

## UM MODELO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA PARA A TOMADA DE DECISÃO DE MANUTENÇÃO PREVENTIVA

**Ailson Renan Santos Picanço<sup>1</sup>**

ailson.picanco@outlook.com

**Guilherme Dean Pelegrina<sup>1</sup>**

guipelegrina@gmail.com

**Cristiano Torezzan<sup>1</sup>**

cristiano.torezzan@fca.unicamp.br

**Alessandro Lucas da Silva<sup>1</sup>**

alessandro.silva@fca.unicamp.br

<sup>1</sup>Faculdade de Ciências Aplicadas da UNICAMP

Rua Pedro Zaccaria, 1300 - Caixa Postal 1068, CEP 13484-350 - Limeira, São Paulo

### RESUMO

A tomada de decisão em gestão de manutenção a partir de aspectos quantitativos ainda é um desafio para a maioria das empresas brasileiras. A realização de manutenção preventiva em equipamentos e as restrições orçamentárias da maioria das empresas ainda é um desafiante dilema. Este estudo apresenta uma abordagem que modela este problema usando teoria de risco em árvores de decisão, de maneira a reponder satisfatoriamente e esse dilema. Dessa forma, o trabalho propõe um modelo de programação linear inteira, cujas variáveis binárias representam a decisão em fazer ou não manutenção preventiva em determinado item, mediante a restrições orçamentárias. Para validação da proposta, o modelo foi aplicado a dados reais de duas categorias de equipamentos em um terminal logístico de açúcar.

**PALAVRAS CHAVE.** Gestão de Manutenção. Manutenção Preventiva. Programação Linear Inteira. Árvore de Decisão.

**Área Principal:** IND - PO na Indústria, MP - Modelos Probabilísticos, PM - Programação Matemática

### ABSTRACT

The decision on maintenance management starting from quantitative aspects remains a challenge for most Brazilian companies. Performing preventive maintenance on equipment and budget constraints of most companies is still a challenging dilemma. This study provides an approach based on risk theory in decision trees to modeling and respond positively to this dilemma. Thus, the paper proposes an integer linear programming model, which binary variables represent the decision in doing or not preventive maintenance on an item, subject to budget constraints. In order to validate our proposal, the model was applied to real data from two categories of equipment in a logistics sugar terminal.

**KEYWORDS.** Maintenance Management. Preventive Maintenance. Integer Linear Programming. Decision Tree.

**Main Area:** IND - OR in Industry, MP - Probabilistic Models, PM - Mathematical Programming

## 1. Introdução

A gestão de manutenção é um dos campos de maior complexidade dentro da gestão de operações, uma vez que trata do estudo da vida dos equipamentos e da incerteza referente à probabilidade de falha e à confiabilidade de sistemas reparáveis ou não reparáveis. A manutenção atua diretamente na conformidade e na qualidade do processo produtivo, uma vez que é decisiva para a disponibilidade de equipamentos e do seu funcionamento conforme o especificado.

Um dos problemas mais críticos dentro da esfera da manutenção diz respeito à tomada de decisão quanto à execução de manutenção preventiva, preditiva ou corretiva. Segundo Assis (2010) a função corretiva é aquela em que nenhuma ação prévia é executada nos equipamentos até a falha; a preditiva atua nos sintomas que o equipamento apresenta e a sinalização de possíveis falhas futuras; enquanto a preventiva são intervenções programadas e periódicas sobre os itens para conservar o seu estado inicial ou retardar a sua degeneração natural.

A predição de falhas é o estágio mais complexo da gestão de manutenção e requer um sistema complexo de monitoramento e automação. Por outro lado, a manutenção preventiva e a corretiva são as atividades mais usuais e acessíveis à maioria das empresas. Ribeiro e Mendes (2011) explicam que a manutenção corretiva é frequentemente mais danosa e custosa ao sistema produtivo do que a manutenção planejada, para equipamentos complexos e dentro da sua vida útil.

O problema de pesquisa surge quando os gerentes precisam tomar decisão de investimentos em manutenção preventiva ou corretiva e as empresas apresentam orçamentos destinados a manutenção inferiores ou muito inferiores ao necessário para manter um programa de preventiva em todos os equipamentos. é um problema que está associado à probabilidade de falha, custos de manutenção diversos e ao risco associado a este escopo.

Neste sentido, este artigo propõe um modelo de programação linear inteira (PLI) destinado à tomada de decisão em fazer ou não manutenção preventiva em determinado item, mediante restrições orçamentárias. A construção do modelo dar-se-á por meio da análise de risco pela elaboração da árvore de decisão associada ao problema, o qual será aplicado para validação em dados reais de equipamentos em um Terminal Logístico de Açúcar, para efeito de validação.

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Gestão da manutenção e confiabilidade

Fernández e Márquez (2012) definem manutenção como a combinação de todas as técnicas e ações gerenciais durante o ciclo de vida de um item, que garantam o seu pleno funcionamento para a função requerida. Para Manzini et al (2010), manutenção é a função que monitora e mantém instalações, equipamentos e ambientes de trabalho, vindo a arquitetar, organizar, executar e verificar o trabalho de garantir o funcionamento nominal do item durante períodos de trabalho (uptimes) e minimizar intervalos de parada causados por avarias ou pelos reparos resultantes. O gerenciamento de manutenção, portanto, é a gestão adequada das falhas, da disponibilidade e da performance dos ativos físicos de uma organização, de forma que funcionem conforme os requisitos esperados dentro do seu ciclo de vida.

