UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Guilherme Augusto Roiz

ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DE ATIVOS COM BASE EM VARIÁVEIS DE CONFIABILIDADE E SUSTENTABILIDADE: UMA APLICAÇÃO DEA

São Carlos
2016

Guilherme Augusto Roiz

ANÁLISE DE SUBSTITUIÇÃO DE ATIVOS COM BASE EM VARIÁVEIS DE CONFIABILIDADE E SUSTENTABILIDADE: UMA APLICAÇÃO DEA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Economia, Organizações e Gestão do Conhecimento

Orientadora: Profª. Assocª. Daisy A. do N. Rebelatto

São Carlos
2016

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

Roiz, Guilherme Augusto
R741a Análise de substituição de ativos com base em variáveis de Confiabilidade e Sustentabilidade: Uma aplicação DEA / Guilherme Augusto Roiz; orientador Daisy A. N. Rebelatto. São Carlos, 2016.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Economia, Organizações e Gestão Conhecimento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016.

1. Engenharia Econômica. 2. Gestão de Ativos. 3. PAS-55. 4. Engenharia de Confiabilidade. 5. Gestão da Manutenção. 6. DEA. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **GUILHERME AUGUSTO ROIZ.**

Título da dissertação: "Análise de substituição de ativos com base em variáveis de confiabilidade e sustentabilidade: uma aplicação DEA".

Data da defesa: 14/03/2016

Comissão Julgadora: **Resultado:**

Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC) APROVADO

Prof. Dr. **Alexandre Sartoris Neto**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Araraquara) APROVADO

Prof. Dr. **Enzo Barberio Mariano**
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP - Bauru) Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:
Profa. Associada **Daisy Aparecida do Nascimento Rebelatto**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

Aos meus pais...

AGRADECIMENTOS

À Deus , por me acompanhar e me proteger em tudo que faço.

Aos meus pais, pela educação e exemplo de vida que me são dados constantemente.

À minha namorada Roberta, por me apoiar durante todo o curso de mestrado.

Ao amigo Rodrigo Ataulo, por dedicar parte de seu tempo para conversas que foram muito úteis para minha formação, para a execução desse trabalho e por me ajudar com o banco de dados. Espero que um dia eu possa retribuir todos esses favores que me foram prestados.

Aos meus amigos, em especial Naja – pelas conversas, pela disponibilidade em me ajudar sempre, ao Bruno – pelas idéias trocadas, pelas discussões e pelas ajudas, ao Herick – grande amigo que sempre me apoiou e incentivou para a execução desse trabalho.

Agradeço ao professor Enzo Mariano pela ajuda despendida e pelos conhecimentos transmitidos durante esse período.

Finalmente gostaria de agradecer a minha orientadora Daisy Ap. do Nascimento Rebelatto, pela confiança depositada em mim para a execução desse trabalho, pela oportunidade concedida, pela paciência, pelos seus ensinamentos e pelo exemplo dado. Espero ter absorvido ao menos uma parcela de sua sabedoria.

"Somente se aproxima da perfeição quem a procura com constância, sabedoria e, sobretudo muita humildade".

Jigoro Kano

RESUMO

ROIZ, G. A. (2016)**.** Análise de substituição de ativos com base em variáveis de Confiabilidade e Sustentabilidade: Uma aplicação DEA. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

As companhias estão inseridas em um contexto global de preocupação sustentável, onde questões ambientais e sociais acompanham as preocupações econômicas. Faz-se necessário englobar, de alguma forma, nas análises de viabilidade econômica ou ainda em modelagens de Vida Econômica e Reposição de Ativos, variáveis que possam representar aspectos sociais e ambientais. Nesse panorama entra a norma PAS-55 – *Publicly Avaiable Specification – 55,* publicada pela *British Standards Institution,* que visa aperfeiçoar o sistema de gestão de ativos físicos de maneira a permitir maiores resultados econômicos, sociais e ambientais, provenientes da utilização dos equipamentos, nas empresas. Os procedimentos previstos na norma PAS-55 sugerem o alinhamento de conhecimentos oriundos da gestão de manutenção, que compõem o arcabouço da Engenharia de Confiabilidade, a conhecimentos de Engenharia Econômica, de maneira a compor ferramentas e métodos para tomar decisões em relação aos ativos físicos de empresas. O objetivo do presente trabalho é propor um modelo de substituição de ativos que considere variáveis de Confiabilidade e Sustentabilidade, juntamente com variáveis financeiras, por meio da Análise Envoltória de Dados. Os resultados apresentam um modelo conceitual de substituição de ativos, com inclusão de variáveis socioambientais e aplicação DEA e, também, um estudo de caso com dados reais que avalia a substituição de um equipamento pertencente a uma empresa produtora de ácido fosfórico.

Palavras-chave: PAS-55, Substituição de Ativos, Análise de Investimentos, Engenharia Econômica, DEA, Engenharia de Confiabilidade, Gestão de Manutenção, Gestão de Ativos.

ABSTRACT

ROIZ, G. A. (2016). Asset replacement analysis based on Reliability and Sustainability variables: An DEA application. Master´s Thesis – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2016.

Companies are placed in a global context of sustainable concern where environmental and social issues accompanying economic concerns. It is necessary to include, in some way, the economic feasibility analysis or in modeling of Economic Life and Asset Replacement, variables that may pose social and environmental aspects. In this scenario enters the PAS-55 standard - Publicly Avaiable Specification - 55, published by the British Standards Institution, which aims to improve the management system of physical assets in order to allow greater economic results, social and environmental issues arising from the use of equipment, in companies. The procedures laid down in PAS-55 standard suggests the alignment of knowledge from maintenance management, which make up the framework of Reliability Engineering, the knowledge of economic engineering in order to make tools and methods to make decisions in relation to physical assets companies. The objective of this study is to propose a model of asset replacement that considers variables Reliability and Sustainability, along with financial variables, using data envelopment analysis. The results present a conceptual model of asset replacement, with the inclusion of social and environmental variables and DEA application and also a case study with real data that assesses the replacement of equipment belonging to a producer of phosphoric acid.

Keywords: PAS-55, Asset Replacement, Investment Analysis, Economic Engineering, DEA, Reliability Engineering, Maintenance Management, Physical Asset Management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – GESTÃO ECONÔMICA DE ATIVOS EM UMA ORGANIZAÇÃO 16
FIGURA 2 – NÍVEIS DE GESTÃO DE ATIVOS E ESCOPO DO PAS-55 21
FIGURA 3 – DEFINIÇÕES DE CRITÉRIO E FUNCIONAMENTO DE ATIVOS 27
FIGURA 4 – CURVA DA BANHEIRA 37
FIGURA 5 - PADRÃO DE FALHAS 38
FIGURA 6 – CURVA DE EFICIÊNCIA 46
FIGURA 7 – EXEMPLO DE FLUXO DE CAIXA 48
FIGURA 8 – DIAGRAMA DE FLUXO DE CAIXA 49
FIGURA 9 – ANÁLISE DE FLUXO INCREMENTAL DE CAIXA 49
FIGURA 10 – FLUXO INCREMENTAL 50
FIGURA 11 – FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS 51
FIGURA 12 – CONJUNTO DE VARIÁVEIS TEÓRICAS 58
FIGURA 13 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA ORGANIZAÇÃO DAS DMU´S 59
FIGURA 14 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DOS *INPUTS* E *OUTPUTS* 59
FIGURA 15 – EFICIÊNCIAS RELATIVAS DOS PERÍODOS DO ATIVO 61
FIGURA 16 – CÁLCULO DE FLUXO DE CAIXA INCREMENTAL DE EFICIÊNCIA PRESENTE LÍQUIDA PARA OS PERÍODOS *T* E *T+1* 63
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÃO DA EFICIÊNCIA PRESENTE LÍQUIDA 64
FIGURA 18 – EFICIÊNCIAS PRESENTES LÍQUIDAS E PONTO DE SUBSTITUIÇÃO 64
FIGURA 19 – FILTRO ESTEIRA EIMCO® 65
FIGURA 20 – INTERFACE DO SOFTWARE FRONTIER ANALYST® 68

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 – ATUAÇÃO PROFISSIONAL DOS ESPECIALISTAS 55
GRÁFICO 2 – PADRÃO DE EFICIÊNCIA APÓS A APLICAÇÃO DA TÉCNICA DA FRONTEIRA INVERTIDA 69
GRÁFICO 3 – PADRÃO DE EFICIÊNCIA DO FILTRO ESTEIRA 71
GRÁFICO 4 – EFICIÊNCIAS PRESENTES LÍQUIDAS RECALCULADAS 76

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO MODELO TEÓRICO 60
QUADRO 2 – EFICIÊNCIAS PRESENTES LÍQUIDAS DA SUBSTITUIÇÃO 64
QUADRO 3 – VARIÁVEIS CONSIDERADAS NO ESTUDO DE CASO 66
QUADRO 4 – *SCORES* DE EFICIÊNCIA OBTIDOS 68
QUADRO 5 – ÍNDICES COMPOSTOS OBTIDOS 69
QUADRO 6 – FLUXOS DE EFICIÊNCIA INCREMENTAL DOS PERÍODOS 1 AO 7 72
QUADRO 7 – FLUXOS DE EFICIÊNCIA INCREMENTAL DOS PERÍODOS 8 AO 14 73
QUADRO 8 – FLUXOS DE EFICIÊNCIA INCREMENTAL DOS PERÍODOS 15 AO 20 74
QUADRO 9 – EFICIÊNCIAS PRESENTES LÍQUIDAS 75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ETAPAS DA PESQUISA 42
TABELA 2 – VARIÁVEIS NÃO FINANCEIRAS 53

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPM– *Capital Asset Pricing Model*

DEA – *Data Envelopment Analysis*

DMU – *Decision Making Unit*

EAM – *Enterprise Asset Management*

EFPL – Eficiência Presente Líquida

FEI – Fluxo de Eficiência Incremental

MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade

MCR – Manutenção Centrada no Reparo

MPT – Manutenção para Produtividade Total

MTBF – *Mean time between Failures*

MTIR– Taxa Interna de Retorno Modificada

MTTF – *Mean time to failure*

MTTR – *Mean time to Repair*

OEE – *Overall Equipament Effectviness*

PAS-55– *Public Avaiable Specification - 55*

PCM – Planejamento e Controle da Produção

RCM – *Reliability Centred Maintenance*

TBF – Tempo entre falhas

TBF – *Time Between Failures*

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMA – Taxa Mínima de Aceitação

TPM – *Total Productive Maintenance*

TR – *Time to repair*

TTF – Tempo até a falha

VERA – Vida Econômica e Reposição de Ativos

VPL – Valor Presente Líquido

WACC – *Weighted Average Cost of Capital*

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA 9

1.1 - OBJETIVO 11
1.2 - ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 12

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

2.1 - GESTÃO DE ATIVOS E MODELOS CLÁSSICOS DE ANÁLISE DE INVESTIMENTOS 15
2.1.1 PAS-55 20
2.1.2 Método de Payback 22
2.1.3 Valor Presente Líquido - VPL 23
2.1.4 Taxa Interna de Retorno - TIR 24
2.1.5 Taxa Interna de Retorno Modificada - MTIR 25
2.2 - ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE 26
2.2.1 - Gestão da Manutenção 30
Manutenção Corretiva 31
Manutenção Preventiva 31
Manutenção Preditiva 32
Manutenção Detectiva 32
2.2.2 - Análise Convencional de Falhas 34
Função de Confiabilidade 35
Função de Confiabilidade e a Curva da Banheira 35
Função Mantenabilidade 38
Função Disponibilidade 39

CAPÍTULO 3 - MÉTODO DA PESQUISA 42
Análise Envoltória de Dados - DEA - *Data Envelopment Analysis* 44
Análise Incremental de Fluxo de Caixa 48

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS 52

4.1 - IDENTIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS 52
4.2 - PAINEL DE ESPECIALISTAS 55
4.3 - MODELO CONCEITUAL 58
4.3.1 - Construção do Modelo 58
4.3.1.1 Modelo de Substituição por Cálculo de Eficiências Incrementais 62
4.4 - ESTUDO DE CASO 65
4.4.1 - Equipamento 65
4.4.2 - Variáveis 66
4.4.3 - Modelagem de DEA 67
4.4.4 - Cálculo das Eficiências Incrementais 71

CAPÍTULO 5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS 77

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 80

APÊNDICES 88

APÊNDICE A – CUSTO DE CAPITAL PRÓPRIO, DE TERCEIROS E WACC 88
APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO PARA PAINEL 91

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os ganhos de capital da empresa são gerados a partir de decisões de investimento que podem estar ligadas a ampliação da capacidade produtiva, substituição de ativos como máquinas e equipamentos, tecnologia, capital intelectual entre outros.

As decisões de investimento envolvem a elaboração, avaliação e seleção de propostas de aplicações de capital efetuadas com o objetivo, normalmente de médio e longo prazos, de produzir determinado retorno aos proprietários de ativos (ASSAF NETO, 2010).

Os critérios associados à decisão de investimento são racionais e, segundo os modelos que serão apresentados no Capítulo 2, baseiam-se na mensuração das informações financeiras que ilustram sua atratividade econômica. Sua importância é dada pelo fato de que

> os investimentos de longo prazo representam desembolsos substanciais de fundos que comprometem a empresa com determinada linha de ação. Desse modo a empresa deve contar com procedimentos para analisar e selecionar de maneira adequada os investimentos de longo prazo. Deve ser capaz de medir os fluxos de caixa e aplicar técnicas apropriadas para a tomada de decisão (GITMAN, 2012, p.326)

A empresa deve ter como principal objetivo o aumento da riqueza de seus acionistas, o que se dá por meio de implementação de projetos que, invariavelmente, ocorrem a partir de um gasto inicial, com o intuito de se obter receitas futuras que remunerem o risco incorrido.

Dentro dessa ótica, está inserida a gestão econômica de ativos, que de acordo com Hastings (2010) fornece recursos e conhecimento para auxiliar no planejamento de aquisições, manutenções e descarte de ativos físicos.

Ainda em Hastings (2010), é destacado que a gestão econômica de ativos não tem importância identificada e reconhecida pelas empresas, tomando forma apenas há poucos anos, como em Pintelon E Gelders (1992) e em Hoskins et al. (1998), que

colocam a gestão econômica de ativos em um lugar de importância devido a normas regulatórias que surgem para garantir a qualidade dos equipamentos, em condição satisfatória.

Dessa forma, torna-se de vital importância, para a tomada de decisões empresariais no âmbito da gestão de ativos, o conhecimento de todos os custos envolvidos na aquisição, operação, manutenção e descarte, isto é, a compreensão do custo de ciclo de vida do ativo físico em questão. Aliado a isso, é necessário um modelo de analise de investimentos eficiente para que a empresa possa tomar a decisão de realizar manutenção em um ativo danificado, depreciado ou de fazer a aquisição de um novo equipamento. A partir desse dilema tem-se o conceito de vida econômica, pois se um ativo é mantido por um período maior que sua vida econômica, as despesas de manutenção serão muito altas; e se o ativo for substituído antes de atingir a vida econômica completa, o custo de capital não terá sido amortizado o suficiente, perdendo-se parte do investimento realizado; esse é o motivo pela qual os ativos não são mantidos por tempo ilimitado (MARQUES, 2003).

A gestão econômica de ativos busca identificar o momento ótimo para a realocação de recursos em ativos físicos, isto é, o momento ótimo da reposição de maquinas e equipamentos, para que não sejam substituídos prematuramente e nem tardiamente. Assim, de acordo com Hastings (2010), a previsão dos custos de ciclo de vida dos ativos físicos depende de técnicas de previsão e quantificação do comportamento do equipamento, em especial, para as taxas de ocorrência de manutenção.

Dentre os modelos utilizados, disponíveis na literatura, se destacam os métodos de engenharia econômica para avaliar a VERA – Vida Econômica e Reposição de Ativos, e tais métodos são conhecidos como modelos de análise de investimentos clássicos sendo: *Payback, Payback* descontado, Valor Presente Líquido – VPL (NPV), Taxa Interna de retorno – TIR (IRR), Taxa Interna de Retorno Modificada – MTIR (MIRR).

Os modelos clássicos de análise de investimento, no entanto, utilizam como variáveis, informações de natureza financeira, tais como entradas de caixa, saídas de caixa, prazos e taxas de desconto. Existe a necessidade de desenvolver ferramental de análise que permita ampliar o escopo das análises de investimentos, não apenas pela ótica da riqueza gerada a partir de questões financeiras e econômicas, mas também que possam traduzir maior valor adicionado às empresas que investem a partir de melhor

empregabilidade, maior foco na questão ambiental e sustentabilidade, e ainda, melhor retorno econômico para empresas no longo prazo. As discussões sobre sustentabilidade vêm ganhando, cada vez mais, espaço no ambiente corporativo e um modelo que consiga analisar a eficiência de investimentos a partir de informações não apenas financeiras, mas também sociais e ambientais, pode ser um grande passo para abrir caminho para novas formas de tratar investimentos, dada a demanda por práticas de gestão que denotem maior preocupação com fatores ambientais e sociais.

Dessa forma, o presente trabalho busca ampliar o escopo de analise de investimentos, em especial para reposição de ativos físicos, levando em conta impactos ambientais, sociais e econômicos, decorrentes da substituição.

1.1 Objetivo

O foco da gestão de ativos é fornecer informações para alocar os recursos de forma ótima em aquisições, substituições e manutenção de ativos e, dado isso, torna-se de extrema importância o conhecimento de todos os custos do ciclo de vida dos ativos, além de sua produtividade.

Os modelos para previsão de VERA são baseados em ferramentas da engenharia econômica e levam em conta períodos de tempo e fluxos de caixa monetários, além de taxas de desconto, não levando em conta questões de caráter sustentável, tais como variáveis com características ambientais e sociais.

Uma maneira de considerar tais questões em modelagem de VERA é a utilização de técnicas matemáticas não paramétricas.

Dessa forma, a DEA – Análise por Envoltória de Dados – ferramenta de programação operacional que por ser não paramétrica pode ser utilizada para medir a eficiência de DMU´s que se utilizam de múltiplos *inputs* e *outputs* além de permitir a utilização de várias unidades de medida, se apresenta como uma alternativa.

Assim, o objetivo deste projeto de pesquisa é **propor um modelo de avaliação de substituição de ativos, utilizando DEA, que considere variáveis provenientes da Engenharia de Confiabilidade e Sustentabilidade.**

Para compor um repertório básico de conhecimento que permitisse o atingimento do objetivo proposto recorreu-se à literatura de Engenharia de Confiabilidade e Gestão de Manutenção, aliada a conceitos de sustentabilidade. De acordo com Dias (2002), os sistemas complexos que exigem sistemáticas de manutenção mais bem elaboradas tem a necessidade de conciliar o conhecimento técnico com técnicas modernas de gestão. Nesse contexto a Engenharia de Confiabilidade torna-se uma boa aliada, se utilizada para dominar o conhecimento relativo aos itens que precisam ser geridos.

Para atingir o objetivo, foram estabelecidas as seguintes metas intermediárias:

- Realização de revisão da literatura relativa aos temas;
- Identificação de possíveis variáveis em trabalhos das áreas de conhecimento que poderiam compor um modelo de decisão de substituição de ativos;
- Validação das variáveis encontradas por meio de aplicação de Painel de Especialistas;
- Elaboração de um modelo conceitual de substituição de ativos;
- Aplicação do modelo conceitual em um estudo de caso;
- Análise dos resultados.

1.2 Organização do Texto

A estrutura e organização do texto da dissertação estão definidas da seguinte maneira:

- Capítulo 1 – Introdução: apresenta o tema estudado, as justificativas, o objetivo e organização do texto;
- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica: reporta a pesquisa bibliográfica realizada e constitui o embasamento teórico dos estudos realizados, considerando os principais temas envolvidos no trabalho – Gestão de Ativos, Modelos Clássicos de Análise de Investimentos e Engenharia de Confiabilidade;

- Capítulo 3 – Método da Pesquisa: explicita o método utilizado e os passos de procedimento para atingir o objetivo proposto;
- Capitulo 4 – Resultados: apresenta os resultados obtidos, as variáveis encontradas, o Painel de especialistas, o Modelo Conceitual e o Estudo de Caso;
- Capitulo 5 – Considerações Finais: conclui as discussões e apresenta limitações e possibilidades de continuidade de pesquisa para o tema;
- Referências Bibliográficas: apresenta as obras consultadas para o desenvolvimento da dissertação.

Capítulo 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica está organizada em dois subitens, dedicados aos principais temas que constituem a base conceitual deste trabalho: 2.1–Gestão de Ativos e Modelos Clássicos de Análise de Investimentos, 2.2–Engenharia de Confiabilidade.

O tema Gestão de Ativos apresenta a discussão de práticas que otimizam a vida econômica dos ativos, melhoram a análise de tempo de substituição e tornam mais fácil a decisão de investir em aquisições ou implantação de projetos de forma eficiente e sustentável. Para tanto foi apresentada a Norma PAS-55 e seus pontos a serem seguidos pelas empresas que têm interesse em tornar a utilização de seus ativos mais eficiente. Ainda nessa sessão são apresentados os modelos considerados clássicos de análise de investimentos e vida econômica de ativos e projetos.

A segunda parte é dedicada ao tema Engenharia de Confiabilidade, que engloba os conceitos técnicos de funcionamento de máquinas e equipamentos e informações teóricas de gestão de manutenção e padrões de falhas que tem como objetivo fornecer arcabouço teórico necessário para tornar possível o atendimento de todos os requisitos necessários para satisfazer as funções requeridas pelos ativos.

Em Gestão de Manutenção são tratados os conceitos separadamente de manutenção corretiva, preventiva, preditiva e detectiva, enquanto que em Análise Convencional de Falhas são apresentadas as funções de Confiabilidade, de Mantenabilidade, de Disponibilidade além dos padrões de falhas, dentre eles a Curva da Banheira.

2.1 GESTÃO DE ATIVOS E MODELOS CLÁSSICOS DE ANÁLISE DE INVESTIMENTOS

De acordo com Assaf Neto (2010), a definição de ativo é dada como sendo a representação de benefícios futuros esperados que são direito de seus detentores. No caso de uma máquina ou equipamento de produção, espera-se a receita proveniente do uso desse ativo na linha de produção de determinada companhia.

Os ativos podem ser classificados em circulantes e não circulantes, sendo ativos circulantes, de acordo com Gitman (2012) são aqueles que representam a parcela do investimento que circulam de uma forma à outra, durante a condução normal dos negócios.

