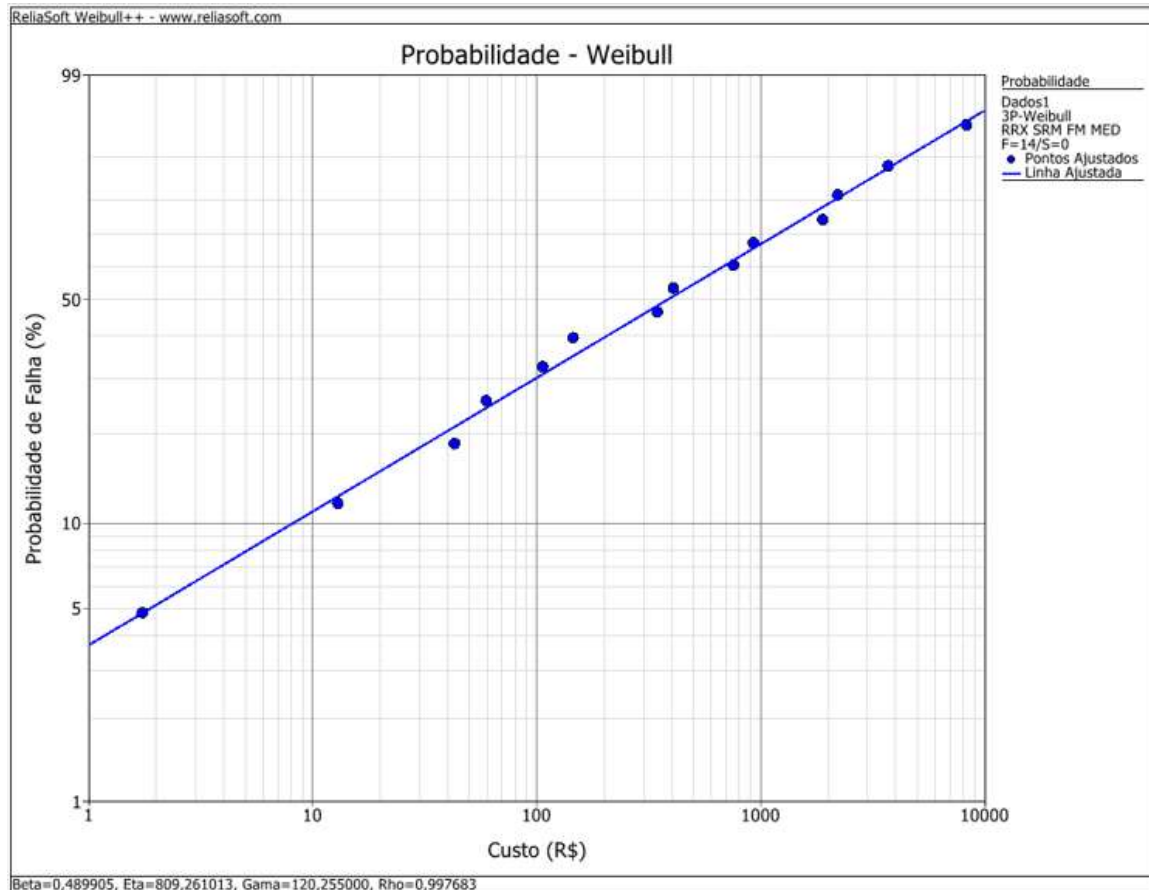
Quadro 1.3 - Resultados de Saída Software Weibull++ Análise LDA para Custo Esperado Mensal de Preventiva (BRRU020)

Relatório de Resultados	
Tipo de Relatório	Resultados Weibull++
Informações do Usuário	
Nome	Ana Spader
Empresa	UTFPR
Parâmetros	
Distribuição	Weibull 3P
Análises	NLRR
Beta	0,489905
Eta (R\$)	809,261013
Gama (R\$)	120,255
Valor da LK	-109,228573
Rho	0,997683

Fonte: a autora (2019).

Outra forma de verificar a aderência dos dados à distribuição é através do gráfico de probabilidade. Conforme o Gráfico 4.5, podemos observar uma boa aderência dos dados a distribuição Weibull 3P.

Gráfico 4.5 - Probabilidade da Weibull 3P (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Com base nestas observações de aderência, utilizou-se a calculadora do *software* QCP para calcular o custo mensal esperado de preventivas. O *software* denomina como Vida Média, conforme Figura 4.5.

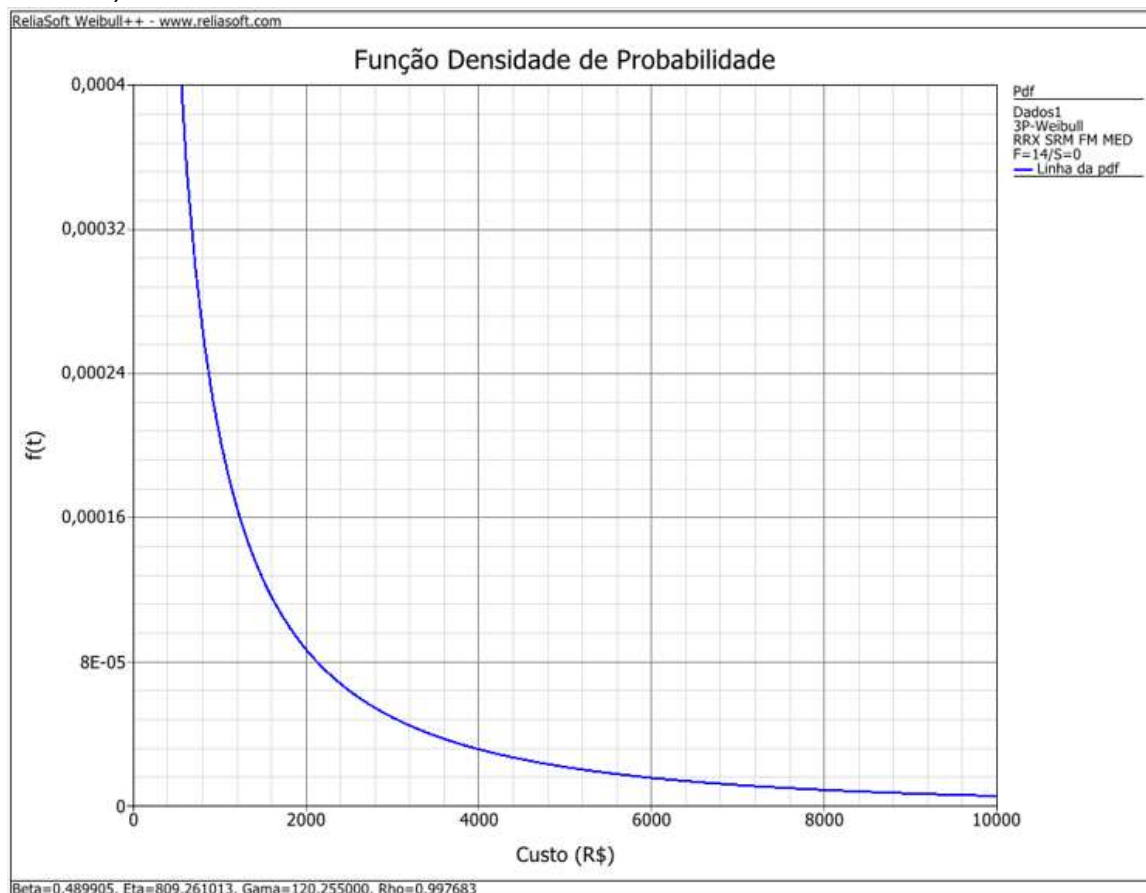
Figura 3 –Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva no QCP (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

O custo esperado mensal de preventivas encontrado, no caso da BRU020, é de R\$1802,07. Também é possível verificar a aderência deste resultado através do gráfico da Função Densidade de Probabilidade, conforme a Gráfico 4.6. Pode-se observar uma maior densidade dos dados entre R\$0,00 e R\$2000,00.