Segundo Márquez (2007), as estratégias de manutenção são os diferentes tipos de tarefas incluindo ações, procedimentos, recursos e tempo. Estas atividades têm de ser realizadas em conformidade com os horários estabelecidos para garantir a manutenção dos ativos-alvos.

Estratégias de manutenção e planejamento podem ser atualizados adequadamente com base nos dados extraídos de feedback da performance dos itens. A configuração de um sistema de apoio para essas estratégias depende de muitos fatores, tais como a complexidade de tarefas de manutenção, a habilidade do pessoal e disponibilidade das instalações. É, portanto, um problema de gestão de manutenção com singular complexidade (MANZINI et al, 2010).

O ponto de partida é o sincronismo do controle do sistema de produção que não envolve apenas equipamentos de monitoramento, mas também a manutenção, controle, planejamento e organização, com grande número de subatividades. Além de realizar trabalhos de reparo e melhoria, a "manutenção" deve ter o seu espaço na arquitetura da gestão e no apoio à tomada de decisões

na empresa. Por exemplo, isto aplica-se em peças de reposição, controle de custo, controle de qualidade e outras áreas (ASSIS, 2010; BARABADI, 2013).

## 2.2. Árvores de decisão

As árvores de decisão representam de forma simplificada e organizada os eventos aleatórios presentes na tomada de uma decisão, bem como os riscos envolvidos. Dessa forma, elas são de grande utilidade na visualização do problema em questão, uma vez que decompõem um problema de decisão complexo em subproblemas menores (WINSTON, 2004).

Na literatura, encontram-se estudos que utilizam as árvores de decisão como uma ferramenta de auxílio na tomada de decisões. Santos (2005) elaborou uma análise acerca da viabilidade econômica no contexto da cana-de-açúcar, no qual a árvore de decisão foi usada na determinação das receitas esperadas ao abrir mão da irrigação suplementar. Campolina e Ciconelli (2006) mostra a importância das árvores de decisão baseadas em medidas de utilidade, fornecendo resultados adequados para a análise de decisão no setor da saúde.

Quinlan (1986) apresentou uma técnica para criar tais árvores de decisão, chamada ID3. Esta técnica é composta por um conjunto de atributos mutuamente exclusivos que levam à classes também mutuamente exclusivas. Na mesma linha de raciocínio, Winston (2004) representou um problema através de uma árvore de decisão composta por nós de decisão, nós de eventos e ramificações. Nos nós de decisão há as tomadas de decisões acerca das possibilidades existentes (mutuamente exclusivas). Essas possibilidades, representadas pelas ramificações da árvore, levam aos eventos aleatórios. Tais eventos compreendem as incertezas envolvidas nas decisões tomadas, representados por uma distribuição discreta de probabilidades de ocorrência. No final da árvore, os resultados são obtidos para cada ramificação. A Figura 1 ilustra de maneira simplificada uma árvore de decisão.

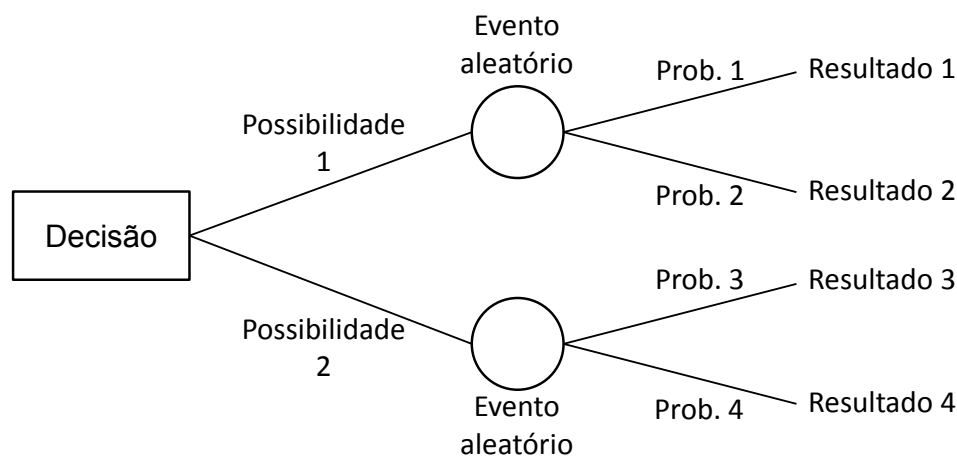


Figura 1: Esquematização de uma árvore de decisão. Fonte: Dos Autores (2015).

Nota-se que a visualização das consequências da decisão tomada (resultados) é simplificada. Assim, essa técnica probabilística servirá como auxílio na análise dos riscos envolvidos na decisão de se realizar ou não uma manutenção preventiva em determinado item. Além disso, será a base para a construção do modelo de programação linear inteira, discutido na seção seguinte.