Os ativos não circulantes são definidos, de acordo com Assaf Neto (2010) como sendo todos os bens de permanência duradoura, destinados ao funcionamento normal da sociedade e do seu empreendimento, assim como os direitos exercidos com essa finalidade.

Os ativos físicos são ativos não circulantes e representam prédios, máquinas, veículos, equipamentos e etc., e no trabalho serão abordados sob o ponto de vista da gestão econômica de ativos que consiste em planejamento estratégico, dentro de uma corporação que tem o objetivo de maximizar indicadores de desempenhos dos ativos e minimizar os custos decorrentes do ciclo de vida desses bens.

Segundo Davies et al. (2011), a definição de gestão de ativos é dada por práticas e atividades sistemáticas e coordenadas através das quais uma organização administra de forma sustentável e ótima seus ativos e sistemas de ativos, sua *performance*, riscos e gastos inerentes à seus ciclos de vida com o objetivo de atingir seu plano estratégico e organizacional.

Em Cesca (2012), apresenta-se a gestão econômica responsável por diversas funções, dentre elas, a previsão de tendências de demandas de serviços, previsão de tendências de custos de manutenção e operação dos ativos, a administração financeira de capital, estratégias de aquisição de ativos físicos, substituição de equipamentos em operação, inovação tecnológica e obsolescência de ativos e análise de risco de produção e confiabilidade das condições de operação dos equipamentos.

De acordo com Hastings (2010), a gestão econômica de ativos é uma área que consiste em fornecer recursos e conhecimento para auxiliar no planejamento de aquisições (substituições), manutenções e descarte de ativos físicos. Portanto, trata-se de uma área distinta da de operações, assim como da área de manutenção , ou seja, a gestão econômica de ativos é uma área bem mais abrangente, pois nela ocorrem atividades que são exercidas por diferentes áreas.

Assim se verifica que as atividades e responsabilidades da gestão econômica de ativos podem impactar em diversos departamentos de uma empresa (departamento de manutenção, financeiro, contábil e engenharia). Assim sendo, ela não se resume em um único departamento em uma empresa, mas na união de outros, de tal maneira que áreas de finanças, engenharia, contábil e comercial trabalham em conjunto como sendo um novo departamento (CESCA, 2012). Dependendo da dimensão da empresa em questão pode haver a existência de um departamento responsável pela gestão econômica dos ativos, porém por ser algo considerado novo, isso pode ocorrer apenas em grandes empresas ainda.

A integração possível entre os departamentos para ocorrer a gestão econômica de seus ativos pode vir a ocorrer da seguinte maneira:

O departamento financeiro seria responsável pelo orçamento dos projetos, o de engenharia pelas operações e manutenções a serem executadas nos ativos físicos, o departamento contábil em relação às tributações referentes para cada ativo e, por último, o departamento comercial cuidando dos contratos.

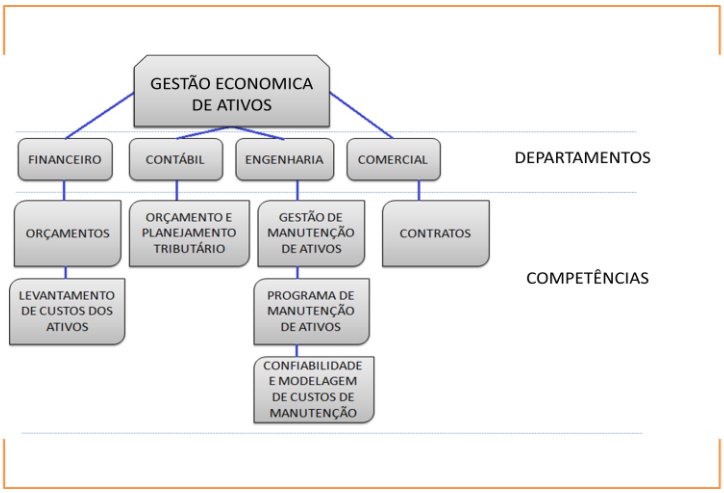


Figura 1: Gestão Econômica de Ativos em uma Organização

Fonte: Produção Própria

Como pode ser visto na Figura 1, a integração dos departamentos das empresas viabiliza a gestão econômica de ativos. O trabalho de Cesca (2012), apresentadas principais etapas a seguir:

- Identificação das despesas recorrentes do ativo; isto é, avaliação e comparação dos gastos com manutenção e aquisição de equipamentos em relação às receitas.

- Avaliação das condições de operação e manutenção dos equipamentos. Para isso, é necessário checar se os equipamentos estão operando nas condições adequadas, e se a produção é consistente com a capacidade produtiva dos equipamentos. Além disso, verificar se as manutenções ocorrem, de fato, como o planejado.

- Modelagem dos custos: Nesta etapa é necessário modelar os custos de operação e manutenção ao longo do tempo, de modo que seja possível realizar previsões destes custos.

- Monitoração e revisão: Convém sempre monitorar os custos dos ativos e analisar se a modelagem foi bem sucedida. E se não foi, realizar alterações, de modo que uma nova modelagem seja adequada ao comportamento dos custos de manutenção e operação dos ativos.

- Descarte: Com o passar dos anos, conforme os custos de manutenção e operação forem aumentando, pode existir a ocorrência da necessidade de substituir os equipamentos. Além desta situação, como é apresentado em Cesca (2012), deve ser observado que a substituição pode ocorrer por razões de outra natureza, tais como tecnológicas, regulatórias, contratuais, etc.

Internamente às organizações, a gestão de ativos passa a sofrer alterações no que diz respeito ao seu *status* estratégico, passando de ser apenas uma alternativa à gestão de manutenção praticada pelas companhias para ser encarada como importante gerenciadora de oportunidades e restrições.

Outro ponto importante no que diz respeito à Gestão econômica de Ativos no ambiente industrial é o fato de muitos equipamentos serem operados em ambientes que possuem normas regulatórias e ainda fornecem serviços à parcela de mercado que demanda qualidade. Dessa forma, de acordo com Hoskins et al. (1998) é necessária a existência de uma política de gestão de ativos que garanta a permanência de condição satisfatória na infra estrutura.

Portanto, para a aplicação da gestão econômica de ativos nas empresas é necessário ter um bom conhecimento dos ativos físicos. Para isso, torna-se necessário o conhecimento desde a localização destes na empresa, como os valores de mercado atuais e futuros, e, além disso, quais suas utilidades para a empresa, as atuais condições de operação, o tempo de campanha de cada um deles, o tempo esperado em que devem continuar em funcionamento pleno, manutenções futuras e custos e, por último, inovações tecnológicas que estão para surgir em relação aos ativos.

A decisão de adquirir um ativo ou substituir um existente não deve ser tomada apenas em seu valor de aquisição, mas sim por meio do custo do ciclo de vida do ativo em questão (CESCA, 2012).

Segundo Pintelon et al. (1992), a gestão de manutenção equipamentos industriais é importante, mas possui sua função financeira relativamente negligenciada. Os objetivos da manutenção é maximizar a disponibilidade do ativo em uma condição de operação permitindo a quantidade e qualidade desejada da produção.

Em Hoskins et al. (1998), apresenta a importância de políticas de gestão de ativos para assegurar que os ativos estejam em nível de *network* satisfatório para atender altos requisitos de confiabilidade e existência mínima de falhas com um custo mínimo.

A importância da gestão de ativos para setores intensivos em ativos imobilizados, isto é, altamente dependentes de plantas e equipamentos industriais que requerem alta confiabilidade é destacada em Palombo (2005), onde são elucidados pontos em que as empresas pertencentes à indústria energética devem maximizar o valor de longo prazo de suas plantas e redes de transmissão e distribuição dentro de determinados limites de segurança e regulamentação.

O trabalho de Roe E Mba (2009) apresenta a o conceito de *Asset Health Management (AHM)*, que seria uma gestão dos ativos com princípios apoiados nos protocolos de manutenção conhecidos (preventivo, preditivo, reativo, baseado na condição e centrado na confiabilidade). A importância da gestão de ativos recai sobre não para máquinas e equipamentos de alto valor, mas também para a eficiência geral dos equipamentos, segurança do sistema, rentabilidade e retorno do investimento, apoiados por monitoramento de condições e tecnologia de teste de desempenho.

Em Katicic e Susnjar (2011), a gestão de ativos físicos (seleção, manutenção, supervisão e substituição) desempenha papel chave na *performance* e lucratividade de qualquer indústria as quais as operações de ativos físicos representam atividades principais. Boas práticas de gestão de ativos podem assistir gestores a tomar

decisões, otimização de processos e minimização de custos totais durante o ciclo de vida do ativo.

Ferreira Fecha (2012) estudou a implementação da especificação PAS-55 no departamento de operação e manutenção dos sistemas de operação da distribuição de energia elétrica de Portugal.

> "... O cumprimento dos requisitos da PAS 55 permite à empresa assegurar que os básicos da gestão de ativos são cumpridos, eliminando as barreiras para o melhoramento contínuo dos processos da empresa..." (Ferreira Fecha, 2012, p. 74)
>
> "... A gestão de ativos é a evolução natural da operação e monitoramento dos ativos das organizações, tendo em vista a otimização dos ativos..." (FERREIRA FECHA, 2012, p.74)

Ainda sobre a indústria energética, devido ao alto custo de aquisição e elevadas despesas de manutenção (CESCA, 2012), o trabalho desenvolvido por Chinedu et al. (2014) que desenvolve um *framework* de gestão integrada de ativos para plantas de geração de energia renovável, demonstrando que o aumento do tempo de inatividade, a baixa produção de energia, elevado custo das operações de manutenção e reparação, que são atribuíveis a uma má gestão de integridade ativos, pode ser mitigado com gestão integrada de ativos sustentável.

Grussing (2014) destaca o papel da gestão de ativos na minimização os custos de ciclo de vida relacionados às atividades, garantindo níveis de desempenho em relação à condição, manutenção, segurança e capacidade dos ativos, tendo como objetivos identificar a grande variedade de abordagens para a construção de gerenciamento de ciclo de vida, revisão de benefícios e desafios para propor uma estrutura para apoio às decisões.

Tal evolução apresenta a necessidade de idealização e consolidação de padrões normativos que tratam a gestão de ativos com detalhamento de estruturação, ferramentas gerenciais e métodos que estão focados em gestão de ativos ou sistemas de ativos, como por exemplo, a especificação PAS-55.

2.1.1 Publicly Avaiable Specification – PAS – 55

O dilema de uma companhia em relação à manutenção de seus equipamentos industriais passa pelas opções de realizar manutenção de um ativo em danificado, ou adquirir um ativo novo para substituí-lo, e para isso é necessário conhecer os custos envolvidos em cada uma das etapas do projeto de investimento/substituição, ou seja, os custos de aquisição, operação, manutenção e descarte, de modo que a gestão econômica de ativos consiga passar uma visão global de todos os custos e auxiliar na tomada de decisão de uma empresa.

Logo, de acordo com Cesca (2012), o custo compreendendo todas as fases é chamado de custo de ciclo de vida, em inglês *life-cycle cost* (LCC), o qual consiste na metodologia para estimativa de custos reais dos ativos e também para gerir a vida econômica dos mesmos.

Por esses motivos, nas empresas do setor energético, foi criado um conjunto de normas e especificações, chamado de PAS-55, com o intuito de facilitar a execução de etapas necessárias para implementar modelos de gestão econômica de ativos.

De acordo com a Abraman – Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos, foi criado no ano de 2009 o *Global Forum on Maintenance and Asset Management – GFMAM*, com sede em Zurique, passo importante para a globalização e consenso no que diz respeito à práticas de gestão de ativos, pois viabiliza o trabalho em conjunto de associações de Gestão de Ativos para desenvolver e padronizar normas, processos e publicações e processos de certificações.

A PAS-55 é um procedimento técnico com 28 pontos que tem por objetivo estabelecer e aperfeiçoar o sistema de gestão para todos os tipos de ativos físicos nas companhias, pois segundo a Associação Brasileira de Manutenção, a norma define a gestão de ativos como sendo a aplicação de atividades sistemáticas e coordenadas, através da qual uma organização realiza a gestão, de forma otimizada e sustentável, de seus ativos e sistemas de ativos e sua *performance* associada, riscos e custos ao longo do seu ciclo de vida com o objetivo de alcançar seu planejamento estratégico.

Cada parte da seleção de ativos é identificada, como se fosse uma única coisa, focando no risco que o ativo ou a seleção de ativo representa para todo o sistema.

Os custos associados ao sistema são analisados para determinar o ativo ou a seleção de ativos presentes para a empresa em geral. Para uma empresa se tornar

sustentável, condições de adequações devem ser fornecidas para o trabalho contínuo em direção à excelência.

Dessa forma, os benefícios principais da gestão de ativos otimizada, segundo a Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos incluem:

- Desempenho melhorado e controle de distribuição de produto ou serviço com as normas exigidas;
- Soluções de segurança, meio ambiente e saúde melhorados;
- Crescimento otimizado e retorno em investimentos;
- Planejamento a longo prazo, sustentabilidade e confiança no desenvolvimento;
- Aderência às limitações de orçamento;
- Conformidade legal, regulamentar e estatutária;
- Gestão de governança corporativa e risco melhorado e um mandato claro para ajustes;
- Tomadas de decisão;
- Uma reputação corporativa melhorada devido ao aumento de valor para as partes interessadas, melhor negociabilidade para produtos e serviços, alcance e superação das expectativas dos clientes, e mais;
- Processos eficientes e efetivos na cadeia de suprimentos;
- Clara demonstração de desenvolvimento de sustentabilidade sobre ciclos de vida de ativos.

A aplicação prática da Norma é apresentada pela Figura 2, onde a Gestão de Ativos e o Escopo da Norma PAS-55 são divididos em níveis de aplicação.

Figura 2: Níveis de Gestão de Ativos e Escopo do PAS-55

Fonte: Pragma Academy (2014)

Como pode ser visto na Figura 2, a gestão de ativos, em seu primeiro nível diz respeito às atividades de aquisição das máquinas, operação, mantenabilidade e descarte. O segundo nível diz respeito ao gerenciamento desses ativos quanto à otimização dos custos envolvidos, melhoria de desempenho e gestão de riscos. Enquanto que no terceiro nível, é papel gerencial cuidar para que o investimento seja otimizado quanto a seus resultados e tenham a sustentabilidade planejada.

Acima da pirâmide está localizada a Gestão da organização. Tal segmento tem como função estabelecer as metas organizacionais e estratégicas da empresa para que a Gestão de Ativos seja aplicada com o intuito de se obter tais resultados.

Em Gestão de Ativos, utiliza-se os modelos que são tradicionalmente considerados para tomadas de decisão com relação à substituição de ativos, ampliação de capacidade ou ainda apenas para simples aquisição de ativos e implementação de projetos. Nessa sessão são apresentados os principais modelos utilizados e, como alguns necessitam uma taxa de desconto é apresentado, também, a definição e o cálculo do custo de capital.

2.1.2 Método *Payback*

O método de *Payback* consiste na determinação do tempo que é considerado necessário para recuperar o dispêndio realizado em dado investimento por meio dos fluxos incrementais líquidos promovidos pelo investimento. Este método não leva em consideração a existência de uma taxa de desconto, ignorando dessa forma o custo de oportunidade e possível variação no poder de compra da moeda em vigor. O *payback* descontado é assim chamado quando passa a considerar uma taxa de juros, dessa forma melhorando a análise do investimento. De acordo com Assaf Neto (2010) essa ferramenta é interpretada frequentemente como importante indicador do nível de risco de um projeto de investimento, pois quando maior for o prazo para a recuperação financeira do investimento, mais arriscado é considerado este. A decisão de aceitar ou não determinado investimento depende do prazo estabelecido pela empresa e de qual momento econômico a empresa esta inserida, pois em tempos de maiores incertezas econômicas os períodos de *payback* aceitáveis pelas empresas reduzem bastante.

Como restrições do método de *Payback*, pode-se imputar o fato de não levar em conta as magnitudes dos fluxos de caixa e sua distribuição nos períodos que antecedem ao período de *payback* (ASSAF NETO, 2010), o método não leva em consideração os fluxos de caixa que ocorrem após o período de *payback* (ASSAF NETO, 2010). Essas restrições são contornadas utilizando o método descontado, em que se passa a considerar uma taxa de desconto.

Em razão de sua simplicidade e apelo intuitivo, geralmente esse método é utilizado por grandes empresas para avaliar projetos de baixo valor, enquanto que por pequenas empresas é utilizado para avaliar a maioria dos projetos. De acordo com Gitman (2012), a principal fragilidade do período de *Payback* está no fato de que o período adequado de *payback* nada mais é que um número determinado de forma subjetiva, não pode ser especificado à luz do objetivo de maximização de riqueza, pois não se baseia no desconto de fluxos de caixa para determinar se agregam ao valor da empresa.

Os modelos a seguir utilizam como um dos conceitos base para a apuração dos valores para tomada de decisões, o valor do dinheiro no tempo, isto é, a diferença de valores que ocorre com as grandezas monetárias quando se considera períodos de tempo. Em virtude disso, será apresentada a taxa mínima de aceitação, assim como sua participação na contabilidade do custo médio ponderado de capital das empresas.

A forma como se considera essa taxa mínima de aceitação (TMA) recai no fato de que tanto acionistas quanto credores exigem uma remuneração mínima de seus recursos investidos em uma empresa. No caso dos acionistas o custo de capital incorrido é seu custo de oportunidade, isto é, o quanto de retorno é exigido no mínimo, em detrimento ao risco inerente à atividade. Os credores, por sua vez, esperam receber um prêmio pelo financiamento da unidade produtiva. A seguir serão discutidas mais detalhadamente as variáveis que compõe o Custo de Capital, assim como Custo de capital de terceiros, custo de oportunidade e suas respectivas metodologias de cálculo, essenciais para o entendimento da formação da TMA (Apêndice A).

2.1.3 Valor Presente Líquido – VPL

O Valor Presente Líquido de um projeto de investimento é encontrado subtraindo o investimento inicial de um projeto do valor presente de suas entradas de

caixa, descontadas à taxa de custo de capital da empresa. De acordo com Gitman (2012) é considerada uma técnica sofisticada de orçamento de capital, pois descontam de alguma maneira os fluxos da empresa a uma taxa especificada, que consiste no retorno mínimo que um projeto precisa proporcionar para manter inalterado o valor de mercado da empresa.

O calculo do VPL é realizado da seguinte forma:

$$VPL = \sum_{t=1}^{n} \frac{FC_t}{(1+r)^t} - FC_0 \qquad (1)$$

Em que:

VPL: Valor Presente Líquido;

n: Período de Tempo;

r: Taxa de Desconto;

FC_0: Fluxo de caixa ocorrido no momento t=0, podendo ser um empréstimo, financiamento ou Investimento;

FC_t: Valor de entrada ou saída para cada intervalo de tempo.

O investimento será aceito caso o VPL encontrado seja maior ou igual a zero, em caso de VPL negativo, então o projeto de investimento deve ser evitado. No caso de projetos excludentes, isto é, onde a implantação de um causa automaticamente a rejeição de outro, o projeto a ser escolhido é aquele que possui maior valor presente líquido.

O método de VPL exige a definição prévia da taxa de desconto a ser utilizada nos vários fluxos de caixa, sendo que na verdade o VPL não apura diretamente a rentabilidade do projeto e sim seu resultado econômico (riqueza gerada) descontando todos os fluxos de entradas e saídas de caixa de um investimento por uma taxa de desconto mínima aceitável pela empresa (ASSAF NETO, 2010).

2.1.4 Taxa Interna de Retorno – TIR

A taxa interna de retorno de um projeto de investimento é a taxa de desconto que faz com que o VPL de uma oportunidade de investimento seja igual a $0

(Gitman, 2012). Isto é, é a taxa de retorno anual composta que será obtida caso decida investir no projeto em análise e de fato receber as entradas e realizar as saídas de caixa previstas. Utilizando dessa forma as mesmas variáveis que a Equação (1), acrescentando apenas a TIR – Taxa Interna de Retorno se obtém:

$$\sum_{t=1}^{n} \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} = FC_0 \qquad (2)$$

Para critérios de decisão se aceita o projeto de investimento caso a TIR seja maior do que o custo de capital, enquanto que para valores de TIR menores que o custo de capital, rejeita-se o projeto de investimento. Pressuposto básico desse método de avaliação de investimentos é que todos os fluxos intermediários de caixa do projeto sejam reinvestidos à mesma taxa de retorno obtida no investimento.

2.1.5 Taxa Interna de Retorno Modificada – MTIR

Caso não seja possível o reinvestimento dos fluxos intermediários de caixa do investimento em questão, o retorno esperado altera-se, podendo dessa forma modificar também sua atratividade econômica. Uma forma de se incorporar à analise varias taxas de desconto é por meio da utilização da taxa de retorno modificada que incorpora em seu calculo a taxa de reaplicação e taxa de captação de recursos. O calculo da MTIR é dado da seguinte forma:

$$MTIR = \left[\frac{\sum_{j=0}^{n} R_j(1+i_r)^{n-1}}{\sum_{j=0}^{n} |C_j|/(1+i_c)^j}\right]^{\frac{1}{n}} \qquad (3)$$

Sendo que:

n: É referente ao período de tempo;

R_j: Representa os fluxos de caixa positivos;

i_c: Taxa de captação de recursos;

i_r: Taxa de reaplicação de recursos;

C_j: Representa os fluxos de caixa negativos.

Essa forma de avaliação nos indica que um projeto de investimento não é apenas dependente de seus fluxos de caixa, mas também de sua taxa de reinvestimento (ASSAF NETO, 2010). Isso indica que diante de cenários econômicos diversos existem diferentes resultados para projetos que podem não apresentar mudanças significativas em seus fluxos de caixa, porém as oportunidades de reinvestimento e os custos de captação de recursos podem apresentar modificações significativas nas taxas de retorno dos investimentos.

2.2 ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Segundo Miranda de Oliveira (2014), a definição de confiabilidade é a probabilidade de um ativo ou produto desempenhar de maneira satisfatória sua função, sob condições de operação estabelecidas em um período de tempo pré determinado, sendo uma medida importante para a manutenção em virtude de sua relação com o risco de parada de produção devida à falta de disponibilidade de um equipamento. Em Dias (1996), confiabilidade é ilustrada por quatro definições, com pouca ou nula variação de sentido:

- "Capacidade de um item desempenhar uma função requerida, sob condições especificadas, durante um intervalo de tempo";
- "Probabilidade de um produto comportar-se adequadamente, sob determinadas condições de operação, em um dado período de tempo";
- "probabilidade de um item satisfazer uma função requerida, nas condições fixadas, por um período de tempo estabelecido";
- "Sua capacidade expressa por uma probabilidade de funcionar corretamente (cumprir a missão requerida) por um período de tempo estabelecido em condições ambientais e operacionais especificadas".

