



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE
PERNAMBUCO**
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA
SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS: UM ESTUDO DE
CASO EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR ALIMENTÍCIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO
POR

JEFFERSON CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO COSTA

Orientador: Prof.^a Dr.^a MAÍSA MENDONÇA SILVA

CARUARU, 2017

JEFFERSON CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO COSTA

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA
SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTO: UM ESTUDO DE
CASO EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR ALIMENTÍCIO**

Proposta de trabalho a ser apresentado ao
Curso de Engenharia de Produção do Centro
Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco -
UFPE, como requisito para a disciplina
Projeto Final de Curso.

Área de concentração: Pesquisa Operacional
Orientador: Prof.^a Dr.^a Maísa Mendonça
Silva

Catálogo na fonte:
Bibliotecária – Marcela Porfírio CRB/4 - 1878

- C837a Costa, Jefferson Carlos de Oliveira Ribeiro.
Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamento : um estudo de caso em uma indústria do setor alimentício. / Jefferson Carlos de Oliveira Ribeiro Costa. – 2017.
53f. ; il. : 30 cm.
- Orientadora: Maísa Mendonça Silva.
Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Pernambuco, CAA, Engenharia de Produção, 2017.
Inclui Referências.
1. Equipamentos industriais – Manutenção. 2. Programação dinâmica. 3. Alimentos.
I. Silva, Maísa Mendonça (Orientadora). II. Título.
- 658.5 CDD (23. ed.) UFPE (CAA 2017-287)

JEFFERSON CARLOS DE OLIVEIRA RIBEIRO COSTA

**APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NA
SUBSTITUIÇÃO DE EQUIPAMENTOS: UM ESTUDO DE
CASO EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR ALIMENTÍCIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Coordenação do Curso de Engenharia de Produção
do Centro Acadêmico do Agreste - CAA, da
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, como
requisito para a disciplina **Projeto Final de Curso**.

Área de concentração: Pesquisa Operacional

A banca examinadora composta pelos professores abaixo, considera o candidato
ALUNO APROVADO COM NOTA_____.

Caruaru, 29 de novembro de 2017.

Banca examinadora:

Prof.^a. Dr.^a Maisa Mendonça Silva _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Orientador)

Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Lucio Camara e Silva _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Avaliador)

Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez _____
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE (Coordenador da disciplina)

RESUMO

A substituição de equipamentos é um evento comum a todas as empresas e saber o seu momento ótimo é o primeiro passo para uma tomada de decisão que pode vir a comprometer a sobrevivência da organização. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo de programação dinâmica determinística que procura maximizar a receita líquida através de uma relação de recorrência. O modelo proposto pode ser descrito como uma adaptação do modelo tradicional de substituição desenvolvido por Bellman (1995), em que além das clássicas variáveis utilizadas, como receita, custos operacionais e valor de sucata, foram considerados o custo associado a instalação de um novo equipamento e indicadores advindos da engenharia de manutenção e da engenharia econômica e financeira para efeito de correção dos dados trabalhados, uma vez que muitos deles foram estimados. O modelo foi aplicado a uma indústria do setor alimentício, mais especificadamente a um equipamento importante na produção de biscoitos tipo *wafers*, a saber: o forno. A escolha do equipamento analisado se deu através de uma análise de falhas usando o gráfico de Pareto e o horizonte de planejamento foi fixado em 20 anos, contemplando o período de 2014 até 2033. A partir da aplicação do modelo proposto, foi possível determinar que a política ótima de substituição do mesmo deverá ser feita a cada 10 anos. Observou-se ainda que o modelo auxilia o tomador de decisão quanto a estratégia a ser utilizada na substituição da máquina, pois a partir do momento em que é fornecido um norte baseado em algumas limitadas variáveis, do período crítico de substituição, pode-se direcionar esforços para avaliar outros importantes fatores relacionados a uma necessidade de troca de equipamento.

Palavras-chave: Programação dinâmica. Substituição de equipamentos. Setor alimentício.

ABSTRACT

Replacing equipment is an event common to all companies and knowing their optimal timing is the first step towards a decision-making that may end up compromising the survival of the organization. This study aims to develop a dynamic deterministic programming model that seeks to maximize net revenue through a recurrence relation. The proposed model can be described as an adaptation of the traditional substitution model developed by Bellman (1995), in which besides the classic variables used, such as revenue, operating costs and scrap value, the cost associated with the installation of new equipment and indicators derived from maintenance engineering and economic and financial engineering for the purpose of correcting the data processed, since many of them were estimated. The model was applied to a food industry, more specifically to an important equipment in the production of wafers, namely: the oven. The equipment was analyzed through a fault analysis using the Pareto chart and the planning horizon was set at 20 years, covering the period from 2014 to 2033. From the application of the proposed model, it was possible to determine that the optimal policy of replacing it should be done every 10 years. It was also observed that the model assists the decision maker regarding the strategy to be used in the replacement of the machine, since once a north based on some limited variables of the critical period of substitution is provided, it can be directed efforts to evaluate other important factors related to a need to exchange equipment.

Key words: Dynamic programming. Equipment replacement. Food sector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Passos para implementação da PO	13
Figura 2.2 - Árvore de decisão	14
Figura 4.1 - Fluxograma do processo produtivo	23
Figura 4.2 - Fluxograma do processo produtivo modificado	25
Figura 4.3 - Gráfico de Pareto	25
Figura 4.4 - Quantidade de horas paradas	26
Figura 4.5 - Forno automático para wafer	27
Figura 4.6 - Gráfico do comportamento da taxa de disponibilidade	30
Figura 5.1 - Árvore de decisão	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 4-1 - Dados da indisponibilidade dos equipamentos.....	25
Tabela 4-2 - Dados de depreciação do forno	28
Tabela 4-3 - Dados relacionados aos indicadores de performance da manutenção	29
Tabela 4-4 - Dados históricos do IGP-M	30
Tabela 4-5 - Estimativas do IGP-M	30
Tabela 4-6 - Preço das matérias primas por kg de produto acabado.....	32
Tabela 4-7 - Preço dos materiais de embalagem por kg de produto acabado	32
Tabela 4-8 - Capacidade nominal da linha de produção	33
Tabela 4-9 - Conjuntura dos custos industriais	34
Tabela 4-10 - Estimativa das receitas anuais	35
Tabela 4-11 - Estimativa dos custos anuais	36
Tabela 4-12 - Dados de entrada para o cálculo da PDD	38
Tabela 4-13 - Decisões no estágio 17	39
Tabela A 1 - Decisões no estágio 17	47
Tabela A 2 - Decisões no estágio 16.....	47
Tabela A 3 - Decisões no estágio 15.....	48
Tabela A 4 - Decisões no estágio 14.....	48
Tabela A 5 - Decisões no estágio 13.....	49
Tabela A 6 - Decisões no estágio 12	49
Tabela A 7 - Decisões no estágio 11	50
Tabela A 8 - Decisões no estágio 10	50
Tabela A 9 - Decisões no estágio 09	51
Tabela A 10 - Decisões no estágio 08.....	51
Tabela A 11 - Decisões no estágio 07	51
Tabela A 12 - Decisões no estágio 06.....	52
Tabela A 13 - Decisões no estágio 05.....	52
Tabela A 14 - Decisões no estágio 04.....	52
Tabela A 15 - Decisões no estágio 03.....	53
Tabela A 16 - Decisões no estágio 02	53
Tabela A 17 - Decisões no estágio 01	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1 Justificativa.....	10
1.2 Objetivos	11
1.2.1 Objetivo Geral	11
1.2.2 Objetivos Específicos.....	11
2. REVISÃO DA LITERATURA	12
2.1 Pesquisa Operacional.....	12
2.1.1 Pesquisa Operacional: conceitos gerais.....	12
2.1.2 Modelo de otimização de Bellman (1995) e Taha (2008)	13
2.2 Programação Dinâmica.....	15
2.2.1 Programação dinâmica: conceitos	15
2.2.2 Substituição de Equipamentos	16
2.3 Engenharia econômica e financeira: conceitos básicos.....	17
2.4 Engenharia de manutenção: conceitos básicos de confiabilidade	18
3. METODOLOGIA	20
4. ESTUDO DE CASO	22
4.1 Caracterização da empresa	22
4.2 Descrição do processo produtivo	22
4.3 Seleção do equipamento crítico.....	23
4.4 Descrição técnica e econômica do equipamento crítico	26
4.5 Previsão de receitas e custos operacionais	28
4.5.1 Detalhamento do uso dos indicadores associadas	28
4.5.2 Determinação das receitas e custos operacionais previstos.....	31
4.6 Aplicação da Programação Dinâmica Determinística.....	37
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
6. CONCLUSÕES.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
APÊNDICE A - Tabelas de subestruturas ótimas.....	47

1. INTRODUÇÃO

De acordo com Campos (2016), a crise econômica e financeira que o Brasil vem enfrentando tem forte impacto em diversos setores da economia nacional. No que se refere particularmente à indústria de alimentos, dentre os diversos segmentos industriais da economia brasileira, foi uma das primeiras a recuperar o crescimento ao longo dos últimos períodos de turbulências. Este autor explica também que até junho de 2016, enquanto a indústria como um todo contraiu -9,8%, a indústria de fabricação de produtos alimentícios cresceu 0,18%. A indústria alimentar tem forte potencial de contribuir à melhoria e fortalecimento da economia brasileira, mas, assim como em qualquer outro setor, necessita de sustentações estratégicas a respeito de seus custos e sua produtividade.

O capital de uma empresa, na maioria das vezes, é constituído basicamente de sistemas ou conjunto de itens usados na produção de bens e/ou prestação de serviços. A substituição desses itens, com o passar do tempo, torna-se uma decisão complexa e necessária. Silva et. al (2015) afirma que a atividade de substituição faz parte da rotina da maioria das empresas e que isso faz com que se tornem relevantes os estudos sobre o tema, principalmente naquelas organizações que fazem o uso intensivo de bens de capital e que possuem uma quantidade elevada de equipamentos, os quais tem participação relativamente alta em seus custos operacionais.

Segundo Abensur (2010), tanto sob a ótica do investimento, como da produtividade, a reposição desses itens representa uma considerável decisão financeira. Ainda, dado que a substituição seja tardia ou prematura, a organização terá consequências negativas como perdas financeiras, perdas na recuperação de capital e elevados custos operacionais do bem (MARQUES et al., 2005 apud VALVERDE e REZENDE, 1997, p.750). Miranda (2009) comenta que nunca se deve trocar um equipamento que apresente um bom desempenho funcional ainda que origine elevados custos de manutenção. Este autor ainda afirma que a troca não deve ser efetuada se não resultar em uma evidente mais-valia, uma vez que a compra de um novo equipamento representa um alto risco. É nesse conjunto de pensamentos que surge a necessidade de tomadas de decisões bem fundamentadas, para evitar resultados técnicos e econômicos indesejáveis. Segundo Marques et al. (2005), dentre os métodos utilizados para determinação da substituição ótima de máquinas e equipamentos, destacam-se o do custo médio total, o do custo anual equivalente, o de equações diferenciais e o de programação dinâmica. Marques et al. (2005) ainda afirma que mesmo cada método

apresentando suas características próprias, a programação dinâmica é uma ferramenta útil devido ao fato de que além de ser considerada flexível, gera soluções de forma rápida e otimizada dentro de um leque maior de opções.

Com isso, o presente trabalho propõe a utilização de um modelo matemático, formulado através da Programação Dinâmica (PD), que é um método que pode ser aplicado em situações que necessitam de uma série de decisões para se determinar a solução ótima, em uma indústria do setor alimentício localizada na região do Agreste Pernambucano.

1.1 Justificativa

Segundo Campos (2016), o setor de alimentos e bebidas brasileiro é internacionalmente conhecido pelo seu desenvolvimento e estrutura, representando aproximadamente 10% do total do PIB do país. Neste cenário, muitos equipamentos são submetidos a condições adversas e funcionamento entre dois a três turnos, levando a um desgaste mais acentuado de sua capacidade técnica de produção. Com isso, surge a necessidade da avaliação da vida econômica destes no que se concerne a idade ótima da substituição, visando diminuir resultâncias negativas.

Segundo Casarotto Filho (2000), muitas empresas brasileiras têm o costume de manter os equipamentos velhos em funcionamento, mesmo quando sua operação não é mais economicamente viável. Nascimento (2017), ressalta que as empresas não fazem as substituições, que deveriam, por um simples comodismo administrativo em que não cogitam a antecipação da resolução deste problema.