## 2.3. Programação Linear Inteira

Os modelos de programação linear (PL) são modelos de otimização que auxiliam na tomada de decisão. Nele, a partir da definição das variáveis de decisão e das restrições envolvidas no modelo, cria-se uma função, chamada de função objetivo, cujo intuito é sua maximização ou

minimização. Com a possibilidade das variáveis de decisão assumirem valores contínuos e com a linearidade do modelo, essa classe de programação possui algoritmos eficientes para a busca da solução ótima (GOLDBARG; LUNA, 2005).

No entanto, em diversas aplicações a hipótese da continuidade das variáveis de decisão não é válida, uma vez que há a exigência que tais valores sejam inteiros (HILLIER; LIEBERMAN, 2010). Essa outra classe de programação é chamada de programação linear inteira (PLI).

Assim, a programação linear inteira busca maximizar ou minimizar a função objetivo, sujeita às restrições, de maneira que a solução seja composta por variáveis inteiras. Dentro dessa classe de programação, há uma aplicação importante, na qual as decisões são compostas por duas escolhas possíveis, ou seja, decisões de sim ou não (HILLIER; LIEBERMAN, 2010). Essa classe específica de programação é chamada de programação inteira binária (PIB), ou programação inteira 0-1, uma vez que os valores possíveis para as variáveis de decisão são 0 ou 1 (HILLIER; LIEBERMAN, 2010; WINSTON, 2004). Vale ressaltar que esta abordagem binária é justificada neste estudo uma vez que as possibilidades da realização ou não da manutenção preventiva são mutuamente exclusivas.

A modelagem matemática para um problema de programação inteira binária é ilustrado como

$$\text{Maximizar (ou Minimizar) } z = c^T x$$

$$\text{Sujeito a: } Ax \leq b$$

$$x \in \{0, 1\}$$

onde  $x$  é o vetor de variáveis de decisão,  $z$  é a função objetivo,  $c$  é o vetor de custo das variáveis de decisão,  $A$  é a matriz de restrições e  $b$  é o vetor de termos independentes vinculado às restrições. Vale ressaltar que as inequações das restrições podem ser tanto  $\leq$  quanto  $\geq$  e igualdade.

#### **2.4. Modelos aplicados à programação da manutenção planejada**

O problema de programação de manutenção planejada considerando alocação de recursos escassos tem sido alvo de pesquisas de diversos autores. Muitos estudos enveredam ao planejamento da manutenção aplicado à produção e operações com uso de modelos e métodos para agendar atividades de manutenção preventiva em sistemas de produção sujeitos a falha, isto é, para a manutenção corretiva (Hadidi et al. 2012; Xiang et al. 2014).

Manzini et al (2015) desenvolveram um modelo de programação linear considerando restrições de custos, disponibilidade de realizar a manutenção e uma abordagem de risco por meio da apuração da confiabilidade. Tantardini et al (2014) desenvolveram um modelo considerando o impacto da reprogramação das atividades de manutenção planejada ao longo do tempo para otimizar o nível de serviço na esfera de disponibilidade de recursos. Nesse sentido, Rougé et al (2014) modelou um problema de manutenção considerando o comportamento da confiabilidade com variação do tempo, isto é, aplicou otimização para obter os resultados iniciais e simulação para avaliar o modelo ao longo do tempo.

Um aspecto que deve ser levado em consideração na modelagem voltada para a programação das atividades de manutenção é a capacidade de ressuprimento e a manutenibilidade dos equipamentos reparáveis em sistemas complexos (MOGHADDAM; USHER, 2011). Verma et al (2007) aponta como uma das grandes dificuldades e fragilidades dos modelos de programação a ausência de variáveis relativas a manutenibilidade, que está intimamente ligado ao MTTR, e sobretudo à segmentação das falhas por gravidade.

### **3. Metodologia**

A pesquisa desenvolvida é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa, e se enquadra como um estudo de caso, por ter o modelo de programação linear aplicado à equipamentos da gestão de manutenção de um terminal logístico de açúcar. O objetivo central é a construção de um modelo matemático de PLI destinado à decisão de efetuar ou não manutenção planejada. Os dados

de confiabilidade foram coletados no dia 05 de abril de 2015, por meio de uma pesquisa documental no sistema da empresa.

Para a construção do modelo, inicialmente, foram determinados os parâmetros (custos, probabilidade de falha, confiabilidade) e variáveis necessários. Em seguida, foi construída a árvore de decisão, que possibilitou modelar a função objetivo e as restrições do problema. Os resultados foram avaliados e submetidos a uma análise de cenários, que permitiu inferir conclusões da presente pesquisa.

Os resultados do trabalho e a decisão de efetuar ou não manutenção preventiva para equipamentos de um terminal açucareiro situado em Ribeirão Preto-SP está condicionado aos parâmetros de custos e probabilidades de falha e funcionamento (confiabilidade) coletados. No entanto, esta pesquisa não está pautada principalmente nos resultados obtidos, mas sim na avaliação e validação do modelo matemático utilizado para resolver o problema da pesquisa.

