

Adriana Haueisen Pechir

Análise de Políticas de Reposição de  
Estoque sob Incerteza: Aplicação em  
Peças de Manutenção de uma Mineradora  
de Ouro.

**Belo Horizonte**  
**2017**

Adriana Haueisen Pechir

Análise de Políticas de Reposição de  
Estoque sob Incerteza: Aplicação em  
Peças de Manutenção de uma Mineradora  
de Ouro.

Plano de Trabalho a ser realizado através do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção de Título de Mestre em Engenharia de Produção, na Linha de Pesquisa Modelos e Algoritmos de Produção e de Rede.

Orientador: Mauricio Cardoso de Souza

**Belo Horizonte**  
**2017**

P365a Pechir, Adriana Haueisen  
Análise de políticas de reposição de estoque sob incerteza  
[manuscrito]: aplicação em peças de manutenção de uma mineradora de  
ouro / Adriana Haueisen Pechir. - 2017.  
94f., enc.: il.

Orientador: Mauricio Cardoso de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais,  
Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 92-94.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Controle de estoque - Teses.  
I. Souza, Maurício Cardoso de. II. Universidade Federal de Minas Gerais.  
Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658.5(043)

*A minha mãe, que me acompanhou com os olhares durante todo o curso do mestrado e,  
por questão de dias, assistiu a minha defesa lá de cima.*

*Ao meu querido pai, irmãos e Gustavo pela  
paciência e compreensão nos meus momentos de ausência.*

# Agradecimentos

Agradeço ao professor Mauricio Cardoso de Souza pela clareza da orientação e apoio constante ao longo do toda execução deste projeto,

ao professor Marcelo Azevedo Costa pela prontidão nos esclarecimentos em estatística durante o projeto,

ao professor Leonardo Santiago, inicialmente pela aceitação de orientação no início do curso, e também pela participação na banca juntamente com o professor Martín Gómez Ravetti.

e a todos os demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFMG pelo conhecimento compartilhado nas disciplinas cursadas.

## *Resumo*

Este trabalho considera um sistema de reposição de estoque para situações em que tanto a demanda quanto o leadtime possuem caráter estocástico. Um modelo de simulação foi desenvolvido no software R para definir a política de estoque que minimizasse o custo médio esperado de estoque. Foram utilizados como base alguns itens consumidos pela área de manutenção de uma mineradora de ouro. A escolha dos itens foi baseada principalmente nos critérios de criticidade, valor em estoque e frequência de consumo. De uma forma geral são itens de valores elevados, cuja falta pode impactar diretamente em uma parada de produção, uma vez que são peças componentes de equipamentos utilizados na rotina de operação da mina. Foram avaliados também alguns cenários de variabilidade do leadtime para calcular o ganho em relação ao cenário atual caso houvesse melhora na performance de entrega por parte dos fornecedores. Conclui-se através do modelo de simulação desenvolvido que há oportunidades de redução do custo médio esperado sem consideravelmente reduzir o nível de serviço. O uso desse modelo poderá ser estendido para auxiliar na tomada de decisão relacionada aos demais itens administrados em estoque pela empresa, no que diz respeito em quanto e quando realizar a reposição.

**Palavras-chave:** gestão de estoque, política  $(s, S)$ , custo de falta, custo de estoque, nível de serviço, ponto de ressuprimento, lote do pedido

## *Abstract*

This study contemplates an inventory replacement system when both demand and leadtime are stochastic. A simulation model was developed in R software with the objective of defining the stock policy which minimizes the inventory expected cost. Some maintenance items of a gold mining were used to apply the model. The selection of the goods was based on the criteria of criticality, inventory value and consumption frequency. In general, they are highly priced items and their shortage impacts directly in a production shutdown because they are spare parts of important equipments in the mining operation. They were analyzed also in some scenarios of leadtime variability in order to calculate the gain related to the actual scenario, in case of an increase of the supplier performance. Through the simulation model it was possible to conclude that there are opportunities of an expected cost reduction without a significantly decrease of the service level. The model can also be applied to help in decision-making topics related to the other goods managed in stock to decide the quantity and the right time for the replacement.

**Keywords:** inventory control, policy  $(s, S)$ , storage cost, inventory cost, service level, re-order point, lot sizing

# Lista de Figuras

2.1	Classificação dos itens segundo Syntetos et al. [2005]	13
3.1	Evolução produção minério bruto em milhões de toneladas - 2011 a 2016	18
3.2	Evolução produção barras de ouro - 2011 a 2016	19
3.3	Evolução preço da commodity ouro em milhares de onças - Mar/11 a Mar/16 - site <a href="http://www.indexmundi.com">www.indexmundi.com</a>	19
3.4	Fluxograma das etapas de reposição do estoque	21
3.5	Curva ABC dos itens de estoque	23
3.6	Curva PQR dos itens de estoque	23
4.1	Custo por hora parada do equipamento	28
4.2	Fluxograma da lógica do modelo de simulação	29
4.3	Movimentações de estoque - PINO	31
4.4	Movimentações de estoque - CAIXA	31
4.5	Movimentações de estoque - CABO	32
4.6	Movimentações de estoque - PAINEL	32
4.7	Movimentações de estoque - FILTRO	33
4.8	Movimentações de estoque - COMPRESSOR	33
4.9	Movimentações de estoque - CENTRALIZADOR	34
4.10	Movimentações de estoque - ESPELHO	34
4.11	Movimentações de estoque - MOTOR	35
4.12	Movimentações de estoque - CAIXA DE DIREÇÃO	35
5.1	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “PINO”	39



5.2	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CAIXA” . . . . .	40
5.3	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CABO” . . . . .	40
5.4	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “PAINEL” . . . . .	40
5.5	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “FILTRO” . . . . .	41
5.6	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “COMPRESSOR” . . . . .	41
5.7	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CENTRALIZADOR” . . . . .	41
5.8	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “ESPELHO” . . . . .	42
5.9	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “MOTOR” . . . . .	42
5.10	Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CAIXA DE DIREÇÃO” . . . . .	42
5.11	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - PINO . . . . .	45
5.12	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CAIXA . . . . .	45
5.13	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CABO . . . . .	46
5.14	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - PAINEL . . . . .	46
5.15	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - FILTRO . . . . .	46
5.16	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - COMPRESSOR . . . . .	47
5.17	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CENTRALIZADOR . . . . .	48
5.18	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - ESPELHO . . . . .	48
5.19	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - MOTOR . . . . .	49
5.20	Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CAIXA DE DIREÇÃO . . . . .	49
6.1	Nível de Serviço do PINO - Simulação x Demanda Normal . . . . .	53
6.2	Nível de Serviço do CAIXA - Simulação x Demanda Normal . . . . .	53

6.3	Nível de Serviço do CABO - Simulação x Demanda Normal . . . . .	54
6.4	Nível de Serviço do PAINEL - Simulação x Demanda Normal . . . . .	55
6.5	Nível de Serviço do FILTRO - Simulação x Demanda Normal . . . . .	56
6.6	Nível de Serviço do COMPRESSOR - Simulação x Demanda Normal . . . . .	57
6.7	Nível de Serviço do CENTRALIZADOR - Simulação x Demanda Normal . . . . .	58
6.8	Nível de Serviço do ESPELHO - Simulação x Demanda Normal . . . . .	58
6.9	Nível de Serviço do MOTOR - Simulação x Demanda Normal . . . . .	59
6.10	Nível de Serviço do CAIXA DIREÇÃO - Simulação x Demanda Normal . . . . .	60
6.11	Custo médio esperado - PINO . . . . .	61
6.12	Custo médio esperado - CAIXA . . . . .	62
6.13	Custo médio esperado - CABO . . . . .	62
6.14	Custo médio esperado - PAINEL . . . . .	63
6.15	Custo médio esperado - FILTRO . . . . .	63
6.16	Custo médio esperado - COMPRESSOR . . . . .	64
6.17	Custo médio esperado - CENTRALIZADOR . . . . .	64
6.18	Custo médio esperado - ESPELHO . . . . .	65
6.19	Custo médio esperado - MOTOR . . . . .	65
6.20	Custo médio esperado - CAIXA DE DIREÇÃO . . . . .	66
6.21	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - PINO . . . . .	68
6.22	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CAIXA . . . . .	69
6.23	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CABO . . . . .	70
6.24	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - PAINEL . . . . .	71
6.25	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - FILTRO . . . . .	72
6.26	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - COMPRESSOR . . . . .	73

6.27	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CENTRALIZADOR . . . . .	74
6.28	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - ESPELHO . . . . .	75
6.29	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - MOTOR . . . . .	76
6.30	Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CAIXA DIREÇÃO . . . . .	77
6.31	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - PINO . . . . .	79
6.32	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CAIXA . . . . .	80
6.33	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CABO . . . . .	81
6.34	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - PAINEL . . . . .	83
6.35	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - FILTRO . . . . .	84
6.36	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - COMPRESSOR . . . . .	84
6.37	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CENTRALI- ZADOR . . . . .	85
6.38	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - ESPELHO . . . . .	86
6.39	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - MOTOR . . . . .	87
6.40	Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CAIXA DIREÇÃO . . . . .	88