Modelos de otimização, formulados a partir da PD, tem impacto significativamente positivo no apoio à tomada de decisões deste tipo, visando maximizar os lucros e/ou minimizar os custos associados, levando em consideração variáveis como receita anual, custo operacional anual, valor de sucata do maquinário, entre outras. Porém, mesmo com sua capacidade de formulação e resolução de algoritmos bem fundamentados, ainda não é de cunho prático nas indústrias, principalmente brasileiras. À vista disso, este trabalho se justifica pela necessidade de apoio à tomada de decisões de alto risco no que concerne a investimentos de substituições de equipamentos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Formular e aplicar um modelo matemático, utilizando a Programação Dinâmica Determinística (PDD), em uma indústria do setor alimentício do Agreste Pernambucano, a fim de proporcionar ao planejador subsídios relativos a substituição de equipamentos ao longo do horizonte de planejamento predefinido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Elaborar fluxograma da linha de produção a ser estudada e descrever o processo produtivo;
- b) Selecionar o equipamento crítico;
- c) Descrever o equipamento em estudo de forma técnica e econômica;
- d) Utilizar técnicas da engenharia econômica e a engenharia de manutenção na previsão das variáveis do modelo;
- e) Aplicar a metodologia de Programação Dinâmica Determinística.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pesquisa Operacional

As origens da Pesquisa Operacional (PO) podem ser remontadas muitas décadas atrás quando foram feitas tentativas iniciais no emprego de uma abordagem científica na gestão das organizações. Porém, o início da atividade, denominada pesquisa operacional, geralmente é atribuído às atividades militares nos primórdios da Segunda Guerra Mundial, quando uma equipe de cientistas britânicos decidiu tomar decisões com bases científicas sobre a melhor utilização de material de guerra (HILLIER e LIEBERMAN, 2006; TAHA, 2008). Com o seu caráter multidisciplinar, a PO ganhou espaço da Engenharia a Medicina, passando por diversas outras áreas.

2.1.1 Pesquisa Operacional: conceitos gerais

A PO é uma ciência que propõe uma abordagem científica na solução de problemas e seu modelo geral compreende alternativas, critérios, objetivos e restrições, atrelado a ideia de que o modo como cada componente é desenvolvido e construído depende das diferentes situações e detalhes destes componentes (MARINS, 2011; TAHA, 2008).

Belfiore & Fávero (2012) comentam que quatro elementos podem ser considerados como principais em um modelo geral de PO:

- a) Variáveis de decisão: que são definidas como incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo;
- b) Parâmetros: são valores fixos do problema, previamente conhecidos;
- c) Função objetivo: trata-se da função responsável por determinar o valor alvo desejado em função das variáveis de decisão e dos parâmetros; esse valor pode ser fundamentado no objetivo de maximização ou minimização;
- d) Restrições: diz respeito ao conjunto de equações e/ou inequações que as variáveis de decisão do modelo devem satisfazer.

Cardoso (2011) resume o objetivo principal da PO em determinar a programação otimizada de atividades ou recursos, fornecendo um conjunto de procedimentos e métodos quantitativos para tratar de forma sistematizada problemas que envolvam a utilização de recursos escassos. Um estudo de PO é desenvolvido em fases, como exposto na figura 2.1.

Após ser identificado o problema a ser estudado, inicia-se as etapas da implementação da PO, descritas, sucintamente, abaixo:

- **Formulação:** consiste na estruturação dos dados e informações;
- **Modelagem:** concentra-se na construção do modelo, que é uma representação simplificada do sistema;
- **Solução:** nesta etapa, a solução é obtida através de um método que pode ser um algoritmo ou procedimento matemático;
- **Avaliação:** consiste na validação do modelo;
- **Decisão:** é a escolha e operacionalização da solução encontrada.

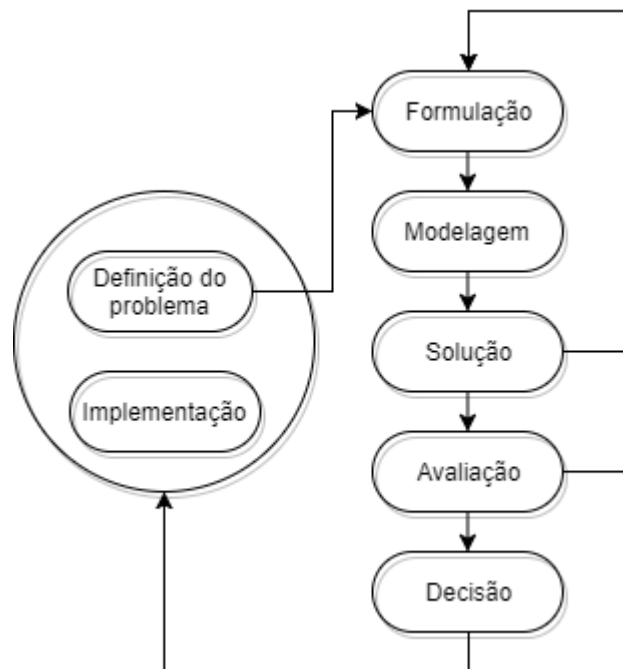


Figura 2.1 - Passos para implementação da PO
Fonte: Adaptado de Cardoso (2011, p.06)

2.1.2 Modelo de otimização de Bellman (1995) e Taha (2008)

No estudo de substituição de máquinas e equipamentos, Bellman (1995) e Taha (2008) sugerem um modelo de maximização da receita líquida para os anos $i, i + 1, \dots, n$ expressa por $f_i(t)$. O problema é expressado como uma sequência de decisões, que deve ser tomada, no início de cada ano sobre a decisão de manter ou não a máquina em serviço por mais um ano ou se deve ser substituída por uma nova.

De acordo com Taha (2008), as equações recursivas para este caso são as seguintes:

$$f_i(t) = \max \begin{cases} r(t) - c(t) + f_{i+1}(t+1), & \text{se mantiver} \\ r(0) + s(t) - I - c(0) + f_{i+1}(t), & \text{se substituir} \end{cases} \quad (2.1)$$

Onde,

$r(t)$ = Receita anual;

$c(t)$ = Custo operacional anual;

$s(t)$ = Valor de sucata de uma máquina de t anos de idade;

I = Custo de aquisição de uma máquina nova em qualquer ano;

i = Estágio da decisão, representado pelo ano $i, i = 1, 2, \dots, n$;

t = Idade da máquina no início do ano i , chamado de estado.

Sujeito a:

$$f_{n+1}(\cdot) \equiv 0 \quad (2.2)$$

O modelo sugerido pelos autores, como já mencionado, tem o objetivo de encontrar a política ótima de substituição que maximize a receita líquida a um determinado número de trocas em um horizonte de planejamento pré-estabelecido. Na figura 2.2, é visualizado uma árvore de decisão que tem a finalidade de representar o problema em questão, facilitando o entendimento. Nesta árvore, o estudo foi aplicado a um equipamento com três anos de idade em que a empresa necessitava determinar a política ótima de reposição para os próximos quatro anos, com a restrição de que ao completar seis anos era exigido que a máquina fosse substituída.

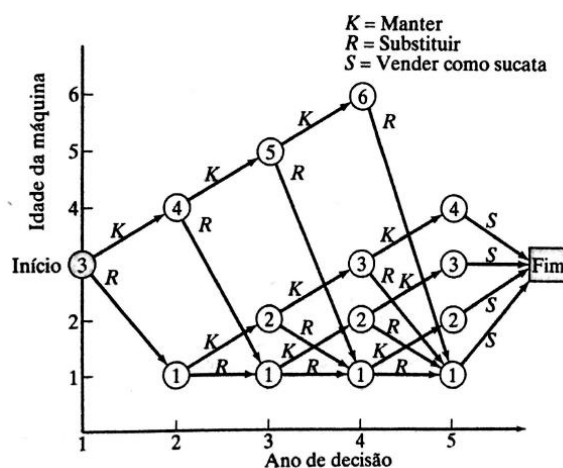


Figura 2.2 - Árvore de decisão
Fonte: Taha (2008, p.185)

A árvore apresenta duas possibilidades para cada nó (idade), K-keep em que diz respeito a manter o equipamento e R-replace que representa a opção de substituir. Iniciando com três

anos de idade, caso seja decidido a reposição, o equipamento inicia o ano 2 com idade de um ano, sendo esta mesma lógica replicada para os anos consecutivos e ao final do ano 4, as máquinas serão substituídas e assumirão valor de sucata (S).

2.2 Programação Dinâmica

Segundo Gluss (1961, apud. Plizzari, 2017), a programação dinâmica é um método de decomposição que se baseia no princípio da otimalidade de Bellman, aplicado em casos que exigem diversas decisões na determinação da solução ótima de um sistema composto de distintos estágios, sendo que uma política de decisões ótimas só pode ser formada por subpolíticas ótimas. A melhor decisão em cada estágio é determinada de acordo com o estado em que o sistema se encontra; esse processo se baseia no conhecimento prévio das possibilidades futuras e suas consequências (SIQUEIRA & SALGADO, 2011).

De acordo com Hillier & Lieberman (2006) pode-se afirmar que o princípio da otimalidade para a PD é baseado no fundamento de que a decisão imediata ótima depende somente do estado atual e não de como se chegou lá. Taha (2008) complementa, afirmando que os cálculos em PD são feitos recursivamente, de modo que a solução ótima de um subproblema é usada como dado de entrada para o subproblema seguinte. Ainda discorre que quando o último subproblema é resolvido, a solução ótima para o problema inteiro está à mão.

2.2.1 Programação dinâmica: conceitos

A formulação de problemas de programação dinâmica exige a noção de alguns termos básicos e estabelecimento de algumas notações para o entendimento e desenvolvimento do modelo. Marques (2003), fez o uso de algumas notações e termos importantes neste sentido, conforme descritos a seguir:

- a) Horizonte de planejamento: conjunto de períodos sucessivos no decorrer do qual há interesse em se otimizar determinada variável ou função;
- b) Estágios: são os períodos anuais, em que as ações de substituição são conduzidas. Coincide com o horizonte de planejamento;
- c) Estado: situação do sistema em determinado estágio, caracterizada por uma ou mais variáveis quantitativas ou qualitativas;
- d) Ação: em cada estado existe um conjunto de ações viáveis, das quais uma deverá ser escolhida e executada; onde, resolver o problema de programação dinâmica significa, dado um objetivo, achar a melhor sequência de ações;

- e) Plano: pode ser resumido como um conjunto de ações, no qual para cada estado é especificada uma ação.
- f) Retorno: define-se como algo que o sistema gera, sobre um estágio ou processo;
- g) Transição: é a passagem do sistema do estado em que se encontra em determinado estágio para um estado associado ao estágio seguinte;
- h) Decisão: no caso em estudo, problema de substituição de equipamentos, a decisão que é realizada no início de cada estágio consiste em reter o equipamento em uso por mais um ano ou substituí-lo e começar o ano seguinte com o equipamento novo;
- i) Política: é caracterizada como o conjunto de decisões sucessivas ao longo do horizonte de planejamento.

Existem problemas que são considerados multivariáveis e a Programação Dinâmica tem como finalidade determinar a solução ótima de dificuldades dessa natureza, sendo de forma determinística (PDD) quando o estágio no estado posterior é determinado pelo o estado e decisão sobre a política a ser adotada no estágio atual e sendo probabilística/estocástica (PDP/PDE) quando envolve uma distribuição probabilística para determinar o estágio no estado posterior.

2.2.2 Substituição de Equipamentos

Segundo Marques et al. (2005), dentre os métodos utilizados para determinação da substituição ótima de máquinas e equipamentos, destacam-se o do custo médio total, o do custo anual equivalente, o de equações diferenciais e o de programação dinâmica. Ainda assim, ele afirma que mesmo que cada método apresente suas características, a PD permite gerar soluções de forma rápida e otimizada dentro de um leque maior de opções, além de se apresentar de forma flexível. A vantagem de se utilizar a PD, neste caso, está na capacidade que o método tem de oferecer ao planejador uma alta gama de alternativas, além da eficiência em relação à sensibilidade da solução ótima.

Projetos de substituição de equipamentos (PSE) tem como objetivo analisar a viabilidade econômica da troca de uma ferramenta/máquina, já em uso, por outra ferramenta selecionada. Os dados dos bens analisados são representados por características técnicas e econômicas que são incorporadas nos métodos de análise para a busca de soluções (ABENSUR, 2015).

Ainda, segundo Casarotto & Kopittke (2007), Ehrlich (1986) e Fleischer (1973), conforme citado por Abensur (2015, p. 532), os autores identificaram, caracterizaram e apresentaram formas de análise de investimentos adequadas para a avaliação econômica da

viabilidade da substituição, sendo as situações comuns: (i) baixa sem reposição, ou seja, um ativo poderá deixar de ser econômico antes de atingir sua vida física e não ser desejável sua substituição; (ii) substituição idêntica, equipamentos que são afetados em menor escala pelo avanço tecnológico serão substituídos, devido ao desgaste, por novos equipamentos com características semelhantes; (iii) substituição não idêntica, os bens substitutos possuem alguma diferença em relação ao bem em uso, mas não há uma diferença significativa; e (iv) substituição com progresso tecnológico, os bens substitutos estimados diferem significativamente do bem em uso. Sendo assim, a classificação é vista como uma facilitadora na identificação de características tecnológicas e econômicas dos bens em análise, além de auxiliar na seleção do método de resolução adequado a cada PSE.