O papel da engenharia de confiabilidade é assegurar que os ativos possuam baixo custo de ciclo de vida com qualidade, que execute suas funções (sendo essas cada vez mais complexas) com o mínimo de tempo utilizado, máxima segurança e máxima disponibilidade com máxima produtividade (Figura 3).

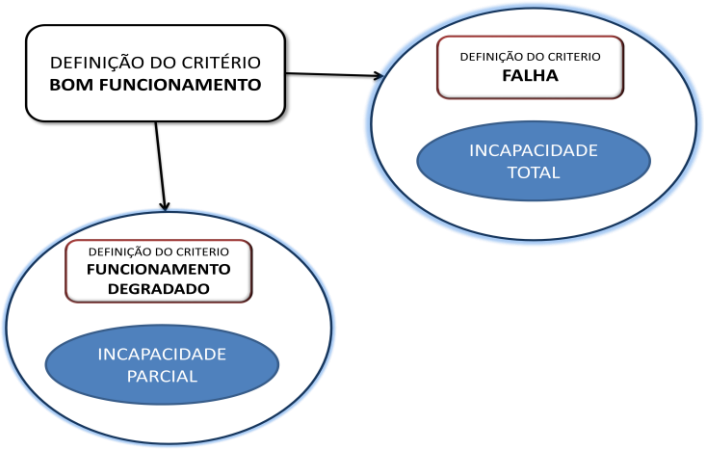


Figura 3: Definições de Critério e Funcionamento de Ativos

Fonte: Produção Própria

Na Figura 3 é ilustrado que o bom funcionamento de um produto é caracterizado pela qualidade de execuções das funções para as quais o mesmo foi projetado e desenvolvido. A partir da definição do critério de bom funcionamento do produto derivam-se o critério de falha e funcionamento degradado do produto que se referem, respectivamente, à incapacidade total ou parcial de executar funções.

Em Simonetti et al. (2009) a Engenharia de Confiabilidade possui como principal objetivo estabelecer, através de modelos estatísticos, o tempo no qual um sistema estará disponível, informação fundamental tanto para a proposição do tempo de garantia de um determinado produto quanto para a gestão da manutenção de um ambiente fabril.

Em Batista e Lima (2013) apresenta a confiabilidade de um componente, equipamento ou sistema podendo ser definida como a probabilidade de seu funcionamento isento de falhas, durante um período de tempo pré-determinado, sob condições de operação estabelecidas. E então, define-se como falha o término da capacidade de um item desempenhar uma função requerida.

No trabalho de Dias (2002) é explicitado o conflito existente entre manutenção e confiabilidade, isto é, para garantir os níveis de confiabilidade, adia-se a

manutenção, gerando problemas ambientais, sociais e econômicos. Apresenta a idéia de gestão de manutenção, e para sistemas complexos são exigidos a conciliação entre técnicas de gestão com conhecimento técnico.

De acordo com Duek e Rosa (2003), em um mundo de constantes avanços tecnológicos, equipamentos tornam-se obsoletos pouco tempo após conquistarem sua fatia de mercado. Entretanto, a aquisição de itens de valor elevado deve contemplar um período de operação segura e eficiente ou um "lucro operacional" de igual monta, apesar da obsolescência inevitável.

Em Sellitto et al. (2002) a MCC – Manutenção Centrada na Confiabilidade é apresentada como foco do trabalho, porém é identificado que apesar de confiabilidade ser reconhecida e bem aplicada em projetos de produtos, o mesmo não acontece quando o assunto é manutenção industrial. Um dos motivos avaliados pelo trabalho é que os modelos utilizados para modelagem de planejamento de manutenção são muito rigorosos para serem aplicados, e as empresas estão familiarizadas apenas a intervenções de curto prazo.

Porém já existem algumas empresas que introduziram duas práticas consideradas desejáveis: a integração da operação e da manutenção, que é necessária para a correta modelagem e o uso da manutenção como alternativa estratégica aumentando a capacidade de oferecer serviços e produtos ao mesmo tempo em que se reduzem os custos de mão de obra e materiais que se utiliza nas intervenções.

Simonetti et al. (2009) apresenta a importância da otimização da utilização da manutenção para acompanhar as modernizações ocorridas nas linhas de produção das empresas que atendem às exigências de dos clientes e dos mercados cada vez mais competitivos que estão inseridas. Assim como a engenharia de confiabilidade como estando fortemente baseada em ajustes de modelos estatísticos, resultando em informações chave para tomadas de decisões, sendo dessa forma considerada ferramenta estratégica para empresas.

Em Araújo (2010), a manutenção preventiva e corretiva de máquinas e equipamentos é considerada um alto ponto de redução de custos e melhoria de produção, aumento da vida útil dos maquinários e processos com conseqüente aumento de confiabilidade do processo.

Outro ponto importante da engenharia de confiabilidade que deve explorada pela gestão de ativos é o principio de sustentabilidade, um dos pilares desse trabalho. A gestão de ativos deve cuidar para que as decisões sejam baseadas em

princípios de sustentabilidade e a engenharia de confiabilidade sugere que o funcionamento dos sistemas de ativos seja mais eficiente para evitar não apenas prejuízos econômicos de paradas inesperadas, mas também prejuízos ambientais em caso de desperdícios provenientes de ineficiências produtivas.

Nesse quesito, Campos e Lima (2012) apresentam a contribuição da gestão estratégica de manutenção para a sustentabilidade, assim como práticas sustentáveis à manufatura enxuta, princípios sustentáveis em plantas industriais, buscando eliminar má utilização de ativos apresentados pelo sistema como desperdícios por paradas inesperadas. A aplicação de manutenção busca principalmente evitar esses contratempos, principalmente se o desperdício estiver sendo causado por defeito nos equipamentos, mantendo a continuidade do processo produtivo bem como o princípio da sustentabilidade.

> "A manutenção estratégica sugere sistemas e metodologias para que empresas possam maximizar a eficácia do equipamento, estabelecer um sistema completo para maior vida útil dos equipamentos, implantar a manutenção em vários departamentos dentro da empresa, envolver os funcionários, melhorar a função e o projeto do equipamento de produção." (CAMPOS E LIMA, 2012, p.48)

Em Batista e Lima (2013) tem-se a compreensão dos processos e relações para a análise de disponibilidade de sistemas reparáveis e entender as condições que levam ao aumento da produtividade com qualidade e segurança ambiental desejáveis. Isto é, a abordagem da manutenção centrada em confiabilidade como forma de gestão de manutenção voltada ao aumento da competitividade, justificando investimentos futuros para modelagem de outros processos produtivos de complexidade similar ou superior.

Segundo Cirqueira (2013), a gestão de projetos aplicados à parada de manutenção na empresa influencia de forma significativa o resultado da produção. O planejamento deve primar pela excelência dos serviços realizados e pela eficiência e eficácia da execução, visto que os riscos deste tipo de serviço são de grande responsabilidade, porém quando os trabalhos são executados de maneira correta, verifica-se incremento no retorno financeiro das companhias.

Em Oliveira e Lima (2014), a discussão e análise da função de manutenção é apresentada como estratégia empresarial, suas abordagens, estruturas e ferramentas; seus benefícios sobre decisões quanto ao investimento em equipamentos e políticas de conservação. Ainda de acordo com seu trabalho, o retorno almejado pelos proprietários

das empresas varia em função do uso do investimento na planta. O planejamento, pesquisa e escolha do equipamento e as políticas de produção e manutenção influenciarão a análise do custo do ciclo de vida do equipamento ou planta, pois a efetividade global dos equipamentos (*Overall Equipment Effectiveness*– OEE) tem como consequência o aumento de valor de mercado da empresa e conseqüente a agregação de valor aos investidores.

Segundo Miranda de Oliveira (2014), há benefícios na implantação de uma célula de Planejamento e Controle de Manutenção (PCM) em uma planta fabril. E dentre os conceitos relativos a planos de manutenção que são apresentados, defende-se a utilização de métodos estatísticos para análise de equipamentos de alta criticidade para gerar dados que nortearão as tomadas de decisões estratégicas da empresa.

2.2.1 Gestão de Manutenção

O trabalho de manutenção deve ser orientado para que os quesitos de Engenharia de Confiabilidade sejam atendidos, de forma que a utilização das plantas industriais seja o mais eficiente possível.

A gestão de manutenção pode ser definida como um arcabouço de procedimentos técnicos e administrativos destinados ao favorecimento do desempenho das funções requeridas de ativos, no caso deste trabalho de máquinas e equipamentos.

Em Lopes Carvalho (2008) a definição de manutenção é dada como o conjunto de ações destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual possa executar sua função requerida e seu propósito é estender a vida de um equipamento ou, no mínimo, aumentar o tempo médio até a próxima falha.

Existem estratégias para amenizar o impacto econômico da manutenção de acordo com o comportamento do item em questão. Sendo elas: Manutenção Corretiva, Preventiva, Preditiva, Detectiva. Tais modelos de manutenção devem ser permeadas considerando o conceito de manutenção produtiva total, pois pode não ser viável, do ponto de vista econômico, a realização de ações de manutenção com uma freqüência muito alta. Assim, o custo devido a uma provável falha e o custo de manutenção devem ser balanceados de forma a se obter um ponto ótimo (LOPES CARVALHO, 2008).

Manutenção Corretiva

Manutenção corretiva é aquela que é realizada após a falha do equipamento e é a mais comum. Apresenta impacto mais significativo no orçamento do que as demais estratégias de manutenção, além de constituir um gasto e uma parada não prevista na produção. Em Araújo (2010), a manutenção corretiva é classificada como sendo "processamento de ações de manutenção como uma resposta após defeitos inesperados".

Manutenção Preventiva

De acordo com Batista e Lima (2013), a manutenção preventiva teve sua origem nos Estados Unidos e foi introduzida no Japão em 1950. Até então, a indústria japonesa trabalhava apenas com o conceito de manutenção corretiva, após a falha da máquina ou equipamento, mas isso representava um custo e um obstáculo para a melhoria de qualidade.

Consiste em serviços de reparo planejados para prevenção de ocorrências de paradas inesperadas no equipamento. Essa estratégia engloba programas de inspeção, reparos e reformas. Quanto mais intensiva a utilização dessa estratégia, há uma redução importante na necessidade de manutenções corretivas, tendo inclusive seus gastos previstos no plano de orçamento da empresa. Araújo (2010) considera a manutenção preventiva como uma evolução do conceito anterior, e a divide em dois momentos:

- 1º período – substituição de componentes da máquina antes da quebra, baseado em acompanhamentos históricos.
- 2º período – inspeção – desmonta o equipamento e inspeciona empiricamente os componentes e dependendo do estado deste, decide-se pela sua substituição ou não.

Manutenção Preditiva

Estratégia que possui como fim a análise do estado do equipamento de maneira periódica de forma a determinar a realização de serviços de reparo mediante os resultados obtidos pelas análises que avaliam o estado do equipamento por meio de medições e análises sem a necessidade de interrupção no funcionamento do ativo.

Segundo Miranda de Oliveira (2014), a antecipação do estado do equipamento por meio de estudos não invasivos (medições e análises que não causam paradas no funcionamento da máquina ou equipamento), gera uma grande vantagem dessa forma de manutenção e favorece o planejamento de preventivas relativas ao tratamento de algum desvio indicado por seus resultados e evita a realização de paradas desnecessárias por preventivas programadas para períodos em que a atuação do equipamento ainda se mostraria satisfatória em resultados de preditivas, dispensando tratamento.

Araújo (2010) caracteriza manutenção preditiva pela monitora de alguns parâmetros selecionados dos equipamentos em funcionamento, para determinar o momento e que certas partes deverão sofrer manutenção.

Manutenção Detectiva

A manutenção detectiva consiste na realização sistemática de inspeções no intuito de se encontrar e reparar falhas ocultas, não evidentes ao operador ou ao mantenedor. Esse tipo de problema é comumente encontrado em equipamentos que se encontram em estado de *stand-by* ou reserva.

Porém, Dias (2002) apontou para o fato de que a adoção de sistemas para a gestão da manutenção oferece resultados mais promissores do que os obtidos com pela manutenção que é centrada no reparo – MCR. Dias (2002) apresenta como destaque atual a manutenção centrada na Confiabilidade – MCC e manutenção para produtividade total – MPT.

Por fim, apresenta-se o conceito de Manutenção Produtiva Total que é visto em Araújo (2010), sendo que através deste conceito, tomam-se ações capazes de impedir que as manutenções substanciais sejam necessárias, ou que simplesmente ocorram paralisações da produção por falhas nos equipamentos.

> "Através dos cuidados básicos, como o respeito às condições de uso, assegurando a limpeza e o conhecimento adequado dos operadores sobre o equipamento, implanta-se a Manutenção Produtiva Total". (ARAÚJO, 2010, p. 58)

Com enfoque nesse tipo de manutenção, foi desenvolvido o conceito de manutenção produtiva total, conhecido pela sigla TPM (*Total Productive Maintenance*), que inclui programas de manutenção preventiva e preditiva.

Em Fogliato e Ribeiro (2009) as melhorias na gestão de manutenção dos ativos se traduzem em vantagem competitiva por meio de adoções de programas de manutenção, como por exemplo, a Manutenção Produtiva Total (TPM) e a Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM).

De acordo com Batista e Lima (2013), as empresas tentam garantir sua competitividade e perpetuação no mercado através de adoção da prática da RCM. Essa metodologia é usada para determinar os requisitos de manutenção de qualquer ativo físico em seu contexto operacional, analisando as funções e padrões de desempenho, isto é, como ocorre a falha, qual sua causa, o que acontece quando a falha ocorre e o que deve ser feito para preveni-la. Tal prática aumenta a disponibilidade, permitindo o aumento da produção.

Em Lopes Carvalho (2008), a manutenção é apenas uma das ferramentas utilizadas para garantir que a confiabilidade de um componente ou sistema seja satisfatória. Outras opções podem incluir o aumento da capacidade do sistema, utilização de redundâncias ou o emprego de componentes intrinsecamente mais robustos.

Em relação à Manutenção Produtiva Total (TPM), Batista e Lima (2013) diz que durante muito tempo, as indústrias funcionaram com o sistema de manutenção corretiva. Com isso, ocorriam desperdícios, retrabalhos, perda de tempo e de esforços humanos e conseqüentes prejuízos financeiros. A partir de uma análise desse problema, passou-se a dar ênfase na prevenção da manutenção, e na busca de maior eficiência da manutenção produtiva, surgiu a TPM.

De acordo com Oliveira e Lima (2014), dentre as estratégias que muito contribuem para essa agregação de valor, há consenso quanto à manutenção produtiva total (*Total Productive Maintenance*– TPM), a manutenção centrada em confiabilidade

(*Reliability Centred Maintenance*– RCM) e a gestão de ativos empresariais (*Enterprise Asset Management* – EAM), aponta a existência de correlação entre o nível e o ciclo de utilização dessas técnicas, assim como o impacto sobre o retorno esperado pelos proprietários da organização.

Além disso, de acordo com Lopes Carvalho (2008), a ação de não realização de um procedimento de manutenção pode ter como conseqüência um alto custo em caso de uma falha.

2.2.2 Análise Convencional de Falhas

A análise convencional de falhas de sistemas reparáveis estabelece o estudo de duas variáveis aleatórias: tempo entre falhas (*TBF*) e o tempo de reparo (*TR*).

As premissas para a abordagem clássica da gestão de manutenção é a consideração que após a ocorrência de uma falha será realizado um reparo imediatamente, e que esse reparo é capaz de levar o item falho (componente ou sistema) novamente a sua condição original de características e funcionamento.

De acordo com Lopes Carvalho (2008), a literatura refere-se a este conjunto de considerações através do termo "*as-good-as-new*" – Tão Bom quanto Novo.

Dessa forma, tem-se que a distribuição da variável aleatória "tempo até a falha" (*TTF*) será considerada igual à distribuição da variável aleatória "tempo entre falhas" (*TBF*).

A definição de variável aleatória está ligada à probabilidade, isto é, que não possui valores fixos. Toda variável que está associada a uma distribuição de probabilidade é considerada variável aleatória (SARTORIS, 2003). Dessa forma, valores passados, em cenários e situações que já se acabaram não são considerados como sendo uma variável aleatória.

Função de Confiabilidade

Lopes Carvalho (2008) define a confiabilidade de um componente, equipamento ou sistema como sendo a probabilidade de funcionamento isento de falhas durante um período de tempo pré-determinado, sob as condições de operação estabelecidas e define-se como falha o término da capacidade de um item desempenhar uma função requerida.

A teoria clássica da engenharia de confiabilidade se resume a considerar a condição de operação de um sistema ou de um equipamento isenta de falhas durante certo período de tempo. A falha é definida como término da capacidade de um item desempenhar sua função requerida (LOPES CARVALHO, 2008). Essa teoria considera a operação como sendo um experimento aleatório, em que se pode verificar dois estados: "operação" ou "falha"; utilizando-se do conceito de variável aleatória.

Função de confiabilidade e a "Curva da Banheira"

Seja considerado um item qualquer ou um sistema, em um determinado instante de tempo especificado $(t = 0)$, e então esse item ser observado até que seja verificada uma falha, pode-se considerar o tempo até a falha desse equipamento como T. O tempo até a falha T pode ser considerado uma variável aleatória contínua que possua alguma função densidade de probabilidade.

Como T não pode ser previsto e nem calculado por um modelo determinístico, tem-se o pressuposto de que máquinas e equipamentos operando sob mesmas condições de esforço e intensidade não apresentarão necessariamente as falhas no mesmo instante. Dessa forma há uma variável aleatória T – "Tempo até a falha" para quantificar a probabilidade de ocorrência de falha.

Assim tem-se que:

$$F(t) = P(T \leq t) \qquad (4)$$

Sendo que:

$F(t)$ é a Função Distribuição Acumulada de Falhas

Se o item não apresentou falhas em um tempo $T \leq t$, ele pode apresentar falha em $T > t$, dessa forma a Confiabilidade é definida por:

$$R(t) = P(T > t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (5)$$

Em que:

$R(t)$ é a Função de Confiabilidade

$F(t)$ é a Função Distribuição Acumulada de Falhas

$f(t)$ é a Função Densidade de probabilidade de falhas

Dessa forma, essa mesma Equação pode ser reescrita, fornecendo a Função de distribuição acumulada do tempo até a falha em termos da função de confiabilidade $R(t)$:

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad (6)$$

O parâmetro "*mean time to failure"*- Tempo médio até a falha (MTTF) – é o valor esperado da variável aleatória T, como segue:

$$MTTF = E[t] = \int_0^{+\infty} t\, f(t)dt \quad (7)$$

O Tempo Médio até a Falha (MTTF) pode ainda ser escrito em termos de confiabilidade, como na Equação a seguir:

$$MTTF = -\int_0^{+\infty} \frac{t\, dR(t)}{dt} dt = -t\, R(t)|_0^{+\infty} + \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (8)$$

Considerando que $\lim_{t\to\infty} tR(t) = 0$, chegamos à:

$$MTTF = \int_0^{+\infty} R(t)dt \quad (9)$$

De acordo com Lewis (1994), a velocidade de ocorrência de falhas pode ser expressa através do parâmetro taxa de falhas, isto é, sendo a análise de falhas um

processo interativo cujo sucesso depende da determinação das relações implícitas entre causa e efeito.

Dessa forma, tem-se uma variável chamada taxa de falhas instantâneas "$h(t)$" que pode ser definida em termos de confiabilidade "$R(t)$" e da função densidade de probabilidade "$f(t)$". Como segue:

$$h(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \qquad (10)$$

De acordo com essa função é adquirido o conhecimento do comportamento das falhas de um equipamento ou sistema ao longo de seu ciclo de vida, tal comportamento é conhecido como Curva da Banheira (Figura 4).

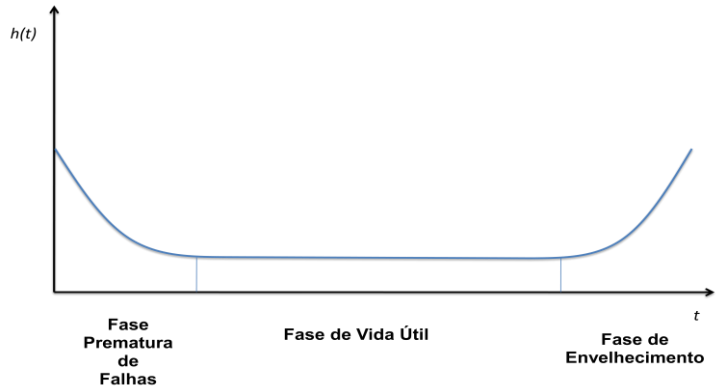


Figura 4: Curva da Banheira
Fonte: Produção Própria

De acordo com a Figura 4, essa curva apresenta três fases distintas do ciclo de vida, sendo: Falhas prematuras, vida útil e obsolescência. (LEWIS, 1994; LOPES CARVALHO, 2008).

Porém, em Lopes Carvalho (2008) é apresentado que a curva da banheira possui certas excentricidades dependendo do sistema ou ativo que é avaliado, demonstrando um comportamento diferente das falhas ao longo da vida útil do ativo, descrevendo dessa forma curvas com outro padrão, como é apresentado na Figura 5.

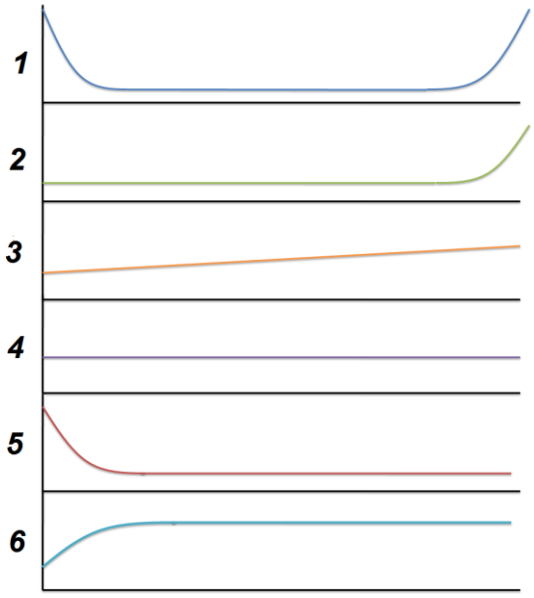


Figura 5: Padrão de Falhas
Fonte: Lopes Carvalho, 2008

A Figura 5 ilustra além do padrão de falhas conhecido por curva da banheira, os padrões que apresentam taxa de falhas constante ou com aumento lento seguido por um período de desgaste, padrões que apresentam crescimento lento sem apresentação do período de obsolescência, outro que pode apresentar baixa taxa de falhas no inicio da vida seguido por taxa constante de falhas, existem também ativos que apresentam taxas de falhas aleatórias e sistemas e ativos que apresentam taxa de falhas elevado no período prematuro e depois tende a se estabilizar em um valor constante. (LEWIS, 1994; Lopes CARVALHO, 2008).