# Lista de Tabelas

2.1	Categoria Econômica - Classificação ABC . . . . .	14
2.2	Categoria Operacional - Classificação PQR . . . . .	14
2.3	Categoria Criticidade da Demanda - Classificação XYZ . . . . .	14
2.4	Categoria Comprabilidade (Facilidade de entrega) - Classificação 123 . . . . .	14
4.1	Caracterização dos itens selecionados . . . . .	30
4.2	Categorização dos itens selecionados . . . . .	36
5.1	Compilação dos resultados dos testes de aderência . . . . .	44
5.2	Parâmetros da distribuição Normal da demanda e leadtime . . . . .	50
6.1	Leadtime fixo dos itens (dias) . . . . .	67
6.2	Comparação entre políticas atual e melhor opção obtida pela Simulação . . . . .	78
6.3	Análise de cenários da política de estoque do item 1 - PINO . . . . .	79
6.4	Análise de cenários da política de estoque do item 2 - CAIXA . . . . .	80
6.5	Análise de cenários da política de estoque do item 3 - CABO . . . . .	81
6.6	Análise de cenários da política de estoque do item 4 - PAINEL . . . . .	82
6.7	Análise de cenários da política de estoque do item 5 - FILTRO . . . . .	83
6.8	Análise de cenários da política de estoque do item 6 - COMPRESSOR . . . . .	83
6.9	Análise de cenários da política de estoque do item 7 - CENTRALIZADOR . . . . .	85
6.10	Análise de cenários da política de estoque do item 8 - ESPELHO . . . . .	86
6.11	Análise de cenários da política de estoque do item 9 - MOTOR . . . . .	87
6.12	Análise de cenários da política de estoque do item 10 - CAIXA DE DIREÇÃO . . . . .	88

## Tabela de Notação

- $K$ : Custo fixo de pedido;
- $h$ : Custo variável de estocagem;
- $p$ : Custo devido a falta de estoque;
- $\lambda$ : demanda do período;
- $\mu$ : média da demanda durante o leadtime;
- $\tau$ : leadtime;
- $\sigma$ : desvio padrão da demanda;
- $D_t$ : Demanda do período  $t$ ;
- $R$ : Ponto de reabastecimento;
- $EM$ : estoque máximo

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1	Políticas de Gestão de Estoque e Tipos de Revisão . . . . .	5
2.2	Distribuições de probabilidade da demanda . . . . .	7
2.3	Definição da política ótima . . . . .	9
2.4	Nível de serviço . . . . .	11
2.5	Classificação dos itens . . . . .	13
2.6	Aplicação de Modelos de Gestão de Estoque . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Contexto de Aplicação</b>	<b>18</b>
3.1	Gestão de estoque atual . . . . .	20
3.2	Caracterização do estoque . . . . .	23
3.3	Definição do problema . . . . .	24
<b>4</b>	<b>Modelo de Simulação</b>	<b>25</b>
4.1	Metodologia da simulação . . . . .	26
4.2	Seleção dos itens críticos . . . . .	28
<b>5</b>	<b>Definição da Distribuição de Probabilidade</b>	<b>37</b>
5.1	Aderência a distribuição de probabilidade . . . . .	38
5.2	Aproximação pela normal . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Resultados da Simulação</b>	<b>52</b>
6.1	Curva do nível de serviço x ponto de ressuprimento . . . . .	52

6.2	Custo médio por dia de estoque . . . . .	60
6.3	Cenários de variabilidade do leadtime . . . . .	66
6.4	Definição do estoque máximo . . . . .	78
6.5	Síntese dos resultados . . . . .	89
<b>7</b>	<b>Conclusão e Estudos Futuros</b>	<b>90</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>92</b>

# Capítulo 1

## Introdução

A Gestão de Estoque é um dos grandes desafios na operação das empresas uma vez que estoque em excesso gera elevados custos financeiros com capital imobilizado ao mesmo tempo que rupturas no estoque podem impactar consideravelmente na performance de seus processos e gerar elevados custos por perda de produção.

As empresas precisam administrar uma quantidade elevada de itens e decidir entre mantê-los em estoque pagando-se um custo de estocagem e obsolescência ou manter uma quantidade menor porém comprometendo o nível de serviço e aumentando o risco de falta.

Segundo Axsäter [2015] o estoque está diretamente vinculado com outros setores da empresa como Compra, Produção e Marketing. E portanto a função da Gestão de Estoque é balancear os objetivos de cada um deles. Uma das metas é manter os níveis de estoque baixos para fazer caixa para outras aplicações. Entretanto o setor de Compras deseja realizar pedidos maiores para obter descontos em volume. E o setor de produção também objetiva produzir durante um período maior para evitar os custos com setup bem como ter disponível um estoque de matérias-primas de forma a evitar paradas na produção devido a falta de materiais. E por fim o setor de marketing deseja um estoque de produtos finais elevado para poder oferecer um nível de serviço alto para os clientes.

Atualmente observa-se um elevado potencial de melhoria tanto nos processos quanto nos custos das empresas através do controle mais acurado do capital investido em estoque. Essa gestão é permitida através dos avanços na tecnologia da informação e nos modelos de gestão de estoque que aumentaram a possibilidade de utilizar técnicas de controle



eficientes de estoque sem necessariamente aumentar outros custos da empresa.

Segundo Scarf [1959] os principais custos envolvidos na Gestão de Estoque são:

- . Custo do pedido  $c(z)$  onde  $z$  é a quantidade pedida.
- . Custo de estocagem  $h()$  o qual é função do excesso de estoque em relação a demanda no final do período;
- . Penalidade por falta  $p()$  o qual é função do excesso da demanda em relação ao estoque (falta);

O custo do pedido ocorre no início do período enquanto que os custos de estocagem e de falta no final. Além disso, o custo do pedido pode ser linear, ou seja,  $c(z) = cz$  ou não-linear, onde:

$$c(z) = \begin{cases} 0, & z = 0 \\ K + cz, & z > 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

onde  $K$  é o custo de reabastecimento.

Segundo do Rego and de Mesquita [2015] os custos de pedido dependem, por exemplo, da origem dos materiais e da quantidade de fornecedores disponíveis. E Goyal and Satir [1989] conclui que o custo fixo está associado a cada reposição e o custo variável a cada item repostos.

Custos de estocagem são definidos como o custo de capital mais o aluguel, seguro, perda, movimentação e armazenagem dos materiais. Segundo Nahmias and Olsen [2015], o custo de estocagem pode estar relacionado com o custo de oportunidade de aplicar o capital em algum tipo de investimento. E de acordo com Goyal and Satir [1989] ele é proporcional ao nível médio do estoque podendo assumir valores iguais ou diferentes entre os itens.

O custo da falta existe quando o estoque disponível não atende a demanda. Nesse caso, o cliente pode optar por obter o material de outra fonte ou aceitar postergação do atendimento da demanda. A espera por itens críticos acarretam custos referentes a falta de produção, degradação dos equipamentos por interrupções não programadas e a substituição por um material similar visto que pode reduzir a produtividade ou aumentar a chance de

novas paradas. Além disso, a falta de material no estoque pode gerar a necessidade de adiantar a entrega de um pedido utilizando o chamado “frete emergencial”, que significa um transporte exclusivo para retirar o pedido no fornecedor e entregar direto na empresa.

Os modelos de definição da política econômica de estoque são divididos em dois grupos de acordo com a incerteza da demanda: determinísticos e estocásticos.

Segundo Goyal and Satir [1989] o desafio dos modelos determinísticos é determinar a frequência dos ciclos de reposição, objetivando minimizar o custo total por unidade de tempo. O custo de reposição é composto por três partes: custo fixo de uma reposição, custo variável de reposição dependente do item e custo de estocagem de cada item. A demanda é conhecida e constante e falhas no estoque não são permitidas.

No caso dos modelos estocásticos, em que a demanda é tratada com incerteza, a reposição do item é feita até um nível máximo quando seu estoque atinge o ponto de ressuprimento. O objetivo é minimizar o custo esperado da soma dos custos fixos e variáveis do pedido, custo de estocagem e custo de atraso de pedido. Esse último custo foi adicionado nos modelos estocásticos devido a sua própria característica de incerteza.

Este trabalho avalia a política de reposição do estoque de algumas peças de manutenção de uma mineradora de ouro onde há incerteza tanto na demanda quanto no leadtime. A quantidade de itens gerenciados em estoque é alta, com custos de estocagem e de falta elevados. Esta análise está em linha com a estratégica da empresa uma vez a redução da necessidade de capital de giro é um dos objetivos do seu mapa estratégico.

O objetivo geral deste trabalho é portanto desenvolver um modelo de simulação que minimize o custo esperado de estoque de peças de manutenção de equipamentos pesados da empresa. Os objetivos específicos são: i) desenvolver um modelo de simulação que considere incerteza tanto na demanda quanto no leadtime, ii) avaliar o impacto da variabilidade do leadtime na definição dessa política de estoque e iii) definir a política de estoque que minimize o custo esperado total.