2.3 Engenharia econômica e financeira: conceitos básicos

Hirschfeld (2000) comenta que a engenharia econômica é capaz de promover uma avaliação sistemática para otimização de recursos a partir de alternativas provenientes de fatores técnicos, financeiros e sociais.

Para maior entendimento dos termos e técnicas utilizados neste trabalho, são definidos abaixo alguns conceitos relacionados à engenharia econômica e financeira:

- a) Depreciação: A depreciação pode ser entendida como a diferença entre o preço de compra de um bem e o seu valor residual depois de um certo tempo de uso. Um dos métodos de depreciação é o de depreciação linear, que é um dos métodos considerados mais simples e de maior uso (DUTRA, 2009). A fórmula utilizada para seu cálculo é a seguinte:

$$DA = \frac{(vn - vr)}{N} \quad (2.3)$$

Sendo:

DA = Depreciação anual;

vn = Valor de aquisição do novo equipamento;

vr = Valor residual;

N = Vida útil em anos.

- b) Índice Geral de Preços do Mercado – (IGP-M): O IGP-M é um indicador macroeconômico que registra a inflação de preços de bens de consumo e bens de produção. De acordo o Instituto Brasileiro de Economia-IBRE (2017), o IGP-M tem

como base metodológica a estrutura do índice geral de preços – disponibilidade interna, resultando da média ponderada de três índices de preços: o índice de preços ao produtor amplo (IPA-M), o índice de preços ao consumidor (IPC-M) e o índice nacional de custo da construção (INCC-M).

- c) Vida útil econômica: pode ser definida como a idade em que além dela não vale a pena manter o equipamento, do ponto de vista dos custos. Ela se faz baseada na máxima produtividade e eficiência, demonstrando um refinamento administrativo que sugere substituir o bem no ponto em que ele prestou o melhor serviço à empresa e que daí por diante não mais irá contribuir com o mesmo desempenho (CAIRES, 1978; PLIZZARI, 2017).

2.4 Engenharia de manutenção: conceitos básicos de confiabilidade

Após a segunda guerra mundial, grandes mudanças ocorreram em relação à manutenção, e assim exigindo novas posturas dos profissionais, a saber: competência, criatividade, flexibilidade, velocidade, cultura de mudança e trabalho em equipe. Tais mudanças podem ser justificadas devido ao aumento da produção e complexidade das instalações e equipamentos. Neste contexto, a engenharia de manutenção assumiu uma função estratégica nas organizações e vários instrumentos gerenciais têm sido utilizados (ALMEIDA & CARVALHO, 2016).

Fogliatto & Ribeiro (2009) sugerem que o estudo da confiabilidade é uma necessidade que surgiu com o advento da economia globalizada, a partir da necessidade de redução na probabilidade de falhas em produtos. Ainda, explanam que a confiabilidade está associada à operação bem-sucedida de um produto ou sistema e à ausência de quebras ou falhas e que os principais conceitos associados à confiabilidade são: qualidade, disponibilidade, manutenibilidade, segurança e confiança. Com base nas normas NBR ISO-5462 (1994) e NBR ISO-8402 (1994), Fogliatto e Ribeiro (2009) definem estes principais conceitos:

- a) Qualidade: pode ser definida como o cumprimento das especificações de projeto e manufatura com menor variabilidade possível;
- b) Disponibilidade: é definida como a capacidade de um item, mediante manutenção apropriada, de desempenhar sua função em um determinado período de tempo. O conceito de disponibilidade varia conforme a capacidade de reparo da unidade e em unidades reparáveis e os possíveis estados da unidade em um tempo t de análise funcionando ou em manutenção; nestes casos, trabalha-se com um valor médio de disponibilidade A (do inglês, *availability*):

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (2.4)$$

Sendo,

MTBF: tempo médio entre falhas (do inglês, *Mean Time Between Failures*);

MTTR: tempo médio para reparo (do inglês, *Mean Time to Repair*)

- c) **Mantenabilidade:** capacidade de um item ser mantido ou realocado em condições de executar suas funções requeridas, mediante condições preestabelecidas de uso, quando submetido à manutenção sob condições predeterminadas e fazendo o uso de procedimentos e recursos padrão;
- d) **Segurança:** basicamente, pode ser definida como a ausência de condições que possam causar a morte, dano ou doenças ocupacionais a pessoas, bem como dano ou perda de equipamento ou de propriedade;
- e) **Confiança:** podem-se considerar os conceitos de confiança e confiabilidade como análogos; o termo confiança, todavia, estaria associado a uma definição de maior amplitude, não estritamente probabilística de confiabilidade.

3. METODOLOGIA

O cenário em que o estudo em questão se concentra é uma indústria do setor alimentício, localizada no Agreste Pernambucano e seu contexto é caracterizado como estudo de caso por investigar um determinado fenômeno dentro de um contexto real com o objetivo de estimular a compreensão acerca de tomadas de decisões. A principal tendência em todos os tipos de estudo de caso, é que estes tentam esclarecer o motivo pelo qual uma decisão ou um conjunto de decisões foram tomadas, como foram implementadas e com quais resultados alcançados (YIN, 2001 apud. MIGUEL, 2007, p.219). Além disso, a pesquisa é tida como “quali-quantitativa”, pesquisa com fundamento qualitativo e quantitativo, pelo fato de mensurar variáveis e fazer o uso de observações e coleta de evidências teóricas. De acordo com Miguel (2012), na Engenharia de Produção, o que caracteriza o fundamento qualitativo em uma pesquisa é a coleta de informações por parte do observador na organização à fim de entender a complexidade pesquisada.

O instrumento de coleta de dados consistiu em relatórios gerenciais, acesso ao sistema de informação da empresa e registros de dados e informações do desempenho dos equipamentos da linha de produção do biscoito tipo *wafer* disponibilizados pelo setor de Planejamento e Controle da Produção (PCP) e pelo setor de Planejamento e Controle da Manutenção (PCM).

Com a intenção de expressar uma sequência clara e lógica dos passos realizados no estudo após o levantamento bibliográfico, segue abaixo uma lista com uma sucinta explicação a respeito de cada etapa:

- a) Caracterização da empresa: nesta etapa foi realizada uma breve descrição da empresa em estudo, levando em consideração o ramo em que ela está inserida, sua abrangência e suas diretrizes estratégicas;
- b) Descrição do processo produtivo: após a descrição da empresa, foi realizado a descrição do processo produtivo selecionado para o estudo em questão. O fluxograma do processo de fabricação foi estrategicamente elaborado com representações das máquinas;
- c) Seleção do equipamento crítico: nesta etapa foi realizada uma seleção do equipamento que apresentou comportamento mais crítico, quando pensado na indisponibilidade da linha de produção;

- d) Descrição técnica e econômica do equipamento selecionado: para fundamentar o estudo, neste passo, o equipamento selecionado foi descrito tecnicamente e economicamente;
- e) Previsão de receitas e custos operacionais: para tornar o trabalho mais próximo da realidade, foram considerados algumas variáveis que reproduzem um pouco da complexidade e comportamento do sistema;
- f) Aplicação da PDD: nesta etapa, foram definidos os elementos do modelo, estabelecidas as equações recursivas e aplicado o modelo no caso;
- g) Resultados e discussões: nesta etapa foi comentada a solução ótima obtida com a aplicação do modelo e discutidas algumas questões que se apresentaram necessárias;

4. ESTUDO DE CASO

4.1 Caracterização da empresa

A empresa em estudo é uma indústria do setor alimentício de grande porte, localizada no Agreste Pernambucano, produtora de biscoitos, cafés, massas, mistura para bolos e salgadinhos. Tem como missão oferecer alimentos aos consumidores com segurança e sustentabilidade e sua visão concentra-se em expandir a participação no mercado e ser reconhecida como marca de qualidade. Com mais de 600 colaboradores, a empresa funciona os 365 dias do ano e suas principais linhas de produção operam 24 horas/dia. O trabalho concentrou-se no setor de fabricação do biscoito do tipo *wafer*, já que este apresenta um maior acervo de dados históricos. Porém, mesmo com o estudo concentrado neste setor, os dados disponíveis não foram suficientes para quantificar probabilisticamente as incertezas envolvidas.

4.2 Descrição do processo produtivo

O processo de produção do biscoito, do tipo *wafer*, inicia-se com a pesagem das matérias prima referentes a produção da casquinha e do creme. Em seguida os materiais são transferidos para o batimento que tem como finalidade homogeneizar a mistura dos ingredientes; tem-se dois turbos misturador operando de forma paralela, um para a formação da massa da casquinha do biscoito e o outro para a formação do recheio, que são transferidos para reservatórios adaptados com peneiras (pontos de controle). Por conseguinte, através de bombas e tubulações, a mistura de massas é transferida para as placas de forno com o auxílio de injetores. Com as casquinhas prontas, elas passam por arcos de resfriamento e vão para o aplicador de creme. Além disso, vale salientar que no aplicador de cremes existe outro ponto de controle que é responsável por perfurar as casquinhas que recebem a camada de recheio, para assegurar melhor fixação e formação dos blocos. Em seguida, os blocos são transferidos para um refrigerador vertical que contém um arco de resfriamento e que divide o acesso do bloco entre o forneamento e a área climatizada de corte e embalagem.

Transferidos por esteiras transportadoras para os cortadores de blocos, o wafer segue para a finalização do seu processo que é a de separação e empacotamento. Na separação, através de empurradores, os blocos são divididos em fileiras de acordo com o corte realizado anteriormente e atravessam um detector de metais (denominado ponto crítico de controle), antes de chegarem a etapa de empacotamento. Nesta etapa, os biscoitos são conduzidos para

um transferidor de esteiras que os divide na quantidade que deve ter em cada embalagem e seguem para o devido empacotamento e encaixotamento. O processo é finalizado quando as caixas passam na seladeira e os colaboradores formam os paletes de acordo com o controle de paletização.

Para melhor visualização do processo, pode ser visto o fluxograma disposto na figura 4.1, estrategicamente desenvolvido com os blocos representando as máquinas/equipamentos.

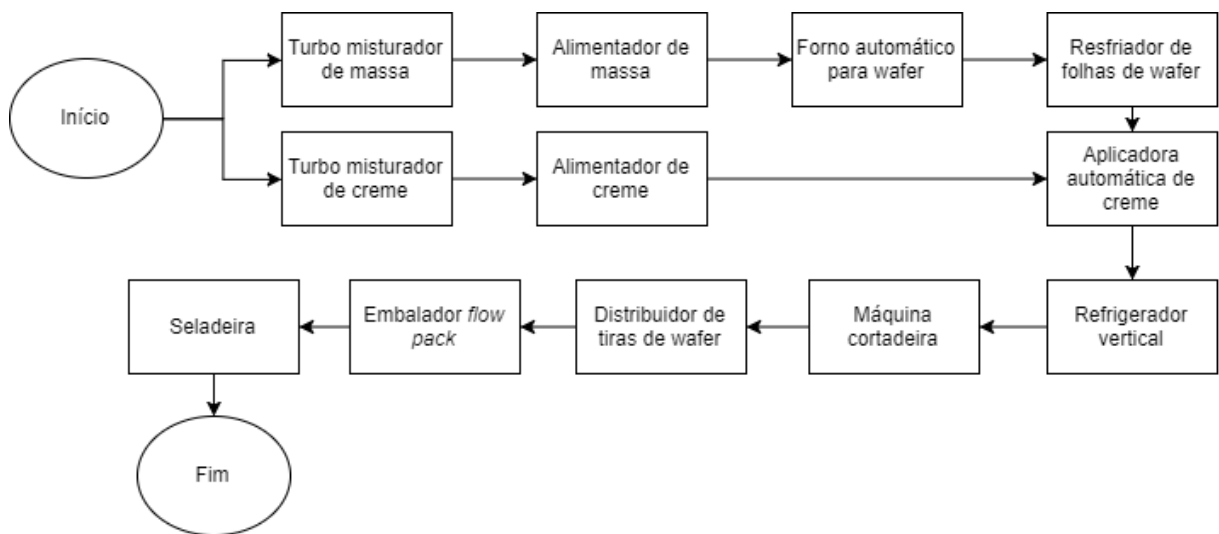


Figura 4.1 - Fluxograma do processo produtivo
Fonte: O autor (2017)

4.3 Seleção do equipamento crítico

Com o intuito de simplificar o estudo em questão, foi realizada uma seleção do equipamento considerado mais crítico no processo através de uma análise da frequência de paradas de linha e tempo total referente a tais paradas.