Função Mantenabilidade

O desenvolvimento matemático da função de mantenabilidade conhecida como $G(t)$ se dá de maneira análoga para a função de confiabilidade. A função de mantenabilidade se relaciona à capacidade de reparo e quantifica a probabilidade de uma falha ser reparada até um tempo t previamente estabelecido (LOPES CARVALHO, 2008).

O tempo necessário para se realizar um reparo em um sistema ou equipamento pode ser definido como uma variável aleatória da mesma maneira que o

"tempo entre falhas". As funções distribuição acumulada de reparo ou função mantenabilidade$G(t)$ e densidade de probabilidade de reparo $g(t)$ são definidas da seguinte forma:

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} \qquad (11)$$

Da mesma forma que o "tempo médio até a falha" – MTTF, o "tempo médio até o reparo (*mean time to repair*)" – MTTR é definido assim como segue:

$$MTTR = E(T) = \int_0^{+\infty} t\, g(t)dt \qquad (12)$$

Onde T é a variável aleatória de tempo de reparo (TR).

Então, conclui-se que todas as expressões apresentadas anteriormente para modelagem de confiabilidade também são válidas para a modelagem de mantenabilidade por serem deduzidas de maneira análoga.

Função Disponibilidade

A disponibilidade *A* (*Availability*) mede a qualitativamente a proporção de tempo que um produto ou processo encontra-se em estado operativo, isto é, o somatório dos tempos de uso ativo e o tempo de espera (tempo do qual o equipamento não está em operação, mas está disponível para utilização imediata) (LOPES CARVALHO, 2008).

O conceito de disponibilidade torna-se o mesmo de confiabilidade, pois é definido pela probabilidade que o sistema funcione continuamente do tempo *0*até um tempo *t*.

De acordo com Lopes Carvalho (2008), esta situação não corresponde à realidade na grande maioria das vezes, então torna- se necessário o estudo dos estados que um sistema pode assumir e consequentemente, a sua disponibilidade.

Para a representação do estado de um sistema genérico, utilizamos a função X(t)*:*

$X(t) = 1$, *se o sistema está operando em tempo t*

$X(t) = 0$, *se o sistema não está operando em tempo t*

A probabilidade de que o sistema esteja em condição de operação no tempo t é dada pela função disponibilidade instantânea A(t) que é definida a partir da função X(t).

$$A(t) = P[X(t) = 1] \qquad (13)$$

Dessa forma é possível medir a probabilidade de um sistema ou ativo se encontrar indisponível no tempo t. Essa indisponibilidade é representada por U(t). Então, por raciocínio lógico, tem-se que;

$$A(t) + U(t) = 1 \qquad (14)$$

A variação da disponibilidade do instante *t* para o instante *(t+ ⊿t)* é expressa a seguir, ainda seguindo uma lógica análoga à função de disponibilidade:

$$A(t + \Delta t) = A(t) - \gamma\, \Delta t\, A(t) + \mu_r\, \Delta t\, U(t) \qquad (15)$$

Sendo que:

$A(t)$: Disponibilidade do sistema/ativo;

$U(t)$: Indisponibilidade do sistema/ativo;

γ : Taxa de falha desse sistema/ativo;

μ_r : Taxa de reparo do sistema/ativo;

$(\gamma \Delta t)$: Probabilidade do sistema/ativo falhar em um tempo *finito* Δt*;*

$(\mu_r \Delta t)$: Probabilidade do sistema/ativo ser reparado em um tempo *finito* Δt.

Se considerarmos uma situação limite em que a variação Δt tende a zero, então a Equação anterior pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d\, A(t)}{d\, t} = -\gamma\, A(t) + \mu_r U(t) \qquad (16)$$

Dessa forma, tem-se que:

$$A(t) = \frac{\mu_r}{\gamma + \mu_r} + \frac{\gamma}{\gamma + \mu_r}\, exp[-(\gamma + \mu_r)t] \qquad (17)$$

Como o valor do tempo tende ao infinito, então verifica-seque:

$$A(t) = \lim_{t\to\infty} A(t) = \frac{\mu_r}{\gamma+\mu_r} \qquad (18)$$

De acordo com Lewis (1994), dentro do período de vida útil de um ativo as taxas de falha γ e reparo $\mu_r$são aproximadamente constantes. Nestas condições, o tempo médio para reparo (*mean time to repair)* – MTTR seria o inverso da taxa de reparo e o tempo médio entre falhas (*mean time between failures)* – MTBF é o inverso da taxa de falhas. Dessa forma, torna-se possível a realização de um procedimento análogo em relação à disponibilidade $U(t)$:

$$A = \frac{\mu_r}{\gamma+\mu_r} = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR} \qquad (19)$$

Logo,

$$U = \frac{\gamma}{\gamma+\mu_R} \qquad (20)$$

A expressão anterior considera que o MTTR deve-se somente ao tempo efetivo de manutenção e não leva em consideração aspectos administrativos ou logísticos.

De acordo com Lopes Carvalho (2008), quando aspectos administrativos e logísticos são considerados define-se o termo disponibilidade operacional A_0 como segue:

$$A_0 = \frac{T_d}{T_d+T_i} \qquad (21)$$

Sendo que:

T_d: Tempo disponível do equipamento ou sistema;

T_i: Tempo indisponível do equipamento ou sistema.

Capítulo 3 - MÉTODO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é propor um modelo de avaliação de substituição de ativo que considere variáveis provenientes da Engenharia de Confiabilidade e Sustentabilidade, em consonância com a norma PAS-55 e seu escopo, que possui principal foco na otimização da utilização dos recursos imobilizados em ativos centrais nas atividades da companhia e na preocupação com questões sociais e ambientais.

Para atingir o objetivo proposto, foram estipuladas cinco etapas, apresentadas na Tabela 1, que explicita para cada uma delas, procedimento, objetivo e método utilizado**.**

Numero da Etapa	Procedimento	Objetivo	Método utilizado
I.	Revisão bibliográfica	Obter base teórica para a elaboração do trabalho	Revisão Bibliográfica nas bases de dados acadêmicas
II.	Identificação de Variáveis	Identificar variáveis na literatura que possam vir a compor o modelo proposto	Revisão Bibliográfica nas bases de dados acadêmicas
III.	Validação de Variáveis	Validar variáveis identificadas por meio de consulta a especialistas	Painel de Especialistas e Entrevistas
IV.	1. Aplicação de DEA	Obter as eficiências relativas para cada período de operação do ativo	Análise Envoltória de Dados (DEA)
	2. Elaboração do Fluxo Incremental	Obter os valores incrementais de eficiência do ativo novo *versus* ativo antigo.	Técnica de Fluxo Incremental de caixa aplicado às Eficiências
	3. Cálculo das Eficiências Presentes Líquidas	Obter as Eficiências presentes líquidas para cada período de maneira a determinar o ponto ótimo de Substituição	Taxa de desconto.
V.	Estudo de Caso	Aplicação do modelo proposto a um caso real	Aplicação do Passo IV em dados reais
VI.	Análise dos Resultados	Análise e discussão dos resultados obtidos	Avaliação do modelo proposto e considerações sobre suas características e avanços conceituais na sua utilização.

Tabela 1: Etapas de pesquisa

Fonte: Produção Própria

A Etapa I apresenta um estudo das áreas que fornecem base para a elaboração deste trabalho, de maneira a desenvolver os conceitos principais, identificar lacunas teóricas e estabelecer ligações. A partir de então, foi possível delimitar o escopo do trabalho e obter clareza a respeito da importância do seu objetivo principal.

Os temas pesquisados foram Gestão de Ativos, PAS-55, Engenharia Econômica e seus principais fundamentos, tais como problemas de Análise de Investimentos e Substituição de Ativos. Por fim, foi tratada a Engenharia de Confiabilidade e seus desdobramentos, tais como análise convencional de Falhas e Gestão da Manutenção. As palavras chave utilizadas foram: *Reliability, Reliability Engineering, PAS-55, Physical Asset Management, Maintenance Management, Maintenance Engineering, Economic Engineering, Replacement Analysis, Sustainability, Economic Sustainability.*

Na Etapa II, a partir dos trabalhos encontrados na literatura, foram pré-identificadas variáveis que poderiam ser consideradas na tomada de decisões sobre investimentos e/ou substituição de ativos.

Inicialmente, foram identificadas variáveis consideradas nas decisões de investimento e/ou substituição de equipamentos que são usualmente transformadas em valores monetários para aplicação dos modelos tradicionais. Um exemplo é o Índice de Paradas, que em análises tradicionais é representado pelo custo decorrente da parada.

Após essa fase, foram identificadas variáveis que poderiam ser consideradas em análises de substituição de ativos, mas que usualmente não são incluídas nos modelos tradicionais. Isso ocorre por sua natureza técnica (confiabilidade, mantenabilidade, disponibilidade), ou por sua natureza qualitativa (socioambiental), o que dificulta a mensuração em unidades monetárias.

A etapa III consistiu na validação técnica dessas variáveis, por meio do envio de questionário para especialistas das áreas de gestão e engenharias. De acordo com Pinheiro et. al.(2013), o especialista representa uma perspectiva específica sobre o assunto, a ser integrada com outras visões sobre o tema, fazendo com que as variáveis possam ser utilizadas no modelo mediante sua aceitação.

O método utilizado foi o painel de especialistas e a ferramenta de coleta de dados é composta por questões pré-estabelecidas (Apêndice B), enviadas a 58 entrevistados atuantes nas áreas de gestão, engenharia mecânica e acadêmica, por e-mail. Foram recebidas 29 respostas que, compiladas, permitiram classificar as variáveis como relevantes ou não, em análises de substituição de equipamentos.

A etapa IV, composta por três passos – Aplicação DEA, Elaboração de Fluxo Incremental e Cálculo das Eficiências Presentes Líquidas - estabeleceu a sequência de procedimentos inerentes ao modelo teórico. O modelo teórico, apresentado em detalhe no Capítulo 4 – Resultados – combinou Análise Envoltória de Dados (DEA) com fundamentos de Engenharia Econômica, de maneira a permitir a consideração de variáveis não monetárias na decisão de substituição de equipamentos, objetivo do presente trabalho.

O primeiro passo de procedimento – Aplicação DEA – tem como objetivo calcular as eficiências relativas de cada período dentro de sua vida econômica, tanto do ativo novo, quanto do ativo a ser substituído.Os fundamentos teóricos são apresentados a seguir.

Análise Envoltória de Dados – DEA- *Data Envelopment Analysis*

De acordo com Fukuyama (2014), na Análise Envoltória de Dados (DEA), a programação matemática é aplicada para observar dados de *input* e *output* não apenas para medir a *performance* de eficiência, mas, também, para prover informações estratégicas para gestores de entidades, como bancos, hospitais, unidades de negócio, etc.

A DEA é uma técnica não-paramétrica que emprega programação matemática para construir fronteiras de produção de unidades produtivas, ou seja, *Decision Making Units* – DMUs (unidades tomadoras de decisões), entidades responsáveis por transformar múltiplos *inputs* em múltiplos *outputs* (Fukuyama et al, 2014), empregando processos tecnológicos semelhantes. Como pode ser visto em Périco et al (2008), a DEA é uma técnica de pesquisa operacional, que tem como base a programação linear e cujo objetivo é analisar comparativamente unidades independentes.

Tais fronteiras representam a eficiência relativa dos planos de operação executados pelas DMU´s e servem, também, como referência para o estabelecimento de metas eficientes para cada unidade produtiva. (CASADO E SOUZA, 2007)

A DEA possui algumas características básicas, que segundo Lins e Meza (2002):

a) Não é necessária a conversão das unidades em unidade monetária;

b) Os índices de eficiência baseiam-se em dados reais e não em formulações teóricas;

c) É uma alternativa e um complemento aos métodos da análise da tendência central e da análise custo e beneficio;

d) Os *outliers* não representam apenas desvios, mas servem como possíveis *benchmarks* a serem analisados pelas DMU´s.

De acordo com Soares de Mello et al. (2001), eficiência é um conceito relativo, pois compara o que foi produzido, dado os recursos disponíveis, com o que poderia ter sido produzido com os mesmos recursos.

De acordo com Marinho (1998), o padrão comparativo de eficiência de uma dada DMU é obtido por meio da revelação do desempenho das outras DMU´s sob análise, a referência não é obtida de modo teórico ou conceitual, mas pela observação da *best practice*.

Existem duas formas básicas de uma unidade considerada não eficiente se tornar eficiente. A primeira é reduzindo os recursos utilizados, mantendo constantes os produtos (orientação a *inputs*) e a segunda é fazendo o inverso (orientação a *outputs*).

A eficiência de uma DMU é calculada pela divisão entre o produto obtido e o insumo utilizado no caso de uma economia de um só produto e insumo. Porém, em uma situação realística, geralmente as DMU´s utilizam-se de vários insumos e não é difícil a obtenção de vários tipos de produtos, ou pelo menos mais do que um único produto. Dessa forma, para obter a eficiência de uma DMU com vários *inputs* e *outputs* deve-se calcular a razão entre a soma ponderada dos produtos e a soma ponderada dos insumos de maneira que:

$$E = \frac{u_1 y_{1j} + u_2 y_{2j} + \cdots}{v_1 x_{1j} + v_2 x_{2j} + \cdots} \qquad (22)$$

Sendo que:

v_1: Peso dado ao *Output*1;

u_1: Peso dado ao *Output*2;

x_{1j}: Total do *Input*1 da unidade j;

y_{1j}: Total do *Input*2 da unidade j.

De acordo com Soares de Mello et al (2001), existem importantes distinções na forma de avaliar a quantidade de insumos/produtos verificados em uma

DMU. Os chamados métodos paramétricos supõem uma relação funcional pré-definida entre os recursos e o que foi produzido. Normalmente, usam médias para determinar o que poderia ter sido produzido. Porém, outros métodos, entre os quais se inclui a DEA, não fazem nenhuma suposição funcional e consideram que o máximo que poderia ter sido produzido é obtido por meio da observação das unidades mais produtivas.

Dessa forma, segundo a equação (22), tem-se que a DMU mais eficiente é aquela que apresente melhor relação entre *output* ponderado e o *input* ponderado, estando, dessa forma, situadas sobre a fronteira de eficiência, enquanto as DMU´s consideradas ineficientes estarão situadas abaixo da fronteira de eficiência.

Na Figura 6, apresenta-se a curva de eficiência onde estão representadas as duas formas básicas de se atingir eficiência, citadas anteriormente. Na fronteira de eficiência definida por $f(x)$, a DMU considerada ineficiente P precisa "caminhar" até o ponto B para tornar-se eficiente reduzindo recursos. No entanto, se optar por aumentar os produtos, tem que "caminhar" até o ponto D.

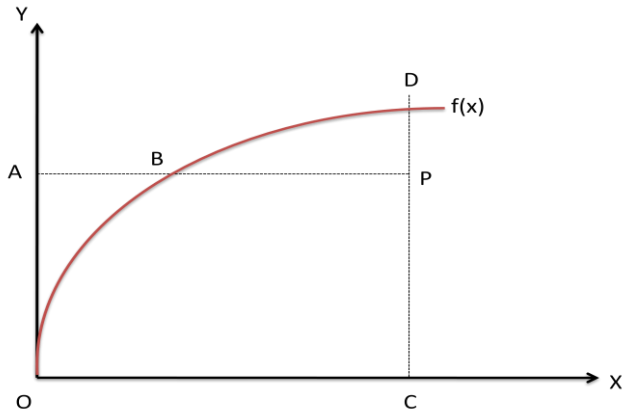


Figura 6: Curva de Eficiência

Fonte: Produção Própria

De acordo com o formato da fronteira de eficiência criada pela DEA, é possível identificar a possibilidade de refletir retornos de escala diferentes para cada situação, dependendo do modelo a ser utilizado. Os modelos distintos que representam diferentes retornos de escala são: (a) o modelo CCR, criado por Charnes, Cooper e Rhodes, em 1978 que utilizam fronteiras que pressupõem retornos constantes de escala; e para retornos variáveis de escala utiliza-se o modelo (b), chamado BCC, criado por Banker, Charnes, Cooper e Rhodes, em 1984.

O modelo CCR em sua fórmula fracionaria é apresentado a seguir:

$$Maxh_0 = \frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^{m} v_i x_{i0}} \quad (23)$$

Sendo que (5.0) é sujeito a:

$$\frac{\sum_{r=1}^{s} u_r y_{r0}}{\sum_{i=1}^{m} v_1 x_{i0}} \leq 1 \text{ para } j = 1, \dots, m \quad (24)$$

Onde:

$r = 1, \dots, S$

$i = 1, \dots, m$

$u_r, v_i \geq 0$

y_{rj}, x_{ij} : São os *Outputs* e *Inputs* conhecidos da *j*-ésima DMU.

h_o: Valor ótimo para solucionar o modelo, sendo que $(0 \geq h_0 \geq 1)$, dessa forma, quando $h_0 = 1$ há eficiência máxima. Essa variável não sofre influencia de unidades de medida.

O modelo BCC, como visto em Almeida (2006), possui retornos variáveis, isto é, DMU´s que possuem baixos *inputs* possuirão retornos crescentes de escala, enquanto aquelas com altos *inputs* apresentarão retornos decrescentes de escala. A formulação do modelo BCC orientado para o *output* é assim definida:

$$Min \sum_{i=1}^{n} v_i x_{ki} + v_k \quad (25)$$

Sendo que (10.3) está sujeito a:

$$\sum_{r=1}^{m} u_r y_{rk} = 1 \quad (26)$$

$$\sum_{r=1}^{m} u_r y_{rk} - \sum_{i=1}^{n} v_i x_{ki} - v_k \leq 0 \quad (27)$$

Sendo que v representa o tipo de retorno de escala da DMU que esta sendo analisada, enquanto que todas outras variáveis possuem mesma explicação que no modelo CCR, isto é, nas equações (23) e (24).

Ainda inserido na Etapa IV, o passo de procedimento - Elaboração de Fluxo Incremental- tem como objetivo elaborar um fluxo incremental com as eficiências obtidas no passo anterior, segundo os fundamentos teóricos são apresentados a seguir.

Análise Incremental de Fluxo de Caixa

A análise incremental de fluxo de caixa, ou apenas modo de fluxo incremental de caixa é utilizado para auxiliar a tomada de decisões em situações que envolvam dois ativos diferentes, como no caso de substituição de ativos.

Um ativo possui um fluxo de caixa que ilustra o resultado de suas operações no decorrer de sua vida econômica. Como exemplo, considere-se um ativo qualquer que possua o fluxo de caixa ilustrado na Figura 7.

Período (t)	Entradas ($)	Saídas ($)
0		- 30,00
1	10,00	
2	12,00	
3	15,00	
4	17,00	
5	20,00	
6	10,00	
7	7,00	
8	6,00	
9	8,00	

Figura 7: Exemplo de fluxo de Caixa
Fonte: Produção Própria

De acordo com esse fluxo de caixa, tem-se uma saída inicial de caixa decorrente de aquisição do ativo e, para cada período, tem- se entradas monetárias referentes à operação do ativo no decorrer da vida econômica. Tal fluxo de caixa pode ser representado graficamente, como ilustrado pela Figura 8.

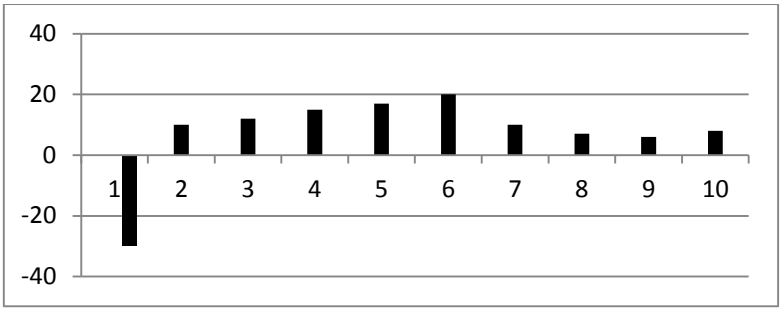


Figura 8: Diagrama de Fluxo de Caixa

Fonte: Produção Própria

As entradas de caixa são apresentadas em escala pelas barras acima do eixo horizontal e representam valores positivos decorrentes da vida econômica do ativo, enquanto as saídas são barras abaixo do eixo horizontal e representam fluxos de caixa negativos do ativo em questão.

Os fluxos de caixa dos ativos são importantes para fornecer dados suficientes para a aplicação dos modelos tradicionais de engenharia econômica citados no Capítulo 2. Para a consideração simultânea de dois ativos, ao mesmo tempo, é elaborada a análise incremental de fluxo de caixa.

Para a elaboração do fluxo incremental de caixa, utiliza-se o fluxo de caixa do primeiro ativo (Ativo A), combinado com o fluxo de caixa do segundo ativo (Ativo B), conforme ilustrado pela Figura 9**.**

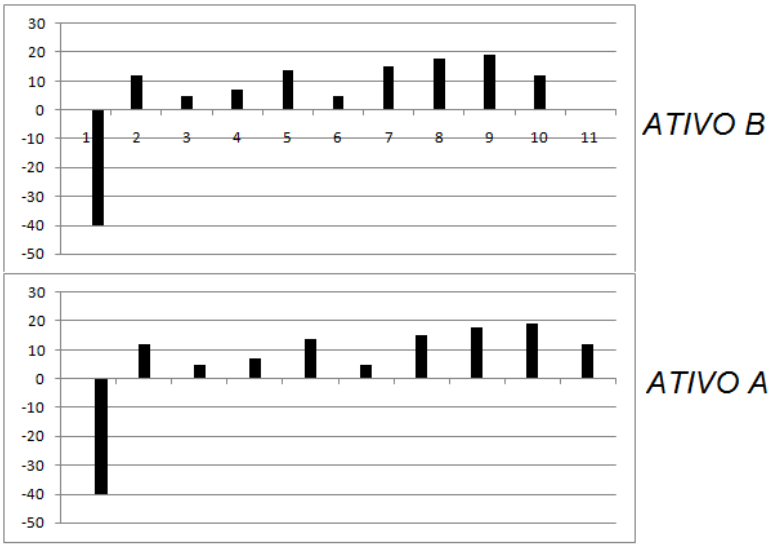


Figura 9: Análise de Fluxo Incremental de Caixa

Fonte: Produção Própria

O Fluxo incremental é calculado como ilustrado na Figura 9, subtraindo os valores dos fluxos de caixa do ativo A do ativo B, compondo assim o Fluxo de caixa incremental (Figura 10).