Além desta Introdução, o trabalho é composto por seis capítulos, iniciando pelo Capítulo 2 onde são apresentados os principais estudos relacionados com política de estoque e pelo Capítulo 3 onde há uma contextualização geral da empresa bem como o funcionamento da sua gestão de estoque. No capítulo seguinte é detalhado o modelo de simulação desenvolvido bem como justificada a seleção dos itens a serem analisados neste trabalho. Em

seguida, no Capítulo 5, é apresentada a análise da distribuição de probabilidade que mais se aproxima do comportamento real das variáveis leadtime e demanda de cada item. No Capítulo 6 são apresentados os resultados de toda análise e por fim, no Capítulo 7, uma conclusão deste trabalho bem como uma proposta de estudos futuros para continuação desta análise.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Políticas de Gestão de Estoque e Tipos de Revisão

As políticas de controle de estoque começaram a ser discutidas pelos estudiosos principalmente na década de 1950 (Scarf [1959] e Arrow et al. [1951], por exemplo) e atualmente podem ser resumidas em (Rao [2003]):

1. **Política (s,S)** onde o tempo é discretizado em períodos e a posição do estoque  $IP$  (saldo disponível mais os pedidos a serem entregues menos as demandas a serem atendidas) é revisada todo início de período. Se  $IP \leq s$  um pedido é feito na quantidade de  $S - IP$  para que o estoque volte a atingir o nível de  $S$ . É a política ótima para revisão periódica e possui uma função custo complexa. Lagodimos et al. [2012] apresenta ainda uma extensão da política  $(s, S)$  onde ao invés de  $T$  ser fixo, ele é otimizado juntamente como as outras duas variáveis  $s$  e  $S$ .
2. **Política (r,Q)** onde  $IP$  é revisado continuamente e um pedido de  $Q$  unidades é feito toda vez que o estoque atinge um nível abaixo de  $r$ . Logo, a quantidade a ser pedida é fixa porém o período entre pedidos sucessivos pode ser aleatório. É a política ótima para revisão contínua.
3. **Política (R,T)** onde  $IP$  é revisada a cada  $T$  períodos e, se necessário, um pedido é solicitado para voltar com a posição do estoque até  $R$ . Esse tempo  $T$  entre as reposições é fixo e deve ser mínimo possível. Já a quantidade a ser pedida pode variar.

De uma forma geral, as três políticas possuem um nível de estoque visado ( $S$ ,  $r + Q$  e  $R$ , respectivamente) que vão determinar o tamanho do lote a ser pedido para que atenda a demanda prevista para até o período seguinte e minimize o custo total envolvido. Elas se diferem no mecanismo a ser usado para determinar quando os pedidos serão colocados.

Em seu trabalho Rao [2003] mostra que a política  $(R, T)$  é mais cara que a  $(r, Q)$  e portanto deve ser mais utilizada em situações em que os processos são melhor planejados e coordenados de forma a evitar perdas e retrabalho. Além disso, defendem o uso da política  $(r, Q)$  para casos em que  $\lambda$  e leadtime  $L$  são bem pequenos. Afinal, quando a taxa de demanda  $\lambda$  é pequena, a demanda se caracteriza como esporádica e favorece o uso da revisão contínua, a qual é premissa da política  $(r, Q)$ . E quando  $L$  é pequeno, essa política, cujos parâmetros ótimos  $Q^*$  e  $r^*$  se baseiam na demanda durante o leadtime, é mais eficiente para os casos em que o nível de estoque são consideravelmente baixos. Em contrapartida, a política  $(R, T)$  depende tanto do  $L$  quanto de  $T$  e podem propor estoques mais elevados quando  $T^*$  é maior que zero. Essa política também é mais eficiente em casos em que o custo fixo do pedido  $K$  é muito alto ou muito baixo. Quando o custo de estocagem  $h$  é relativamente baixo e o custo de falta  $p$  é alto, a política  $(R, T)$  tende a elevar os estoques mais do que a política  $(r, Q)$ , conseqüentemente elevando seu custo. Por fim,  $T$  e  $R(T)$  aumentam quando  $K$  ou  $p$  aumentam ou quando  $h$  diminui.

Yang et al. [2014] acrescenta que estudos recentes estão incorporando novas variáveis na definição da política como custos estocásticos de pedido e múltiplos fornecedores, os quais não serão tratados neste trabalho.

As políticas de gestão de estoque também são caracterizadas pelo tipo de revisão do nível de estoque: periódica ou contínua. Segundo Babai et al. [2011] ambas categorias vem sendo discutidos pela literatura tanto para casos de itens com alta movimentação quanto para itens com baixa movimentação.

No caso da política de revisão periódica discreta  $(s, S)$ , a posição do estoque  $IP$  (saldo disponível mais os pedidos a serem entregues menos as demandas a serem atendidas) é revisada a cada período  $T$ . Se a cada revisão, a posição do estoque  $IP$  estiver abaixo de  $s$ , um pedido é feito em uma quantidade suficiente para trazer o nível do estoque novamente para  $S$ . Caso contrário, não é necessário pedir. Já no caso da revisão contínua, o estoque é repostado toda vez que atinge o nível de  $s$  através de um pedido de quantidade fixa  $Q$ .

Segundo Babai et al. [2011] a revisão periódica consiste em agrupar os pedidos de vários itens no mesmo intervalo de tempo de revisão. Entretanto, a desvantagem em relação a revisão contínua é que para obter um mesmo nível de serviço a revisão periódica exige um estoque de segurança maior. Afinal, nesse caso o estoque de segurança é usado para compensar as incertezas da demanda durante o leadtime mais o período de revisão do estoque. Já na revisão contínua, o estoque de segurança é definido para atender apenas a demanda durante o leadtime.

A revisão periódica foi assumida, por exemplo, nos modelos de Lagodimos et al. [2012], Rao [2003] e Yang et al. [2014]. Esses últimos definiram a política  $(s, S)$  como sendo ótima em casos de capacidade ilimitada e uma política  $(r, Q)$  modificada para casos de capacidade limitada com custo de setup zero. Nesse caso, o modelo proposto prevê que se o nível do estoque for menor que  $r - C$ , deve-se fazer o pedido em toda a sua capacidade  $C$ . Se o estoque estiver entre  $r - C$  e  $r$ , o pedido deve ser feito em uma quantidade que ele eleve o estoque para dentro do intervalo  $[r, r + Q)$ . Caso contrário, não se deve fazer pedido.

Rao [2003] também apresenta algumas vantagens e desvantagens desses dois tipos de revisão do estoque. Segundo eles, além da revisão contínua exigir investimentos tecnológicos altos, os dados disponibilizados sobre o nível do estoque nem sempre são confiáveis o suficiente para apoiarem a decisão de reposição contínua. E mesmo que a acurácia seja razoável, a revisão periódica é mais adequada por reduzir o custo fixo devido a combinação de pedidos para vários produtos bem como pelos ganhos qualitativos por ter uma regularidade na emissão de pedidos. Os fornecedores normalmente preferem esse tipo de revisão visto que reduz a incerteza dos intervalos em que são feitos os pedidos.

Seguindo essa linha de falta de acurácia no registro dos dados, Bai et al. [2012] apresenta um modelo para definição da política  $(r, Q)$  quando a distribuição da demanda e/ou o nível de estoque não são completamente conhecidos.

## 2.2 Distribuições de probabilidade da demanda

Segundo Scarf [1959], para definição da política de estoque assume-se que as demandas são observações independentes e seguem uma função de distribuição.

As distribuições mais utilizadas para caracterizar as demandas aleatórias dos sistemas

de estoque são a Normal e de Poisson. A premissa de normalidade é mais adequada para casos de itens com movimentação alta, onde a demanda ocorre de forma mais regular (?), ou seja, para itens cujo coeficiente de variação (CV) da distribuição da demanda é pequeno (Syntetos and Boylan [2008]).

Segundo Porras and Dekker [2008] casos em que assume-se que a demanda segue uma distribuição normal, calcula-se a média ( $\mu$ ) e o desvio padrão ( $\sigma$ ) da demanda do período observado e em seguida ajusta-os para os parâmetros de demanda durante o leadtime através das seguintes fórmulas:

$$\mu_{LTD} = \mu \times L \quad (2.1)$$

$$\sigma_{LTD} = \sigma \times \sqrt{L} \quad (2.2)$$

onde  $L$  é o leadtime.

Já a distribuição de Poisson é mais adequada para previsão da demanda de itens com baixa movimentação (Nenes et al. [2010a], Porras and Dekker [2008], Vereecke and Verstraeten [1994] e Syntetos and Boylan [2008]) e o único parâmetro necessário para essa distribuição é a taxa média de demanda ao longo do leadtime  $\lambda$ . Além disso, o modelo baseado na distribuição de Poisson é utilizado apenas para classe de itens cuja ocorrência de demanda é feita em uma unidade apenas. E por fim, Syntetos et al. [2009] limita o uso dessa distribuição para situações em que o desvio padrão da demanda durante o leadtime for no máximo 10% de diferença da demanda média.