Gráfico 4.6 - Função Densidade de Probabilidade do Custo Mensal de Preventiva (BRU020)



Fonte: a autora (2019).

Após realizadas as análises para todos os equipamentos, temos a Tabela 4.8, com os resultados encontrados para o custo mensal esperado de preventiva de cada equipamento.

Tabela 4.8 - Custo Mensal Esperado de Manutenção Preventiva por Equipamento

Equip.	Custo Esperado de Preventiva	Distribuição	$\beta$	$\eta$	$\gamma$	Valor de LK
BRU020	R\$ 1802,07	Weibull 3P	0,4899	809,26	120,25	-109,22
BRU021	R\$ 3180,98	Weibull 2P	0,7052	2530,74	-	-97,99
BRU035	R\$ 8768,41	Weibull 3P	0,3784	2204,09	168,45	-95,83
BRU039	R\$ 3415,96	Weibull 3P	0,8483	3112,62	25,31	-108,68

Fonte: a autora (2019).

A Tabela 4.8 traz as distribuições que apresentaram melhor aderência a cada conjunto de dados, além dos parâmetros de forma ( $\beta$ ), escala ( $\eta$ ) e posição ( $\gamma$ ) de cada equipamento. Com base nos resultados encontrados, é possível calcular o custo



anual esperado para manutenções ou ações preventivas e, assim, inserir no fluxo de caixa da LCCA.

#### 4.2.2.2 Custo Anual Esperado de Manutenções Preventivas

Com os resultados obtidos na seção 4.2.2.1, pode-se calcular o custo esperado por manutenções preventivas anuais e, assim, integrar ao fluxo de caixa da LCCA. Para este cálculo, foi utilizado o custo mensal esperado por manutenções preventivas de cada equipamento e multiplicado por 12 meses. Na Tabela 4.9 encontram-se os resultados calculados.

Tabela 4.9 - Custo Anual Esperado de Manutenção Preventiva por Equipamento

<b>Equipamentos</b>	<b>Custo Esperado por Manut. Preventivas Anuais</b>
BRU020	R\$ 21.624,92
BRU021	R\$ 38.171,78
BRU035	R\$ 105.220,96
BRU039	R\$ 40.991,55

Fonte: a autora (2019).

Agora, com os principais elementos de custos encontrados, podemos montar o fluxo de caixa da LCCA e verificar se a substituição destes equipamentos em relação a um novo equipamento é viável economicamente.

### 4.3 PONTO ÓTIMO DE SUBSTITUIÇÃO

O modelo de *Power Law*, permite encontrar o ponto ótimo que minimize o custo total de vida de um sistema reparável quando este encontra-se em sua fase de desgaste ( $\beta > 1$ ). Utilizando a Equação 3.6, apresentada na seção 3.3.2, é viável calcular o ponto ótimo. Com base nos parâmetros de  $\beta$  e  $\eta$  encontrados para a BRU020, tem-se o exemplo do cálculo na Equação 3.14.

$$T_0 = \left[ \frac{591.425,91}{0,000004 \cdot (1,609334 - 1) \cdot 9.526,96} \right]^{\frac{1}{1,609334}} = 39987,4 \text{ h} \quad (3.14)$$

A Tabela 4.10 apresenta os resultados encontrados para os demais equipamentos:

Tabela 4.10 - Ponto Ótimo de Substituição por Equipamento

Equip.	Custo Médio de Reparo ( $C_1$ )	Custo de Substituição ( $C_2$ )	Tempo Ótimo Substituição ( $T_0$ )	Tempo Acum. até Último Evento ( $T_a$ )	$T_a/T_0$
BRU020	R\$ 9.526,96	R\$ 591.425,91	39987,4 h	71850,6 h	1,8
BRU021	R\$ 14.237,35	R\$ 591.425,91	25309,8 h	70972,3 h	2,8
BRU035	R\$ 8.295,79	R\$ 591.425,91	47876,6 h	63094,0 h	1,3
BRU039	R\$ 10.185,47	R\$ 591.425,91	24737,1 h	53144,9 h	2,1

Fonte: a autora (2019).

O custo médio de reparo utilizado é referente aos custos de manutenção corretiva do primeiro ano do fluxo de caixa do Anexo A, e o custo de substituição é referente ao valor de um novo equipamento. Desta forma, o tempo ótimo de substituição para BRU020 = 39987,4 h, BRU021 = 25309,8 h, BRU035 = 47876,6 h e BRU039 = 24737,1 h.

Como base no tempo ótimo de substituição ( $T_0$ ), foi realizada uma comparação com os tempos acumulados até o último evento observado ( $T_a$ ) de cada equipamento, conforme a coluna  $T_a/T_0$  da Tabela 4.10. Sendo assim, podemos verificar que o tempo ótimo de substituição, o qual minimiza o custo total do ciclo de vida, foi ultrapassado em todos os casos, ou seja, optou-se pela continuidade dos reparos ao invés da substituição. Essa estratégia adotada pela empresa contribuiu para o aumento do custo total do ciclo de vida destes equipamentos.

Com base no ponto ótimo de substituição, todos os equipamentos devem ser substituídos, sob o ponto de vista da otimização dos custos, conforme a relação  $T_a/T_0$  da Tabela 4.10. Porém, é preciso estipular qual critério será utilizado para priorizar essas substituições e saber o quanto será economizado financeiramente em cada um dos casos. Para este trabalho, a análise de viabilidade suportará a tomada de decisão com base em aspectos monetários.

#### 4.4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Retomando as etapas para a aplicação da LCCA, temos os objetos de estudo que foram identificados pela RDA paramétrica que se encontram na fase de desgaste

$\beta > 1$ , conforme seção 4.1.2. Determinou-se os principais elementos de custos de operação e manutenção, como visto na seção 3.5.1, e realizamos estimativas destes custos através do comportamento dos dados com a RDA paramétrica para número de falhas esperadas de cada equipamento e demais custos esperados com a LDA, conforme seção 3.4. O próximo passo é reunir as demais informações necessárias para o fluxo de caixa, o que permitirá a realização do cálculo do VPL e CAE de cada equipamento.

#### 4.4.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Para realizar a análise econômica, é preciso comparar os dois fluxos de caixa, do equipamento atual e do novo. Para isso, é necessário obter algumas informações complementares, como o custo de aquisição, custo de operação/manutenção e custo de reforma, além das taxas de atratividade e de correção consideradas pela empresa, conforme visto na seção 3.5.2.1.

Para este estudo, será considerado o valor de R\$ 591.425,91 para o preço um equipamento novo. Este valor foi informado pelo setor da Engenharia de Processos da empresa analisada. Esta área é responsável pela aquisição e instalação de novos equipamentos. Quanto aos equipamentos atuais, os valores de aquisição foram consultados no sistema de gerenciamento SAP PM R/3.