### 3.1. O modelo

Considere  $N$  ativos em uma lista de manutenção  $L = \{1, 2, \dots, N\}$ , para os quais deseje-se fazer uma manutenção preventiva para reduzir o risco do item falhar durante um período  $Q$ . Seja  $m_i$  o custo da manutenção preventiva no ativo  $i$  e suponha que dispõe-se de um capital  $M \leq \sum_{i=1}^N m_i$ , ou seja, não há recursos suficientes para dar manutenção em todos os itens.

Nosso problema é escolher em quais itens da lista devem ser feita a manutenção de forma a minimizar o prejuízo esperado com falhas (incluindo os custos de manutenção) sem ultrapassar o orçamento  $M$ .

Para cada item  $i \in L$ , vamos atribuir uma variável de decisão binária  $x_i$ , associada as seguintes ações:

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{fazer manutenção preventiva no item } i \\ 0, & \text{não fazer manutenção preventiva no item } i \end{cases}$$

Vamos considerar também três estados principais para cada item, cujas probabilidades de ocorrência são afetadas pela decisão  $x_i$ :

- Estado OK - significa que o item funcionou perfeitamente durante o período considerado.
- Estado FL - significa que o item sofreu uma falha leve, que pode ser consertada com um reparo rápido.
- Estado FG - significa que o item sofreu uma falha grave, que necessitará de um reparo grave.

Na Figura 2 apresentamos uma árvore de possibilidades que ilustra a relação entre  $x_i$  e os estados de cada item.

Nesta árvore,  $\beta_{ij}$  representa a probabilidade condicional de ocorrência de cada estado dado  $x_i \in \{0, 1\}$  e  $p_{ij}$  representa o prejuízo associado a cada evento. Estes valores geralmente incluem custos com reparos e outros prejuízos operacionais em função da falha do item. Os valores de  $p_{ij}$  devem ser parametrizados para cada aplicação, de acordo com relatórios prévios de manutenção.

Neste caso,  $\beta_{i1}$  representa a probabilidade do item  $i$  estar funcionando dado que não foi feita a manutenção preventiva e  $p_{i1}$  é o prejuízo associado, que na maioria dos casos práticos será igual a zero. De forma análoga,  $\beta_{i2}$  representa a probabilidade de o item sofrer uma falha leve, dado que não foi feita uma manutenção preventiva, neste caso, o prejuízo é denotado por  $p_{i2}$ , enquanto que  $\beta_{i3}$  representa a probabilidade do item sofrer uma falha grave, dado que não foi feita uma manutenção preventiva, analogamente, o prejuízo neste caso é denotado por  $p_{i3}$ . O lado direito da árvore é simétrico, com a diferença de que a manutenção preventiva foi realizada.



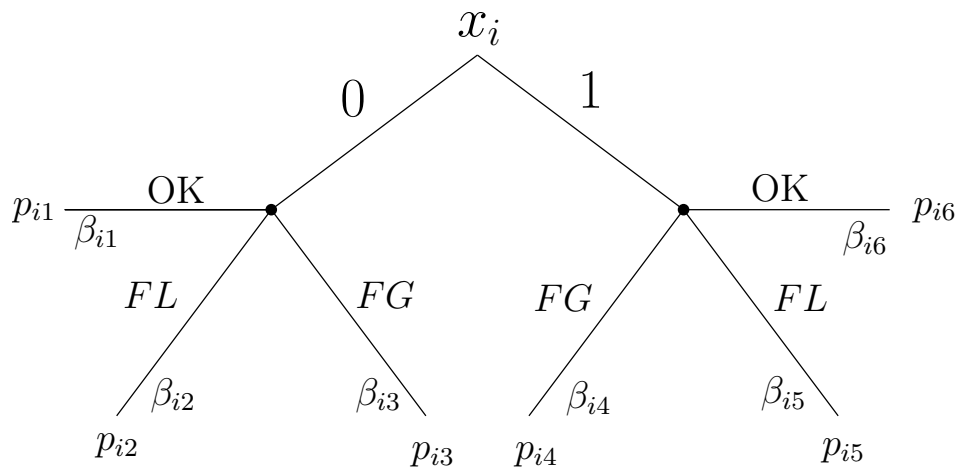


Figura 2: Árvores de possibilidades. Fonte: Dos Autores (2015).

A função objetivo do problema, que descreve o valor esperado do prejuízo, incluindo os custos de manutenção, pode ser descrita como:

$$E[P(x)] = \sum_{i=1}^N (1 - x_i)(\beta_{i1}p_{i1} + \beta_{i2}p_{i2} + \beta_{i3}p_{i3}) + x_i(\beta_{i4}p_{i4} + \beta_{i5}p_{i5} + \beta_{i6}p_{i6})$$

Assim, podemos estabelecer o seguinte problema de programação linear binária:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } E[P(x)] \\ &\text{Sujeito a: } \sum_{i=1}^N x_i m_i \leq M \\ & \quad x_i \in \{0, 1\} \end{aligned}$$

Podemos notar que o modelo proposto é um problema de programação linear com  $N$  variáveis binárias,  $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  e apenas uma restrição.