No trabalho de Syntetos et al. [2009] a geração de demanda é apresentada em dois processos: Bernoulli e Poisson. Se o tempo for uma variável discreta, a geração de demanda se baseia no processo de Bernoulli e conseqüentemente os intervalos da demanda seguem distribuição geométrica. Caso seja uma variável contínua, a distribuição de Poisson é mais adequada e conseqüentemente a distribuição exponencial negativa caracteriza o comportamento dos intervalos.

Essa discussão também é feita por Babai et al. [2011] os quais desenvolveram um modelo cuja demanda e o leadtime são caracterizados por processos estocásticos. A demanda segue um processo de Poisson composto, ou seja, os intervalos de demanda seguem distribuição

exponencial e o tamanho da demanda uma distribuição contínua arbitrária. Eles definiram expressões para cálculo dos limites superior e inferior do nível de estoque a ser repostado  $S$  baseado no custo de não atendimento da demanda  $p$ , com o objetivo de obter o  $S^*$  ótimo e atender um nível de serviço visado.

Por fim, o processo de gestão de estoque foi claramente definido por Babai et al. [2011] através de uma comparação com um sistema de filas: a cada chegada da demanda, o nível do estoque que inicialmente é  $S$  diminui e gera um pedido para reposição do mesmo. A fila é formada pelas unidades solicitadas do material, cuja taxa de chegada é caracterizada pela taxa da demanda a qual segue uma distribuição de Poisson, e o tempo de processamento corresponde ao leadtime de reposição, o qual segue uma distribuição genérica com média  $L$ . O estoque é repostado em  $Y$  unidades de tempo após uma demanda. Não há restrição de capacidade de pedido correspondendo a um número infinito de atendentes no sistema de filas.

### 2.3 Definição da política ótima

Ang et al. [2013] apresentam uma discussão sobre a propriedade de convexidade dos modelos discretos, ou seja, quando a demanda assume valores inteiros, para se atingir a política ótima  $(r^*, q^*)$ . Entretanto, iniciam a discussão com modelos de revisão contínua  $(r, q)$  assumindo as seguintes premissas:

- .  $r$  é o ponto de pedido e  $q$  é a quantidade pedida;
- . A demanda segue a distribuição de Poisson com taxa  $\lambda$ ;
- . O leadtime é uma variável aleatória  $L$ ;
- . Demanda durante o leadtime é denominada de  $D$ ;
- .  $IN$  é o saldo disponível menos as demandas a serem atendidas;
- .  $IP$  é a posição do estoque considerando  $IN$  mais os pedidos a serem entregues;
- .  $IN = IP - D$  e  $IP$  é uniformemente distribuído no intervalo  $r + 1, \dots, r + q$  e não depende de  $D$ .



- . Demandas atrasadas a serem atendidas  $B(r, q)$ ;
- . Estoque médio disponível  $I(r, q)$ .
- . Custo unitário de estocagem  $h$ ;
- . Custo unitário de falta  $p$ ;
- . Custo fixo de pedido  $K$ .

O custo médio esperado da política de estoque é definido como:

$$C(r, q) = \frac{\lambda K}{q} + hI(r, q) + pB(r, q) = \frac{\lambda K + \sum_{y=r+1}^{r+q} G(y)}{q} \quad (2.3)$$

onde

$$G(y) = hE[(y - D)^+] + pE[(D - y)^+] \quad (2.4)$$

Logo, observa-se que  $E[(y - D)^+]$  é o excesso de estoque e  $E[(D - y)^+]$  a falta. Assim, a política ótima  $(r^*, q^*)$  é obtida considerando a convexidade conjunta de  $C$  em  $(r, q)$  de tal forma que o ótimo local é também o ótimo global. Entretanto essa premissa é provada apenas para casos em que os dados assumem valores contínuos. Segundo Ang et al. [2013] a aproximação da função custo para modelos cuja demanda assume valores discretos é conveniente apenas quando a quantidade pedida  $q$  é grande o suficiente.

Além disso, os autores defendem o uso da fórmula EOQ em modelos  $(r, q)$  mesmo que ele assuma valores determinísticos. Nesse caso o custo médio da política é obtido pela equação 2.3 onde  $G(y)$  é substituído por:

$$G(y) = h(y - ED)^+ + p(ED - y)^+ \quad (2.5)$$

A otimalidade da política  $(s, S)$  também é mostrada por Scarf [1959] através da convexidade da função custo que existe devido a linearidade dos custos de estocagem e de falta, tanto para casos com leadtime igual a zero quanto maior que zero. O nível ótimo é obtido igualando a zero a derivada da função custo.

## 2.4 Nível de serviço

Syntetos and Boylan [2008] define dois tipos de nível de serviço: i) a probabilidade de não haver falhas no estoque durante o leadtime ( $S_1$ ) e ii) a proporção da demanda durante o leadtime que será atendida pelo estoque disponível ( $S_2$ ). O nível de serviço tipo 1 é considerado por exemplo no trabalho de Vereecke and Verstraeten [1994]. Já o tipo 2 é utilizado em Nenes et al. [2010a] e do Rego and de Mesquita [2015].

Axsäter [2015] acrescenta um terceiro tipo  $S_3$  que representa a fração do tempo em que o estoque esteja disponível. Para os casos em que a demanda é contínua ou segue uma distribuição de Poisson,  $S_2$  e  $S_3$  são equivalentes. Entretanto este não é o caso para quando os usuários podem solicitar mais de uma unidade por vez. Afinal mesmo que o estoque disponível esteja positivo, ele pode não ser suficiente para atender toda a demanda do cliente. Se o estoque contém um número pequeno de unidades disponíveis na maior parte do tempo, o  $S_3$  pode ser alto. Da mesma forma que  $S_2$  pode ser baixo se há clientes que solicitam quantidades bastante elevadas.

Segundo do Rego and de Mesquita [2015], em um modelo de gestão de estoque  $(Q, r)$  ambos parâmetros  $Q$  e  $r$  estão relacionados com o nível de serviço tipo 2. Já o tipo 1 depende apenas do ponto de reabastecimento ( $r$ ).

De acordo com Nenes et al. [2010a], o nível de serviço objetivado pode variar de acordo com a classificação dos itens. Materiais sem movimentação, por exemplo, não justificam um nível de serviço maior que 80%.

Silver and Bischak [2011] apresentaram uma expressão de nível de serviço para a política de revisão periódica  $(R, T)$  definida como a demanda atendida pelo estoque dividida pela demanda esperada em cada ciclo  $T$ .

Segue abaixo a expressão demonstrada pelos autores:

$$P = 1 - \left[ \frac{\sqrt{T+L}}{T} \times CV \times G(k) - \frac{\sqrt{L}}{T} \times CV \times G\left(\frac{R}{\sqrt{L}CV} + k\sqrt{\frac{T+L}{L}}\right) \right] \quad (2.6)$$

onde

$TR$  é o intervalo da revisão;

$L$  é o leadtime;

$CV = \frac{\sigma}{\mu}$ , onde  $\sigma$  e  $\mu$  são a média e o desvio padrão da demanda, respectivamente;

$G(k)$  é a função de perda Normal do fator de segurança  $k$ .

Uma aproximação muito comum utilizada na literatura e apresentada por Silver and Bischak [2011] é ignorar a segunda parte da expressão 2.6 obtendo o seguinte:

$$P = 1 - \frac{\sqrt{T+L}}{T} CV G(k) \quad (2.7)$$

e conseqüentemente

$$G(k) = \frac{T(1-P)}{\sqrt{T+L} CV} \quad (2.8)$$

Entretanto, essa negligência do segundo termo da expressão superestima a necessidade do estoque para qualquer valor de  $k$ . Assim obtém-se um valor de  $k$  maior que o valor requerido pela fórmula 2.6. Conseqüentemente o nível de serviço obtido por essa aproximação será maior que o objetivado.

Rao [2003] apresenta uma possibilidade de calcular o custo  $C(R, T)$  colocando o custo da falta  $p$  em função do nível de serviço tipo 1  $\alpha$ , sendo  $p = \frac{\alpha h}{(1-\alpha)}$ . Isso em casos em que  $\alpha$  é definido e  $p$  não, onde  $\alpha$  é a probabilidade da demanda ser menor ou igual ao ponto de ressuprimento  $R(T)$ . Já em casos de  $p = 0$  e o nível de serviço  $\beta$  definido, então  $R(T)$  é obtido calculando a esperança da falta de estoque, isto é  $E[D - R] = (1 - \beta)\lambda T$ , visto que  $E[D - R]$  é convexo em  $R$ .

Segundo Axsäter [2015] o nível de serviço pode ser definido de outras formas e não somente por uma probabilidade. Em algumas situações pode ser mais adequado objetivar que o tempo médio de espera pelo material não exceda uma certa quantidade de dias. Entretanto, independente da forma escolhida na empresa, é importante que essa definição seja clara para todos os envolvidos. Além disso, o autor menciona que não é real ter o mesmo nível de serviço para todos os itens estocados. Ao mesmo tempo que é inviável

usar níveis de serviço individuais para cada um deles. Logo uma solução usual é agrupar os itens em determinada categoria e especificar níveis de serviço por grupos.