Para a reforma dos equipamentos atuais, o setor da Engenharia de Manutenção, responsável por reformas e melhorias de máquinas, indicou o valor de R\$ 120.000,00 para a troca de todo o sistema elétrico e adequação das configurações de *software*. Conforme justificado anteriormente, estes equipamentos possuem obsolescência tecnológica, pois seus componentes não são mais fabricados e nem encontrados no mercado.

Com os dados de previsão de falhas por corretivas e manutenções preventivas, englobando os custos associados a mão de obra, sobressalentes e demais custos, obtidos na seção 4.2.1 e 4.2.2, é possível aplicar a LCCA baseado em projeções de valores futuros a uma taxa de desconto (BLANK; TARQUIN, 2008). Desta forma, os resultados obtidos precisam ser corrigidos ao longo do tempo por uma taxa de atratividade para transformarmos os valores presentes em valores futuros,

através do cálculo pela Equação 3.12, apresentada na seção 3.5.2.1 do referencial teórico.

A taxa de atratividade utilizada pela empresa é de 8% para novos investimentos. Os cálculos e critérios para este valor não foram divulgados pela empresa. Também foi considerada uma taxa de correção para sobressalentes e mão de obra de 5% que a empresa considera na construção do seu orçamento anual para reduzir o impacto das flutuações da inflação, dólar e euro.

Com base nestas informações e resultados, realizou-se os fluxos de caixa para análise de viabilidade econômica dos quatro equipamentos que se encontram na fase de desgaste, conforme ANEXO A. Na Tabela 4.11, temos de forma resumida o VPL e CAE de cada equipamento, incluindo o equipamento novo.

Tabela 4.112 - Ganhos Potenciais por Equipamento (VPL e CAE)

<b>Equipamentos</b>	<b>VPL</b>	<b>CAE</b>	<b>Ganho Potencial (VPL Novo – VPL Atual)</b>
BRU020	-R\$ 746.574,51	-R\$ 143.396,36	R\$ 49.971,09
BRU021	-R\$ 795.559,10	-R\$ 152.804,95	R\$ 98.955,68
BRU035	-R\$ 1.302.389,52	-R\$ 250.153,08	R\$ 605.786,09
BRU039	-R\$ 932.035,57	-R\$ 179.018,31	R\$ 235.432,14
Equip. NOVO	-R\$ 696.603,42	-R\$ 133.798,29	-

Fonte: a autora (2019).

Podemos constatar, na coluna Ganho Potencial da Tabela 4.11, que a aquisição de um novo equipamento em um horizonte para os próximos 7 anos pode gerar economia em relação aos custos de manutenção e investimentos para reformas de R\$49.971,09 para BRU020, R\$98.955,68 para BRU021, R\$605.786,09 para BRU035 e R\$235.432,14 para a BRU039.

Conforme visto na seção 3.5.2.1, o VPL indica o lucro real do investimento considerando o custo capital ao longo do tempo. Porém, como não estamos considerando receitas, neste caso, o VPL mais próximo de zero indica qual a estratégia (substituição ou reforma) que causa menor prejuízo (TORRES, 2004).

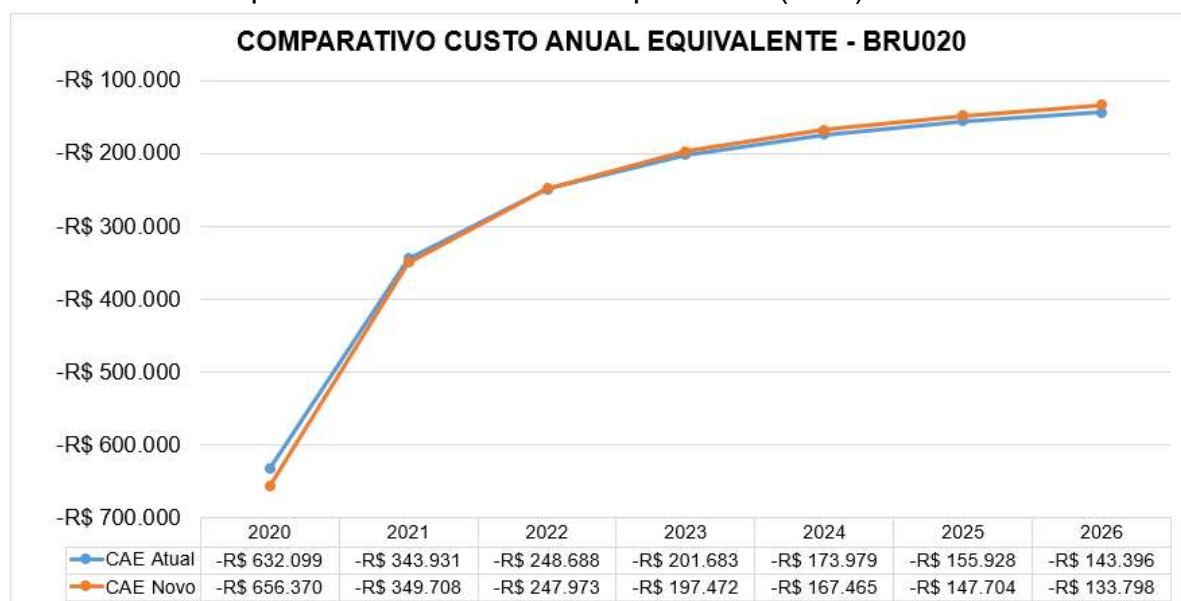
Este trabalho aplica métodos de estimativas paramétricas utilizando ferramentas computacionais para modelar em curvas de *PDF* o comportamento dos dados em análise (FABRYCKY; BLANCHARD, 1991; BARRINGER, 2003). Desta forma, a expressão “Ganho Potencial” é utilizada, pois os valores podem não ser exatamente estes, mas uma estimativa aproximada.

#### 4.4.2 Custo Anual Equivalente (CAE)

Para este estudo, os CAEs apresentados serão negativos, em consequência do cálculo do VPL que consiste apenas em custos, sem estimativas de receitas. Desta forma, será considerado como mais atrativo o CAE mais próximo de zero, pois ele representará um menor prejuízo e o ponto de intersecção entre as curvas indicará o ponto ótimo para substituição.

Conforme visto na seção 3.5.2.2, para verificar o ponto onde um equipamento torna-se mais vantajoso que o outro ao longo do fluxo de caixa, realiza-se o cálculo do CAE para cada ano, conforme Anexo A, onde podemos projetar as duas curvas, do equipamento atual e do novo, e compará-las. Desta forma, podemos verificar se existe um cruzamento entre estas curvas ao longo do fluxo de caixa e descobrir em qual ano cada equipamento torna-se mais atrativo, conforme os Gráficos 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10:

Gráfico 4.7 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU020

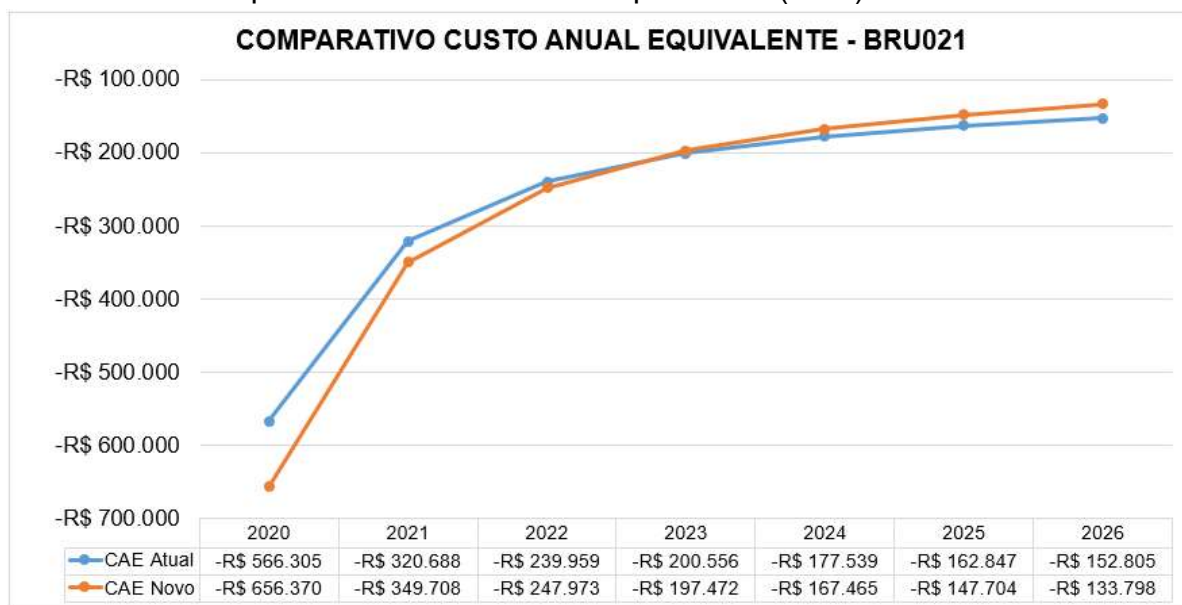


Fonte: a autora (2019).

Para a BRU020, temos um cruzamento entre as duas curvas, conforme o Gráfico 4.7, indicando que o equipamento novo se torna mais atrativo a partir do ano 2022. Porém, considerando o fluxo de caixa total analisado, disponível no Anexo A, o VPL indica um prejuízo menor. Sendo assim, o equipamento novo ainda é atrativo.

Vale ressaltar, que os dois equipamentos apresentam curvas bem similares, mesmo o equipamento novo apresentando um VPL menor, seria necessário aprofundar e detalhar mais os custos referentes aos dois equipamentos tornando assim a decisão mais robusta para a melhor estratégia.

Gráfico 4.8 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU021

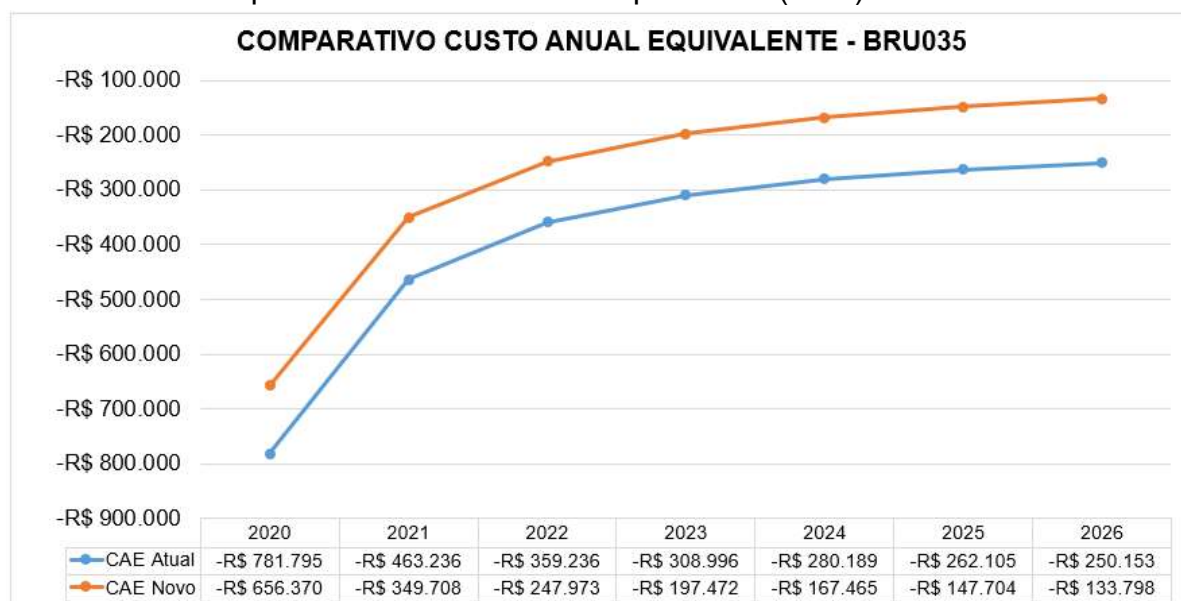


Fonte: a autora (2019).

Para a BRU021, temos um cruzamento entre as curvas, conforme o Gráfico 4.8, indicando que o equipamento novo se torna mais atrativo a partir do ano 2023. Porém, como no caso anterior, ao considerar o fluxo de caixa total, o VPL indica um prejuízo menor. Sendo assim, o equipamento novo continua atrativo.

Da mesma forma que no caso anterior, pode-se detalhar mais os custos referentes aos dois equipamentos para auxiliar em uma tomada de decisão mais robusta. Pode-se incluir os custos de descarte do equipamento atual e os custos de montagem do equipamento novo, por exemplo.

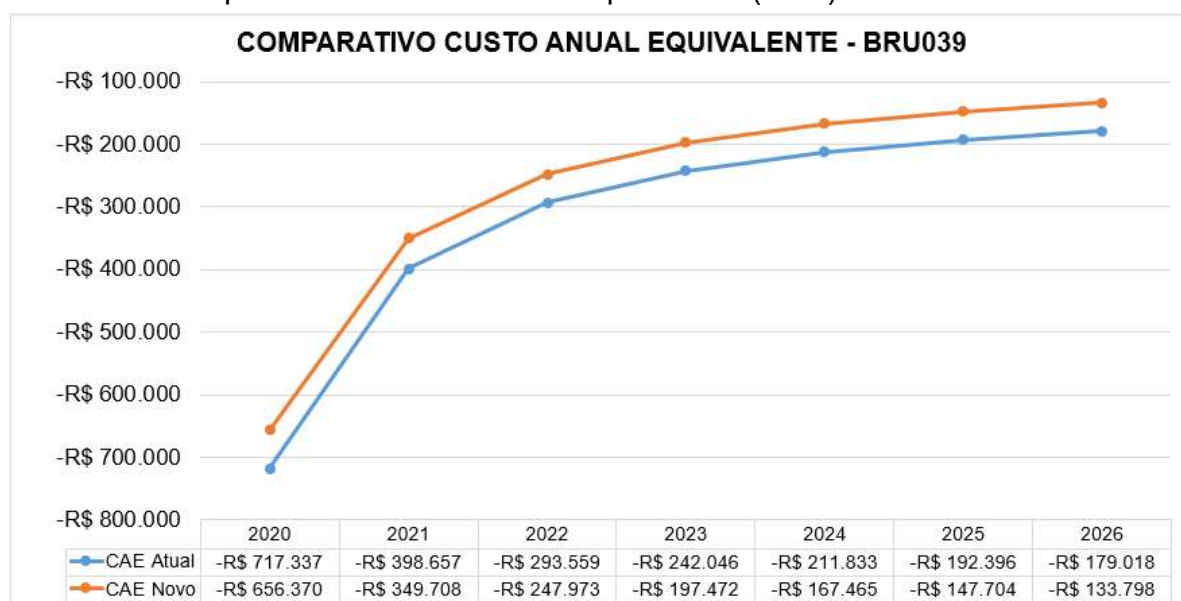
Gráfico 4.9 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU035



Fonte: a autora (2019).