Como trata-se de um problema de planejamento, há uma maior tolerância em relação ao tempo de solução. Sendo assim, espera-se que este problema possa ser resolvido em tempo factível utilizando solvers convencionais como o *GLPK* e até mesmo o *MSExcels*, o que pode ser uma grande vantagem em termos de usabilidade prática.

Na próxima seção apresentamos um exemplo de utilização do modelo proposto aplicado à dados reais obtidos em um terminal Logístico de Açúcar situado em Ribeirão Preto-SP.

## 4. Aplicação do modelo

### 4.1. Definição dos parâmetros

O modelo foi aplicado á dados reais de um terminal logístico de açúcar em itens de duas famílias (mesma característica e mesmo comportamento de lei de vida) de equipamentos: E e B. Os parâmetros de custos utilizados são referentes ao custo médio por hora de manutenção preventiva, ao custo-hora médio de efetuar manutenção corretiva, ao custo-hora da parada do sistema produtivo e ao custo médio por hora de intervenções graves e leves. Diferem-se intervenções graves de leves pela complexidade das operações de manutenção: as intervenções leves definidas são intervenções curtas, as quais requerem pouca especialização de mão-de-obra e tropa de peças pouco importantes; por outro lado, as intervenções graves tem um tempo maior de duração, requerem mão de obra especializada e frequentemente requerem a troca de peças mais complexas dos equipamentos. Esta definição de atividades leves e graves foi efetuada junto à empresa do estudo de caso.

Há ainda os parâmetros de probabilidade associadas, onde têm-se a probabilidade de falha do item, a probabilidade de funcionamento (confiabilidade) e as probabilidades de falhas leves ou graves. Deve-se levar em consideração também os tempos associados à manutenção de falhas leve e graves, que implicam nos custos de mão-de-obra e nos custos de parada do sistema. A Tabela 1 apresenta os dados coletados de custos de manutenção e parada para os 9 itens analisados, onde 3 são da família E e 6 da família B.

Tabela 1: Dados coletados acerca dos custos de manutenção e parada.

Variável	Equipamentos	Custo-hora da preventiva	Tempo-hora da preventiva	Custo hora-parada das não programadas
$x_1$	E1	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
$x_2$	E2	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
$x_3$	E3	R\$ 66,32	1,89	R\$ 756,63
$x_4$	B1	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85
$x_5$	B2	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85
$x_6$	B3	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85
$x_7$	B4	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85
$x_8$	B5	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85
$x_9$	B6	R\$ 139,32	1,02	R\$ 306,85

Destaca-se que foram escolhidos 9 equipamentos críticos de um horizonte de 150 presentes no terminal estudado. Estes foram escolhidos a partir de uma análise de criticidade para compor o estudo de caso que serve para validá-lo

Foram ainda coletados dados de probabilidade de falhas de intervenções leves e graves, os respectivos custos-hora e o tempo médio da operação para cada tipo de intervenção (Tabela 2).

Tabela 2: Dados coletados acerca das intervenções.

	Família do item	Probabilidade	Tempo médio (h)	Custo-hora médio
Falha Grave	E	0,142857143	11,16	R\$ 519,37
Falha Leve	E	0,857142857	1,258	R\$ 63,24
Falha Grave	B	0,285714286	5,75	R\$ 244,61
Falha Leve	B	0,714285714	1,3	R\$ 118,12

Além disso, foram coletados informações de confiabilidade e probabilidade de falhas dos itens estudados, conforme apresentadas na Tabela 3.

De posse desses parâmetros, foi construída uma árvore de decisão para cada item. Em cada árvore, o nó de decisão representa a escolha pela realização ou não da manutenção preventiva. Essa ramificação leva, em ambos os lados, ao nó de evento. Neste estudo, foi considerado o evento aleatório de observar a consequência para cada item  $i$  de acordo com a decisão escolhida, em termos do bom funcionamento ou ocorrência de falhas. Dessa forma, a distribuição de probabilidade se

Tabela 3: Dados coletados acerca da confiabilidade de probabilidade de falhas.

Equipamentos	Confiabilidade - $R(t)$	Probabilidade de falha - $F(t)$
E1	76,71%	23,29%
E2	12,48%	87,52%
E3	62,88%	37,12%
B1	19,34%	80,66%
B2	3,02%	96,98%
B3	55,14%	44,86%
B4	71,65%	28,35%
B5	15,24%	84,76%
B6	63,61%	36,39%

restringe ao espaço amostral que contém os eventos funcionamento, ocorrência de falha leve ou ocorrência de falha grave. A Figura 3 contém uma árvore de decisão genérica para um determinado item. Vale ressaltar que foi considerada nula a probabilidade de ocorrência de uma falha grave dado que foi realizada a manutenção preventiva.