O autor ainda completa que a escolha do nível de serviço deve ser baseada na expectativa dos clientes e no custo de fornecer um atendimento satisfatório. Em casos de leadtime elevado e variabilidade alta na demanda, pode-se tornar bastante caro manter elevados níveis de serviço.

Uma desvantagem do tipo de serviço tipo 1 é que ele não leva em consideração o tamanho do lote e pode maquiar o atendimento ao cliente. Afinal se esse tamanho é grande e cobre a demanda durante um período extenso, não importa se  $S_1$  é baixo. Se o tamanho do lote é pequeno, o “real” serviço pode ser similarmente muito baixo mesmo que o  $S_1$  seja alto. Os outros dois tipos de nível de serviço  $S_2$  e  $S_3$  podem ser um pouco mais complexo que o primeiro, porém proporciona um retrato melhor do serviço prestado.

## 2.5 Classificação dos itens

Para lidar com a dimensão e a diversidade de seu estoque, as empresas precisam considerar algumas premissas que agrupem os materiais e as permitem priorizar as análises e decisões. Dessa forma as decisões são focadas nos itens de maior importância, obtendo ganho tanto em redução de custo quanto no nível de serviço.

Em Syntetos et al. [2005] os autores propõem uma classificação dos itens em quatro categorias baseadas em duas dimensões: variabilidade do tamanho da demanda e intervalo entre chegadas de demandas, conforme apresentado na Figura 2.1.

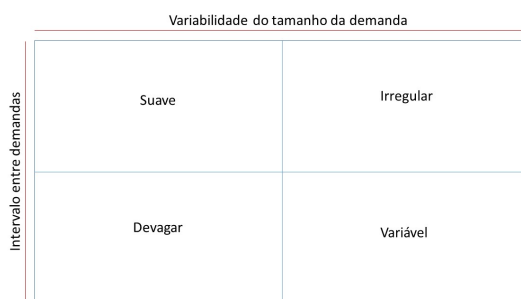


Figura 2.1: Classificação dos itens segundo Syntetos et al. [2005]

De acordo com essa classificação, itens que possuem alta variabilidade na demanda

podem ser classificados como **variável** se os intervalos entre as chegadas forem grandes (denominados de intermitentes por Willemain et al. [2004]) ou **irregular** caso sejam mais frequentes. Em casos de variabilidade mais baixa, a classificação pode ser **suave** caso o intervalo entre chegadas seja menor ou **devagar** caso sejam mais esporádicos.

Gasnier [2002] sugere outras quatro principais categorias para classificação do estoque - econômica, operacional, criticidade de demanda e comprabilidade - as quais estão detalhadas nas Tabelas 2.5 a 2.4.

A	Valiosos	Elevado valor em estoque
B	Intermediários	Médio valor em estoque
C	Ordinários	Baixo valor em estoque
D	Estagnados	Sem custo em estoque pois não houve saída no período
E	Novo	Novo produto e portanto não há histórico para classificação

Tabela 2.1: Categoria Econômica - Classificação ABC

P	Alta	Elevada frequência de transações
Q	Média	Frequência intermediária
R	Baixa	Raramente movimentou no período
S	Nenhuma	Sem movimentações no período

Tabela 2.2: Categoria Operacional - Classificação PQR

Z	Emergências	Sua falta paralisa processos críticos
Y	Urgentes	Sua falta provoca alguma inconveniência
X	Comuns	Sua falta não traz problemas e existem itens equivalentes à disposição

Tabela 2.3: Categoria Criticidade da Demanda - Classificação XYZ

1	Complexas	Difícil obtenção, leadtime longo
2	Difíceis	Processo de aquisição envolve poucos obstáculos, leadtime médio
3	Simples	Existência de diversos fornecedores locais, leadtime curto

Tabela 2.4: Categoria Comprabilidade (Facilidade de entrega) - Classificação 123

O autor também define alguns critérios secundários de classificação como unidade de medida, locais de estocagem, fragilidade de manuseio e variações de demanda as quais não serão abordadas neste trabalho.

Como exemplos de aplicação de classificação dos itens, é válido citar os trabalhos de do Rego and de Mesquita [2015] e Porras and Dekker [2008]. do Rego and de Mesquita [2015] avaliam diversas combinações de política de estoque de peças em uma indústria automotiva (aproximadamente 10.000 itens) para cada nível de serviço visado (80%, 90%,

95% e 99%) e definem a mais adequada para cada uma das categorias apresentadas na Figura 2.1.

Já Porras and Dekker [2008] agruparam os itens em estoque de uma refinaria de petróleo de acordo com sua criticidade, frequência de consumo e preço. A criticidade vincula a indisponibilidade do material com perda de produção, gastos extensivos com aquisições emergenciais e até mesmo impacto na segurança das pessoas e do meio ambiente. A frequência de consumo se refere ao número de vezes que o material é demandado em um período de tempo e a categorização baseada em preço separa as peças de acordo com as faixas de preço iniciando por  $p = 0$ .

Outros critérios são utilizados para classificação dos itens, como ciclo de vida, custo unitário, criticidade e aspectos logísticos, os quais não serão tratados com detalhe neste trabalho.

## 2.6 Aplicação de Modelos de Gestão de Estoque

Finalmente, serão apresentados nesta seção alguns modelos aplicados em grandes empresas que lidam com milhares de itens em estoque, similares a situação da empresa em análise neste trabalho.

Um deles foi proposto por Vereecke and Verstraeten [1994] para definição do ponto de reabastecimento de peças em uma indústria química que possui em torno de 34.000 itens em estoque, dos quais 90% são itens com uma frequência de retirada de menos de 4 vezes em um período de 12 meses. Para estimativa da demanda, a empresa considerava a distribuição de Poisson para esse tipo de material e a distribuição Normal para os itens com movimentação. Entretanto, administrar dois modelos para um mesmo estoque não era interessante. A proposta do trabalho era então criar um modelo único para lidar com todos os tipos de itens de estoque: sem movimentação, com movimentação baixa e com movimentação alta. Como em cada ocorrência de demanda são solicitadas várias unidades, propuseram o chamado “Pacote de Poisson”, assumindo que a frequência de demanda segue a função de Poisson e o tamanho da demanda é representado por uma quantidade  $f$  constante definida como o “pacote”.

Dessa forma, para se estimar o número de unidades solicitadas deve-se multiplicar o

número de pacotes pela quantidade de unidades por pacote. O algoritmo proposto calcula o ponto de reabastecimento dos materiais iterativamente até atingir o nível de serviço adequado. Ou seja, se o ponto de reabastecimento calculado inicialmente permite um nível de serviço muito abaixo do desejado, aumenta-se o ponto em uma unidade e recalcula-se o nível de serviço. Esse processo é repetido até se atingir o valor % desejado. O modelo proposto apresentou resultados satisfatórios em casos em que a demanda foi gerada por uma distribuição de Poisson, com variações pequenas em relação aos resultados obtidos utilizando outras distribuições de probabilidade (diferença de no máximo 3% no nível de serviço e de 1 unidade no ponto de reabastecimento).

Nenes et al. [2010b] desenvolveram um modelo computacional para definição da política de reposição  $(R, S)$ , onde  $R$  é o período de revisão e  $S$  é o nível de estoque a repor, a ser aplicado em uma empresa de pneus. Devido a irregularidade e variabilidade da demanda dos itens, a aproximação de uma distribuição Normal ou de Poisson não seria adequada. Assumiram que a demanda é estacionária, pois apesar de haver uma tendência positiva, a taxa de crescimento é baixa o suficiente. Baseado no período de revisão  $R$  e no leadtime  $L$  o modelo calcula para cada item o nível do estoque a ser repostado  $S$ , o estoque disponível esperado e o nível de serviço a ser atingido. Antes de realizar os cálculos, o modelo analisa se os dados sobre as demandas são suficientes para análises estatísticas bem como se há valores muito discrepantes (“outliers”). Se os dados forem suficientes para caracterização das demandas, os parâmetros são calculados utilizando as funções de probabilidade. Para itens de demanda alta, utilizam a distribuição gamma e para os de demanda baixa, a distribuição de Poisson. Caso não sejam suficientes, o modelo utiliza uma heurística a qual depende basicamente da demanda média  $\mu R + L$ .

Com um ano de implementação do modelo na empresa, o estoque reduziu 8% e as vendas aumentaram 3% sem prejudicar o nível de serviço oferecido. Além disso, houve redução nos custos logísticos, bem como ganhos indiretos na transparência e sistematização da Gestão dos Estoques.

Como um terceiro exemplo, há o trabalho de Syntetos et al. [2009] que foi aplicado nas operações logísticas na Europa de uma indústria japonesa de eletrônicos. O objetivo era centralizar seu estoque em uma única unidade e repor mensalmente as 13 unidades locais existentes, com eventuais reposições semanais de urgência. A performance do sistema era

medida por dois indicadores: nível de atendimento (% de demandas atendidas completamente pelo estoque disponível) e cobertura de estoque (duração do estoque baseado no consumo médio). Apesar da categorização tradicional ABC que agrupa os itens por valor da demanda, onde os itens de A correspondem a 80% do valor total, B a 15% e C a 5%, o sistema utiliza uma classificação baseada na frequência da demanda. Nessa nova classificação, o grupo A corresponde aos itens de movimentação baixa, porém com valores altos. Assim, eles são importantes para a Gestão de Estoque mas não geram tanto impacto no indicador de atendimento de serviço. Já os itens C influenciam consideravelmente nesse número, visto que correspondem a 63% das solicitações. Entretanto não impactam tanto no valor da demanda visto que seus preços são mais baixos. A cobertura média visada para os grupos A, B e C era de 2, 3 e 6 meses, respectivamente.