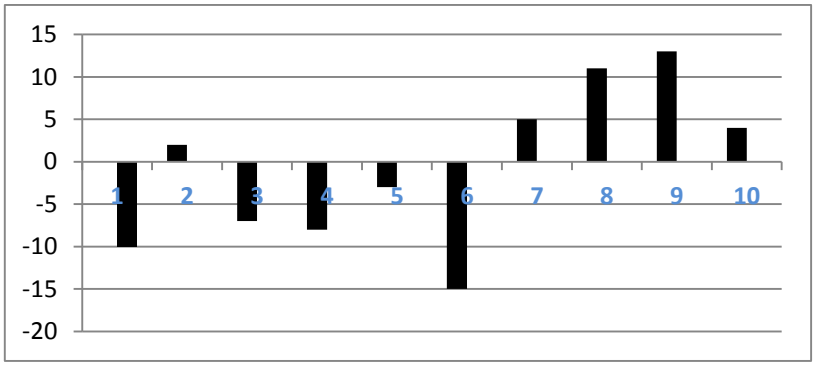


Figura 10: Fluxo Incremental

Fonte: Produção Própria

O fluxo incremental de caixa é calculado considerando as diferenças dos valores dos fluxos e é utilizado para aplicar ferramentas de Engenharia Econômica em problemas que consideram dois ativos ou projetos de investimento concorrentes pelo mesmo recurso.

Para o caso deste trabalho, o fluxo de eficiência incremental será calculado, aplicando-se a técnica apresentada, para os valores de eficiência relativa, obtidos com a aplicação de DEA, calculadas para várias suposições de tempo de substituição para o ativo em questão.

O ultimo passo de procedimento pertencente à etapa IV – Cálculo das eficiências presentes líquidas – é realizado aplicando-se cálculo de valor presente sobre as eficiências incrementais calculadas para cada uma das suposições de tempo de substituição para o ativo analisado, de maneira a obter informações sobre o melhor tempo para esta substituição. Como segue a Equação (28):

$$EFPL = EFL_1 + \frac{EFL_2}{(1+R)^{j+1}} + \frac{EFL_3}{(1+R)^{j+2}} + \ldots + \frac{EFL_n}{(1+R)^{j+(n-1)}} \qquad (28)$$

Sendo que:

$EFPL$: Eficiência Presente Líquida;

EFL: Eficiências Incrementais;

R: Taxa de desconto considerada;

j: Período de atividade.

A etapa V é composta pelo estudo de caso em que, utilizando dados reais de um ativo pertencente a uma planta de produção de ácido fosfórico para fertilizantes, determinou-se qual o momento ótimo de substituição desse equipamento por outro mais novo, de mesma especificação.

Por fim, a etapa VI consiste na análise dos resultados obtidos com a aplicação do método proposto e principais observações sobre sua aplicabilidade. São, ainda, discutidas particularidades da aplicação do modelo, assim como oportunidades de pesquisa posterior e ampliação da ideia apresentada.

A figura 11 apresenta, para melhor compreensão, o fluxograma que resume os Passos de Procedimento realizados no decorrer da execução do trabalho.

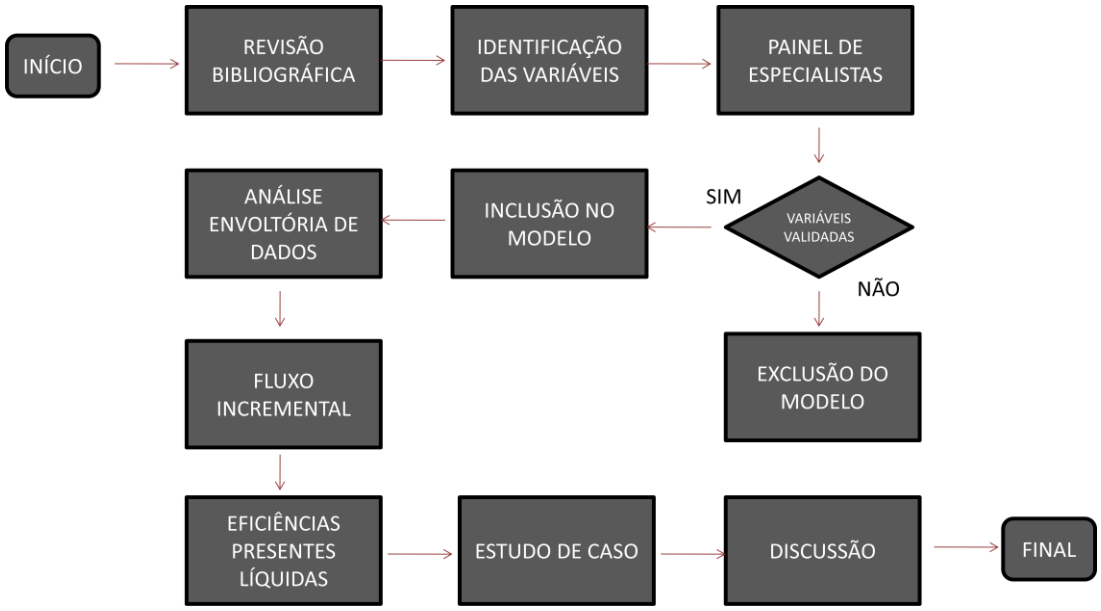


Figura 11: Fluxograma de procedimentos

Fonte: Produção Própria

O próximo capítulo é dedicado a apresentar os Resultados da pesquisa, compostos pela identificação de variáveis, validação de variáveis via Painel de Especialistas, elaboração de modelo conceitual e aplicação do modelo em estudo de caso.

Capítulo 4 – Resultados

O presente capítulo apresenta resultados e discussões resultantes do trabalho realizado de maneira detalhada. Inicia com os resultados da etapa II, que consistiu na identificação das variáveis na literatura, seguida da validação das variáveis pela aplicação do painel de especialistas (etapa III). Em seguida, será apresentado o modelo teórico de substituição de ativos (etapa IV) antes da aplicação do modelo em um caso específico de substituição de equipamento (etapa V).

4.1 – Identificação de Variáveis

A execução da etapa II utilizando-se as palavras-chave mencionadas no Método identificou variáveis que, por sua natureza qualitativa, não são usualmente consideradas em modelos clássicos de engenharia econômica.

É importante citar que não foram encontrados, na literatura, autores que classificam, em seus trabalhos, tais variáveis como informações a serem levadas em consideração em problemas de engenharia econômica. Porém, as novas exigências do mercado e de legislação impõem como imperiosa a ampliação do escopo de análise para a tomada de decisão, incluindo questões sociais e ambientais.

A Tabela 2 apresenta as principais variáveis encontradas na literatura seguidas de seus trabalhos.

Variável	Autor
Conhecimento para realizar manutenção	Alkaim (2003) Igreja Junior et al. (2005) Lima et al. (2012) Salgado (2008) Simonetti (2011) Souza (2008)
Risco de parada	Igreja Junior et al. (2005) Salgado (2008)
Índices de paradas para manutenção	Alkaim (2003) Igreja Junior et al. (2005) Lopes et al. (2009) Salgado (2008) Souza (2008)
Emissão de resíduos sólidos e gases	Allen (2002) Gungor (1999) King e Lenox (2001)
Segurança	Allen (2002) Carvalho e Menegon (2014) Del Guercio e Silva (2003) Duek e da Rosa (2003)
Confiabilidade	Del Guercio e Silva (2003) Duarte Filho e Marta Filho (2011) Duek e da Rosa (2003) Simonetti (2011) Souza (2008) Souza et al. (2011)

Tabela 2: Variáveis não financeiras

Fonte: Produção Própria

De acordo com a Tabela 2, as seguintes variáveis encontradas na literatura podem ser levadas em conta em análises de investimento e/ou substituição de ativos:

- Conhecimento para realizar manutenção: O domínio de maior conhecimento em manutenção implica em menor tempo de parada para manutenções (preditiva, corretiva e preventiva), e torna as manutenções mais eficientes de modo que as paradas inesperadas sejam mais raras;
- Risco de Parada: Quanto maior o risco de parada, maior a probabilidade de ocorrer falhas que acarretam em paradas na produção e surgimento de gargalos que acarretam quedas na produtividade e aumento de custos inesperados;

- Índices de paradas para manutenção: O conhecimento desses índices auxilia no planejamento da gestão dos ativos pela ótica da gestão de manutenção e pela ótica da substituição. A evolução desses índices indica se as manutenções estão sendo realizadas de forma satisfatória e se o equipamento se encontra em alguma fase da curva da banheira de senilidade, afetando sua confiabilidade.
- Emissão de resíduos sólidos e/ou gasosos: As emissões são tratadas pelos autores separadamente ou em conjunto, como em Allen (2002) que trata os riscos ambientais em conjunto, como poluição do ar, água e solo, ou como Gungor (1999) que possui maior foco em resíduos sólidos;
- Segurança: A segurança engloba questões sociais e ambientais em conjunto. Segundo Allen (2002) a segurança representa riscos ao meio ambiente, e em Del Guercio e Silva (2003) representa não apenas os riscos ambientais, mas também os sociais. Em Carvalho e Menegon (2014) a segurança possui foco social, pois aborda a segurança dos trabalhadores e operadores dos equipamentos e, ainda, Duek e da Rosa (2003) tratam a segurança como uma junção das questões humanas (sociais) e ambientais;
- Confiabilidade: Engloba questões de mantenabilidade e disponibilidade, denota a capacidade e o sucesso do equipamento em executar sua função de maneira plena.

Tais variáveis podem compor uma matriz de informações, em conjunto com variáveis usuais em projetos de investimento e/ou substituição, porém para a consideração ou não dessas variáveis, torna-se necessário a sua validação. O painel de especialistas foi a ferramenta utilizada para suprir esta necessidade, de acordo com a etapa III.

4.2 Painel de Especialistas

O painel de especialistas foi utilizado para validar as variáveis encontradas na literatura, que podem ser utilizadas em decisões de engenharia econômica. Tal instrumento, além de validar as variáveis, abriu a possibilidade dos especialistas opinarem e comentarem sobre as avaliações das variáveis com exemplos e justificativas.

O instrumento, na forma de questionário foi enviado para profissionais da área de gestão, engenharia de produção, engenharia mecânica, engenharia de confiabilidade e área acadêmica, selecionados por facilidade de contato e disponibilidade para participar do projeto. O Gráfico 1 apresenta o perfil de atuação profissional dos especialistas consultados.

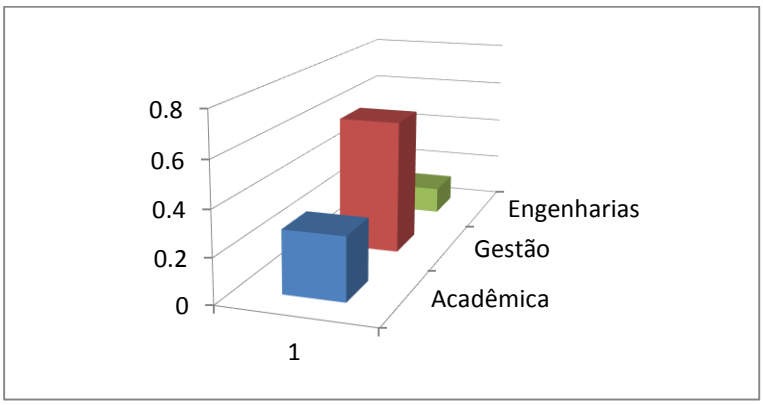


Gráfico 1: Atuação profissional dos especialistas

Fonte: Produção Própria

O Gráfico 1 ilustra a proporção dos especialistas entrevistados que responderam ao questionário. A importância de entrevistar profissionais de engenharias – Engenharia Mecânica e Engenharia de Produção – se deveu pelo conhecimento técnico das variáveis a serem validadas. Os profissionais da área acadêmica apresentam conhecimentos teóricos indispensáveis para opinar sobre a consideração de informações não usuais em problemas de avaliação econômica de alternativas.

A grande maioria dos profissionais entrevistados é atuante nas áreas de gestão, sendo consultores, analistas de projetos, diretores e gerentes. Seu conhecimento foi útil para identificar a necessidade e utilidade de considerar novas variáveis para decisões de substituição e aquisição de ativos.

O painel de especialistas foi dividido em duas partes, sendo que a primeira parte diz respeito à natureza das variáveis, enquanto que na segunda parte as variáveis encontradas na Tabela 2 foram tratadas individualmente. Segue em detalhe, cada uma das questões do questionário discutidas:

A questão 1.1 está relacionada tanto para análise de vida econômica quanto para análise de substituição de ativos. As definições de Confiabilidade e Disponibilidade foram apresentadas e foi perguntado a respeito da consideração ou não de variáveis dessas naturezas nas análises. Todos os especialistas entrevistados consideraram importante a consideração de variáveis dessa natureza em projetos de substituição e análise de vida econômica.

A questão 1.2 abordou a mantenabilidade separadamente, pois as diferentes técnicas de manutenção impactam no desempenho dos ativos, podendo causar impactos, como dito anteriormente, nos custos de produção. Todos os especialistas validaram a consideração das variáveis provenientes da gestão de manutenção como úteis em projetos de substituição de ativos e análise de vida econômica.

A questão 1.3 procurou validar a consideração de sustentabilidade nos modelos de análise de investimentos. Todos os entrevistados classificaram como importante sua consideração, porém os comentários e justificativas foram diversos quanto à principal motivação de se considerar variáveis dessa natureza em modelos. A grande maioria citou a responsabilidade social e ambiental das empresas, mas alguns citaram que a motivação se dá apenas em razão de se cumprir legislação local. Independentemente dessas divergências que possam ter ocorrido por diversos fatores, tais como área de atuação dos entrevistados, formação acadêmica ou cultura empresarial, todas as respostas foram a favor quanto a relevância de variáveis dessa natureza em projetos de substituição de ativos.

Na segunda parte do painel de especialistas, as variáveis encontradas na literatura foram tratadas individualmente em cada questão, mantendo o mesmo padrão da primeira parte do questionário, deixando-se espaço para comentários e justificativas por parte dos entrevistados.

A questão 2.1 trata do conhecimento em realizar manutenção em um equipamento e sua relevância nas análises de substituição e vida econômica. Todos os entrevistados foram favoráveis quanto sua relevância nas decisões, inclusive com alguns entrevistados dizendo que se leva em consideração tal variável, porém não existe

consenso em como medir ou incluí-la em modelos de decisões de investimento e/ou substituição de equipamentos.

A questão 2.2 tratou o risco de parada e a comparação entre o risco de parada de um equipamento novo em contraponto ao equipamento vigente. Todas as respostas foram positivas em relação a consideração dessa variável por sua relação direta com custos de manutenção e surgimento de gargalos na produção.

Na questão 2.3 os índices de paradas de manutenção foram abordados. Tais índices estão relacionados aos conceitos de manutenção corretiva, manutenção preventiva e manutenção preditiva e a comparação entre os índices de um equipamento a ser substituído com os índices esperados de um equipamento que possa vir a substituí-lo. Todos os entrevistados consideraram importante levar em consideração essas informações na tomada de decisões de substituição de ativos.

A questão 2.4 trata da emissão de gases de efeito estufa, emissão de carbono e emissão de resíduos sólidos. Todos os entrevistados foram favoráveis a considerar tais informações na substituição de equipamentos e na determinação de vida econômica de ativos. Como justificativa foram citados os custos de compensação ambiental, responsabilidade ambiental e social, escolhas entre ativos de maior eficiência energética, menor emissão e consequentemente menores custos. A preocupação com a geração de externalidades negativas também foi citada nas respostas dos entrevistados.

Finalmente, nas questões 2.5, 2.6 e 2.7 foram tratadas as variáveis de segurança para operadores e para proximidades (ambiental e social). Tais variáveis foram consideradas em separado pelo fato da possibilidade da existência de divergências quanto suas considerações. Como todos os entrevistados consideraram útil sua utilização em análises de substituição de equipamentos e determinação de vida útil, então foram agrupadas em apenas um parágrafo.

A aplicação do painel teve como resultado a validação de todas as variáveis identificadas. Um dos pontos mais relevantes, segundo os entrevistados, foi a mensuração dessas variáveis, pois apesar de serem consideradas importantes, usualmente não são consideradas, principalmente pela sua natureza qualitativa que dificulta, impossibilita ou até inviabiliza a sua transformação em unidades monetárias. Informação que corrobora a justificativa do presente trabalho e a importância de seu objetivo que é considerar essas variáveis em um modelo de análise de investimentos.

A Figura 12 resume o conjunto de variáveis que pode ser utilizado para a tomada de decisão de substituição, segundo os especialistas.

Figura 12: Conjunto de Variáveis Teóricas

Fonte: Produção Própria

Em seguida, é apresentado o modelo conceitual, composto pelas variáveis validadas em conjunto com as financeiras (tradicionais) – Figura 12 – e que servirá como base para a aplicação do estudo de caso.

4.3 Modelo Conceitual

Dado o objetivo do trabalho, foi formulado um modelo teórico de substituição de ativos, em que se considera um ativo a ser substituído – denominado ativo defensor – e um ativo candidato a substituto – denominado ativo desafiante –englobando as variáveis tradicionalmente usadas, as variáveis identificadas e suas naturezas qualitativa ou técnica.

4.3.1 Construção do modelo

As variáveis foram classificadas como *inputs* ou *outputs* para a composição do modelo. O modelo adotado para o cálculo da eficiência do ativo em cada período (modelo DEA) é o CCR, de retornos constantes de escala. Tal modelo foi adotado

em razão de apresentar menos empates, dado que as empresas buscam utilizar seus ativos tão eficientemente quanto possível durante toda sua vida econômica.

A orientação do modelo DEA escolhida é a orientação a *outputs*, pois se considera que a maximização dos benefícios seja mais importante, mantendo-se todos os *inputs* constantes.

Cada um dos *n* períodos de atividade do ativo são considerados como sendo uma DMU, de modo que as DMU´s passam a ser consideradas como apresentado na Figura 13.

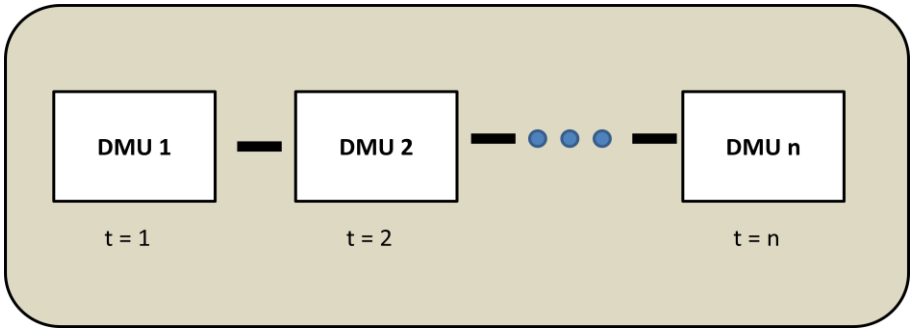


Figura 13: Representação Gráfica da organização das DMU´s

Fonte: Produção Própria

Como pode ser verificado na Figura 13, o ativo é considerado como sendo uma DMU diferente para cada período de tempo, do período t=1 a período t=n. Dessa forma, dadas as variáveis *input/output* consideradas, pode-se calcular as eficiências relativas do ativo, para cada tempo de vida útil.

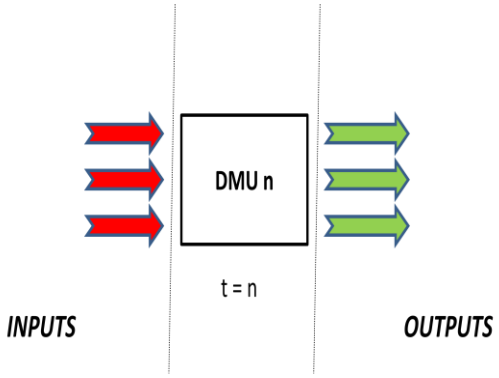


Figura 14: Representação Gráfica dos *Inputs* e *Outputs*

Fonte: Produção Própria

A Figura 14 ilustra a possibilidade da consideração de variáveis de natureza qualitativa, quantitativa, monetarizável ou não, de maneira que o cálculo das eficiências relativas seja realizado via DEA. As variáveis *input* e *output* propostas para o modelo conceitual estão organizadas no Quadro 1.

INPUTS
1. Riscos Relacionados a Segurança de Proximidades
2. Emissões de Resíduos
3. Riscos de Segurança para Operadores
4. Custos Gerais
5. Risco de Parada
OUTPUTS
1. Sucesso na execução da Função do Ativo (Confiabilidade)
2. Disponibilidade
3. Mantenabilidade
4. Produção
5. Valor Residual

Quadro 1: Variáveis Consideradas no Modelo Teórico

Fonte: Produção Própria

Os Riscos relacionados à Segurança de Proximidades são representados pelos riscos que a operação do equipamento possa representar para regiões urbanas ou rurais próximas, tais como cidades, vilarejos ou ainda fauna e flora local.

As Emissões de resíduos representam a contabilização de resíduos tanto sólidos quanto líquidos ou gasosos que possam ser decorrentes da operação da máquina; nessa variável também podem ser considerados os subprodutos que venham a representar algum ônus ambiental e/ou social para a sociedade.

Os custos gerais englobam todos os custos decorrentes da operação do ativo, desde custos de manutenção (de todas as naturezas, de acordo com Engenharia de Confiabilidade e Gestão de Manutenção) até custos de operação da máquina que possam ser decorrentes de sua atividade ou características de produção.

O risco de parada é o risco de o equipamento parar de forma não esperada, seja por defeito, seja por falha de planejamento ou ainda pela necessidade de manutenções corretivas.

O Sucesso na execução da Função do Ativo condiz com a Confiabilidade, que traduz como "potencial do equipamento em satisfazer suas qualidades de forma plena". Tal variável pode ser medida de diversas maneiras, de acordo com as características do ativo.

Disponibilidade deve ser considerada de modo que indique o quanto o ativo não apresentou indisponibilidade durante as campanhas, isto é, o quanto ele esteve apto a executar suas funções esperadas.

Mantenabilidade é a quantificação da probabilidade de sucesso em possíveis reparos que possam ser recorrentes durante a vida econômica do equipamento.