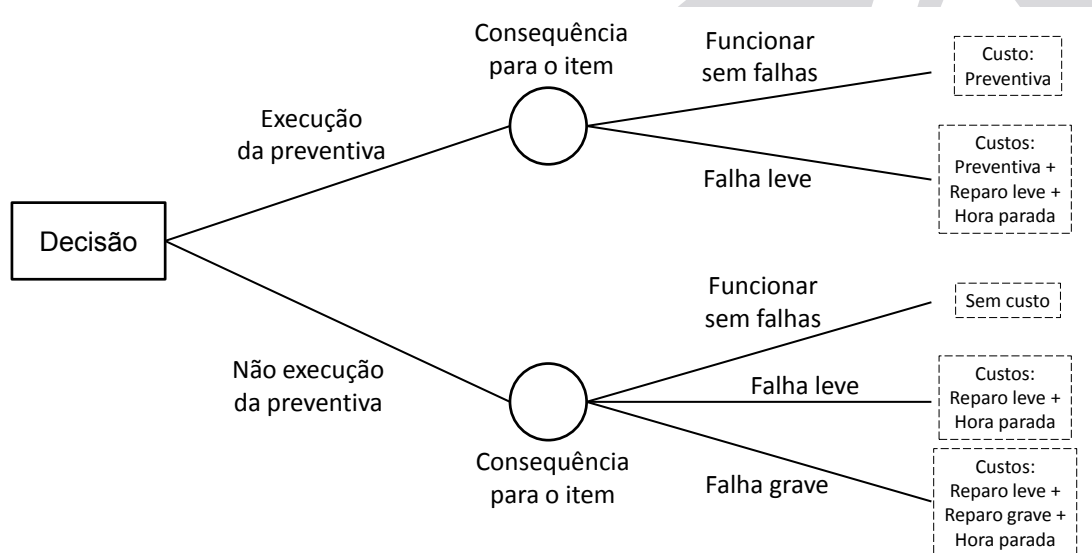


Figura 3: Árvore de decisão genérica. Fonte: Dos Autores (2015).

Como pode ser notado, para cada ramificação há um resultado particular. Como este estudo consiste na análise do risco na tomada de decisão entre a realização ou não da manutenção preventiva, os resultados considerados foram os custos esperados para cada ramificação.

Com os dados de custos e tempos da Tabela 1, as informações de probabilidade e tempo da Tabela 2 e os dados de confiabilidade e probabilidade de falha da Tabela 3 foram construídas as matrizes de parâmetros  $\beta_{ij}$  e  $p_{ij}$ :



$$\beta_{ij} = \begin{pmatrix} 0,767 & 0,120 & 0,033 & 0,233 & 0,000 & 0,767 \\ 0,125 & 0,750 & 0,125 & 0,875 & 0,000 & 0,125 \\ 0,629 & 0,318 & 0,053 & 0,371 & 0,000 & 0,629 \\ 0,193 & 0,576 & 0,230 & 0,807 & 0,000 & 0,193 \\ 0,030 & 0,693 & 0,277 & 0,970 & 0,000 & 0,030 \\ 0,551 & 0,320 & 0,128 & 0,449 & 0,000 & 0,551 \\ 0,717 & 0,202 & 0,081 & 0,284 & 0,000 & 0,716 \\ 0,152 & 0,605 & 0,242 & 0,848 & 0,000 & 0,152 \\ 0,636 & 0,260 & 0,104 & 0,364 & 0,000 & 0,636 \end{pmatrix}.$$

$$p_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & R\$1.031,40 & R\$5.876,99 & R\$1.031,40 & R\$15.271,59 & R\$125,34 \\ 0 & R\$1.031,40 & R\$5.876,99 & R\$1.031,40 & R\$15.271,59 & R\$125,34 \\ 0 & R\$1.031,40 & R\$5.876,99 & R\$1.031,40 & R\$15.271,59 & R\$125,34 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \\ 0 & R\$398,90 & R\$3.723,35 & R\$465,57 & R\$3.723,35 & R\$142,11 \end{pmatrix}.$$

Em  $p_{i6}$  está associado apenas a probabilidade de funcionamento do equipamento, logo recai apenas em custos de manutenção preventiva, sendo portanto a matriz  $m_i$  uma matriz coluna de  $p_{i6}$ . Aplicando os dados coletados ao modelo de PLI descrito, considerando a restrição orçamentária de gasto médio com manutenção preventiva ( $CTm_i$ ) de R\$ 800,00, obtemos os resultados apresentados na (Tabela 4) (utilizando o *SOLVER* do *MS Excel*).

Tabela 4: Resultados para um  $CTm_i$  de R\$ 800,00.

Orçamento	Custo Esperado	$CTm_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
R\$ 800,00	R\$ 5.088,82	R\$ 693,77	0	1	0	1	1	1	0	1	0

Como pode ser notado, deve-se fazer manutenção preventiva apenas nos itens E2, B1, B2, B3 e B5. Há o custo médio com manutenção preventiva de R\$ 693,77 de um orçamento de R\$ 800,00 com custo esperado de R\$ 5.088,82 ao mês.

Finalmente foi realizado uma análise de cenários para verificar o comportamento das variáveis e a evolução do custo esperado, variando o orçamento de R\$ 500,00 a R\$ 1300,00. Os resultados são encontrados na Tabela 5.