Para a BRU035, não ocorre cruzamento entre as curvas, conforme o Gráfico 4.9, indicando que o equipamento novo é mais atrativo. Também pode-se reforçar esta ideia através da diferença entre os VPLs encontrados (-R\$ 605.786,09), indicando um prejuízo abaixo do valor de investimento inicial (-R\$ 591.425,91), considerando o fluxo de caixa como um todo. Diferente dos dois casos anteriores, fica evidente o momento de substituição e a vantagem econômica para a estratégia de substituição por um equipamento novo neste caso.

Gráfico 5 - Comparativo do Custo Anual Equivalente (CAE) - BRU039



Fonte: a autora (2019).

Para a BRU039, não ocorre cruzamento entre as curvas, conforme visto no Gráfico 4.10, indicando que o equipamento novo é mais atrativo. Também pode-se reforçar esta ideia através da diferença entre os VPLs encontrados (-R\$ 235.432,14), não tão expressivo quanto no caso anterior, mas que ainda assim indica um prejuízo menor, considerando todo o fluxo de caixa. Da mesma forma, que o caso anterior, fica evidente o momento de substituição e a vantagem econômica para a estratégia de substituição por um equipamento novo.

#### 4.5 RESULTADOS DO ESTUDO

Para este trabalho foram analisadas nove brunidoras. Destas, temos BRU049 e BRU055 na fase de mortalidade infantil, pois apresentaram  $\beta < 1$ . Já os equipamentos BRU011, BRU014 e BRU019 encontram-se na fase de vida útil, pois apresentaram  $\beta = 1$ . Desta forma, é necessário aprofundar as análises para nível de componentes, como podemos verificar na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Priorização e Previsão de Substituição de Equipamentos

Prioridade	Equip.	$\beta$	$\lambda$	VPL	Ganho Potencial	Previsão para Substituição
1	BRU035	1,926061	7,450758E-8	(R\$1.302.389,52)	R\$ 605.786,09	2020
2	BRU039	1,729814	0,000002	(R\$932.035,57)	R\$ 235.432,14	2020
3	BRU020	1,609334	0,000004	(R\$746.574,51)	R\$ 49.971,09	2022
4	BRU021	1,526378	0,000015	(R\$795.559,10)	R\$ 98.955,68	2023
5	BRU011	1,021117	0,003318	-	-	-
6	BRU014	1,025204	0,001616	-	-	-
7	BRU019	1,067981	0,001805	-	-	-
8	BRU049	0,889258	0,028501	-	-	-
9	BRU055	0,605991	0,103234	-	-	-

Fonte: a autora (2019).

Devido a essas considerações e as premissas deste estudo, não foram realizadas as análises de viabilidade das cinco brunidoras que não se encontram na fase de desgaste. Sendo assim, considerando uma escala de priorização para substituição, estes equipamentos não apresentam alta criticidade para o processo, sob o ponto de vista dos conceitos da engenharia da confiabilidade aplicados. Ressalta-se que essas brunidoras possuem oportunidades para a melhoria de desempenho, otimização de custos e crescimento da confiabilidade, ou seja, a estratégia de substituição não seria a mais adequada no momento.



Desta forma, temos as quatro brunidoras BRU020, BRU021, BRU035 e BRU039 na fase de desgaste, pois apresentaram  $\beta > 1$ . Partindo destas, foi calculado o ponto ótimo de substituição para verificar onde o custo total do ciclo de vida é minimizado, e todas ultrapassaram este ponto ótimo, indicando que a substituição é a estratégia mais adequada em relação a redução de custos.

A análise de viabilidade possibilitou identificar quantitativamente através do cálculo de VPL, um ganho potencial na substituição destas quatro brunidoras indicando que a ordem de prioridade para substituição deve ser em primeiro lugar para a BRU035, após a BRU039, em seguida a BRU021 e, por último, a BRU020, considerando o fluxo de caixa como um todo, como podemos observar na Tabela 4.12.

Porém, verificando minuciosamente o fluxo de caixa de cada ano através do cálculo do CAE, conforme Anexo A, e dos Gráficos 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, observa-se que a substituição imediata, para o ano 2020, das BRU035 e BRU039 é mais atrativo, sob o ponto de vista econômico, pois os equipamentos atuais possuem altos custos de manutenção. Além disso, apresentam os maiores parâmetros de betas ( $\beta$ ), indicando aumento do número de falhas e de indisponibilidade a cada ano.

As brunidoras BRU020 e BRU021 apresentam um ganho potencial bem menos expressivo do que os casos anteriores, onde foi sugerindo um aprofundamento mais detalhado de outros custos resultantes dos dois equipamentos para tornar a decisão mais robusta. Mesmo assim, a estratégia de substituição gera uma redução de custos. Contudo, o cálculo do CAE anual, conforme Anexo A, indica que a substituição não necessita ser imediata, podendo ocorrer para o caso da BRU020 a partir de 2022, conforme Gráfico 4.7, e para BRU021 a partir do ano de 2023, conforme Gráfico 4.8, onde a aquisição de um novo equipamento é mais atrativa economicamente.

Desta maneira, foi sugerido a ordem de prioridade por equipamento, o ano de previsão para a substituição e os valores de ganho potencial. Assim, considerando todos os pontos analisados, a sequência sugerida de substituição para o ano de 2020 são as BRU035 e BRU039, para o ano 2022 a BRU020 e para o ano 2023 a BRU021, conforme a Tabela 4.12.

#### 4.6 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O presente capítulo desenvolveu o método de trabalho proposto e a aplicação do referencial teórico. Nele, foram respondidas as questões norteadoras estabelecidas nas premissas deste estudo. Definitivamente, esta seção foi embasada pelos demais capítulos, aplicando as técnicas referenciadas, de modo a obter os resultados esperados nos objetivos geral e específicos deste trabalho.

Como resultado, ficou definida a ordem de prioridade e o ponto ótimo de substituição dos equipamentos analisados, assim como os valores de ganho potencial de cada cenário proposto. Na próxima seção, serão apresentadas de forma resumida as considerações finais acerca deste trabalho, além de sugestões para possíveis trabalhos futuros utilizando as técnicas desenvolvidas neste capítulo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a responder quatro questões norteadoras, de modo a auxiliar a tomada de decisão na empresa analisada referente aos seus equipamentos que apresentam obsolescência tecnológica e altos custos de manutenção.

Através da análise RDA paramétrica, foi possível compreender o comportamento das falhas e identificar a fase da curva da banheira de cada equipamento e, com isso, selecionar aqueles que se encontram em fase de desgaste. Desta forma, criou-se um indicador baseado em estatística, considerando todo o histórico de vida dos equipamentos.

A partir desta seleção, aprofundou-se o estudo voltado para a viabilidade econômica. Através da RDA e LDA, estimou-se falhas e custos futuros, para alimentar o fluxo de caixa utilizado na LCCA, permitindo assim uma visão de médio e longo prazo do comportamento dos equipamentos analisados.