Com oito meses de implementação do modelo, reduziu-se de 5,7 para 3,5 meses. E o nível de serviço passou de 79% para próximo de 95%.

Em sua análise de estoque, Nasr and Maddah [2015] considerou não só um comportamento estocástico para a demanda durante o leadtime como também uma relação direta com fatores externos como competição de mercado, situação econômica e fatores climáticos. Assumiram que o tempo entre demandas seguia o processo de Poisson modulado pela Cadeia de Markov, cujos estados representavam a demanda para determinada condição de momento no início do período do leadtime. Dessa forma pode avaliar o ganho em considerar a dinamicidade no controle da reposição do estoque, variando de acordo com o estado do ambiente, em relação ao premissa de uma política estática. O estudo apresenta um modelo de otimização heurístico para definição da política de estoque  $(s, S)$  e compara com os resultados obtidos com a aproximação da demanda durante o leadtime a distribuição Normal atualmente utilizado pelo sistema. Concluiu-se que essa aproximação é interessante na prática para os itens com menor criticidade, classificados como B e C.



## Capítulo 3

# Contexto de Aplicação

Este projeto foi realizado em uma mineradora de ouro sediada na África do Sul cujas operações no Brasil se concentram em três unidades, duas em Minas Gerais e uma em Goiás e representam 10% da produção mundial do grupo. O foco do trabalho será em uma das unidades mineradoras da empresa, em operação há 26 anos e que contribui com cerca de 70% da produção no Brasil.

A produção da mina em questão cresceu 15% desde 2011, atingindo patamares em 2015 de 1.142kt de minério bruto e 265oz de ouro, conforme Figuras 3.1 e 3.2.

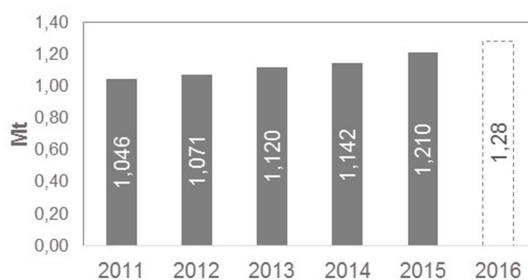


Figura 3.1: Evolução produção minério bruto em milhões de toneladas - 2011 a 2016

Como o preço do ouro no mercado internacional apresenta uma queda desde setembro de 2012 quando atingiu patamares próximos a 1.800 US\$/oz, conforme apresentado na Figura 3.3, os desafios da mineradora de reduzir os custos para aumentar sua rentabilidade são cada vez maiores. Atualmente a commodity está oscilando em torno de 1.150 US\$/oz.

Um dos fatores que impactam consideravelmente no resultado financeiro da empresa são os custos com manutenção de equipamentos. A operação da mina é suportada por

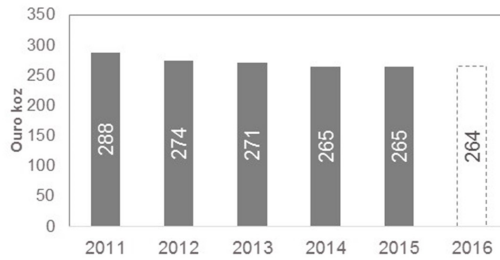


Figura 3.2: Evolução produção barras de ouro - 2011 a 2016

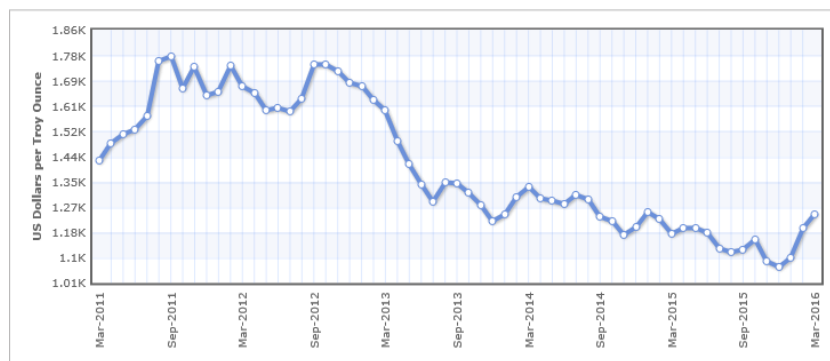


Figura 3.3: Evolução preço da commodity ouro em milhares de onças - Mar/11 a Mar/16 - site [www.indexmundi.com](http://www.indexmundi.com)

equipamentos pesados de valores elevados que exigem constantes manutenções, sejam elas preventivas ou corretivas. Esses custos implicam tanto em perda de produção quanto no próprio desembolso para aquisição de componentes a serem substituídos durante o reparo.

No caso das manutenções preventivas, a área de manutenção informa a área de suprimentos um plano de consumo de peças em um horizonte de quatro semanas. Com isso, a equipe de suprimentos providencia a reposição dos materiais de forma planejada, visando garantir em pelo menos 93% a disponibilidade do material na data programada. No caso de manutenções corretivas, ou seja, paradas não programadas, a área de suprimentos atua em caráter emergencial objetivando tornar o material disponível o mais rápido possível.

A motivação desse trabalho vem do fato da empresa administrar em torno de 12.000 itens em estoque os quais variam desde os menores e mais baratos até componentes grandes com valores mais altos. Muitos desses itens podem ser armazenados em prateleiras e gavetas, porém outros precisam de espaços maiores (galpões, tendas) e até mesmo equipamentos para serem manuseados (caminhão munck, empilhadeira, paleteira).

Como referência, 25% do valor do estoque da empresa se referem aos itens consumidos pela área de manutenção de equipamentos pesados. Portanto, a definição de quanto e quando pedir esses itens requer uma análise criteriosa de forma a atender a demanda do cliente no prazo e quantidades desejados bem como não gerar estoque em excesso.

Um outro desafio na gestão de estoque da empresa é melhorar a qualidade do mesmo, uma vez que aproximadamente 30% são itens sem movimentação e 9% de estoque em excesso. Uma parametrização do estoque adequada ao consumo e aos prazos de entrega minimiza a probabilidade do item ficar parado no estoque por muito tempo e de se manter estoque uma quantidade acima do necessário.

Por fim, conclui-se que uma gestão adequada dos itens em estoque que suportam a manutenção geram impactos diretos na redução de custos e na disponibilidade de equipamentos, que por sua vez, impacta na execução do plano de produção.

### 3.1 Gestão de estoque atual

A gestão de estoque da empresa é realizada pela área de suprimentos logístico a qual é responsável também pelo setor de Compras e Almoxarifado. Seus colaboradores avaliam a necessidade de compra do material, compram, recebem e armazenam os materiais, tornando-os disponível para atendimento ao usuário.

O estoque é revisado diariamente e toda vez que o saldo estiver em seu ponto de ressuprimento é gerada uma “ordem planejada” que sinaliza para o analista de estoque a necessidade de reposição. Esta é transformada em “requisição de compra” a qual é direcionada para os compradores ou transformada automaticamente em uma “ordem de compra” se for item de contrato. Essa “ordem de compra” é o pedido enviado automaticamente para o fornecedor.

O leadtime do produto é composto pelos seguintes tempos:

- Geração da “Requisição de Compra”: ocorre no máximo em 3 dias;
- Geração da “Pedido de Compra”: se for item de contrato, ocorre no mesmo dia. Caso tenha problema em algum parâmetro do contrato como preço, imposto, quantidade, o pedido não é gerado até que esses parâmetros sejam ajustados. Se for compra spot,

ou seja, fora de contrato, esse prazo é maior, podendo chegar a 30 dias.

- Prazo de entrega do fornecedor: tempo de entrega solicitado pelo fornecedor;
- Prazo de conferência: tempo para conferência do material recebido (quantidade e qualidade). Tempo objetivado de 3 dias.

As etapas desse processo de reposição do estoque estão apresentadas na Figura 3.4.



Figura 3.4: Fluxograma das etapas de reposição do estoque

As peças solicitadas pela área cliente podem ser ou não itens cadastrados para o estoque. Os itens que não são de estoque são adquiridos apenas conforme demanda. Já os itens de estoque são mantidos conforme parâmetros de reposição.

Independente do item ser de estoque ou não a área de suprimentos é responsável por providenciar a sua disponibilidade o mais breve possível. Afinal equipamento parado pode representar interrupção na produção e conseqüentemente perda de rentabilidade para a empresa. Observa-se aqui a necessidade de avaliação constante do custo de se manter determinado item em estoque para atendimento das demandas emergenciais em contrapartida adquiri-lo somente sob demanda pagando os custos decorrentes da parada do equipamento.