Observa-se que as variáveis  $x_4$ ,  $x_5$  e  $x_8$ , referentes aos equipamentos B1, B2 e B5, respectivamente, são as prioritárias na decisão de fazer manutenção preventiva. Isto pode ser explicado por serem os equipamentos que apresentam maior probabilidade de falha. Por outro lado, B4 e E1 (representados pelas variáveis  $x_7$  e  $x_1$ , respectivamente) são os equipamentos com menos prioridades, uma vez que apresentam confiabilidade elevada. Especialmente no caso do equipamento E1, vale ressaltar que em nenhum cenário houve a decisão em se realizar a preventiva.

Destaca-se ainda o comportamento do custo esperado, mediante a variação do orçamento (Figura 4). Como pode ser observado, há um comportamento exponencial negativo ao comparar a restrição orçamentária e o valor esperado de custo de manutenção. No início, o incremento orçamentário possui um impacto maior na redução do valor esperado, mas, a partir de um orçamento de R\$ 900,00, essa redução passa a ser praticamente inexpressiva, considerando a dimensão dos valores do valor esperado.

Tabela 5: Resultados da análise de cenários.

Orçamento	Custo Esperado	$CTm_i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$	$x_9$
R\$ 500,00	R\$ 5.729,40	R\$ 426,32	0	0	0	1	1	0	0	1	0
R\$ 600,00	R\$ 5.264,55	R\$ 551,66	0	1	0	1	1	0	0	1	0
R\$ 700,00	R\$ 5.088,82	R\$ 693,77	0	1	0	1	1	1	0	1	0
R\$ 800,00	R\$ 5.088,82	R\$ 693,77	0	1	0	1	1	1	0	1	0
R\$ 900,00	R\$ 4.999,94	R\$ 835,88	0	1	0	1	1	1	0	1	1
R\$ 1.000,00	R\$ 4.947,14	R\$ 961,22	0	1	1	1	1	1	0	1	1
R\$ 1.100,00	R\$ 4.947,14	R\$ 961,22	0	1	1	1	1	1	0	1	1
R\$ 1.200,00	R\$ 4.940,69	R\$ 1.103,33	0	1	1	1	1	1	1	1	1
R\$ 1.300,00	R\$ 4.940,69	R\$ 1.103,33	0	1	1	1	1	1	1	1	1

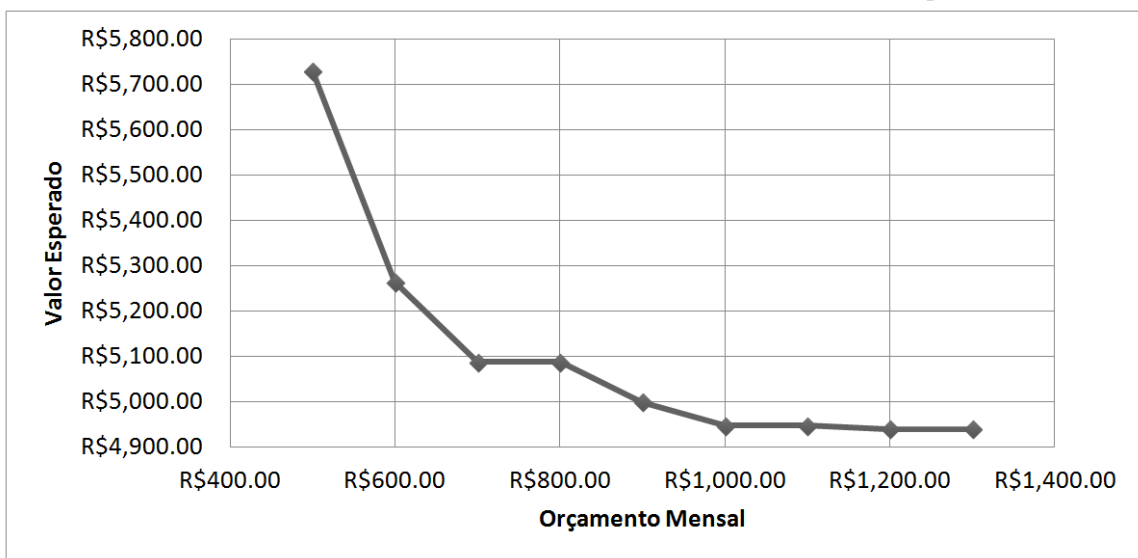


Figura 4: Custo esperado em função da variação do orçamento. Fonte: Dos Autores (2015).

## 5. Considerações finais

O modelo de PLI construído a partir de análise de risco por meio de árvore de decisão mostrou-se eficiente para a tomada de decisão de manutenção planejada no contexto da gestão de operações industriais e de manutenção. Destaca-se que o modelo desenvolvido tem como objetivo o gerenciamento e alocação de recursos em manutenção.

Os resultados mostram que o modelo, apesar de simples, requer uma análise acurada para obtenção dos parâmetros. A obtenção das probabilidades e da confiabilidade requer um histórico de falhas, bem como dados referentes a custos de manutenção associados à manutenção preventiva, intervenções corretivas leves e graves e custo médio das paradas. A obtenção dos dados para o estudo de caso foi de fácil acesso, tendo em conta a existência de custos de paradas bem definidos contratualmente e devido a existência de um sistema de manutenção informatizado. Mas isto não é uma realidade na maioria das indústrias brasileiras.