Mediante o cálculo do VPL foi possível quantificar, de forma monetária, os ganhos potenciais em cada caso, criando cenários comparativos, considerando a possibilidade de reforma ou substituição. Também foi possível identificar os equipamentos com uma crescente de custos de manutenção para os anos futuros. Com o cálculo do CAE foi possível comparar os fluxos de caixa ano a ano, assim identificando o momento onde cada estratégia torna-se mais atrativa, possibilitando a sugestão de prioridade e um cronograma de substituições de médio e longo prazo.

Sendo assim, apresentou-se na Tabela 4.12 a sugestão de prioridade na substituição dos equipamentos, denominados BRU035 e BRU039, seguidos da BRU020 e BRU021, nesta ordem e calendário indicado. Todas as brunidoras apresentaram um potencial de ganho ou prejuízo menor para a estratégia de substituição. De forma geral, somente com estes quatro equipamentos pode-se gerar uma economia total de R\$ 990.145,00 para empresa.

Durante o desenvolvimento deste estudo, uma das dificuldades encontradas foi a limitação de dados ao nível de componentes, o que aumentaria a precisão desta análise e o desdobramento para os demais equipamentos com  $\beta = 1$ . Porém, mesmo com as limitações encontradas, este estudo mostrou-se válido, pois forneceu uma metodologia quantitativa para a definição e priorização de substituições de equipamentos.

Outro ponto a ser considerado foi a conversão dos resultados desta análise técnica para uma linguagem gerencial. No momento em que se traduz parâmetros e dados estatísticos em valores financeiros, a tomada de decisão por parte dos gestores é facilitada e agilizada, uma vez que a justificativa da importância do investimento se torna clara e quantitativa.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A análise realizada neste trabalho mostrou que sua aplicação é viável a qualquer indústria que possua dados de falhas e gastos por equipamento. Uma sugestão para trabalhos futuros seria desenvolver a ampliação desta análise, fazendo uso de dados ao nível de componentes e, assim, utilizando-se de outras técnicas, como o Diagrama de Blocos de Confiabilidade (*Reliability Block Diagram – RBD*) no *software BlockSim*, para obter dados mais detalhados de custos e indisponibilidade.

## REFERÊNCIAS

ABRAMAN - Associação Brasileira de Manutenção. **Documento Nacional 2017: situação da manutenção no Brasil 2017**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/105100568-Resultado-do-documento-nacional-2017.html>>. Acesso em: 20 mai. 2019.

ASCHER, Harold; FEINGOLD, Harry. **Repairable systems reliability modeling, inference, misconceptions and their causes**. Vol. 7, New York: Marcel Dekker, 1984.

BÄHRE, Dirk; SCHMITT, Christina; MOOS, Uwe. Analysis of the differences between force control and feed control strategies during the honing of bores. **5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012**, p.377-381, 2012. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827112000686>>. Acesso em: 20 abr. 2019.

BARRINGER, H. Paul. **A Life Cycle Cost Summary**. Perth, Austrália: Maintenance Engineering Society of Australia, 2003.

BIROLINI, Alessandro. **Reliability Engineering Theory and Practice**. 5ª ed. Tuscany, Italy: Springer, 2007.

BLANK, Leland; TARQUIN, Anthony. **Engenharia Econômica**. 6ª ed. São Paulo: McGraw Hill, 2008.

BRANCO FILHO, G. **Dicionário de Termos de Manutenção, Confiabilidade e Qualidade**. 4º. ed. Buenos Aires, 2006.

BOAVENTURA, Edivaldo. M. **Metodologia da pesquisa: Monografia Dissertação Tese**. São Paulo: Atlas, 2009.

CALIXTO, Eduardo. **Gas and Oil Reliability Engineering – Modeling and Analysis**. 2ª ed. Cambridge: Elsevier, 2016.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITKE, Bruno Hartmut. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11ª ed. São Paulo: Editora Atlas, 2010.

CROW, Larry H. **Reliability Analysis for Complex Repairable Systems**. APG, Maryland: AMSAA Technical Report TR-138, 1974.

DHILLON, Balbir. S. **Life Cycle Costing for Engineers**. 1ª ed. New Nork: CRC Press, 2010.

DUARTE, Cristiani L. G.; ALMEIDA, Sídia F.; ALMEIDA, Paoline L. P.; ROCHA, José. S. Método do custo anual uniforme equivalente como ferramenta para a substituição de frota. **XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 09 a 11 de outubro de 2007. Disponível em: <>. Acesso em: 15 jun. 2019.

EBELING, Charles E. **An Introduction to Reliability and Maintainability Engineering**. New York, NY: McGraw-Hill, 1997.

EHRlich, Pierre. Jacques; MORAES, Edmilson A. de. **Engenharia Econômica: Avaliação e Seleção de Projetos de Investimento**. 6.ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2005.

FABRYCKY, Wolter J.; BLANCHARD, Benjamin S. **Life-Cycle Cost and Economic Analysis**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1991.

FOGLIATTO, Flávio. S.; RIBEIRO, José. L. D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GALESNE Alain; FENSTERSEIFER, Jaime E.; LAMB, Roberto. **Decisões de investimentos da empresa**. São Paulo: Atlas, 1999.

GIL, Antônio. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 5ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2010.

HASTINGS, Nicholas A. J. Life Cycle Costing. **Springer International Publishing**, 2015. 149 – 158 p. Disponível em: <[https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-14777-2\\_8](https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-319-14777-2_8)>. Acesso em: 2 jun. 2019.

PINTO, Alan Kardec; XAVIER, Júlio de Aquino Nascif. **Manutenção Função Estratégica**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 2005.

KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried. **Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen und Läppen**. 3ª ed. Düsseldorf: VDI, 1989. v. 2, 381 p.

KRAR, Stephen. F.; RATTERMAN, Ernest. **Superabrasives: Grinding and Machining with CBN and Diamond**. New York: McGraw-Hill, 1990, p. 128-139.

LAFRAIA, João. R. B. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitmark: Petrobras, 2001.

LANDERS, Richard R., **Product Assurance Dictionary**. Marlton, New Jersey: Marlton Publishers, 1996.

MARQUES, Denilson. **Metodologia para Ajuste e Comparação de Modelos em Confiabilidade**. 2004. 126 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/jspui/handle/REPOSIP/263010>>. Acesso em: 22 ago. 2019.

METTAS, Adamantios; ZHAO, Wenbiao. "Modeling and Analysis of Repairable Systems with General Repair". **Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium**, Alexandria, Virginia, 2005. Disponível em: <[https://www.weibull.com/pubs/2005rm\\_07B\\_03.pdf](https://www.weibull.com/pubs/2005rm_07B_03.pdf)>. Acesso em: 8 jun. 2019.

MOREIRA NETO, Teófilo C. **Aplicação da Análise do Custo do Ciclo de Vida em uma Indústria de Mineração com Base na Gestão de Ativos**. 2018. 117 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado) – Escola Politécnica Engenharia Industrial, Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/26177>>. Acesso em: 19 mai. 2019.

MOREIRA NETO, Teófilo C.; MAGALHÃES, Robson S.; RIBEIRO, Abel. 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: 2 jun. 2019.

MOUBRAY, John. **Reliability Centered Maintenance**. 2ª ed. New York: Editora Industrial Press, 2001.

PALLEROSI, Carlos A.; MAZZOLINI, Beatriz P. M.; MAZZOLINI, Luiz R.; **Confiabilidade Humana: Conceitos, análises e desafios**. 1ª ed. São Paulo: Editora All Print, 2011.

OLIVEIRA, José A. N. de. **Engenharia econômica: uma abordagem às decisões de investimento**. São Paulo: McGraw-Hill, 1982.