Para captação dos dados necessários foram analisadas requisições de atendimento abertas pelo setor em estudo junto ao setor de manutenção da empresa e planilhas referentes as paradas de linha de produção. Uma requisição de atendimento é um documento gerado pelo responsável da linha de produção e repassado para os operadores mantenedores, naquele turno. No documento constam informações de qual o tipo de falha que ocorreu, (mecânica, elétrica, produção e/ou outros), qual o equipamento, se houve parada da linha ou somente de equipamento e por quanto tempo ocorreu essa parada. Ao ser analisado pelos mantenedores e efetuado as devidas correções, são adicionadas descrições dos reais motivos e qual foi o tempo requerido para solução do problema.

Foram analisadas todas as planilhas e requisições geradas referentes ao primeiro semestre do ano de 2017, visando uma maior e direcionada base de dados, com foco naquelas que acusaram parada de linha. Segundo Menita et al. (2011), indisponibilidade de linhas de produção pode ser efetivamente um fator crítico de sucesso não só para processos de produção de biscoito, mas também para muitos outros processos de produção de fluxo contínuo. Além de que, as paradas de linha podem ocorrer devido a várias situações, sendo mais significativas as de máquinas por problemas técnicos.

As paradas de linha podem consequentemente resultar em um conjunto de custos advindos da indisponibilidade, como o custo da perda de clientes por atraso na entrega, custo da ociosidade dos colaboradores e consequente desmotivação, custo da queda na produção, entre outros.

Durante a análise dos dados, foram identificadas algumas imprecisões e para efeito de minimização delas e de adequação ao proposto, foi estabelecida uma consideração baseada na formação de conjuntos de equipamentos. A formação de conjuntos de equipamentos torna-se necessária, para alguns deles, devido as lacunas que existem a respeito da apuração da frequência de problemas. Nesse caso, a agregação se deu a respeito dos seguintes equipamentos: turbo misturador de massas e alimentador de massas, sendo tratados como masseira e para o turbo misturador de cremes e alimentador de cremes, sendo tratados como recheadeira.

Problemas relacionados ao motor de acionamento podem ser considerados um exemplo das lacunas existentes; alguns dos colaboradores se referem ao motor de acionamento como sendo o motor elétrico existente no turbo misturador de massas que é acionado através do rotor, já outros se referem ao motor de acionamento como sendo a bomba de massas para alimentação do recipiente do forno, causando assim, certa confusão na análise dos dados. Sendo assim, a figura 4.2 representa o fluxograma do processo produtivo após a consideração dos conjuntos de equipamentos.

A primeira análise, advinda da aplicação do Diagrama de Pareto, caracterizou a frequência de paradas na linha de produção, objetivando indicar aquele que apresentou maior índice. Na tabela 4.1, tem-se a frequência e o percentual da ocorrência de indisponibilidade no primeiro semestre de 2017 em relação a cada um dos equipamentos, sendo considerado como “outros” aqueles que apresentaram o número de ocorrência relativamente insignificante quando comparados aos demais.

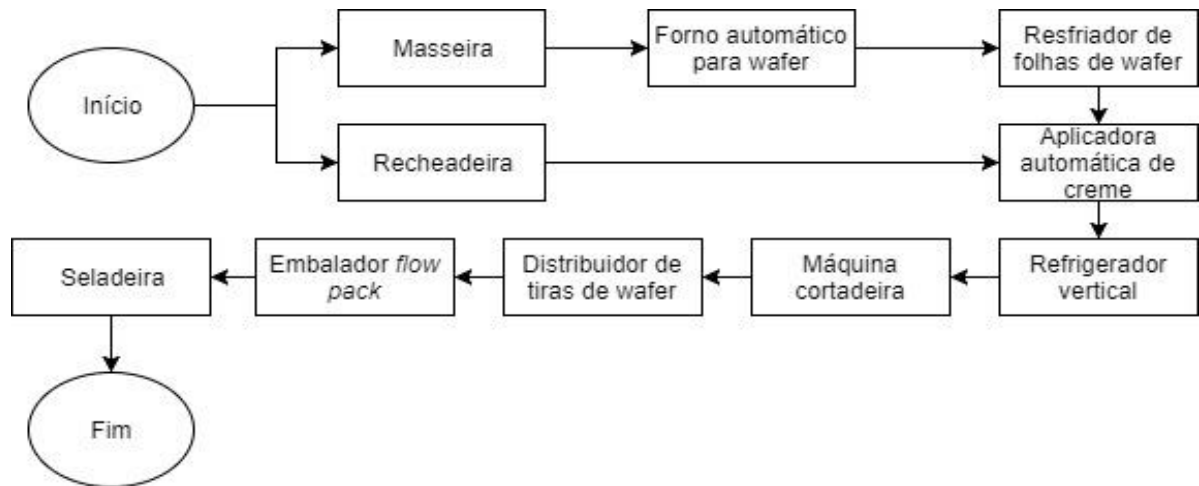


Figura 4.2 - Fluxograma do processo produtivo modificado
 Fonte: O autor (2017)

Tabela 4-1 - Dados da indisponibilidade dos equipamentos
 Fonte: O autor (2017)

	Frequência	F. Acumulada	Porcentagem	P. Acumulada
Forno	134	134	70,53	70,53
Embalador F. P.	17	151	8,95	79,47
Aplicadora C.	14	165	7,37	86,84
Masseira	13	178	6,84	93,68
Outros	12	190	6,32	100

A partir disto foi possível perceber que o forno representou aproximadamente 70% (figura 4.3) de toda a ocorrência durante os seis meses analisados.

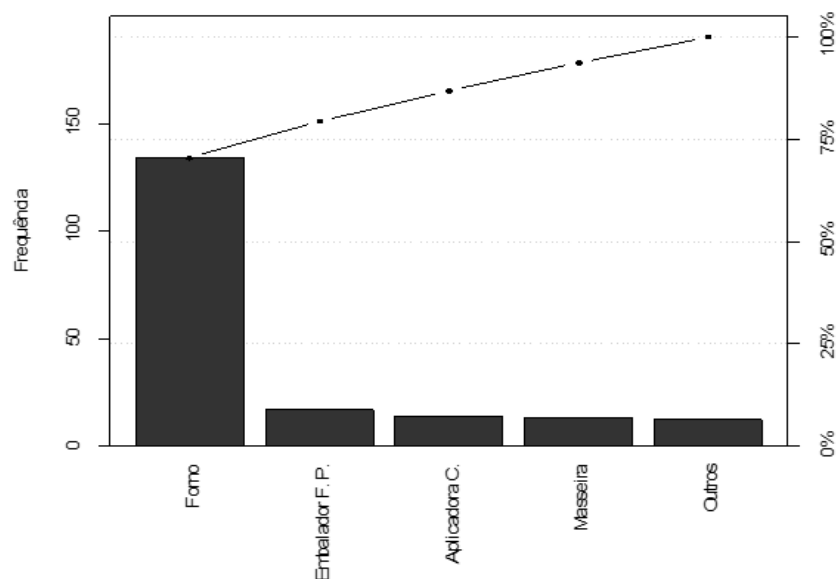


Figura 4.3 - Gráfico de Pareto
 Fonte: O autor (2017)

A fim de fortalecer a indicação do Forno Automático como o equipamento crítico, na figura 4.4 pode ser visto a quantidade de horas em que a linha de produção manteve-se indisponível em relação à cada equipamento, no mesmo semestre. É percebido que ao ser analisada a frequência de paradas, o embalador F. P. apresenta-se a frente da aplicadora de creme, diferentemente da análise da quantidade de horas paradas, onde a aplicadora mostra-se à frente do embalador. Esse fato justifica a necessidade da consideração de diferentes critérios ao estabelecer qual é o equipamento mais crítico.

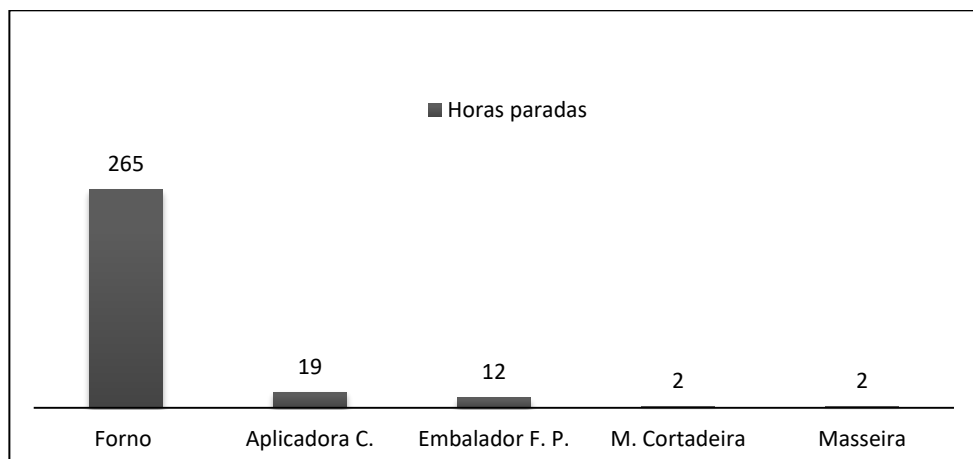


Figura 4.4 - Quantidade de horas paradas
Fonte: O autor (2017)

Outra questão que deve ser levada em consideração é o fato de que o forno é um dos três equipamentos, junto com a aplicadora automática de creme e o refrigerador vertical, que caso ocorra uma parada no equipamento, simultaneamente a linha de produção é afetada, ocasionando indisponibilidade da mesma. Dessa forma, o forno fica definido como o equipamento mais crítico da linha de produção em estudo.

4.4 Descrição técnica e econômica do equipamento crítico

O forno automático para *wafer*, disposto na figura 4.5, é um equipamento totalmente automático para produção industrial de *wafers* planos. É aquecido a gás ou eletricidade e com uma quantidade de 75 placas de cozimento, fabricadas em ferro fundido, é capaz de produzir 42 folhas de *wafer* por minuto. Deve ser levada em consideração que o tempo de cozimento é variável de acordo com características da receita, qualidade, espessura e/ou gravura, ou seja, de acordo com a tecnologia de produto utilizada. Além de que, todos os dispositivos de regulagem, mistura e segurança são integrados aos controles lógicos programáveis (CLP) que, através de um painel *touch-screen*, conecta-se em rede com toda a linha.

O forno considerado em estudo é da marca HAAS e do modelo SWAK-D 75G e de acordo com orçamento realizado pela empresa custa R\$ 2.150.548,00 e sua montagem e instalação variam em torno de R\$ 100.000,00 incluindo transporte aéreo, rodoviário e diárias do hotel para a equipe responsável. Através da tabela de vinculação de Grupos de Materiais do Catálogo BEC (Bolsa Eletrônica de Compras de São Paulo), disponibilizada pela UNICAMP (2017), foi identificado que a vida útil de um forno industrial é de 20 anos e seu valor residual estimado é de 10%. Sabendo disso, foi calculado a depreciação do item à fim de perceber e levar em consideração a diminuição parcelada do valor de compra resultante do desgaste de uso, obsolescência normal e ação da natureza. O método utilizado foi o de depreciação linear, em que faz o uso da equação 2.3. E seu uso pode ser justificado pela simplicidade de sua aplicação, já que existe certa limitação na captação de dados, além de que só é justificável utilizar métodos não lineares quando há uma variação significativa na produção da máquina ao longo dos anos. Conforme Costa (2016), o método não linear é indicado quando há aumento ou diminuição no processo de produção de uma máquina ao passar dos anos.



*Figura 4.5 - Forno automático para wafer
Fonte: Haas do Brasil (2017)*

A seguir, na tabela 4.2, é apresentada a perda de valor do ativo ao passar dos anos, dado que será posteriormente utilizado para aplicação da PD.

Nesse caso, o decremento considerado foi de R\$ 96.775,00, anualmente, baseado no cálculo de depreciação linear; tendo, o equipamento, ao final de sua vida útil um valor residual de R\$ 215.055,00 que corresponde a 10% do investimento inicial, já que o complemento foi totalmente depreciado ao passar dos anos.

Tabela 4-2 - Dados de depreciação do forno
Fonte: O autor (2017)

Ano	Valor da depreciação	Valor da depreciação ac.	Valor residual
0	-	-	2.150.548
1	96.775	96.775	2.053.773
2	96.775	193.549	1.956.999
3	96.775	290.324	1.860.224
4	96.775	387.099	1.763.449
5	96.775	483.873	1.666.675
6	96.775	580.648	1.569.900
7	96.775	677.423	1.473.125
8	96.775	774.197	1.376.351
9	96.775	870.972	1.279.576
10	96.775	967.747	1.182.801
11	96.775	1.064.521	1.086.027
12	96.775	1.161.296	989.252
13	96.775	1.258.071	892.477
14	96.775	1.354.845	795.703
15	96.775	1.451.620	698.928
16	96.775	1.548.395	602.153
17	96.775	1.645.169	505.379
18	96.775	1.741.944	408.604
19	96.775	1.838.719	311.829
20	96.775	1.935.493	215.055

4.5 Previsão de receitas e custos operacionais

Com o propósito de estreitar a interação modelo versus realidade, foram utilizados Indicadores de Performance de Manutenção (KPIs, do inglês *Key Performance Indicators*), um indicador macroeconômico, conhecido como Índice Geral de Preços - Mercado (IGP-M) e o percentual anual do Custo Total da Manutenção sobre o Faturamento Bruto estimado pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos (ABRAMAN).