Quanto ao modelo matemático, destaca-se a segmentação em falhas leves e mais agudas,

o que traz maior realismo ao modelo elaborado. Entretanto, verificou-se que o modelo é dependente dos parâmetros, sobretudo de confiabilidade e de falhas, e, por isto, retrata uma realidade estática, um recorte. Para estudos futuros, sugere-se adotar uma abordagem dinâmica, com avaliação temporal, por meio do uso de simulação agregado ao modelo de PLI. Tendo o modelo validado e consolidado, sugere-se também a realização do estudo completo dos equipamentos, expandindo o modelo para os 150 presentes no terminal, o que necessita de uma análise de confiabilidade excessiva para cada um dos equipamentos.

Trata-se de um modelo simples que tem como diferencial a segregação de falhas em gravidade, conforme sugerem Verma et al (2007). Por outro lado, ele não tem a pretensão de desenvolver uma programação de manutenção, feito os trabalhos de Manzini et al (2015) e Tantardini et al (2014), uma vez que ele aborda apenas uma parte desse estudo, ou seja, a de alocação de recursos para a manutenção mediante às restrições orçamentárias. Para estudos futuros destaca-se também o aprofundamento do modelo para levar em consideração fatores como alocação de mão-de-obra de manutenção e a periodicidade das atividades de manutenção.

Finalmente, o modelo ratifica que a manutenção preventiva é sempre mais vantajosa que a manutenção corretiva. Entretanto, o modelo apresentado, retifica esta afirmação. Dependendo da natureza do equipamento, dos custos associados e da sua confiabilidade, pode ser mais vantajoso executar apenas manutenção preventiva, como exemplo, o equipamento E1, onde, mesmo com um orçamento capaz de cobrir todos os equipamentos com manutenção preventiva, a melhor alternativa é a manutenção corretiva.

## Referências

- Assis, R.**, *Apoio à decisão em Manutenção na Gestão de Activos Físicos*, Lidel, Lisboa, 2010.
- Barabadi, A.** (2013), Reliability model selection and validation using Weibull probability plot: A case study, *Journal Electric Power Systems Research*, 101, 96-101.
- Campolina, A. G. e Ciconelli, R. M.** (2006), Qualidade de vida e medidas de utilidade: parâmetros clínicos para as tomadas de decisão em saúde, *Rev Panam Salud Publica*, 19, 128-136.
- Fernandés, J. F. G. e Marquez, A. C.**, *Maintenance Management in Network Utilities*, Springer Series in Reliability Engineering, Sevilha, 2012.
- Goldbarg, M. C. e Luna, H. P. L.**, *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*, Elsevier, Rio de Janeiro, 2005.
- Hadidi, L. A., Al-Turki, U. M. e Rahim, A.** (2012), Integrated models in production planning and scheduling, maintenance and quality: A review, *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 10 (1), 21-50.
- Hillier, F. S. e Lieberman, G. S.**, *Introdução a pesquisa operacional*, McGraw-Hill, São Paulo, 2010.
- Manzini, R. et al**, *Maintenance for Industrial Systems*, Springer Series in Reliability Engineering, Londres, 2010.
- Manzini, R., Accorsi, R., Cennerazzo, T., Ferrari, E. e Maranesi, F.** (2015), The scheduling of maintenance. A resource-constraints mixed integer linear programming model, *Computers & Industrial Engineering*, 87, 561-568.
- Márquez, A. C.**, *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*, Springer Series in Reliability Engineering, Londres, 2007.
- Mendes A. A. e Ribeiro, J. L. D.** (2011), Um estudo do suporte quantitativo necessário para a operacionalização da MCC, *Produção*, 21 (4), 583-593.
- Moghaddam, K. S. e Usher, J. S.** (2011), Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming, *Computers & Industrial Engineering*, 60 (4), 654-665.
- Quinlan, J. R.** (1986), Induction of Decision Trees, *Machine Learning*, 1, 81-106.

**Rougé, C., Mathias, J.-D. e Deffuant, G.** (2014), Relevance of control theory to design and maintenance problems in time-variant reliability: The case of stochastic viability, *Reliability Engineering & System Safety*, 132, 250-260.

**Santos, M. A. L.**, *Irrigação suplementar da cana-de-açúcar (Saccharum spp): Um modelo de análise de decisão para o Estado de Alagoas.*, Tese apresentada para a obtenção do título de Doutor em Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

**Tantardini, M., Portioli-Staudacher, A. e Macchi, M.** (2014), A model for considering the impact of rescheduling planned maintenance activities in a maintenance service contract, *Production Planning and Control*, 25 (3), 241-259.

**Verma, A. K., e Ramesh, P. G.** (2007), Multi-objective initial preventive maintenance scheduling for large engineering plants, *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 14 (3), 241-250.

**Winston, W. L.**, *Operations research: applications and algorithms*, Brooks/Cole, Belmont, 2004.

**Xiang, Y., Cassady, C. R., Jin, T. e Zhang, C. W.** (2014), Joint production and maintenance planning with machine deterioration and random yield, *International Journal of Production Research*, 52 (6), 1644-1657.