Produção nada mais é do que a Receita do ativo, o quanto se gera (ou se espera gerar) de fluxo de caixa positivo em conseqüência de sua operação.

Valor Residual é o valor recuperado do equipamento antigo. É o quanto se espera receber pelo ativo após seu descarte, seja em um mercado secundário de bens de capital ou ainda apenas pela venda como sucata. A consideração de valor residual na modelagem DEA é realizada período a período para que seja considerada como um *Output.*

A aplicação de DEA retorna eficiências relativas para cada período de vida econômica, nesse modelo, que podem ser representadas graficamente como na Figura 15.

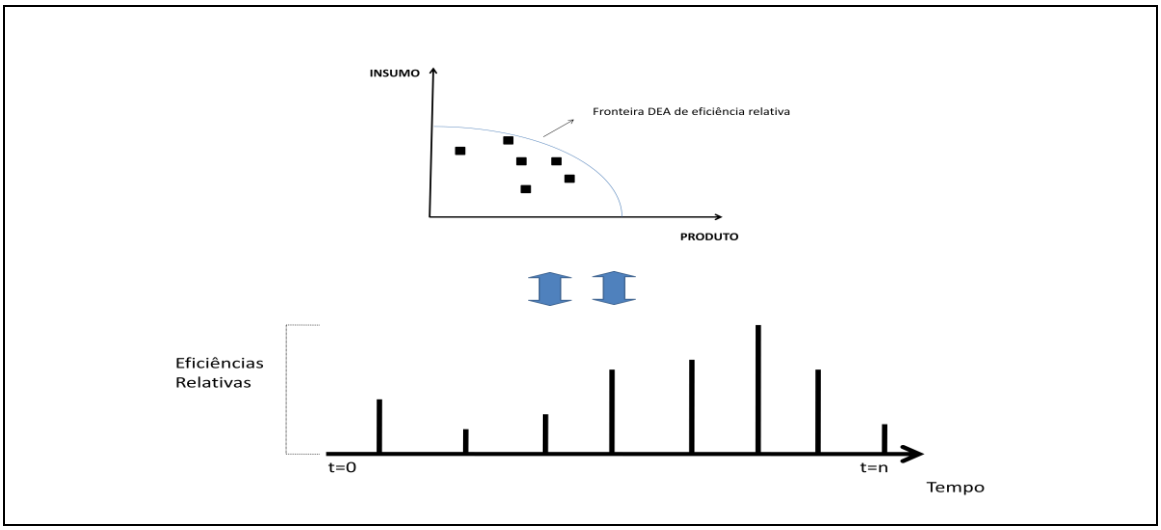


Figura 15: Eficiências relativas dos períodos do ativo

Fonte: Produção Própria

A Figura 15 ilustra as eficiências em um gráfico de linha do tempo como em um fluxo de caixa, sendo que cada traço representa a eficiência de cada período e a dimensão vertical dos traços representa o valor da eficiência, de modo que quanto maior a eficiência do período, maior será seu tamanho. Como as eficiências ocorrem em períodos diferentes, torna-se necessária a adoção de uma taxa de desconto para a comparação entre elas, pois as eficiências dos ativos representam receitas ou custos apesar da consideração de variáveis que não possuem caráter financeiro.

Essa taxa de desconto pode ser calculada de maneira análoga ao cálculo do custo ponderado de capital – Apêndice A- porém, por considerar variáveis de natureza não financeira, o cálculo certamente exigirá considerações adicionais. A composição de uma taxa de desconto para aplicação em fluxos compostos por variáveis econômicas, sociais e ambientais poderá ser de grande utilidade para outras aplicações e, certamente, exigirá estudos específicos. Para o caso deste trabalho, dado que se trata de um cálculo relativo entre dois fluxos de caixa, sua importância fica reduzida e, portanto, não será discutida. A taxa considerada foi de 1%.

4.3.1.1 Modelo de substituição por cálculo de Eficiências Incrementais

A aplicação de DEA no ativo defensor e no ativo desafiante retorna as eficiências para cada período de cada um dos ativos, como ilustrado na Figura 15.

A análise seguinte foi inspirada na análise incremental de fluxo de caixa, aplicada às eficiências dos ativos para avaliar a viabilidade da substituição para cada período por meio do cálculo das Eficiências Presentes Líquidas (EFPL). Para o ativo defensor, deverão ser consideradas as eficiências esperadas dos seus períodos restantes de vida econômica, enquanto que para o ativo desafiante, deverão ser consideradas as eficiências de todos os períodos de sua vida econômica. A Figura 16 ilustra a análise realizada no período 0 e 1 (inicial):

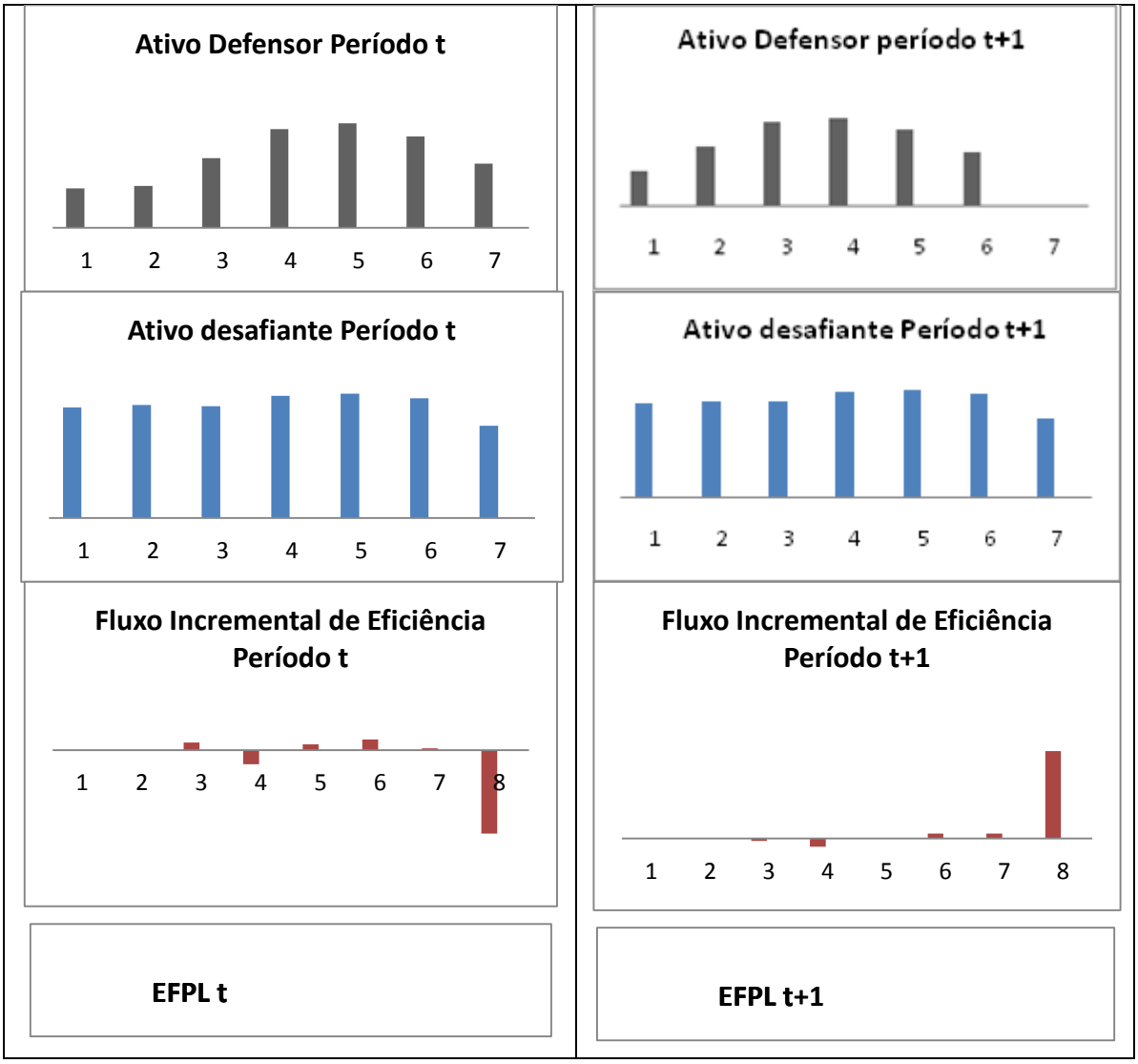


Figura 16: Cálculo de Fluxo Incremental de Eficiência de Eficiência Presente Líquida para os períodos t e t+1

Fonte: Produção Própria

A Figura 16 representa o cálculo do fluxo de eficiência incremental para cada período e a aplicação do cálculo de eficiência presente líquida. Em cada período o ativo defensor possui um período a menos de operação, enquanto que o ativo desafiante, por ser um ativo sem uso, possui todos os períodos completos. O fluxo incremental deverá ser calculado consecutivamente a cada período, sempre levando em consideração os períodos restantes de operação do ativo defensor em contraponto aos períodos de vida econômica do ativo desafiante.

A Figura 17 ilustra o cálculo da EFPL de um período:

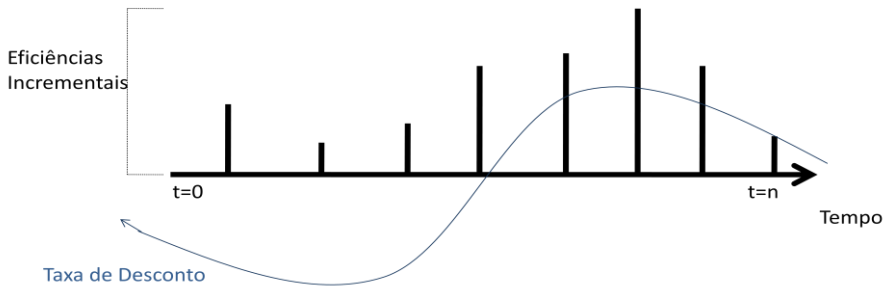


Figura 17: Representação da Eficiência Presente Líquida

Fonte: Produção Própria

A aplicação da taxa de desconto nas eficiências incrementais "Ativo desafiante *versus* Ativo defensor" do período 0 até o n-ésimo, fornece as EFPL, como ilustrado a seguir no Quadro 2:

Período	EFPL
0	$EFPL_{t=0}$
1	$EFPL_{t=1}$
2	$EFPL_{t=2}$
3	$EFPL_{t=3}$
4	$EFPL_{t=4}$
n	$EFPL_{t=n}$

Quadro 2: Eficiências Presentes Líquidas da Substituição

Fonte: Produção Própria

As EFPL dos n períodos em conjunto, podem ser ilustradas graficamente como na Figura 18.

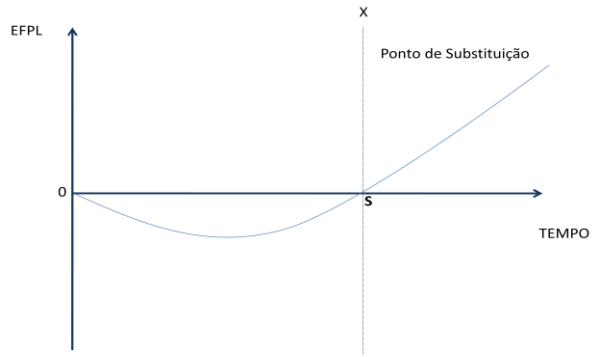


Figura 18: Eficiências Presentes Líquidas e Ponto de Substituição

Fonte: Produção Própria

O ponto S indica o ponto a partir do qual haverá eficiência líquida positiva, decorrente da substituição, pois indica o período em que o fluxo incremental de eficiência desse período, à taxa de desconto adotada, possui Eficiência Presente Líquida maior que zero.

4.4 Estudo de Caso

O estudo de caso avalia o tempo ótimo de substituição de um equipamento, por um outro de mesmas especificações novo.

4.4.1 Equipamento

O estudo de caso foi realizado analisando-se o ativo Filtro Esteira Horizontal EIMCO®, que faz parte de uma planta de produção de ácido fosfórico de uma empresa nacional. O papel desempenhado na planta de produção de ácido fosfórico pelo ativo em questão é separar o produto final (ácido fosfórico) do gesso (passivo ambiental).

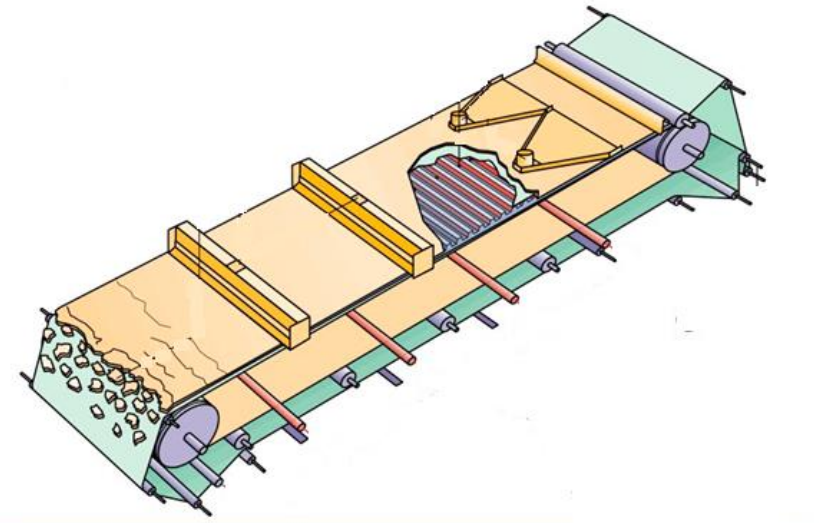


FIGURA 19: Filtro Esteira EIMCO

Fonte: Manual do Fabricante do Filtro Esteira Horizontal EIMCO

A alimentação do filtro ocorre com a massa a ser filtrada colocada uniformemente pela esteira no topo do equipamento, fazendo com que os problemas de formação da massa associados a sedimentação rápida sejam eliminados. O filtro é suportado por uma esteira de borracha e a desidratação da massa é realizada com a aplicação de vácuo abaixo da esteira de drenagem.

4.4.2 Variáveis

Como o equipamento novo possui as mesmas especificações do antigo, os valores para as variáveis do ativo novo foram considerados os mesmos do ciclo de vida do equipamento antigo. As variáveis coletadas são exibidas no Quadro 3, segundo classificação e tipo.

Variável	Tipo	Classificação
Horas operadas	Disponibilidade/Confiabilidade	*Input*
Produção realizada	Financeira	*Output*
Gesso formado	Ambiental	*Input* não controlado
Custos totais de manutenção	Financeira	*Input*
P_2O_5 Solúvel	Confiabilidade	*Input* não controlado

Quadro 3: Variáveis consideradas no estudo de caso

Fonte: Produção Própria

As variáveis utilizadas foram fornecidas por fontes ligadas ao departamento de confiabilidade e gestão de manutenção da empresa, totalizando 24 semestres de operação. Segue a explanação de cada uma delas:

- Horas operadas: São as horas operadas no período da máquina para cada período, é de natureza de confiabilidade e disponibilidade, e no modelo DEA é considerada como *Input*;

- Produção realizada: Produção realizada de ácido fosfórico no período e possui natureza financeira, sendo classificada no modelo como sendo um *Output;*
- Gesso formado: É a quantidade de gesso formado, considerada subproduto da produção de ácido fosfórico, é considerado um pesado passivo ambiental pelo setor, e como sua formação depende do tipo de matéria prima adotada no processo, foi classificada como *Input* não controlado;
- Custos totais de manutenção: São todos os custos de manutenção incorridos durante cada período de operação do equipamento, apesar de ser útil para a gestão de manutenção da companhia. Apesar de essa informação ser útil para a Gestão de Manutenção, optou-se por considerá-la como variável financeira, pois foi mensurada por unidades monetárias e foi classificada como sendo um *Input;*
- P_2O_5 Solúvel: É a concentração de P_2O_5, que não é aproveitada pelo processo de filtragem e se perde. Quanto maior a concentração de P_2O_5 Solúvel nos dejetos, menor é considerada a eficiência de filtragem. Tal variável indica os níveis de confiabilidade do equipamento, pois mede o quão eficiente sua função está sendo desempenhada. Foi classificada como sendo um *Input* não controlado.

O valor residual não foi considerado em virtude de não existir mercado secundário para a comercialização de equipamentos desse tipo.

4.4.3 Modelagem de DEA

Para aplicação da DEA foi utilizado o software Frontier Analyst® versão 4.2.0 da Banxia Software®, que examina e avalia o desempenho de unidades

comparáveis por meio da utilização de variáveis para comparar a eficiências relativas (Figura 20).

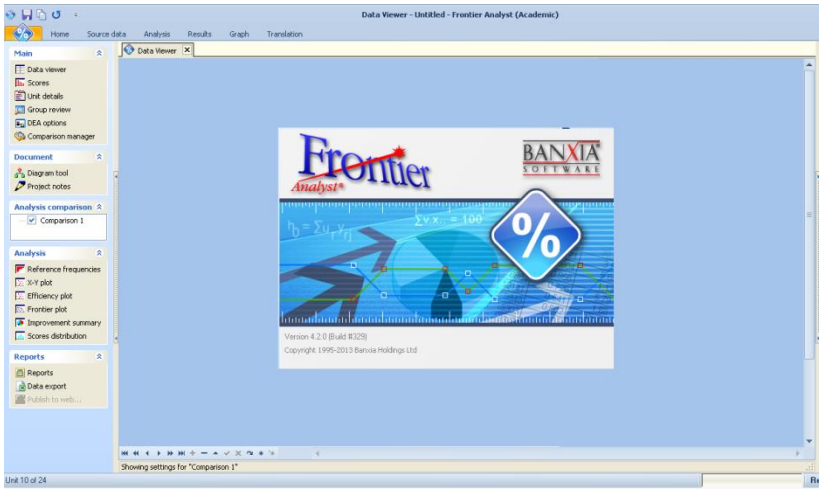


Figura 20: Interface do software Frontier Analyst®

Fonte: Banxia Software®

Para a obtenção das eficiências relativas de cada ano dos ativos (defensor e desafiante), foi aplicado o modelo CCR, com orientação a *Output*, obtendo-se como resultados os *scores* de eficiência para cada semestre, contidos no Quadro 4.

Semestre	*Score*	Semestre	*Score*
1	95,30%	13	100,00%
2	95,30%	14	100,00%
3	94,90%	15	100,00%
4	94,90%	16	99,10%
5	95,90%	17	98,60%
6	95,90%	18	98,70%
7	96,80%	19	100,00%
8	96,80%	20	100,00%
9	97,10%	21	97,20%
10	97,10%	22	98,10%
11	99,80%	23	97,90%
12	99,80%	24	92,70%

Quadro 4: *Scores* de Eficiência obtidos

Fonte: Produção Própria

A aplicação do modelo CCR retornou resultados com muitos empates, sendo dessa forma necessário aplicar a técnica de desempate chamada Fronteira Invertida, que consiste nas seguintes etapas:

- Transformação de *Inputs* em *Outputs* e vice-versa;
- Aplicação de DEA novamente;
- Cálculo do índice composto considerando a fronteira normal e a fronteira invertida.

Semestre	*Índice Composto*	Semestre	*Índice Composto*
1	48,90%	13	52,40%
2	48,90%	14	53,35%
3	47,45%	15	53,55%
4	47,45%	16	49,75%
5	47,95%	17	51,65%
6	47,95%	18	51,15%
7	49,10%	19	52,10%
8	49,10%	20	52,30%
9	48,55%	21	50,40%
10	48,55%	22	51,25%
11	51,80%	23	51,10%
12	51,80%	24	46,35%

Quadro 5: Índices compostos obtidos

Fonte: Produção Própria

O cálculo do índice composto é realizado a partir da média aritmética entre o índice da fronteira normal, considerada fronteira clássica (E_c) e o índice de fronteira invertida subtraído de um (1- E_i). A aplicação da técnica de fronteira invertida resultou no padrão de eficiência por período ilustrado no Gráfico 2:

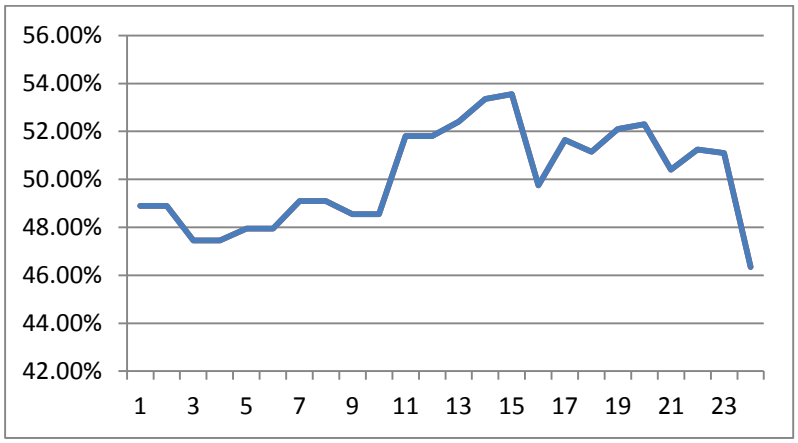


Gráfico 2: Padrão de Eficiência após aplicação da técnica de Fronteira Invertida

Fonte: Produção Própria

O Gráfico 2 ilustra as eficiências relativas para cada um dos 24 semestres, onde se verificou um aumento da eficiência ao longo do ciclo de vida do ativo até atingir o ápice no semestre 15, seguido de queda até o semestre 24, em que se verifica a menor eficiência relativa de todo o conjunto de períodos. Apesar de apresentar um padrão, os valores ainda oscilam bastante, sendo necessária a aplicação de uma técnica de suavização para se obter a tendência e/ou ciclo de eficiência do equipamento.

A aplicação de Médias Móveis Simples, descrita na Equação (29) abaixo foi aplicada para se obter a tendência dos *scores* de eficiência encontrados:

$$MMS_n = \frac{(V_1 + V_2 + \cdots + V_n)}{n} \qquad (29)$$

Sendo que:

n: Número de períodos considerados para o cálculo;

V: Valores utilizados para aplicação da Média Móvel Simples.

A média móvel é calculada por meio do somatório de um conjunto de valores numéricos, dividido pela quantidade de elementos somados. Ao considerar um novo valor no conjunto para o cálculo, é descartado o primeiro valor da série anterior, e assim sucessivamente, até que seja aplicado em todo o conjunto de valores disponíveis.

A aplicação da MM de quatro períodos foi aplicada no conjunto de eficiências que compõem o Gráfico 2**,** obtendo-se o seguinte padrão de eficiências relativas dos períodos, como pode ser visto no Gráfico 3.