4.5.1 Detalhamento do uso dos indicadores associadas

- Em relação aos indicadores de performance de manutenção:

Os indicadores de performance de manutenção foram utilizados com o intuito de prever a disponibilidade do equipamento ao longo do horizonte de planejamento previamente estabelecido no modelo de PD, qual seja: 20 anos.

Para estimar o fator disponibilidade A, foram primeiramente calculados o MTBF e o MTTR utilizando os dados históricos desde a instalação do equipamento, que foi no ano de 2014, até o ano atual e identificando a tendência para se estimar os valores até o ano de 2033 que contempla os 20 anos, o horizonte de planejamento estabelecido com base na vida útil do

equipamento. Foi tomado como referência o mês de março, pelo fato de ser o mês em que se apresenta maior demanda, justificado pela volta às aulas e consequente aumento no consumo de biscoitos como lanche escolar. Outra justificativa plausível para seleção deste mês como referência é a questão de se utilizar o pior cenário para estabelecer o estudo, no sentido de que qualquer outro mês diferente deste resultaria num menor uso da máquina e provavelmente uma menor quantidade de dados disponíveis.

Tendo em vista o fato de que o mês de março é composto por 31 dias e considerando que o setor opere às 24 horas do dia, tem-se um tempo de operação total de 744 horas/mês. A partir disto, da contagem do número de falhas e do tempo total de máquina parada nos meses de março de cada ano analisado, foram calculados os indicadores de MTBF e MTTR e posteriormente a Disponibilidade, A. Na tabela 4.3 são apresentados os dados utilizados para o cálculo e os resultados dos indicadores.

Em seguida, a partir das taxas de disponibilidade foi observado pelo gráfico, presente na Figura 4.6, que a linha de tendência apresentou um comportamento linear, com o $R^2=0,9997$ e tendo sua representação regida pela equação 4.1.

$$y = -2,825x + 100,72 \quad (4.1)$$

*Tabela 4-3 - Dados relacionados aos indicadores de performance da manutenção
Fonte: O autor (2017)*

	2014	2015	2016	2017
Nº Falhas	4	10	34	40
TTMP (hrs)	16	36	58	78,7
MTBF (hrs)	182	70,8	20,18	16,63
MTTR (hrs)	4	3,6	1,71	1,97
A (%)	97,85	95,16	92,2	89,42

Através destas informações, foram previstas as taxas de disponibilidade para os anos consecutivos completando o horizonte de planejamento em consideração. Sabe-se que uma melhoria nos métodos de manutenção ou verificação poderia vir a alterar os indicadores trabalhados acima, porém, a cultura da empresa é de extrema resistência a mudanças, o que ameniza a variação desses indicadores de forma positiva, já que a forma de gerir a manutenção é a mesma desde que a máquina em questão entrou em operação. Dessa forma, o fator de disponibilidade foi utilizado para refletir a queda de desempenho da máquina, propriamente dito, ao passar dos anos.

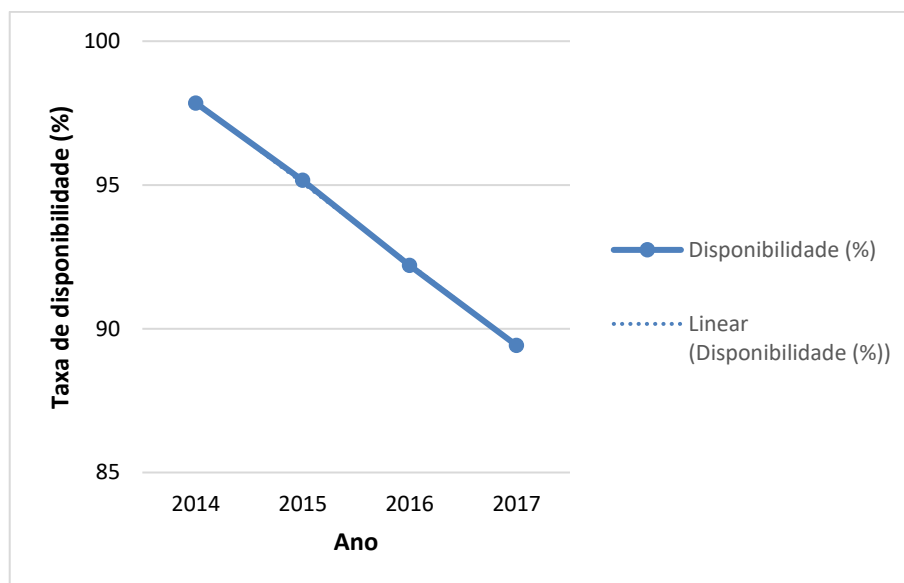


Figura 4.6 - Gráfico do comportamento da taxa de disponibilidade
Fonte: O autor (2017)

- Em relação ao índice geral de preços do mercado (IGP-M):

A partir do conhecimento do histórico dos índices dos anos 2014 a 2016 (tabela 4.4), fornecido pela Fundação Getúlio Vargas e estimativa dos mesmos até o ano de 2020, realizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística fornecidos (IBGE) em 2017 (tabela 4.5), foi possível realizar a correção dos valores anuais por meio deste índice. Vale salientar que a estimativa do IGP-M para os anos consecutivos, até completar o horizonte de planejamento preestabelecido, foi considerada como a média móvel simples (MMS) das quatro estimativas fornecidas, pois é perceptível que as estimativas realizadas pelo IBGE variam em torno de 4,5 e 5%.

Tabela 4-4 - Dados históricos do IGP-M
Fonte: O autor (2017)

Indicador	2014	2015	2016
IGP-M (%)	3,67	10,54	7,19

Tabela 4-5 - Estimativas do IGP-M
Fonte: O autor (2017)

Indicador	2017	2018	2019	2020
IGP-M (%)	4,79	4,67	4,5	4,5

- Em relação ao custo total da manutenção sobre o faturamento bruto:

De acordo com ABRAMAN (2017), o custo total da manutenção por faturamento bruto no ano de 2013 foi de 4,69%. Esse dado é de relevante importância para o estudo, já que a empresa em questão não dispõe de um histórico de custos desta natureza. De qualquer forma, visando tornar este custo mais próximo a realidade, foi levado em consideração um fator de custo para corrigir as despesas de manutenção, assim como os custos operacionais como um todo, sugerido por Plizzari (2017), em um horizonte de planejamento de 20 anos, que é o mesmo período de tempo do estudo em questão. Este autor sugere utilizar um aumento monetário de 0,5% nos dois primeiros anos e 1% a cada dois anos, baseado no aumento de peças de reposição e outros insumos.

4.5.2 Determinação das receitas e custos operacionais previstos

Com a ausência do histórico dos dados de faturamento e a necessidade de uma previsão baseada em alguns fatores para o horizonte de planejamento definido no estudo, fez-se necessário o conhecimento de alguns custos associados e do preço de venda dos produtos.

Primeiramente, com o auxílio de dados fornecidos pelo setor de PCP da empresa, foi possível arquitetar a composição do custo industrial de cada produto de acordo com o sabor e gramatura. Na linha em estudo são produzidos seis diferentes tipos de biscoitos *wafer* por sabor; todos, exceto um, são produzidos em duas versões de gramatura, 35 e 130g.

As tabelas 4.6 e 4.7 apresentam a forma como foi considerado e obtido o custo industrial total por kg de produto acabado, baseado nos insumos. A tabela 4.6 é composta por dados do preço de matéria prima e consumo sem perdas, (consumo A), para fabricação de 1 kg do determinado produto, um percentual de perdas proposto pela empresa, o consumo após inclusão das perdas (consumo B) e o preço após inclusão das perdas. Já na tabela 4.7 é exposto o preço dos materiais de embalagem, também por kg de produto acabado.

Perdas como sobre peso do produto, varredura e perdas intrínsecas ao processo devido ao corte foram consideradas para aproximar o consumo a realidade.

Tabela 4-6 - Preço das matérias primas por kg de produto acabado

Fonte: O autor (2017)

Produto P1 – 35g							
MP	Preço A (R\$/kg-p.a.)	Consumo A (kg)	Perdas			Consumo B (kg)	Preço B (R\$/kg-p.a.)
			S. (%)	V. (%)	C. (%)		
M-1	0,85000	0,42546	3	1	10	0,49472	0,42051
M-2	1,03000	0,40591	3	1	10	0,47199	0,48615
M-3	2,45000	0,26871	3	1	10	0,31245	0,76551
M-4	2,97000	0,00462	3	1	10	0,00537	0,01596
M-5	2,45000	0,00406	3	1	10	0,00472	0,01157
M-6	0,13000	0,00304	3	1	10	0,00353	0,00046
M-7	21,85000	0,00168	3	1	10	0,00195	0,04268
M-8	1,01000	0,00122	3	1	10	0,00142	0,00143
M-9	14,06000	0,00112	3	1	10	0,00130	0,01831
M-10	16,49000	0,00112	3	1	10	0,00130	0,02148
M-11	1,07000	0,00081	3	1	10	0,00094	0,00101
M-12	4,30000	0,00034	3	1	10	0,00040	0,00170
M-13	37,01000	0,00012	3	1	10	0,00014	0,00516
Preço das matérias primas por kg de produto acabado							R\$ 1,79

S - Sobrepeço; V- Varredura; C - Corte.

Tabela 4-7 - Preço dos materiais de embalagem por kg de produto acabado

Fonte: O autor (2017)

Produto P1 – 35g					
MP	Preço (kg)	Consumo A	Perdas	Consumo B	Preço P.A.
M-1	18,80000	0,01983	3%	0,02044	0,38435
M-2	0,03852	0,09692	3%	0,09992	0,00385
M-3	0,50000	0,25641	1%	0,25900	0,12950
M-4	0,02000	0,20512	1%	0,20719	0,00414
Preço dos materiais de embalagem por kg de produto acabado					R\$ 0,52

A construção dessas tabelas de preços foi realizada para todos os produtos e para cada um deles foi observado o preço da matéria prima em geral, composta por ingredientes e materiais de embalagem. Assim, para o uso de forma geral foi optado por trabalhar com as seguintes MMS:

$$MMS (130g) = \frac{2,30953 + 2,31376 + 2,44467 + 2,48335 + 2,50216 + 2,53851}{6}$$

$$MMS (130g) = R\$ 2,43199$$

$$MMS (35g) = \frac{2,61028 + 2,74531 + 2,74935 + 2,79236 + 2,86236}{5}$$

$$MMS (35g) = R\$ 2,75193$$

Com o objetivo de tornar a estimativa de custos mais próxima à realidade, foram analisadas outras despesas como mão de obra direta e o consumo do gás. As estimativas para essas específicas despesas foram realizadas com base na capacidade produtiva da linha de produção.

A capacidade nominal da linha foi calculada de acordo com a capacidade do embalador *flow pack*, já que a mesma tem um comportamento limitante na produção. A tabela 4.8, abaixo, mostra a capacidade nominal para os dois tipos de gramatura. Foi desconsiderado cinco minutos no cálculo de capacidade, para refletir algumas simples interrupções necessárias.

Tabela 4-8 - Capacidade nominal da linha de produção
Fonte: O autor (2017)

Embalagem	Pct/min	kg/pct	Máquinas	kg/min	min/hora	kg/h
130g	70	0,13	1	9,1	55	500,5
35g	110	0,035	1	3,85	55	211,75

Outro aspecto importante a ser destacado é que, através do histórico de produção, foi percebido que existe uma proporção na programação da produção dos biscoitos de acordo com a gramatura, que é de 70/30, sendo 70% da produção diária é referente ao biscoito de 130g e 30% é referente ao biscoito de 35g. Assim, o cálculo de custos com mão de obra e consumo de gás foram os seguintes:

- a) Mão de obra direta (M.O.D.): considerando a capacidade da linha como 413,875 kg/h, baseado na proporção de produção citada, é deduzido que 1 kg do produto é produzido em aproximadamente 0,0024 horas e sabendo que a linha é composta por 10 funcionários por turno, foi possível utilizar a totalidade do salário em horas multiplicado pela quantidade de horas necessárias para se produzir 1kg de biscoito, resultando em um custo de M.O.D./kg de produto acabado, que foi de R\$0,29456/kg.
- b) Consumo do gás liquefeito de petróleo (GLP): através das tabelas de tarifas fornecidas pela empresa fornecedora do gás e do conhecimento da faixa de consumo diária em m³ de GLP pela empresa, foi obtido o custo de GLP por hora, que é de aproximadamente R\$63,7125; dessa forma, obteve-se quanto é pago por 0,0024 horas. Assim, o custo de GLP por kg de produto acabado é de R\$0,15291/kg.