Os principais equipamentos utilizados pela operação da mina e atendidos pela manutenção são:

1. Carregadeiras Grande Porte
2. Carregadeiras Médio Porte
3. Caminhões
4. Scalers
5. Fan Drills
6. Plataformas
7. Projetores de concreto
8. Jumbos
9. Robolts
10. Sondas
11. Veículos leves e pesados

Cada um desses equipamentos é alocado a uma determinada área da Operação, como Desenvolvimento, Lavra, Transporte, Mecânica de Rochas e Infra Estrutura. Portanto, enquanto estiver parado, a sua área “dona” fica com as operações suspensas ou então, dependendo da criticidade da situação, utiliza o equipamento similar de outra área comprometendo a operação da mesma.

O indicador de disponibilidade dos equipamentos é monitorado diariamente pelos gestores da manutenção com o objetivo de identificar o motivo e os planos de correção das paradas. E a eficiência de atendimento por parte de Suprimentos é medida através do indicador de indisponibilidade de equipamentos por motivo “Aguardando Peças”. Existe uma meta de frota mínima disponível para cada tipo de equipamento.

Outro indicador de controle por parte da manutenção sobre o qual os equipamentos parados influenciam diretamente é o MTTR (tempo médio de reparo), ou seja, média de tempo que se leva para executar um reparo após a ocorrência da falha. Enquanto o equipamento está parado, seu MTTR está sendo contabilizado e quanto maior o seu valor maior é a perda de produção.

## 3.2 Caracterização do estoque

Através das Figuras 3.5 e 3.6, observa-se que 14% dos itens de estoque da empresa representam 95% do valor de consumo (itens A e B). E no que diz respeito a popularidade, 19% dos materiais são retirados mais de uma vez por mês (itens P e Q). Esses grupos correspondem aos itens que merecem atenção na análise da Gestão de Estoque pelo fato de impactarem diretamente no valor do estoque bem como no atendimento do serviço. Devido a criticidade do processo de reposição, os materiais a serem analisados neste trabalho serão focados nessas categorias de classificação.

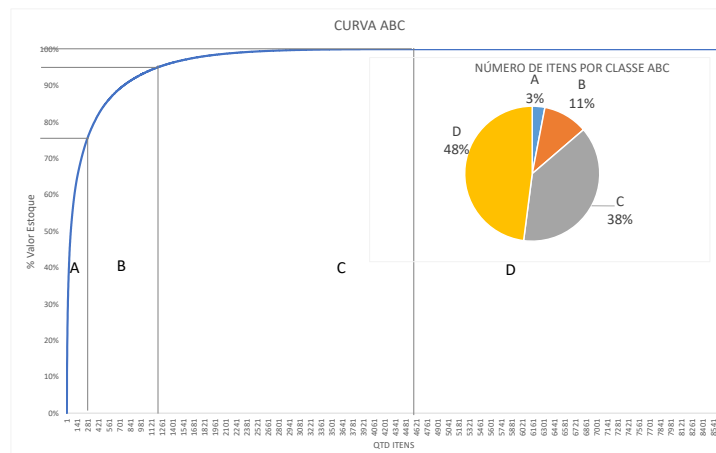


Figura 3.5: Curva ABC dos itens de estoque

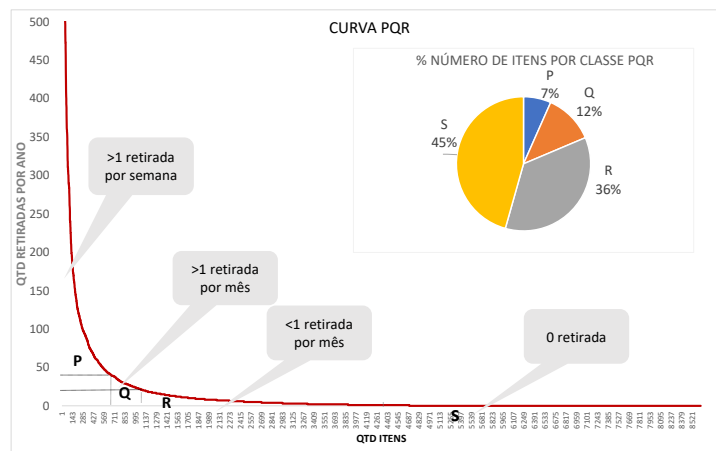


Figura 3.6: Curva PQR dos itens de estoque

### 3.3 Definição do problema

O objetivo do trabalho é determinar o ponto de ressuprimento de alguns itens específicos de forma a minimizar o custo esperado de falta e de estoque, visto que não há custo fixo associado ao pedido. Foi desenvolvido um modelo de simulação para que auxilie na definição da política mais próxima possível da ótima para a realidade desse cenário e assim responder basicamente duas questões: quando e quanto pedir os materiais para atender um nível de serviço visado e minimizar o custo esperado total.

A análise será baseada no tradeoff entre o custo de estoque e custo da falta, visto que há um custo de oportunidade ao manter uma certa quantidade em estoque e ao mesmo tempo há uma perda de produção quando o equipamento se encontra parado devido a falta da peça em estoque.

Tanto a demanda quanto o leadtime possuem um caráter estocástico uma vez que a demanda pelos materiais dependem das paradas corretivas e o fornecedor não cumpre exatamente o prazo pré-definido no momento da negociação. A aleatoriedade se caracteriza pelo fato da demanda variar ao longo dos meses de acordo com uma distribuição de probabilidade. O consumo de um item não influencia no consumo do outro, sendo assim uma demanda independente.

Além disso, é uma demanda estacionária visto que não há tendência de elevação ou queda ao longo do tempo e é permitida a sua postergação. Afinal o equipamento precisa voltar a operar, mesmo que com atraso em relação ao previsto.

A revisão do estoque é feita diariamente, ou seja, de forma discreta. Entretanto, como a demanda avaliada é diária, esse intervalo de tempo entre as revisões é pequeno se aproximando de uma revisão contínua.

O foco será avaliar a política de estoque de alguns itens críticos para operação, uma vez que possuem um valor unitário elevado e correspondem a componentes de equipamentos pesados os quais atendem a produção de ouro. Portanto a decisão de quando e quanto repor o seu estoque é o desafio da análise.

## Capítulo 4

# Modelo de Simulação

Por ser uma ferramenta que possibilite a análise de diversos itens e diversos cenários, a simulação foi utilizada para auxiliar na conclusão da política de estoque mais adequada para a empresa.

Portanto o objetivo da simulação desenvolvida neste trabalho foi avaliar o comportamento da demanda e do estoque de determinados itens de estoque variando o ponto de ressuprimento  $R$  para minimizar o custo médio por dia esperado.

Foram selecionados dez itens de estoque com demandas aleatórias para aplicação das metodologias e embasamento da análise. Apesar de características comuns entre eles como criticidade e dependência da vida útil do equipamento, cada um tem um comportamento histórico de consumo, de leadtime e de reposição de estoque. Eles representam itens de valores consideráveis que têm impacto direto nas paradas dos equipamentos utilizados pela operação da mina e portanto observa-se a importância da acurácia do planejamento de seu estoque. Assumiu-se que os equipamentos não são liberados enquanto esses itens não são substituídos.

Portanto os objetivos específicos do modelo desenvolvido são:

1. Definir o ponto de ressuprimento que gere o menor custo esperado;
2. Avaliar o impacto da variabilidade do leadtime na definição da política de estoque;
3. Definir a política de estoque  $(s, S)$  que minimize o custo esperado e represente uma frequência de chegada de pedidos operacionalmente viável.



## 4.1 Metodologia da simulação

Para definir o ponto de ressuprimento dos itens críticos, foi desenvolvido um modelo no programa R simulando a evolução das movimentações de estoque e considerando as seguintes premissas:

1. **Revisão Contínua:** O saldo é avaliado todo início do dia e como a demanda considerada é diária, esse tipo de revisão se aproxima da contínua.
2. **Período da simulação:** A simulação foi feita para 2 cenários, 120 e 180 dias, cada um repetido em 1000 vezes. Em alguns casos em que o cenário de 180 dias apresentou uma certa incoerência nos resultados, desenvolveu-se um terceiro cenário de 360 dias.
3. **Geração dos dados da demanda e leadtime:** A demanda e o leadtime são gerados diariamente no início da simulação de acordo com uma distribuição probabilística definida na Seção 5.1.
4. **Disparo de um novo pedido:** Toda vez que o saldo do dia (saldo disponível + saldo em pedido) estiver menor ou igual ao ponto de ressuprimento, dispara-se a necessidade de um pedido cujo leadtime segue a distribuição de probabilidade definida. A quantidade do pedido se refere a quantidade necessária para atingir o estoque máximo definido.
5. **Cálculo do nível de serviço:**

**Ciclos observados:** a quantidade de ciclos é contabilizada de acordo com a chegada de pedidos. Ou seja, a cada entrada de pedido soma-se um novo ciclo. Se não houver nenhuma entrada durante o período da simulação, contabiliza-se como um ciclo. Como a simulação possui um período fixo de análise, a contabilização do nível de serviço é truncada no dia do último recebimento de pedido. Dessa forma, garante-se a análise de ciclos completos.