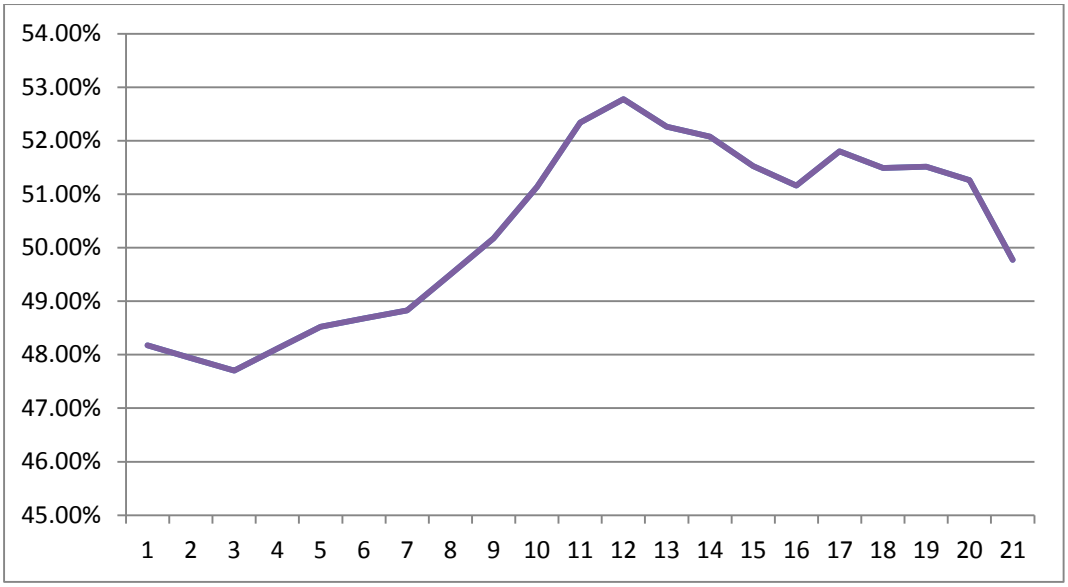


Gráfico 3: Padrão de Eficiência do Filtro esteira

Fonte: Produção Própria

No Gráfico 3, a aplicação de suavização por médias móveis simples de quatro períodos revelou um comportamento crescente das eficiências até quase metade de vida do equipamento, a partir do qual começa a apresentar comportamento decrescente até o último período.

4.4.4 Cálculo das Eficiências Incrementais

As eficiências incrementais foram calculadas para cada um dos períodos considerando-se o restante da vida econômica do ativo antigo (defensor) em contraposição ao ativo novo (desafiante), apresentadas no Quadro 6, Quadro 7 e Quadro 8.

TEMPO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	DEFENSOR	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498	
1	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	0,002	0,002	-0,004	-0,004	-0,002	-0,002	-0,007	-0,007	-0,010	-0,012	-0,004	0,005	0,002	0,006	0,004	-0,006	0,003	0,000	0,003	0,015	0,498
	DEFENSOR	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498		
2	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	0,005	-0,002	-0,008	-0,006	-0,003	-0,008	-0,013	-0,016	-0,022	-0,016	0,001	0,007	0,007	0,009	-0,003	-0,003	0,003	0,002	0,017	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498			
3	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	0,001	-0,006	-0,010	-0,007	-0,010	-0,015	-0,023	-0,028	-0,026	-0,011	0,003	0,013	0,011	0,003	0,000	-0,004	0,005	0,017	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498				
4	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,004	-0,007	-0,011	-0,014	-0,017	-0,025	-0,035	-0,033	-0,021	-0,009	0,008	0,016	0,005	0,006	0,000	-0,001	0,020	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498					
5	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,005	-0,009	-0,018	-0,021	-0,026	-0,037	-0,039	-0,028	-0,019	-0,004	0,012	0,010	0,008	0,006	0,003	0,014	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498						
6	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,007	-0,016	-0,025	-0,030	-0,038	-0,041	-0,034	-0,026	-0,014	0,000	0,005	0,013	0,007	0,008	0,018	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498							
7	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,013	-0,022	-0,034	-0,042	-0,043	-0,036	-0,033	-0,020	-0,010	-0,007	0,008	0,013	0,010	0,023	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498

Quadro 6: Fluxos de Eficiência Incremental dos Períodos 1 ao 7

Fonte: Produção Própria

TEMPO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	DEFENSOR	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498								
8	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,020	-0,032	-0,046	-0,047	-0,037	-0,034	-0,027	-0,017	-0,016	-0,004	0,008	0,015	0,025	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498									
9	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,030	-0,044	-0,051	-0,042	-0,036	-0,029	-0,023	-0,023	-0,013	-0,004	0,011	0,030	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498										
10	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,042	-0,048	-0,046	-0,040	-0,030	-0,025	-0,030	-0,020	-0,013	-0,001	0,026	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498											
11	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,046	-0,043	-0,044	-0,034	-0,026	-0,031	-0,027	-0,020	-0,011	0,014	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498												
12	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,041	-0,041	-0,038	-0,031	-0,033	-0,028	-0,027	-0,018	0,004	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498													
13	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,039	-0,036	-0,035	-0,037	-0,030	-0,028	-0,024	-0,003	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498														
14	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,034	-0,032	-0,041	-0,034	-0,030	-0,026	-0,009	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498

Quadro 7: Fluxos de Eficiência Incremental dos períodos 8 ao 14

Fonte: Produção Própria

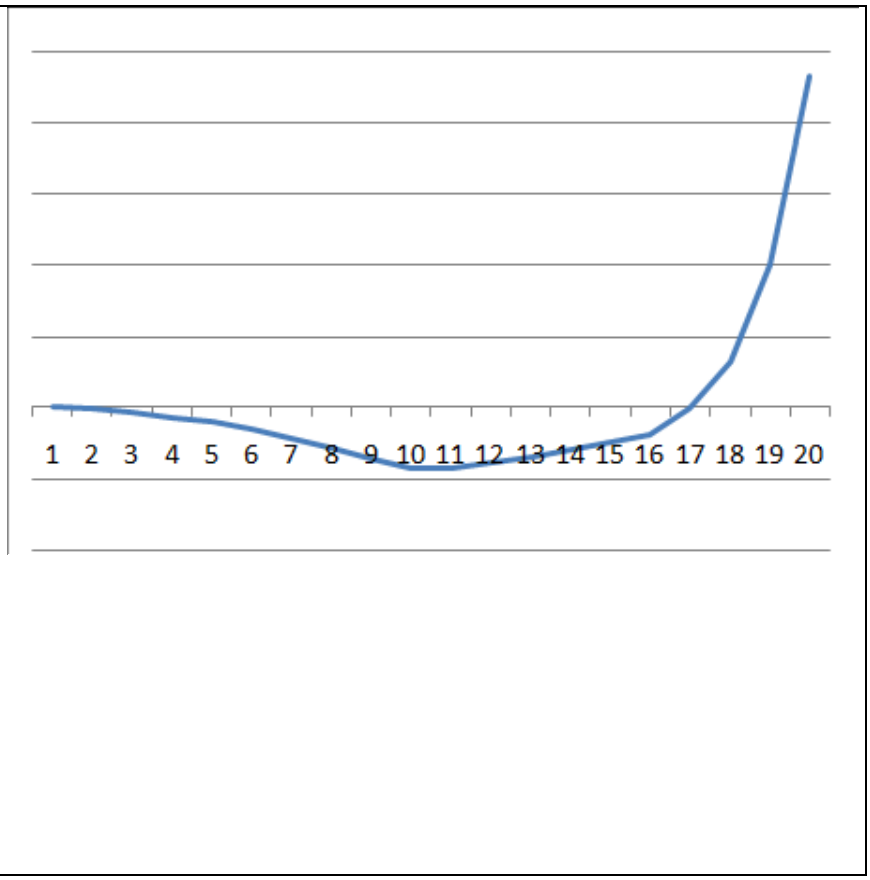
TEMPO		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	DEFENSOR	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498															
15	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,030	-0,039	-0,038	-0,034	-0,027	-0,011	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498																
16	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,036	-0,036	-0,038	-0,032	-0,013	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,515	0,515	0,513	0,498																	
17	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,033	-0,036	-0,036	-0,017	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,515	0,513	0,498																		
18	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,033	-0,033	-0,021	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,513	0,498																			
19	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,031	-0,018	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	DEFENSOR	0,498																				
20	**DESAFIANTE**	0,482	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498
	FEI	-0,016	0,479	0,477	0,481	0,485	0,487	0,488	0,495	0,502	0,511	0,523	0,528	0,523	0,521	0,515	0,512	0,518	0,515	0,515	0,513	0,498

Quadro 8: Fluxos de Eficiência Incremental dos períodos 15 a 20

Fonte: Produção Própria

Como pode ser visto nos Quadros 6,7 e 8 para cada um dos 20 períodos foi elaborado um fluxo incremental de eficiência, e para cada um dos fluxos foi calculado o valor presente desses fluxos de eficiência, considerando-se a taxa de desconto de 1%, obtendo-se dessa forma as eficiências presentes líquidas. Uma representação gráfica é apresentada no Quadro 9.

Período	EFPL
1	0,00083
2	0,00011
3	-0,00371
4	-0,00721
5	-0,01009
6	-0,01435
7	-0,02136
8	-0,02865
9	-0,03647
10	-0,04248
11	-0,04251
12	-0,03819
13	-0,03468
14	-0,02953
15	-0,02474
16	-0,01878
17	-0,00048
18	**0,03298**
19	0,10017
20	0,23205



Quadro 9: Eficiências Presentes Líquidas

Fonte: Produção Própria

É possível observar, portanto, que no período 18, a Eficiência Presente Líquida torna-se positiva, apontando o momento a partir do qual, haverá um ganho de eficiência decorrente da substituição do equipamento antigo pelo novo.

Com o objetivo de exploração e exercício foi feita uma nova aplicação do modelo, para o mesmo equipamento, agora considerando que a eficiência do equipamento velho fosse mantida nos níveis apresentados no último período, para todo o tempo de comparação. Os resultados permitiram a construção do Gráfico 4, de eficiências presentes líquidas.

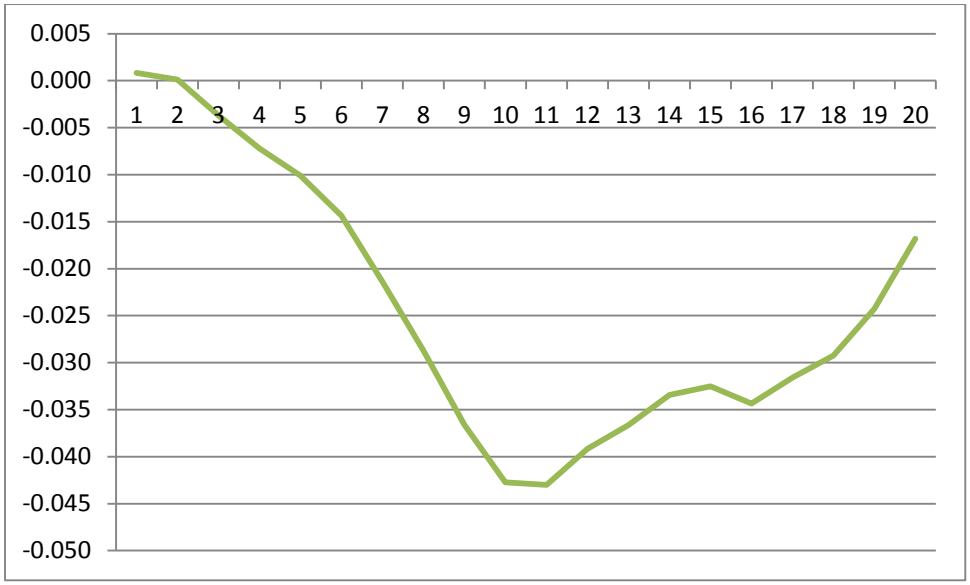


Gráfico 4: Eficiências Presentes Líquidas recalculadas

Fonte: Produção Própria

Os novos resultados sugerem que existe uma curva de aprendizagem para a utilização desse ativo, pois as eficiências líquidas presentes (Ativo defensor *versus* Ativo desafiante) apresentam decréscimo inicial nas duas situações até o décimo período, a partir do qual apresenta um padrão crescente. Com a consideração da eficiência do último período repetida para todo o tempo de comparação, dentro do horizonte de tempo verificado, não foi apresentado um período em que a Eficiência Presente Líquida apresentou valor positivo. Porém o padrão apresentado pelos dois resultados sugere que quanto mais tempo se demorar em substituir esse ativo, maior será o ganho de eficiência dessa substituição.

Tal afirmação condiz com informações da empresa acerca de seu sistema de Gestão de Ativos que apontam que esse ativo não faz parte do rol de ativos a serem substituídos sistematicamente, pois a ele são aplicadas análises de confiabilidade constantes; e intervenções de manutenção programadas mantêm o ativo operando sempre dentro da fase de falhas constantes dentro da curva da banheira, pois a cada intervenção, tal padrão de falhas é deslocado, evitando que o equipamento entre na fase de falhas por desgaste. Isso reforça ainda o fato de não existir liquidez no mercado desse tipo de ativo.

Capítulo 5 – Considerações Finais

No presente trabalho, inicialmente foi apresentada a revisão da literatura sobre os principais temas envolvidos, ou seja, Engenharia de Confiabilidade, Gestão de Ativos Físicos, Gestão da Manutenção, Engenharia Econômica e PAS-55. Tal revisão permitiu identificar o estágio de desenvolvimento de cada um dos temas pesquisados além de construir repertório de entrada para o atingimento do objetivo proposto. Além disso, não foram encontrados trabalhos que tratassem os temas Engenharia Econômica e Engenharia de Confiabilidade em conjunto, apesar da existência da norma PAS-55 e de estudos que tratam de gestão de ativos e práticas sustentáveis baseados nessa norma.

Diante disso, a motivação para o trabalho, com o objetivo de propor um modelo conceitual que levasse em consideração as variáveis de Confiabilidade e Sustentabilidade, que compõem o cerne da PAS-55, muito embora a norma não detalhe ou especifique como cumprir seus requisitos, aumentou. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo de substituição de ativos que leve em consideração variáveis que, em razão de sua natureza técnica ou qualitativa, não são facilmente monetizadas. Para o atingimento do objetivo, foi adotada a ferramenta DEA, oriunda da pesquisa operacional, que permitiu a criação de um fluxo de eficiências que, posteriormente, alimentou um modelo de avaliação de viabilidade utilizado em substituição de ativos.

O primeiro passo, no caminho para a meta definida, foi a pré-identificação de possíveis variáveis em trabalhos pertencentes aos temas pesquisados, nas principais bases de dados disponíveis. Tais variáveis foram organizadas segundo tema e autor, de maneira a eliminar possíveis redundâncias.

A elaboração e a aplicação do painel de especialistas permitiram a validação das variáveis encontradas, assim como a avaliação da relevância de cada uma em projetos de investimento e análises de substituições de ativos. Também, como

resultado secundário, o contato com especialistas da área foi fundamental para prover garantia sobre a real importância do tema e do problema de pesquisa identificado.

Com base em todas estas informações adquiridas, o próximo passo foi compor, conceitualmente, um modelo de avaliação de substituição de ativos que considere variáveis de confiabilidade e sustentabilidade. Para tanto foi necessário recorrer a Análise Envoltória de Dados em associação com ferramentas básicas de análise de investimento.

O modelo criado foi aplicado a um problema real de substituição de ativo, sob dois pressupostos diferentes. No primeiro caso, assumiu-se que o ativo defensor não teria eficiência após o período coletado de vida útil, enquanto que no segundo caso, a eficiência verificada no último período foi replicada para os anos restantes de comparação. Como resultado retornou um período, a partir do qual a substituição traria ganhos de eficiência, ao final do horizonte de planejamento. No segundo caso, a análise da substituição não retornou eficiências positivas em nenhum período.

Os resultados encontrados apontam para a postergação da substituição do ativo analisado. Tal característica, segundo informações da empresa, é uma peculiaridade do ativo, dado que este possui vida econômica muito longa, peças de reposição que são trocadas sistematicamente, acompanhamento de confiabilidade constante e gestão de manutenção constante.

Os resultados permitiram, também, avaliar a aplicabilidade do método proposto. Embora a aplicação do modelo conceitual em um estudo de substituição com dados reais tenha sido realizada com relativo sucesso, verifica-se uma limitação inerente a sua aplicabilidade, pois há a necessidade de dados passados sobre o ativo, com razoável grau de profundidade, para alimentar o método proposto. Daí a importância da existência de um departamento específico ou práticas sistemáticas de Confiabilidade ou de Gestão de Manutenção, por parte das empresas, para que estejam aptas a utilizar métodos mais avançados de análise.

Como proposta de pesquisas futuras, sugere-se a aplicação do modelo conceitual em diferentes situações de substituição, em variados ativos. O fato do estudo de caso retornar resultados alinhados com a prática da empresa em relação à utilização e manutenção do ativo estudado não existe garantia de validação do método proposto. Diferentes situações devem ser exploradas, tais como ativos que possuem pouca ou nenhuma mantenabilidade e a avaliação de substituição por ativos de mesmas ou diferentes especificações.

Outra possibilidade de continuação para o trabalho proposto é a exploração da taxa de desconto a ser utilizada em fluxos com variáveis de natureza distinta, como o caso deste trabalho. Embora em problemas de substituição por meio de Análise de Fluxo Incremental sua importância seja diminuída, para o caso de avaliações de projetos de investimentos independentes seu valor passa a ter maior importância. E o desenvolvimento de um método de composição de uma taxa que possa ser utilizada para descontar variáveis financeiras, sociais e ambientais simultaneamente, pode representar um avanço em estudos de projetos sustentáveis.

Finalmente, apesar das limitações apontadas e da necessidade de estudos posteriores para refinamento e confiabilidade do modelo desenvolvido, prevê-se importância para os resultados alcançados por, pelo menos, três motivos. O primeiro refere-se ao início de desenvolvimento de um ferramental que avalie substituição de ativos de um ponto de vista mais amplo, dentro do princípio da sustentabilidade. O segundo está relacionado a utilização peculiar de uma ferramenta de pesquisa operacional – DEA – em associação com ferramentas clássicas de análise de investimento, numa perspectiva nova e não encontrada na literatura, nas bases pesquisadas. E o terceiro motivo vem da perspectiva de evolução de estudos a respeito da taxa de retorno sustentável, que poderá facilitar avaliações de projetos futuros, além da própria importância intrínseca ao desenvolvimento teórico da respectiva taxa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, R. Aumento da confiabilidade em correias transportadoras por manutenção preventiva e corretiva. **Monografia de Pós-graduação em Eng. Mineral - PPGEM - Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2010.

ASSAF NETO, A. **Finanças Corporativas e Valor**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BANKER, R. D.; CHARNES, A.; COOPER, W. W. Some Models for estimating technical and scale inefficiencies in data envelopment analysis. ***Management Science***, Providence, v. 30, n. 9, p. 1078-1092, 1984.

CAMELO, R. et al. Gestão de Ativos, dificuldades de implantação de cultura de obsolescência de ativos em uma fábrica de papel. **Congresso Brasileiro de Manutenção e Gestão de Ativos**, Salvador, setembro 2013.

CAMPOS, A.; CAMELLO LIMA, C. R. Contribuição da manutenção estratégica para a sustentabilidade. **UNOPAR - Cient. Exatas Tecnol.**, Londrina, v. 11, n. 1, p. 43-48, Novembro 2012.

CARLUCCI, V. F. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação do impacto das variáveis tamanho e localização na eficiência operacional de usinas de cana de açúcar na produção de açúcar e etanol no Brasil. **Dissertação de Mestrado - USP**, Ribeirão Preto, 2012.

CARRASQUEIRA, H. et al. Aplicação da metodologia DEA na análise do desempenho de núcleos científicos numa instituição de ensino. **Revista dos Algarves**, Algarve - Portugal, v. 19, 2010.

CARVALHO, A. L.; MENEGON, N. L. O trabalho invisível e perigoso dos profissionais de manutenção: reflexões sobre a atividade em uma indústria automobilística. **Produção**, São Carlos, Maio 2013.

CASADO, F. L.; SOUZA, A. M. Análise Envoltória de dados: conceitos, metodologia e estudo da arte na Educação Superior. **Revista Social e Humanas**, Santa Maria - RS, v. 20, n. 1, 2007.

CESCA, I. G. Previsão de Custo de Ciclo de Vida e Gestão Econômica de Ativos Físicos de indústrias do setor Energético. **Dissertação de Mestrado UNICAMP**, Campinas, 2012.

CIRQUEIRA, L. Z. Gestão de projetos aplicados a paradas de manutenção industrial. **Revista Especialize On Line IPOG** , Goiânia, v. 01, n. 5, Julho 2013.

COOK, W. D.; SEIFORD, L. M. Data Envelopment Analysis (DEA) - Thirty Years On. ***European Journal of Operational Research***, v. 192, p. 1-17, Fevereiro 2009.

COOPER, W. W.; RHODES, E.; CHARNES, A. Measuring efficiency of decision making Units. ***European Journal of Operational Research***, Amsterdam, v. 3, n. 4, p. 339, Julho 1978.

CUI, Q.; LI, Y. The evaluation of transportation energy efficiency: An application of three-stage virtual frontier DEA. ***Transportation Research Part D***, p. 1-11, 2014.

DA SILVA MARTINS, F. V.; DIAS PINTO RIBEIRO, M. C. A Análise de Eficiência no setor bancário: Modelo de fronteira estocástica com dados em painel para a banca portuguesa. **Nova Economia**, Belo Horizonte, v. 23, dezembro 2013.

DE ALAMADA GARCIA, P. A. Uma abordagem via análise envoltória de dados para o estabelecimento de melhorias em segurança baseadas na FMEA. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 20, p. 87-97, 2013.

DE CARVALHO KLINGELFUS, G. L.; GURSKI, C. A. GESTÃO DA CONFIABILIDADE: DO DISCURSO À PRÁTICA. **Associação Brasileira de manutenção e gestão de ativos - ABRAMAN** , Rio de Janeiro.

DE SOUZA, J. B. et al. As Relações entre Estratégias da Manutenção e Sustentabilidade Empresarial: Um Enfoque Reflexivo no Modelo Entrada-Transformação-Saída. ***3rd International Workshop : Advances in Cleaner Production***, São Paulo, Maio 2011.

DEL GUERCIO, J. M.; CORRÊA DA SILVA, M. Tecnologia e Sustentabilidade no mercado: as implicações de segurança e confiabilidade. **Revista EDUCAÇÃO & TECNOLOGIA**, Curitiba, v. 8, 2011.