Para visualização, tem-se na tabela 4.9 o resumo dos custos levados em consideração:

Tabela 4-9 - Conjuntura dos custos industriais

Fonte: O autor (2017)

Conjuntura dos custos industriais por kg produzido		
Custos	35g	130g
Matéria Prima em geral	2,75193	2,43199
Mão de obra direta	0,29456	0,29456
Consumo de GLP	0,15291	0,15291
Total (R\$)	3,1994	2,87946

Em seguida, através de uma entrevista informal com um gestor de um supermercado da região, cliente da indústria, ficou evidente que o percentual usado em cima do valor de aquisição do produto para definição do preço de venda, que é exposto nas gôndolas, é de 40%. Com isso, foi possível estimar o preço de venda direto de fábrica, valor esse que não foi permitido o acesso, já que existe uma política de preços confidencial.

O cálculo realizado para estimar o preço de venda direto da fábrica é dado da seguinte forma: sabendo que o preço dos produtos, em média, dispostos na prateleira do supermercado analisado é de R\$0,91/unidade do biscoito de 130g e de R\$ 0,35/unidade do biscoito de 35g, conclui-se que os preços de fábrica, nesse caso, foram aproximadamente R\$0,65/unidade e R\$0,25/unidade. Conhecidas essas variáveis, o valor hora pôde ser calculado com base na capacidade, percentual de fabricação de produto por gramatura e preço de venda. Esse valor hora pode ser entendido como a receita que é gerada em uma hora baseado na capacidade nominal.

Para determinar a quantidade de horas do equipamento em que, pelo menos deveria ser, trabalhada em um ano foi descontado 30 dias de manutenção preventiva e quatro dias de limpeza geral que necessita ser feita em meses alternados. Dessa forma, as horas de operação em um ano ficaram em torno de 7464 horas.

Na tabela 4.10 é apresentada a correção das horas produtivas pelo fator de disponibilidade e a correção do valor hora pelo IGP-M, refletindo um determinado comportamento na receita gerada anualmente, que é resultado da multiplicação entre as horas produtivas e do valor hora.

Seguindo o mesmo raciocínio, foram previstos os custos operacionais, apenas se diferenciando na formulação do valor hora, que neste caso é o produto entre a capacidade, percentual de fabricação de produto por gramatura e a conjuntura de custos.

Tabela 4-10 - Estimativa das receitas anuais
Fonte: O autor (2017)

Ano	Disponibilidade (%)	Horas produtivas	Valor hora (R\$)	IGP-M (%)	Receita (R\$)
2014	97,90	7307	2286	3,67	16.707.616
2015	95,07	7096	2527	10,54	17.934.726
2016	92,24	6885	2709	7,19	18.651.975
2017	89,41	6674	2839	4,79	18.945.735
2018	86,58	6462	2972	4,67	19.202.827
2019	83,75	6251	3105	4,50	19.411.035
2020	80,92	6040	3245	4,50	19.599.096
2021	78,09	5829	3395	4,62	19.787.472
2022	75,26	5617	3552	4,62	19.951.420
2023	72,43	5406	3716	4,62	20.088.282
2024	69,60	5195	3887	4,62	20.195.205
2025	66,77	4984	4067	4,62	20.269.131
2026	63,94	4772	4255	4,62	20.306.781
2027	61,11	4561	4452	4,62	20.304.648
2028	58,28	4350	4657	4,62	20.258.974
2029	55,45	4139	4872	4,62	20.165.740
2030	52,62	3928	5097	4,62	20.020.650
2031	49,79	3716	5333	4,62	19.819.111
2032	46,96	3505	5579	4,62	19.556.217
2033	44,13	3294	5837	4,62	19.226.729

Como já citado, para complemento dos custos foram levados em consideração o indicador de custo por faturamento bruto sugerido pela Associação Brasileira de Manutenção e Gestão de Ativos para mensurar os custos de manutenção. Além da utilização do fator de disponibilidade para corrigir as horas produtivas e do IGP-M para corrigir o valor hora por custo operacional, foi também usado um determinado fator custo, sugerido por Plizzari (2017), para corrigir ainda mais as despesas. A tabela 4.11 representa a formulação da estimativa do custo operacional anual.

Tabela 4-11 - Estimativa dos custos anuais

Fonte: O autor (2017)

Ano	Disponibilidade (%)	Horas produtivas	Valor Hora (R\$)	Custo de manutenção (%)	IGP-M (%)	Fator de custo	Custo operacional
2014	97,90	7307	1.257	4,69	3,67	0	10.331.204
2015	95,07	7096	1.389	4,69	10,54	1,005	11.884.026
2016	92,24	6885	1.489	4,69	7,19	1,005	11.984.737
2017	89,41	6674	1.560	4,69	4,79	1,01	11.960.133
2018	86,58	6462	1.633	4,69	4,67	1,01	12.108.549
2019	83,75	6251	1.707	4,69	4,50	1,02	12.340.947
2020	80,92	6040	1.783	4,69	4,50	1,02	12.460.511
2021	78,09	5829	1.866	4,69	4,62	1,03	12.718.198
2022	75,26	5617	1.952	4,69	4,62	1,03	12.823.574
2023	72,43	5406	2.042	4,69	4,62	1,04	13.036.896
2024	69,60	5195	2.136	4,69	4,62	1,04	13.106.287
2025	66,77	4984	2.235	4,69	4,62	1,05	13.280.746
2026	63,94	4772	2.338	4,69	4,62	1,05	13.305.416
2027	61,11	4561	2.446	4,69	4,62	1,06	13.430.723
2028	58,28	4350	2.559	4,69	4,62	1,06	13.400.511
2029	55,45	4139	2.678	4,69	4,62	1,07	13.464.679
2030	52,62	3928	2.801	4,69	4,62	1,07	13.367.802
2031	49,79	3716	2.931	4,69	4,62	1,08	13.356.909
2032	46,96	3505	3.066	4,69	4,62	1,08	13.179.734
2033	44,13	3294	3.208	4,69	4,62	1,09	13.077.657

4.6 Aplicação da Programação Dinâmica Determinística

Fundamentado no modelo proposto por Bellman em 1995, a aplicação da programação dinâmica determinística para o problema de reposição de equipamentos foi adaptada para a realidade trabalhada. Abaixo, tem-se as representações dos elementos básicos necessários a modelagem do problema:

- a) Estágios: são representados pelos anos $i, i = 1, 2, \dots, n$;
- b) Alternativas: as alternativas no estágio i recomendam manter ou substituir a máquina no início do estágio;
- c) Estado: o estado no estágio i é entendido como a idade do forno no início do ano i .

O horizonte de planejamento definido para o estudo é de 20 anos, que coincide com a vida útil do forno. E as equações recursivas adaptadas são vistas a seguir:

$$f_i(t) = \max \begin{cases} r(t) - c(t) + f_i(t+1), & \text{se manter} \\ r(0) + s(t) - I - c(0) - ci(t) + f_{i+1}(t), & \text{se substituir} \end{cases} \quad (4.2)$$

Sujeito à

$$f_{n+1}(\cdot) \equiv 0 \quad (4.3)$$

Sendo,

$f_i(t)$ = Máxima receita líquida para os anos $i, i+1, \dots e n$;

$r(t)$ = Receita bruta no ano t ;

$c(t)$ = Custo operacional no ano t ;

$ci(t)$ = Custo de instalação no ano t ;

$s(t)$ = Valor de revenda no ano t ;

I = Custo de aquisição do equipamento novo;

O problema em questão busca uma solução ótima baseada na solução ótima dos subproblemas associados, à fim de maximizar a receita líquida na determinação da idade mais econômica de realizar a substituição. Na tabela 4.12 têm-se os dados para o problema já corrigido com as devidas taxas selecionadas e estruturado de maneira a facilitar a visualização. Na primeira coluna é apresentada a idade do equipamento, lembrando que o problema foi considerado em um caso real em que o equipamento foi adquirido no ano de 2013. Na segunda coluna tem-se a receita, que como já descrito, é o produto entre o valor hora e as horas produtivas referentes a cada ano/idade do equipamento corrigida pelo IGP-M, assim como na terceira coluna são apresentados os custos operacionais resultante do produto entre valor hora para os custos operacionais e horas produtivas e somados a estimativa do

custo de manutenção, sendo todo o custo operacional corrigido anualmente pelo IGP-M e um determinado fator custo. Além disso, também são vistos na tabela o valor de revenda, que é resultado da aplicação do método de depreciação linear, e o custo de instalação, que representa a necessidade de capital para exercer a instalação do novo equipamento no período em for decidido trocar.

Tabela 4-12 - Dados de entrada para o cálculo da PDD
Fonte: O autor (2017)

Idade	Receita	Custo Operacional	Valor de revenda	Custo de Instalação
1	16.707.616	10.331.204	2.053.773	100.000
2	17.934.726	11.884.026	1.956.999	100.000
3	18.651.975	11.984.737	1.860.224	100.000
4	18.945.735	11.960.133	1.763.449	100.000
5	19.202.827	12.108.549	1.666.675	100.000
6	19.411.035	12.340.947	1.569.900	100.000
7	19.599.096	12.460.511	1.473.125	100.000
8	19.787.472	12.718.198	1.376.351	100.000
9	19.951.420	12.823.574	1.279.576	100.000
10	20.088.282	13.036.896	1.182.801	100.000
11	20.195.205	13.106.287	1.086.027	100.000
12	20.269.131	13.280.746	989.252	100.000
13	20.306.781	13.305.416	892.477	100.000
14	20.304.648	13.430.723	795.703	100.000
15	20.258.974	13.400.511	698.928	100.000
16	20.165.740	13.464.679	602.153	100.000
17	20.020.650	13.367.802	505.379	100.000
18	19.819.111	13.356.909	408.604	100.000
19	19.556.217	13.179.734	311.829	100.000
20	19.226.729	13.077.657	215.055	100.000

A seguir tem-se a primeira solução gerada (tabela 4.13), que representa a última decisão. Esses cálculos são realizados de forma recursiva, de modo que a solução ótima de um subproblema é usada como dado de entrada para o subproblema seguinte. E é no momento em que o último subproblema é resolvido que a solução ótima para o problema inteiro se torna disponível.

Taha (2008) comenta que o aumento do número de variáveis de estado aumenta os cálculos em cada estágio, e isso fica claro em cálculos tabulares de PD, porque o número de linhas em cada tabela corresponde a todas as possíveis combinações de variáveis de estado. Essa dificuldade é conhecida na literatura como problema de dimensionalidade.

A dificuldade de dimensionalidade no estudo é percebida exatamente no último estágio, em que se dispõe de 17 estados diferentes, entendidos como as possíveis idades do

equipamento no início daquele estágio. Como o estágio 17 corresponde ao ano 2033, em que 20 anos se passaram desde que o equipamento foi adquirido novo, é possível, baseado na leitura da solução ótima, que o equipamento apresente a idade entre 1 e 16 ou exatamente 20 anos, ou seja, baseado no caminho ótimo lido de trás para frente existem 17 possibilidades de estado em que o equipamento possa estar no ano de 2033.

As soluções ótimas apresentadas pela aplicação do modelo em cada estado de cada estágio servirão de entrada para o estado consecutivo baseado na ideia de trás para frente. Todas as tabelas referentes às decisões em cada estágio estão dispostas no Apêndice A – Tabelas de subestruturas ótimas e a sua leitura ótima final deve ser de forma “*bottom-up*”.

Tabela 4-13 - Decisões no estágio 17

Fonte: O autor (2017)

Estágio 17 <i>t</i>	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t)$	$r(0) + s(t) - c(0) - I - ci(t)$	$f_{17}(t)$	Decisão
1	6.376.412	6.179.638	6.376.412	M
2	6.050.699	6.082.863	6.082.863	S
3	6.667.238	5.986.088	6.667.238	M
4	6.985.602	5.889.314	6.985.602	M
5	7.094.278	5.792.539	7.094.278	M
6	7.070.088	5.695.764	7.070.088	M
7	7.138.585	5.598.990	7.138.585	M
8	7.069.273	5.502.215	7.069.273	M
9	7.127.846	5.405.440	7.127.846	M
10	7.051.386	5.308.666	7.051.386	M
11	7.088.918	5.211.891	7.088.918	M
12	6.988.384	5.115.116	6.988.384	M
13	7.001.366	5.018.342	7.001.366	M
14	6.873.925	4.921.567	6.873.925	M
15	6.858.462	4.824.792	6.858.462	M
16	6.701.061	4.728.018	6.701.061	M
20	6.149.071	4.340.919	6.149.071	M

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Partindo do pressuposto que a principal intenção do trabalho foi a determinação do ano ótimo de substituição do forno automático para *wafer*, e não necessariamente a definição de uma política de reposição, o resultado de maior interesse em questão é de fato em que ano deve ocorrer a primeira troca.