RIGONI, Emerson; MARIANO, Carlos H. **Distribuições aplicadas a confiabilidade**. 3. Parte. Apostila do curso de pós-graduação em engenharia da confiabilidade, Curitiba (PR): UTFPR (Universidade Tecnológica Federal do Paraná), 2018.

RELIASOFT CORPORATION. **Reliability Growth & Repairable System Data Analysis Reference**. Tucson, 2015a. Disponível em: <[http://www.reliawiki.org/index.php/Reliability\\_Growth\\_and\\_Repairable\\_System\\_Analysis\\_Reference](http://www.reliawiki.org/index.php/Reliability_Growth_and_Repairable_System_Analysis_Reference)>. Acesso em: 10 jun. 2019.

RELIASOFT CORPORATION. **Life Data Analysis Reference**. Tucson, 2015b. Disponível em: <[http://www.reliawiki.org/index.php/Recurrent\\_Event\\_Data\\_Analysis](http://www.reliawiki.org/index.php/Recurrent_Event_Data_Analysis)>. Acesso em: 10 jun. 2019.

Society of Automotive Engineers (SAE), **Reliability and Maintainability Guideline for Manufacturing Machinery and Equipment**, M-110.2. Pennsylvania, 1999.

SANTOS, Antônio. R. dos. **Metodologia Científica: a construção do conhecimento**. Rio de Janeiro: DP&A, 2000.

SLACK, Nigel; BRANDON-JONES, Alistair; JOHNSTON, Robert. **Administração da produção**. 8ª ed. São Paulo: Atlas, 2018.

SOUZA, Alceu; CLEMENTE Ademir. **Decisões Financeiras e Análise de Investimentos: Fundamentos, técnicas e aplicações**. 4ª ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2001

TORRES, Roberta. **Matemática Financeira e Engenharia Econômica: A Teoria e a Prática**. 2004. 94 f. Trabalho de Conclusão do Curso (Licenciatura) – Matemática,

Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2004. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/96657>>. Acesso em: 3 ago. 2019.

WECKMAN, Gary R.; SHELL, Richard L.; MARVEL, Jon H. Modeling the reliability of repairable systems in the aviation industry. **Computer & Industrial Engineering**, v. 40, n. 1, p. 51 – 63, 2001. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/245430596\\_Design\\_Support\\_Approach\\_to\\_Fleet\\_Maintenance\\_Requirements\\_in\\_the\\_Aviation\\_Industry](https://www.researchgate.net/publication/245430596_Design_Support_Approach_to_Fleet_Maintenance_Requirements_in_the_Aviation_Industry)>. Acesso em: 11 jun. 2019.



## ANEXO A – ANÁLISE DE VIABILIDADE BRUNIDORAS

Análise de Viabilidade - BRU020								
Componentes de custo	EQUIPAMENTO ATUAL							
	Anos de operação							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Investimento	-R\$ 436.432,71							
Reforma	-R\$ 120.000,00							
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 9.526,96	-R\$ 10.003,30	-R\$ 10.892,49	-R\$ 11.845,58	-R\$ 12.866,75	-R\$ 13.960,42	-R\$ 15.131,30
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 21.624,92	-R\$ 22.706,17	-R\$ 23.841,47	-R\$ 25.033,55	-R\$ 26.285,23	-R\$ 27.599,49	-R\$ 28.979,46
<b>Total</b>	-R\$ 556.432,71	-R\$ 31.151,88	-R\$ 32.709,47	-R\$ 34.733,96	-R\$ 36.879,13	-R\$ 39.151,98	-R\$ 41.559,91	-R\$ 44.110,76
VPL	-R\$ 585.277,04	-R\$ 613.320,14	-R\$ 640.893,08	-R\$ 668.000,34	-R\$ 694.646,51	-R\$ 720.836,31	-R\$ 746.574,51	-R\$ 746.574,51
CAE	-R\$ 632.099,20	-R\$ 343.931,06	-R\$ 248.687,99	-R\$ 201.683,20	-R\$ 173.978,70	-R\$ 155.927,98	-R\$ 143.396,36	-R\$ 143.396,36
								Taxa Atratividade 8%
								Taxa Correção 5%
								VPL Atual -R\$ 746.574,51
								CAE Atual -R\$ 143.396,36
Componentes de custo	EQUIPAMENTO NOVO							
	Anos de operação							
	0	1	2	3	4	5	6	7
Investimento	-R\$ 591.425,91							
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 4.661,91	-R\$ 4.895,01	-R\$ 5.139,76	-R\$ 5.396,74	-R\$ 5.666,58	-R\$ 5.949,91	-R\$ 6.247,41
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 12.968,52	-R\$ 13.616,95	-R\$ 14.297,79	-R\$ 15.012,68	-R\$ 15.763,32	-R\$ 16.551,48	-R\$ 17.379,06
<b>Total</b>	-R\$ 591.425,91	-R\$ 17.630,43	-R\$ 18.511,95	-R\$ 19.437,55	-R\$ 20.409,43	-R\$ 21.429,90	-R\$ 22.501,39	-R\$ 23.626,46
VPL	-R\$ 607.750,38	-R\$ 623.621,40	-R\$ 639.051,55	-R\$ 654.053,09	-R\$ 668.637,92	-R\$ 682.817,61	-R\$ 696.603,42	-R\$ 696.603,42
CAE	-R\$ 656.370,41	-R\$ 349.707,69	-R\$ 247.973,42	-R\$ 197.472,23	-R\$ 167.464,68	-R\$ 147.703,96	-R\$ 133.798,29	-R\$ 133.798,29
								Ganho Potencial R\$ 49.971,09
								VPL Novo -R\$ 696.603,42
								CAE Novo -R\$ 133.798,29

(Continuação)

Análise de Viabilidade - BRU021										
Componentes de custo	EQUIPAMENTO ATUAL								Taxa Atratividade 8%	
	Anos de operação									
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 355.829,09									Taxa Correção 5%
Reforma	-R\$ 120.000,00									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 14.237,35	-R\$ 15.342,62	-R\$ 16.522,82	-R\$ 18.216,41	-R\$ 19.127,23	-R\$ 21.039,95	-R\$ 22.091,95		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 38.171,78	-R\$ 40.080,37	-R\$ 42.084,39	-R\$ 44.188,61	-R\$ 46.398,04	-R\$ 48.717,94	-R\$ 51.153,84		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 475.829,09</b>	<b>-R\$ 52.409,13</b>	<b>-R\$ 55.422,99</b>	<b>-R\$ 58.607,21</b>	<b>-R\$ 62.405,02</b>	<b>-R\$ 65.525,27</b>	<b>-R\$ 69.757,89</b>	<b>-R\$ 73.245,79</b>		
VPL		-R\$ 524.356,06	-R\$ 571.872,34	-R\$ 618.396,64	-R\$ 664.266,19	-R\$ 708.861,58	-R\$ 752.820,89	-R\$ 795.559,10	VPL Atual	-R\$ 795.559,10
CAE		-R\$ 566.304,55	-R\$ 320.688,41	-R\$ 239.958,62	-R\$ 200.555,78	-R\$ 177.538,96	-R\$ 162.846,74	-R\$ 152.804,95	CAE Atual	-R\$ 152.804,95
Componentes de custo	EQUIPAMENTO NOVO								Ganho Potencial R\$ 98.955,68	
	Anos de operação									
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 591.425,91									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 4.661,91	-R\$ 4.895,01	-R\$ 5.139,76	-R\$ 5.396,74	-R\$ 5.666,58	-R\$ 5.949,91	-R\$ 6.247,41		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 12.968,52	-R\$ 13.616,95	-R\$ 14.297,79	-R\$ 15.012,68	-R\$ 15.763,32	-R\$ 16.551,48	-R\$ 17.379,06		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 591.425,91</b>	<b>-R\$ 17.630,43</b>	<b>-R\$ 18.511,95</b>	<b>-R\$ 19.437,55</b>	<b>-R\$ 20.409,43</b>	<b>-R\$ 21.429,90</b>	<b>-R\$ 22.501,39</b>	<b>-R\$ 23.626,46</b>		
VPL		-R\$ 607.750,38	-R\$ 623.621,40	-R\$ 639.051,55	-R\$ 654.053,09	-R\$ 668.637,92	-R\$ 682.817,61	-R\$ 696.603,42	VPL Novo	-R\$ 696.603,42
CAE		-R\$ 656.370,41	-R\$ 349.707,69	-R\$ 247.973,42	-R\$ 197.472,23	-R\$ 167.464,68	-R\$ 147.703,96	-R\$ 133.798,29	CAE Novo	-R\$ 133.798,29