DIAS, A. Metodologia para análise de confiabilidade em freios pneumáticos automotivos. **Tese de Doutorado UNICAMP**, Campinas, 1996.

DIAS, A. Confiabilidade na Manutenção. **Trabalhosfeitos.com**, 2012.

DINIZ, E. M.; BERMANN, C. Economia verde e sustentabilidade. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 26, 2012.

DORIGUEL, F. Lean e Green: uma análise das potenciais contribuições da manufatura enxuta para a gestão ambiental em uma empresa do setor de montagem hidráulica. **Tékhne & Lógos**, Botucatu, v. 3, n. 2, Julho 2012.

DUARTE FILHO, P.; MARTA FILHO, J. Indicadores em engenharia de confiabilidade para a cadeia produtiva de gás natural. **Revista Científica do Centro Universitário de Araras** , Araras, v. 5, n. 1, p. 29-37, 2011.

DUEK, C.; CANTORSKI DA ROSA, L. Engenharia da confiabilidade aplicada à aviação: uma abordagem, do projeto à operação. **XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção**, Ouro Preto, outubro 2003.

FERRATO, E.; SPERS, E. E.; GIULIANI, A. C. O papel da confiabilidade na redução dos custos de transação: reflexões entre brasil, estados unidos, japão e coréia do sul. **Revista Eletrônica de Ciência Administrativa (RECADM)**, v. 3, n. 2, Novembro 2004.

FERREIRA FECHA, J. F. Aplicação da PAS 55 ao Departamento de Operação e Manutenção da Operadora da Rede Elétrica de Distribuição. **Dissertação de Mestrado - Universidade do Porto - Portugal**, Porto, Julho 2012.

FONSECA, P. C.; FERREIRA, M. A. M. Investigação dos Níveis de Eficiência na Utilização de Recursos no Setor de Saúde: uma análise das microrregiões de Minas Gerais. **Saúde Soc. São Paulo**, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 199-213, 2009.

FRAGOSO, A. Estruturação para auditoria com o primeiro estágio da pirãmide de gestão dos ativos físicos - SGM. **Monografia de Graduação - Universidade tecnológica do Paraná**, Curitiba, 2013.

FUKUYAMA, H. et al. Input–output substitutability and strongly monotonic p-norm least distance DEA measures. ***European Journal of Operational Research***, p. 997-1007, 2014.

GITMAN, L. J. **Princípios de Administração Financeira**. 12. ed. São Paulo: Pearson, 2012.

GONZÁLEZ-ARAYA, M. C.; ESTELLITA LINS, M. P.; AUTRAN MONTEIRO GOMES, L. F. A Integração entre a Análise de Envoltória de Dados e o apoio Multicritério à Decisão: Uma Revisão. **Pesquisa Naval**, v. 14, p. 157-163, 2001.

GU, Y.; XIANG, X.; LI, W. Mode-Adaptive Decentralized Control for Renewable DC Microgrid With Enhanced Reliability and Flexibility. ***IEEE transactions on power electronics***, v. 29, n. 9, Setembro 2014.

HASTINGS, N. A. J. ***Physical Asset Management***. [S.l.]: Springer-Verlag London Limited, 2010.

HOSKINS, R. P.; BRINT, A. T.; STRBAC, G. A structured approach to Asset Management within the electricity industry. ***Utilities Policy***, v. 7, p. 221-232, 1998.

KUMAR, S. A knowledge based reliability engineering approach to manage product safety and recalls. ***Expert Systems with Applications***, v. 41, p. 5323-5339, 2014.

LAMEIRA, V. D. J. et al. Sustentabilidade, Valor, Desempenho e Risco no Mercado de Capitais Brasileiro. **Revista brasileira de gestão de negócios**, São Paulo, v. 15, n. 46, p. 76-90, Março 2013.

LEE, C.-Y. Meta-data envelopment analysis: Finding a direction towards marginal profit maximization. *European Journal of Operational Research*, p. 207-216, 2014.

LEE, C.-Y.; JOHNSON, A. L. Proactive data envelopment analysis: Effective production and capacity expansion in stochastic environments. *European Journal of Operational Research*, p. 537-548, 2014.

LEWIS, E. *Introduction to Reliability Engineering*. Canadá: John Wiley and Sons, 1984.

LINS, M. E. et al. O uso da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de hospitais universitários brasileiros. **Ciênc. saúde coletiva**, v. 12, n. 4, Agosto 2007.

LOPES CARVALHO, A. Análise de Disponibilidade Utilizando Abordagem Nebulosa. **Tese de Doutorado - Universidade Federal de Minas Gerais**, Belo Horizonte, 2008.

LOPES, J. C. R.; SOUZA, P. D.; BELARDO, C. A. Manutenção centrada em confiabilidade aplicada na gestão de linhas de transmissão subterrâneas. ***XIII ERIAC - Décimo tercer encuentro***, Puerto Iguazú - Argentina, Maio 2009.

LOPEZ CAMPOS, M. A.; CRESPO MÁRQUEZ, A. Modelling a Maintenance Management Framework Based on PAS 55 Standard. ***Quality and reliability engineering International***, v. 27, p. 805-820, 2011.

MANTESE, G. C. Análise de Eficácia do plano de manutenção e do sistema de tratamento de falhas em equipamento crítico de uma empresa de fluxo contínuo. **Monografia de Graduação - EESC/ USP**, São Carlos, 2011.

MARCORIN, W. R.; CAMELLO LIMA, C. R. Análise dos Custos de Manutenção e de Não-manutenção de Equipamentos Produtivos. **Revista de Ciência e Tecnologia** , Piracibaca, v. 11, n. 22, p. 35-42, 2004.

MARINHO, A. Estudo de Eficiência em hospitais públicos e privados com a geração de rankings. **RAP**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 6, p. 145-158, Dezembro 1998.

MEHDILOOZAD, M.; SAHOO, B. K.; ROSHDI, I. A generalized multiplicative directional distance function for efficiency measurement in DEA. ***European Journal of Operational Research***, p. 679-688, 2014.

MINNAAR, J. R.; BASSON, W.; VLOK, P. J. Quantitative methods required for implementing pas 55 or the iso 55000 series for asset management. ***South African Journal of Industrial Engineering***, v. 24, n. 3, p. 98-111, Novembro 2013.

MIRANDA DE OLIVEIRA, M. Análise de métodos estatísticos em planejamento e controle de manutenção. **Monografia de graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro**, Rio de janeiro, Fevereiro 2014.

MOSTAFAEE, A.; SOLEIMANI-DAMANEH, M. Identifying the anchor points in DEA using sensitivity analysis in linear progamming. ***European Journal of Operational Research***, p. 383-388, 2014.

OLIVEIRA E AGUIAR, A.; EPELBAUM, M.; SHIBAO, F. Y. Gestão de projetos como parte do sistema de gestão ambiental. **II Simpósio Internacional de Gestão de Projetos (II Sigep)**, São Paulo, Novembro 2013.

OLIVEIRA, F. D. P.; CAMELLO LIMA, C. R. Análise da função manutenção como estratégia empresarial: estrutura, ferramentas e impacto das decisões. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 17, n. 34, p. 65-76, junho 2014.

OLIVEIRA, M. H. D. F. A Avaliação Econômico-Financeira de investimentos sob condição de incerteza:Uma comparação entre o método de monte carlo e o VPL fuzzy. **Dissertação de Mestrado EESC/USP**, São Carlos, 2008.

ORTAS, E.; GALLEGO-ALVAREZ, I.; ETXEBERRIA, I. Á. Financial Factors Inf luencing the Quality of Corporate Social Responsibility and Environmental Management Disclosure: A Quantile Regression Approach. ***Corporate Social Responsibility and Environmental Management***, Fevereiro 2014.

OSSAI, C. I.; BOSWELL, B.; DAVIES, I. J. Sustainable asset integrity management: Strategic imperatives for economic renewable energy generation. ***Renewable Energy***, v. 67, p. 143-152, 2014.

PALOMBO, C. Eight steps to optimize your strategic assets. ***IEEE power & energy magazine***, p. 46-54, Junho 2005.

PANEPUCCI, G. T. M. Avaliação de Desempenhos dos departamentos acadêmicos da UFSCAR Utilizando análise de Envoltória de Dados - AED. **Dissertação de Mestrado Ufscar**, São Carlos, 2003.

PAUL, S. K.; SARKER, R.; ESSAM, D. Real time disruption management for a two-stage batch production-inventory system with reliability considerations. ***European Journal of operational Research***, p. 113-128, 2014.

PEDROSO GONZALEZ, I. V. D. et al. Processo de aprendizagem no contexto da gestão de manutenção visando à confiabilidade. **Gestão contemporânea**, v. 2, n. 1, 2012.

PÉRICO, A. E.; REBELATTO, D. A. D. N.; SANTANA, N. B. Eficiência bancária: os maiores bancos são os mais eficientes? Uma análise por envoltória de dados. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 15, p. 421-431, 2008.

PINTELON, L. M.; GELDERS, L. F. Maintenance management decision making. ***European Journal of Operational Research***, v. 58, p. 301-317, 1992.

PINTO, R. G. a importância dos aspectos básicos da manutenção para implantação do RCM: Um estudo de caso. **Dissertação de mestrado - UNIMEP**, Santa Bárbara do Oeste, 2008.

RAUSAND, M. Reliability centred maintenence. ***Reliability Engineering and system safety***, v. 60, p. 121-132, 1998.

REBELATTO, D. A. D. N. **Projeto de Investimento:** Com estudo de caso completo na área de Serviços. Barueri: Manole, 2004.

RICHARDSON, S.; KEFFORD, A.; HODKIEWICZ, M. Optimised asset replacement strategy in the presence of lead time uncertainty. ***International Journal of Production Economics***, v. 141, p. 659-667, 2013.

RODRIGUES DE ALMEIDA, M.; MARIANO, E. B.; NASCIMENTO REBELATTO, D. A. Análise por envoltória de dados - evolução e possibilidades de aplicação. **Anais do IX Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais**, São Paulo, Agosto 2006.

ROE, S.; MBA, D. The environment, international standards, asset health management and condition monitoring: An integrated strategy. ***Reliability Engineering and System Safety***, v. 94, p. 474-478, 2009.

SAHOO, B. K.; MEHDILOOZAD, M.; TONE, K. Cost, revenue and profit efficiency measurement in DEA: A directional distance function approach. ***European Journal of Operational Research***, p. 921-931, 2014.

SALGADO JUNIOR, A. P.; GRESPAN BONACIM, C. A.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C. Aplicação da Análise Envoltória de Dados (DEA) para avaliação de eficiência de usinas de açúcar e alcool da região nordeste do estado de São Paulo. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 11, Setembro 2009.

SANTANA, N. B. Responsabilidade Socioambiental e Valor da Empresa: Uma Análise por envoltória de dados em empresas distribuidoras de energia elétrica. **Dissertação de Mestrado EESC/USP**, São Carlos, 2008.

SARTORIS NETO, A. **Estatística e Introdução à Econometria**. São Paulo: Saraiva, 2003.

SELLITO, M. A.; BORCHARDT, M.; CAMPOS DE ARAÚJO, D. R. Manutenção Centrada em Confiabilidade: Aplicando uma abordagem quantitativa. **XXII Encontro nacional de Engenharia de produção** , Curitiba, outubro 2002.

SERRA ALMEIDA, G. E. Análise do Índice de instalação de empresas no município de Osasco utilizando sistemas de informação geográfica e análise envoltória de dados - DEA. **Dissertação de Mestrado USP-SP**, São Paulo, 2006.

SIMONETTI, M. J. et al. A Importância da engenharia de confiabilidade e os conceitos básicos da distribuição de Weibull. **Revista Sapere**, Tatuí, v. 2, n. 1, Junho 2010.

SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; GONÇALVEZ GOMES, E.; ESTELLITA LINS, M. P. Seleção de Variáveis para utilização de análise envoltória de dados como ferramenta multicritério: Uma aplicação em educação. **Enegep**, 2001.

SOUZA CAMPOS, L. M. et al. Relatório de sustentabilidade: perfil das organizações brasileiras e estrangeiras segundo o padrão da Global Reporting Initiative. **Revista Gestão e Produção**, São Carlos, v. 20, n. 4, p. 913-926, 2013.

VAN BELLEN, H. M. Indicadores de Sustentabilidade: Uma Análise Comparativa. **Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina**, Florianópolis, Novembro 2002.

VAN DEN HONERT, A. F.; SCHOEMAN, J. S.; VLOK, P. J. Correlating the content and context of pas 55 with the iso 55000 series. ***South African Journal of Industrial Engineering***, v. 24, n. 2, p. 24-32, Agosto 2013.

WU, D. D.; OLSON, D. Enterprise Risk management: a DEA VaR approach in vendor selection. ***International journal of Production Research***, v. 48, p. 4919-4932, Agosto 2010.

APÊNDICES

Apêndice A – Custo de Capital Próprio, de terceiros e WACC

Custo de Capital Próprio – Custo de Oportunidade

A remuneração mínima citada como custo de oportunidade pode ser medida para exemplificação pelo modelo CAPM – *Capital Asset Pricing Model*.

O modelo CAPM estabelece uma relação linear entre o retorno de uma atividade ou ativo e o retorno do mercado, pois diz que o custo de capital é equivalente ao retorno sobre os títulos livres de risco somado ao prêmio pelo risco da atividade multiplicado pelo coeficiente de risco da atividade. Sendo definido, o custo de capital por:

$$K_e = R_f + \beta\left(R_m + R_f\right) \tag{30}$$

Sendo:

K_e - Custo de Oportunidade/ Custo do Capital Próprio/ Taxa de retorno mínima exigida pelos acionistas por investir na atividade

R_f - Taxa de Retorno dos ativos livres de risco, podem ser utilizadas as taxas de juros médias de longo prazo dos títulos públicos do governo norte americano (ASSAF NETO, 2010).

R_m - Taxa de Retorno do Mercado

β - Medida do risco da empresa com relação ao risco de mercado, que é estimado utilizando uma amostra de empresas do mesmo setor e características operacionais próximas à empresa em questão

Como no Brasil e outros países emergentes a taxa de juros nacional é superior à paga pelos *Treasure Bonds* pelo maior nível de incerteza, como forma de remunerar o chamado risco país, geralmente se utiliza o modelo CAPM acrescido do Risco Brasil (α_{Br}):

$$K_e = R_f + \beta\left(R_m + R_f\right) + \alpha_{Br} \qquad (31)$$

Custo de Capital de Terceiros

Como dito anteriormente, o custo de capital é representado pelas despesas financeiras da empresa. Essas despesas são provenientes do custo adicional de financiamento por parte dos passivos onerosos da companhia.

Tais despesas são passiveis de dedução do Imposto de Renda, sendo, dessa forma, o custo de capital de terceiros calculado da seguinte forma:

$$K_{i=K_{ib}(1-IR)} \qquad (32)$$

Onde :

K_i - Custo de Capital de Terceiros após o IR

K_{ib} - Custo de Capital de Terceiros antes do IR

IR - Imposto de Renda

Custo Médio Ponderado de Capital – *Weighted Average Cost of Capital – WACC*

Utilizando as informações disponíveis nos dois tópicos anteriores, pode ser obtido o cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital – WACC, que é realizado somando-se as respectivas participações no financiamento da empresa do custo de capital próprio e do custo de capital de terceiros:

$$WACC = (W_e K_e)(W_i K_i) \quad (33)$$

Sendo:

$WACC$ - Custo Médio Ponderado de Capital da empresa

W_e - Participação do Capital Próprio no financiamento da empresa

W_i - Participação do Capital de Terceiros no financiamento da empresa

K_e - Custo de Capital Próprio

K_i - Custo de Capital de Terceiros Líquido do IR

As respectivas participações W_e e W_i são calculadas de acordo com sua participação percentual no financiamento total da empresa. Sendo o financiamento total da empresa a soma entre o Passivo e Patrimônio Líquido, dividimos o Passivo pelo Financiamento total e obtém-se W_i, com raciocínio análogo, dividindo o patrimônio líquido pelo financiamento total da empresa, encontra-se o peso W_e, sendo que ($W_i + W_e$ =1,0).

Dadas essas informações, torna-se simples o entendimento da TMA, pois, sendo essa uma taxa de aceitação, é a taxa que iguala os custos de captação envolvidos em uma decisão de financiamento ao retorno oferecido pelo empreendimento em questão, pois calculada assim, essa taxa incorpora o custo do capital investido em cada alternativa de investimento.

Dado um investimento qualquer que possua uma determinada TMA baseada no custo de oportunidade e no custo de capital de terceiros, resulta o que foi dito em Oliveira (2008), que um investimento que tenha retorno percentual superior ao WACC propicia à empresa lucro econômico, pois permite ao gestor saldar suas obrigações sejam elas de capital próprio ou de terceiros, com o excedente aumentando a riqueza do investidor (no caso a companhia).

Apêndice B – Questionário para Painel

Painel de Especialistas

Questionário

Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos

Programa de pós-graduação em Engenharia de Produção

Título da Dissertação de Mestrado:

Análise de Investimentos com variáveis da Engenharia de Confiabilidade: Uma Aplicação DEA

Título dos Trabalhos de Conclusão de Curso:

Gestão de Ativos Físicos: Variáveis Econômicas, Sociais e Ambientais para determinação do tempo de substituição de Ativos Físicos

A influência de variáveis Financeiras, Ambientais e Sociais no Ciclo de Vida dos Ativos Físicos

Orientadora: Prof. Dra. Daisy Ap. Nascimento Rebelatto

Mestrando: Guilherme Augusto Roiz

Graduando: João Francisco Fuzile Rodrigues Garcia

Graduando: Maiara Fernanda Moreno

Objetivo do questionário é identificar, dentre as possíveis variáveis provenientes da Engenharia de Confiabilidade e Variáveis Ambientais para projetos de investimentos encontradas na literatura, aquelas que seriam relevantes na tomada de decisões em adquirir e/ou substituir ativos físicos em sistemas de ativos.

A Engenharia de Confiabilidade, juntamente com os princípios de Sustentabilidade, suprirão um modelo de Análise Envoltória de Dados (DEA) que têm por objetivo analisar o tempo ótimo de substituição de um ativo físico (máquina e/ou equipamentos) levando em consideração, também, variáveis não financeiras. Os resultados serão comparados com os obtidos pelos métodos clássicos de Análise de Investimentos e Substituição de Ativos, permitindo a discussão dos resultados obtidos e a avaliação sobre o sucesso ou não da aplicabilidade de DEA para essas condições.

Empresa/Universidade:_____

Entrevistado: _____

Cargo/Função:_____

Formação:_____

Para a tomada de decisões a respeito de substituição/aquisição de ativos físicos, são necessários conhecimentos acerca do tempo de vida útil do ativo, assim como quais receitas e despesas incorrerão sobre esse ativo durante o período. É ainda necessário o conhecimento de ao menos uma estimativa do valor recuperado ao final da vida econômica do ativo.

Ainda deve-se levar em consideração a Taxa Mínima de Aceitação que reflete o custo de capital do investidor (Custo de Capital Próprio – Custo de Oportunidade e Custo de Capital de Terceiros – Despesas Financeiras).

Tais informações alimentam modelos clássicos de análises de investimentos tais como NPV/IRR/PAYBACK e modelos de análise de tempo de vida econômica de ativos como cálculo do custo anual equivalente.

Informações:

A engenharia de confiabilidade fornece informações de funcionamento e manutenção de ativos, com o intuito de aumentar a disponibilidade (*Up Time*) de equipamentos.

As variáveis podem ser classificadas em Disponibilidade, Mantenabilidade, Confiabilidade e Ambiental.

1- Confiabilidade: Probabilidade de sucesso em um determinado ativo/sistema/bem executar suas funções requeridas;
2- Mantenabilidade: Probabilidade de sucesso no reparo de um ativo/sistema/bem;
3- Disponibilidade: Tempo de campanha, isto é, o tempo verificado e considerado "operativo" pelo ativo/sistema/bem.
4- Ambiental: Deposição e/ou emissão de resíduos sólidos, líquidos e gasosos que afetam o meio ambiente em decorrência de suas operações.

1. Questões relacionadas quanto à natureza das variáveis:

1.1 Dadas as definições de Confiabilidade e Disponibilidade, você concorda em considerar variáveis dessas naturezas em análises de tempo de vida econômica e substituição de ativos?

1.2 Dada a definição de Mantenabilidade, você concorda em considerar variáveis dessa natureza em análises de tempo de vida econômica e substituição de ativos?

1.3 Dada a definição de Variáveis de natureza Ambiental, você concorda em considerar variáveis dessa natureza em análises de tempo de vida econômica e substituição de ativos?

2. Variáveis:

2.1 A existência de curvas de aprendizagem diferentes para diferentes ativos, que culmina em CONHECIMENTO PARA REALIZAR MANUTENÇÃO, com MENOR TEMPO DE PARADA deve ser levada em consideração na comparação entre o ativo a ser substituído e o substituto? No caso de resposta positiva, poderia dar um exemplo?

2.2 O RISCO DE PARADA não programada da máquina (culminando em um custo de parada, gargalos à produção, etc.) deve ser comparado entre o ativo substituto e o substituído? Tal RISCO DE PARADA deve ser levado em consideração na determinação de tempo de vida econômica de determinado ativo?

2.3 Os índices de PARADAS PARA MANUTENÇÃO (corretiva, preventiva e preditiva) devem ser levados em consideração para determinar o tempo de vida econômica de um ativo para substituí-lo, assim como comparar tais índices esperados de máquinas e/ou equipamentos novos?

2.4 A comparação entre níveis de EMISSAO DE RESIDUOS SOLIDOS, EMISSÃO DE CARBONO, EMISSÃO DE OUTROS GASES DE EFEITO ESTUFA deveria ser levada em consideração no estudo de substituição de equipamentos, ativos e/ou sistemas de ativos? No caso de determinação de vida econômica útil desses ativos, tais níveis deveriam ser levados em consideração? Justifique.

2.5 A consideração da alteração dos níveis de SEGURANÇA PARA OPERADORES em decorrência da substituição dos ativos é útil? Em que sentido? Para a determinação da vida econômica útil de um equipamento, tais níveis devem ser levados em consideração?

2.6 Assim como a questão anterior, a SEGURANÇA PARA PROXIMIDADES (população) deve ser levada em conta? Dê exemplos.

2.7 Ainda em relação à segurança, mas no âmbito ambiental, a SEGURANCA PARA PROXIMIDADES (possibilidade de deterioração do ambiente, seja por poluição ou por impactos decorrentes de acidentes) deve ser levada em conta?