Para visualizar todas as combinações das variáveis de estado e o caminho ótimo percorrido até a substituição do equipamento, foi desenvolvida uma árvore/diagrama de decisão (figura 5.1) em que além de tornar de fácil visualização o caminho ótimo até o ano de substituição, demonstra visualmente a complexidade da dimensionalidade. Ao todo, 150 diferentes situações de interesse foram analisadas para definição do melhor momento da substituição.

Ao ser aplicado o modelo de PDD, foi definido que a primeira substituição deve ocorrer quando o equipamento completar 10 anos de idade, ou seja, no ano de 2024. Utilizando as siglas M como manter o equipamento e S como substituir, a solução ótima obtida, em sequência anuais, foi a seguinte: **M-M-M-M-M-M-M-M-M-M-S-M-M-M-M-M-M-M-M-M-M**. E a máxima receita líquida ótima do problema completo é de R\$ 116.716.069. Como esperado, os resultados mostraram-se coerentes já que o forno tem uma alta utilização, visto que a linha de produção opera em três turnos no ano completo, desconsiderando o mês de manutenção preventiva e os dias destinados a limpeza.

Foi realizado algumas alterações de valores dos custos de instalação com o intuito de se observar o comportamento da solução ótima no modelo. A primeira análise foi a eliminação do custo de instalação, que pode em alguns casos estar incluso no preço do equipamento; com sua eliminação foi percebido que não houve alteração na solução ótima, mas ao duplicar o custo de instalação o modelo sugeriu uma substituição apenas ao final da vida útil do equipamento, o que pode-se concluir que apenas com um aumento de mais R\$100.000,00 no investimento de um novo equipamento, torna-se inviável a substituição antes de se chegar ao final da vida útil. Outras comparações poderiam ser realizadas, através do uso de uma análise de sensibilidade.

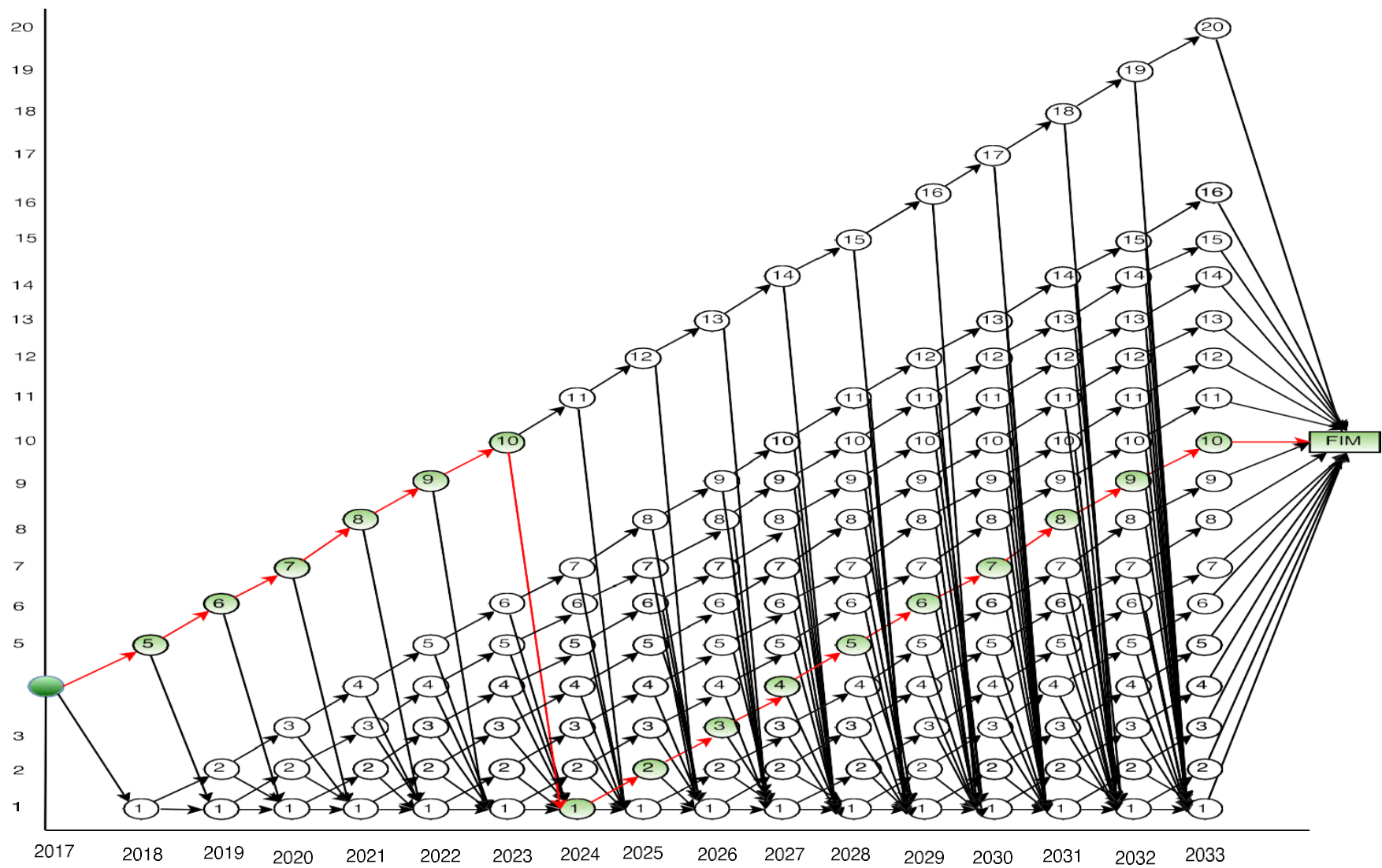


Figura 5.1 - Árvore de decisão
 Fonte: O autor (2017)

6. CONCLUSÕES

O trabalho exposto foi realizado com a finalidade de definir o ano ótimo de substituição de um determinado equipamento da empresa em estudo, considerando a variação, ao longo dos anos, de variáveis como receita, custos operacionais e valor de revenda. Para isso, foi proposta a modelagem do problema através da Programação Dinâmica Determinística.

Ao longo do estudo foi percebido que existem diversos fatores que podem ser considerados para contribuir com a formulação do problema e adquirir uma maior convicção na decisão tomada, por parte do decisor, visto que uma decisão prematura ou tardia tem impacto altamente nocivo ao capital de giro da empresa. Outro ponto importante a ser comentado é a flexibilidade de adaptações que o modelo de PD proposto permite realizar, pois a modelagem de um problema real é de fato complexa e necessita de algumas considerações e estimativa de parâmetros para que se obtenha uma solução adequada e próxima a realidade.

Mesmo diante das dificuldades do uso de modelagem matemática, decisões desse tipo são fortemente apoiadas pela PD, pois ela expressa a solução de um problema que é composto pela solução de outros n problemas menores. No caso em estudo, pode-se afirmar que as soluções dos subproblemas são as decisões pontuais de substituir ou manter o equipamento naquele ano ou estágio analisado, levando em consideração a idade ou estado em que o equipamento se encontra, e a solução ótima do problema é o resultado da composição das soluções apresentadas pelos subproblemas.

O uso da metodologia no problema proposto pode ser considerado positivo e benéfico para a empresa, quando visto que a solução obtida tem sentido lógico e apresenta uma oportunidade de direcionamento estratégico na necessária decisão de troca de equipamentos. Também é importante destacar que o uso de diagramas de árvore para expressar as possibilidades do problema e a solução ótima apresentada pelo modelo de PD tem um potencial enorme no quesito visualização, o que é importante já que a ideia de cálculo de “trás para frente” que a PD reflete pode parecer confuso e sem sentido. E num ambiente industrial, frente a atual concorrência dentro de alguns setores, são exigidas rapidez e clareza nas apresentações de estudos, projetos e resultados.

Como sugestões para trabalhos futuros podem ser citados a inclusão da inovação com o intuito de analisar não somente a substituição de equipamentos de mesmos modelos, a variação no valor da aquisição levando em consideração taxas de juros selecionadas criteriosamente e a aplicação de outros modelos para comparação da solução ótima.

REFERÊNCIAS

- ABENSUR, E. O. **A substituição de bens de capital: um modelo de otimização sob a óptica da Engenharia de Produção.** Gest. Prod.[online]. 2015, vol.22, n.3, pp.525-528. Epub 04-Set-2015.
- ABENSUR, E. O. **Um modelo alternativo de otimização para a política de reposição de equipamentos.** Sinergia, São Paulo, v. 11, n. 2, p.140-150, jul./dez. 2010.
- ALMEIDA, R. B.; CARVALHO, A. L. **Análise sistêmica de confiabilidade, manutenibilidade e disponibilidade em uma frota de tratores de esteira: projeto piloto aplicado a mineração.** In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 36. João Pessoa. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO E GESTÃO DE ATIVOS – ABRAMAN. **Documento Nacional.** Disponível em: < <http://www.abraman.org.br>> Acesso em: 15 de outubro 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade.** Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT NBR 8402. **Gestão da Qualidade.** Rio de Janeiro, 1994.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de administração, contabilidade e economia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.
- BELLMAN, R. **Equipment replacement policy.** Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 3, n. 3, pp. 133-136, 1995.
- CAIRES, H. R. R. **Novos tratamentos matemáticos em tema de engenharia de avaliações.** 2. ed. São Paulo: Pini, 1978.
- CAMPOS, C. C. **A Indústria de Alimentos no Brasil e na América do Sul.** FGV Projetos, N°27, 2016.
- CARDOSO, A. **Fundamentos da Pesquisa Operacional.** Minas Gerais: UNIFAL-MG, 2011.
- CASAROTTO FILHO, Nelson. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial.** – 9.ed. — São Paulo: Atlas, 2000.

CASAROTTO, N. F.; KOPITKE, B. H. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. São Paulo: Atlas, 2007.

COSTA, L. **Depreciação em linguagem simples: O que não depreciar?**. 2016. Disponível em: <<http://www.buyandhold.com.br/depreciacao-em-linguagem-simples-o-que-nao-deprecia/>> Acesso em: 04 de dezembro de 2017.

DUTRA, M. J. **Matemática Financeira: livro didático**. -6. ed. rev. –Palhoça: UnisulVirtual, 2009.

EHRLICH, P. J. **Engenharia econômica: avaliação e seleção de projetos de investimento**. São Paulo: Atlas. 1986.

FLEISCHER, G. A. **Teoria da aplicação do capital: um estudo das decisões de investimento**. São Paulo: Edgard Blucher. 1973.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J.L.D. **Confiabilidade e Manutenção Industrial**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

GLUSS, B. **An introduction to dynamic programming**. Journal of the Staple Inn Actuarial Society, vol.16, n.4, pp.261-274, 1961.

HAAS DO BRASIL. **Swak - Forno para assar Wafer**. Disponível em: <<https://www.haas.com/pt/equipamento/plantas-de-wafers-33/fornos-para-assar-wafer-plano-oco-84/swakn-873/>> Acesso em: 15 de outubro de 2017

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. – 8. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

HIRSCHFELD, H. **Engenharia econômica e análise de custos**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2016. **Indicadores econômicos e financeiros estimados por fontes externas**.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ECONOMIA. **Indicadores de preços**. Disponível em: <<http://portalibre.fgv.br/main.jsp?lumChannelId=402880811D8E34B9011D92B6B6420E96>> Acesso em: 23 de novembro de 2017.

MARINS, F. A. S. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2011.

MARQUES, G. M. **Transformação e substituição de equipamentos utilizando equações diferenciais e programação dinâmica**. Tese (Magister Scientiae). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa (MG), 2003.