(Continuação)

Análise de Viabilidade - BRU035										
Componentes de custo	EQUIPAMENTO ATUAL								Taxa Atratividade 8%	
	Anos de operação									
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 498.776,38									Taxa Correção 5%
Reforma	-R\$ 120.000,00									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 8.295,79	-R\$ 8.710,58	-R\$ 9.603,42	-R\$ 11.043,93	-R\$ 12.100,30	-R\$ 13.234,71	-R\$ 14.452,30		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 105.220,96	-R\$ 110.482,01	-R\$ 116.006,11	-R\$ 121.806,42	-R\$ 127.896,74	-R\$ 134.291,57	-R\$ 141.006,15		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 618.776,38</b>	<b>-R\$ 113.516,75</b>	<b>-R\$ 119.192,59</b>	<b>-R\$ 125.609,53</b>	<b>-R\$ 132.850,35</b>	<b>-R\$ 139.997,04</b>	<b>-R\$ 147.526,28</b>	<b>-R\$ 155.458,45</b>		
VPL		-R\$ 723.884,49	-R\$ 826.072,92	-R\$ 925.785,82	-R\$ 1.023.434,79	-R\$ 1.118.714,42	-R\$ 1.211.681,00	-R\$ 1.302.389,52	VPL Atual	-R\$ 1.302.389,52
CAE		-R\$ 781.795,25	-R\$ 463.236,28	-R\$ 359.235,92	-R\$ 308.996,25	-R\$ 280.189,25	-R\$ 262.105,24	-R\$ 250.153,08	CAE Atual	-R\$ 250.153,08
Componentes de custo	EQUIPAMENTO NOVO								Ganho Potencial R\$ 605.786,09	
	Anos de operação									
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 591.425,91									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 4.661,91	-R\$ 4.895,01	-R\$ 5.139,76	-R\$ 5.396,74	-R\$ 5.666,58	-R\$ 5.949,91	-R\$ 6.247,41		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 12.968,52	-R\$ 13.616,95	-R\$ 14.297,79	-R\$ 15.012,68	-R\$ 15.763,32	-R\$ 16.551,48	-R\$ 17.379,06		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 591.425,91</b>	<b>-R\$ 17.630,43</b>	<b>-R\$ 18.511,95</b>	<b>-R\$ 19.437,55</b>	<b>-R\$ 20.409,43</b>	<b>-R\$ 21.429,90</b>	<b>-R\$ 22.501,39</b>	<b>-R\$ 23.626,46</b>		
VPL		-R\$ 607.750,38	-R\$ 623.621,40	-R\$ 639.051,55	-R\$ 654.053,09	-R\$ 668.637,92	-R\$ 682.817,61	-R\$ 696.603,42	VPL Novo	-R\$ 696.603,42
CAE		-R\$ 656.370,41	-R\$ 349.707,69	-R\$ 247.973,42	-R\$ 197.472,23	-R\$ 167.464,68	-R\$ 147.703,96	-R\$ 133.798,29	CAE Novo	-R\$ 133.798,29

(Continuação)

Análise de Viabilidade - BRU039										
Componentes de custo	EQUIPAMENTO ATUAL								Taxa Atratividade 8%	
	Anos de operação									Taxa Correção 5%
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 496.815,19									
Reforma	-R\$ 120.000,00									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 10.185,47	-R\$ 11.440,89	-R\$ 12.274,09	-R\$ 13.984,63	-R\$ 14.971,78	-R\$ 16.929,62	-R\$ 18.093,54		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 40.991,55	-R\$ 43.041,13	-R\$ 45.193,18	-R\$ 47.452,84	-R\$ 49.825,49	-R\$ 52.316,76	-R\$ 54.932,60		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 616.815,19</b>	<b>-R\$ 51.177,02</b>	<b>-R\$ 54.482,02</b>	<b>-R\$ 57.467,27</b>	<b>-R\$ 61.437,47</b>	<b>-R\$ 64.797,26</b>	<b>-R\$ 69.246,38</b>	<b>-R\$ 73.026,13</b>		
VPL		-R\$ 664.201,32	-R\$ 710.910,88	-R\$ 756.530,25	-R\$ 801.688,62	-R\$ 845.788,55	-R\$ 889.425,52	-R\$ 932.035,57	VPL Atual	-R\$ 932.035,57
CAE		-R\$ 717.337,43	-R\$ 398.656,94	-R\$ 293.559,09	-R\$ 242.046,47	-R\$ 211.833,20	-R\$ 192.396,42	-R\$ 179.018,31	CAE Atual	-R\$ 179.018,31
Componentes de custo	EQUIPAMENTO NOVO								Ganho Potencial R\$ 235.432,14	
	Anos de operação									
	0	1	2	3	4	5	6	7		
Investimento	-R\$ 591.425,91									
Custos Manut. Corretiva		-R\$ 4.661,91	-R\$ 4.895,01	-R\$ 5.139,76	-R\$ 5.396,74	-R\$ 5.666,58	-R\$ 5.949,91	-R\$ 6.247,41		
Custos Manut. Preventiva		-R\$ 12.968,52	-R\$ 13.616,95	-R\$ 14.297,79	-R\$ 15.012,68	-R\$ 15.763,32	-R\$ 16.551,48	-R\$ 17.379,06		
<b>Total</b>	<b>-R\$ 591.425,91</b>	<b>-R\$ 17.630,43</b>	<b>-R\$ 18.511,95</b>	<b>-R\$ 19.437,55</b>	<b>-R\$ 20.409,43</b>	<b>-R\$ 21.429,90</b>	<b>-R\$ 22.501,39</b>	<b>-R\$ 23.626,46</b>		
VPL		-R\$ 607.750,38	-R\$ 623.621,40	-R\$ 639.051,55	-R\$ 654.053,09	-R\$ 668.637,92	-R\$ 682.817,61	-R\$ 696.603,42	VPL Novo	-R\$ 696.603,42
CAE		-R\$ 656.370,41	-R\$ 349.707,69	-R\$ 247.973,42	-R\$ 197.472,23	-R\$ 167.464,68	-R\$ 147.703,96	-R\$ 133.798,29	CAE Novo	-R\$ 133.798,29