- MARQUES, G. M.; SILVA, M. L. da.; LEITE, H. G.; FONTES, A. A. **Aplicação da programação dinâmica na substituição de equipamentos**. Revista Árvore, Viçosa-MG, v.29, n.5, p.749-756, 2005.
- MENITA, P. R.; VIEIRA JR., M. VANALLE, R. M.; LUCATO, W. C. **Fatores determinantes para o desempenho dos processos de produção de fluxo contínuo: estudo de caso na indústria de biscoitos**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 31. Belo Horizonte. 2011.
- MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na Engenharia de Produção: estruturação e recomendações para sua condução**. Production, vol. 17, núm.1, 2007, pp.216-229. Associação Brasileira de Engenharia de Produção, São Paulo.
- MIGUEL, Paulo Augusto Cauchik (organizador). **Metodologia de pesquisa para engenharia de produção e gestão de operações [recurso eletrônico]**, Rio de Janeiro, Elsevier: ABEPRO, 2012.
- MIRANDA, E. G. L. O. **Desenvolvimento de uma aplicação para análise de substituição de equipamentos industriais**. Tese (mestrado). Universidade de Porto, Porto, Portugal, 2009.
- MOTTA, R.R.; CALÔBA, G.M. **Análise de investimentos: tomada de decisão em projetos industriais**. São Paulo: Atlas, 2002.
- NASCIMENTO, S. V. **A importância da substituição de equipamentos**. Disponível em: <http://www.techoje.com.br/site/techoje/categoria/impressao_artigo/1125> Acesso em: 04 de dezembro de 2017.
- PLIZZARI, R. **Modelo para Avaliação da Vida útil Econômica de Máquinas e Equipamentos Utilizando a Programação Dinâmica e o Método de Monte Carlo**. 2017.107f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul.
- SILVA, B. A. O.; NOGUEIRA, S. G.; REIS, E. A. **Determinação do momento ótimo para substituição de equipamentos sob as óticas da Gestão Econômica e da Engenharia Econômica**. Revista de administração e contabilidade, vol.7, n.1, Feira de Santana, 2015.
- SIQUEIRA, T. G.; SALGADO, R. M. **Aplicação de programação dinâmica e modelos de previsão inteligentes no planejamento da operação energética**. In: Conferência Brasileira de Dinâmica, Controle e Aplicações, 9. Águas de Lindóia. pp.587-590. 2011.
- TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional: uma visão geral**. -8. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

UNICAMP. **Bolsa eletrônica de compras de São Paulo.** Disponível em: <
http://www.dga.unicamp.br/Conteudos/Documentos/vinculacao_grupos_materiais_catalogo_bec_contas_contabeis.pdf> Acesso em: 18 de novembro de 2017.

VALVERDE, S. R.; REZENDE, J. L. P. **Princípio de substituição de máquinas e equipamentos.** Revista Árvore, v.21, n.3, p.353-364, 1997.

YIN, R. K. **Estudo de Caso – Planejamento e Método.** 2. ed. São Paulo: Bookman, 2001.

APÊNDICE A - Tabelas de subestruturas ótimas

Tabela A 1 - Decisões no estágio 17

Fonte: O autor (2017)

Estágio 17 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t)$	$r(0) + s(t) - c(0) - I - ci(t)$	$f_{17}(t)$	Decisão
1	6.376.412	6.179.638	6.376.412	M
2	6.050.699	6.082.863	6.082.863	S
3	6.667.238	5.986.088	6.667.238	M
4	6.985.602	5.889.314	6.985.602	M
5	7.094.278	5.792.539	7.094.278	M
6	7.070.088	5.695.764	7.070.088	M
7	7.138.585	5.598.990	7.138.585	M
8	7.069.273	5.502.215	7.069.273	M
9	7.127.846	5.405.440	7.127.846	M
10	7.051.386	5.308.666	7.051.386	M
11	7.088.918	5.211.891	7.088.918	M
12	6.988.384	5.115.116	6.988.384	M
13	7.001.366	5.018.342	7.001.366	M
14	6.873.925	4.921.567	6.873.925	M
15	6.858.462	4.824.792	6.858.462	M
16	6.701.061	4.728.018	6.701.061	M
20	6.149.071	4.340.919	6.149.071	M

Tabela A 2 - Decisões no estágio 16

Fonte: O autor

Estágio 16 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0) - I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{16}(t)$	Decisão
1	12.459.275	12.556.050	12.556.050	S
2	12.717.938	12.459.275	12.717.938	M
3	13.652.840	12.362.500	13.652.840	M
4	14.079.880	12.265.726	14.079.880	M
5	14.164.365	12.168.951	14.164.365	M
6	14.208.673	12.072.176	14.208.673	M
7	14.207.859	11.975.402	14.207.859	M
8	14.197.119	11.878.627	14.197.119	M
9	14.179.232	11.781.852	14.179.232	M
10	14.140.305	11.685.078	14.140.305	M
11	14.077.303	11.588.303	14.077.303	M
12	13.989.750	11.491.529	13.989.750	M
13	13.875.291	11.394.754	13.875.291	M
14	13.732.388	11.297.979	13.732.388	M
15	13.559.524	11.201.205	13.559.524	M
19	12.525.554	10.814.106	12.525.554	M

Tabela A 3 - Decisões no estágio 15
Fonte: O autor (2017)

Estágio 15	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t+1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{15}(t)$	Decisão
t				
1	19.094.350	18.735.687	19.094.350	M
2	19.703.539	18.638.913	19.703.539	M
3	20.747.118	18.542.138	20.747.118	M
4	21.149.967	18.445.363	21.149.967	M
5	21.302.951	18.348.589	21.302.951	M
6	21.277.946	18.251.814	21.277.946	M
7	21.335.704	18.155.039	21.335.704	M
8	21.248.505	18.058.265	21.248.505	M
9	21.268.150	17.961.490	21.268.150	M
10	21.128.689	17.864.715	21.128.689	M
11	21.078.668	17.767.941	21.078.668	M
12	20.863.675	17.671.166	20.863.675	M
13	20.733.753	17.574.391	20.733.753	M
14	20.433.449	17.477.617	20.433.449	M
18	18.987.755	17.380.842	18.987.755	M

Tabela A 4 - Decisões no estágio 14
Fonte: O autor (2017)

Estágio 14	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t+1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{14}(t)$	Decisão
t				
1	26.079.952	25.273.987	26.079.952	M
2	26.797.817	25.177.213	26.797.817	M
3	27.817.205	25.080.438	27.817.205	M
4	28.288.553	24.983.663	28.288.553	M
5	28.372.224	24.886.889	28.372.224	M
6	28.405.792	24.790.114	28.405.792	M
7	28.387.091	24.693.339	28.387.091	M
8	28.337.424	24.596.565	28.337.424	M
9	28.256.535	24.499.790	28.256.535	M
10	28.130.055	24.403.015	28.130.055	M
11	27.952.593	24.306.241	27.952.593	M
12	27.722.137	24.209.466	27.722.137	M
13	27.434.814	24.112.691	27.434.814	M
17	25.640.603	23.725.593	25.640.603	M

Tabela A 5 - Decisões no estágio 13
Fonte: O autor (2017)

Estágio 13 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{13}(t)$	Decisão
1	33.174.229	32.259.589	33.174.229	M
2	33.867.905	32.162.815	33.867.905	M
3	34.955.791	32.066.040	34.955.791	M
4	35.357.826	31.969.265	35.357.826	M
5	35.500.070	31.872.491	35.500.070	M
6	35.457.178	31.775.716	35.457.178	M
7	35.476.009	31.678.941	35.476.009	M
8	35.325.808	31.582.167	35.325.808	M
9	35.257.900	31.485.392	35.257.900	M
10	35.003.980	31.388.617	35.003.980	M
11	34.811.056	31.291.843	34.811.056	M
12	34.423.199	31.195.068	34.423.199	M
16	32.341.664	30.807.969	32.341.664	M

Tabela A 6 - Decisões no estágio 12
Fonte: O autor (2017)

Estágio 12 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{12}(t)$	Decisão
1	40.244.317	39.353.867	40.244.317	M
2	41.006.490	39.257.092	41.006.490	M
3	42.025.064	39.160.318	42.025.064	M
4	42.485.672	39.063.543	42.485.672	M
5	42.551.456	38.966.768	42.551.456	M
6	42.546.097	38.869.994	42.546.097	M
7	42.464.393	38.773.219	42.464.393	M
8	42.327.174	38.676.444	42.327.174	M
9	42.131.825	38.579.670	42.131.825	M
10	41.862.442	38.482.895	41.862.442	M
11	41.512.117	38.386.120	41.512.117	M
15	39.200.126	37.999.022	39.200.126	M

Tabela A 7 - Decisões no estágio 11
Fonte: O autor (2017)

Estágio 11	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{11}(t)$	Decisão
t				
1	47.382.902	46.423.955	47.382.902	M
2	48.075.764	46.327.180	48.075.764	M
3	49.152.910	46.230.405	49.152.910	M
4	49.537.058	46.133.631	49.537.058	M
5	49.640.374	46.036.856	49.640.374	M
6	49.534.481	45.940.081	49.534.481	M
7	49.465.759	45.843.307	49.465.759	M
8	49.201.099	45.746.532	49.201.099	M
9	48.990.288	45.649.757	48.990.288	M
10	48.563.503	45.552.983	48.563.503	M
14	46.074.052	45.165.884	46.074.052	M

Tabela A 8 - Decisões no estágio 10
Fonte: O autor (2017)

Estágio 10	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{10}(t)$	Decisão
t				
1	54.452.176	53.562.540	54.452.176	M
2	55.203.609	53.465.765	55.203.609	M
3	56.204.296	53.368.991	56.204.296	M
4	56.625.976	53.272.216	56.625.976	M
5	56.628.759	53.175.441	56.628.759	M
6	56.535.847	53.078.667	56.535.847	M
7	56.339.684	52.981.892	56.339.684	M
8	56.059.561	52.885.117	56.059.561	M
9	55.691.349	52.788.343	55.691.349	M
13	53.075.417	52.401.244	53.075.417	M

Tabela A 9 - Decisões no estágio 09
Fonte: O autor (2017)

Estágio 09 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{09}(t)$	Decisão
1	61.580.021	60.631.813	61.580.021	M
2	62.254.995	60.535.039	62.254.995	M
3	63.293.214	60.438.264	63.293.214	M
4	63.614.361	60.341.489	63.614.361	M
5	63.630.124	60.244.715	63.630.124	M
6	63.409.772	60.147.940	63.409.772	M
7	63.198.146	60.051.165	63.198.146	M
8	62.760.622	59.954.391	62.760.622	M
12	60.063.801	59.567.292	60.063.801	M

Tabela A 10 - Decisões no estágio 08
Fonte: O autor (2017)

Estágio 08 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{08}(t)$	Decisão
1	68.631.408	67.759.659	68.631.408	M
2	69.343.914	67.662.884	69.343.914	M
3	70.281.599	67.566.110	70.281.599	M
4	70.615.726	67.469.335	70.615.726	M
5	70.504.049	67.372.560	70.504.049	M
6	70.268.234	67.275.786	70.268.234	M
7	69.899.207	67.179.011	69.899.207	M
11	67.152.720	66.791.912	67.152.720	M

Tabela A 11 - Decisões no estágio 07
Fonte: O autor (2017)

Estágio 07 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{07}(t)$	Decisão
1	75.720.326	74.811.045	75.720.326	M
2	76.332.298	74.714.271	76.332.298	M
3	77.282.964	74.617.496	77.282.964	M
4	77.489.651	74.520.721	77.489.651	M
5	77.362.512	74.423.947	77.362.512	M
6	76.969.295	74.327.172	76.969.295	M
10	74.204.106	74.230.397	74.230.397	S

Tabela A 12 - Decisões no estágio 06
Fonte: O autor (2017)

Estágio 06 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{06}(t)$	Decisão
1	82.708.710	60.631.813	82.708.710	M
2	83.333.664	60.535.039	83.333.664	M
3	84.156.889	60.438.264	84.156.889	M
4	84.348.114	60.341.489	84.348.114	M
5	84.063.573	60.244.715	84.063.573	M
9	81.358.243	59.857.616	81.358.243	M

Tabela A 13 - Decisões no estágio 05
Fonte: O autor (2017)

Estágio 05 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{05}(t)$	Decisão
1	89.710.076	60.631.813	89.710.076	M
2	90.207.589	60.535.039	90.207.589	M
3	91.015.352	60.438.264	91.015.352	M
4	91.049.175	60.341.489	91.049.175	M
8	88.427.516	59.954.391	88.427.516	M

Tabela A 14 - Decisões no estágio 04
Fonte: O autor (2017)

Estágio 04 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{04}(t)$	Decisão
1	96.584.001	95.889.714	96.584.001	M
2	97.066.051	95.792.939	97.066.051	M
3	97.716.413	95.696.164	97.716.413	M
7	95.566.102	95.309.066	95.566.102	M

Tabela A 15 - Decisões no estágio 03
Fonte: O autor (2017)

Estágio 03 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{03}(t)$	Decisão
1	103.442.464	102.763.639	103.442.464	M
2	103.767.112	102.666.864	103.767.112	M
6	102.636.189	102.279.765	102.636.189	M

Tabela A 16 - Decisões no estágio 02
Fonte: O autor (2017)

Estágio 02 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{02}(t)$	Decisão
1	110.143.525	109.622.101	110.143.525	M
5	109.730.467	109.235.002	109.730.467	M

Tabela A 17 - Decisões no estágio 01
Fonte: O autor (2017)

Estágio 01 t	Manter	Substituir	Solução ótima	
	$r(t) - c(t) + f_i(t + 1)$	$r(0) + s(t) - c(0)$ $-I - ci(t) + f_i(1)$	$f_{01}(t)$	Decisão
4	116.716.069	116.032.838	116.716.069	M