**Falhas:** a quantidade de falhas é contabilizada se houver pelo menos uma demanda não atendida durante o ciclo. E a porcentagem de falhas (%falhas) é definida dividindo o número de falhas pelo número de ciclos.

**Nível de Serviço:** o nível de serviço  $S_1$  é calculado considerando  $1 - \%$  falhas. Foi calculado o nível de serviço tipo 1 ( $S_1$ ) que representa a probabilidade de não ocorrer nenhuma falha durante o ciclo do pedido. Pela definição de Axsäter [2015] é a probabilidade de não haver demanda não atendida durante o leadtime. Portanto, deseja-se determinar o ponto de reabastecimento tal que exista uma probabilidade  $S_1$  em que a demanda durante o leadtime é menor ou igual a  $R$ . Esse tipo de nível de serviço é utilizado normalmente em casos de revisão contínua (Política (R,Q)) e em modelos de demanda contínua. Ou seja, um pedido na quantidade  $Q$  é solicitado assim que a posição do estoque estiver em  $R$ .

Para parametrização foram considerados os seguintes dados de entrada:

**Estoque máximo (EM):** Considerou-se o estoque máximo real considerado pela política atual da empresa.

**Saldo inicial:** Considerou-se o saldo inicial real do período referente a obtenção dos dados.

**Custo de estoque:** Para o custo de estocagem assumiu-se a premissa da taxa de retorno considerando na empresa para 2017 de 11,5% aplicado ao preço médio do estoque e desconsiderados os riscos associados ao investimento. Custos relacionados com o espaço físico (aluguel, manutenção), mão de obra, seguro e taxas não foram considerados na análise visto que independem da quantidade e do tipo do material em estoque. Também não serão considerados os custos de degradação visto que todos os itens são de giro alto e permanecem pouco tempo em estoque.

**Custo da falta:** Cada equipamento pesado da Operação possui uma estimativa de receita de produção. Portanto, considerou-se que a sua parada devido a falta de alguma peça em estoque gera uma perda de produção por hora. Estima-se, por exemplo, que uma hora parada do Jumbo representa uma perda de produção de aproximadamente US\$ 5.000. Esse equipamento é utilizado pela equipe de Desenvolvimento para abrir as frentes de minério através da detonação das rochas. No caso das carregadeiras, que fazem a movimentação do minério extraído, estima-se

um valor de US\$ 3.500/hora parada. A Figura 4.1 resume o custo de hora parada de cada equipamento considerado na análise, base de 2014/2015.

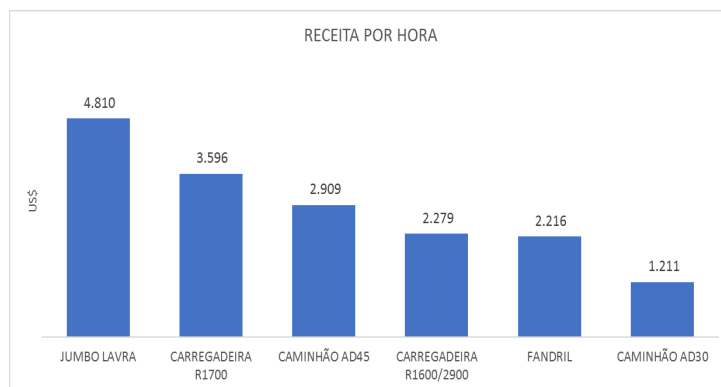


Figura 4.1: Custo por hora parada do equipamento

**Custo do pedido:** Não será considerado o custo de pedido uma vez que os custos necessários para realização da compra (espaço físico, recurso tecnológico e mão de obra do comprador), recebimento e armazenagem (mão de obra e empilhadeira, por exemplo) são fixos no horizonte de tempo (mês, por exemplo), ou seja, independem do número de pedido. Além disso, devido a quantidade de materiais a serem entregues e a limitação de capacidade de recebimento, a chegada dos pedidos ocorre diariamente independente da existência dos pedidos em análise. Por serem considerados itens de contrato, assumiu-se que o preço do material independe da quantidade comprada, ou seja, não há desconto quanto se compra uma quantidade maior por pedido.

A lógica implementada no modelo de simulação é apresentado na Figura 4.2.

O modelo foi implementado em um computador Samsung com Microsoft Windows 10, processador Intel(R) Core(TM) i5-5200U CPU, 2.20GHz, 2201 Mhz.

## 4.2 Seleção dos itens críticos

Para desenvolvimento e análise do modelo de simulação, foram selecionados dez itens baseados nas seguintes premissas:

**Criticidade:** São itens críticos para a rotina diária da equipe de Manutenção.

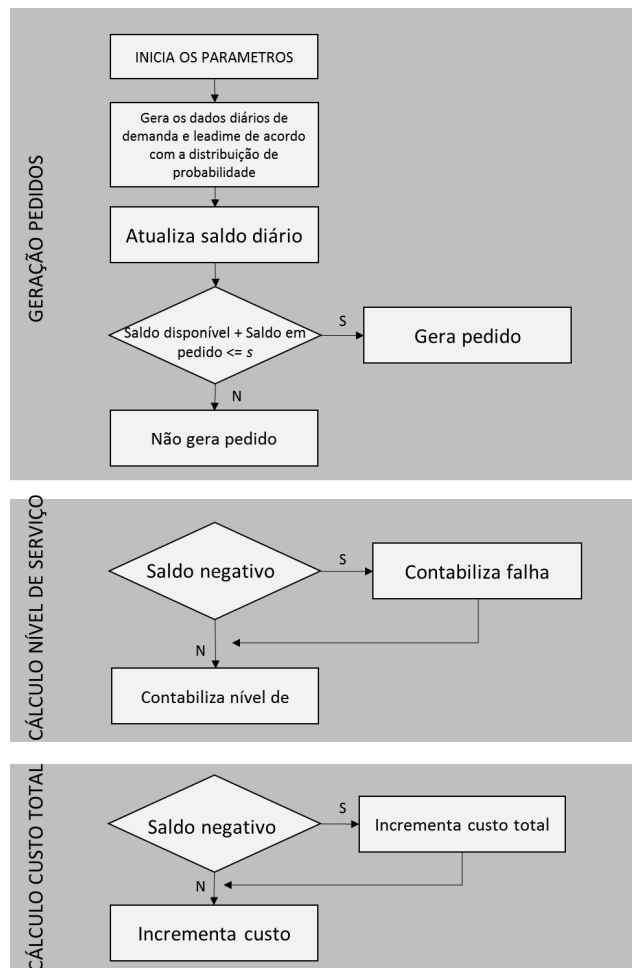


Figura 4.2: Fluxograma da lógica do modelo de simulação

**Aplicabilidade:** São componentes de equipamentos chave na Operação, como carregadeira, caminhão, jumbo e fandrill.

**Prazo de entrega:** Possuem prazos de entrega de contrato longos podendo chegar a 90 dias.

**Frequência de Consumo:** São itens de média e alta movimentação, sendo consumidos no mínimo em 4 meses do ano.

**Preço:** Itens de valores unitários representativos, de 780R\$ a 10.347R\$.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo das principais características dos itens. A segunda e terceira colunas representam os parâmetros de reposição do estoque, sendo  $R$  o ponto de ressuprimento e  $EM$  o estoque máximo a ser atingido. O prazo do fornecedor é o prazo de entrega inserido no cadastro do material, o qual é considerado no cálculo dos parâmetros de reposição. O preço unitário representa o custo médio de estoque e a última coluna representa o equipamento no qual o material é aplicado.

ITEM	R	EM	PRAZO	PREÇO UNIT	EQUIPAMENTO
			FORNECEDOR (DIAS)		
PINO	8	14	30	780	JUMBO
CAIXA	3	6	90	2.006	CAMINHÃO AD45
CABO	6	14	25	1.378	FANDRILL
PAINEL	0	2	30	10.347	CARREGADEIRA R1700
FILTRO	8	18	15	1.603	JUMBO
COMPRESSOR	3	4	3	3.899	CAMINHÃO AD30
CENTRALIZADOR	2	4	5	2.711	JUMBO
ESPELHO	3	6	5	1.262	CAMINHÃO AD45
MOTOR	3	8	15	1.401	VEÍCULO LEVE
CAIXA DIREÇÃO	6	14	5	5.189	VEÍCULO LEVE

Tabela 4.1: Caracterização dos itens selecionados

Foram analisadas as movimentações de estoque (consumo e reposição) desses itens e conseqüentemente obtido o histórico de demanda e leadtime durante o período de um ano (no caso, o ano de 2016).

As Figuras 4.3 a 4.12 representam a evolução do estoque de cada item no período coletado bem como todas as movimentações de entradas (colunas positivas) e saídas (colunas negativas), tais como aquisições, devoluções, consumos, transferências entre unidades e ajustes de inventário. Observa-se que há itens que mantiveram seu estoque elevado durante a maior parte do período analisado, outros que atingiram níveis próximos a zero em algumas ocasiões e demais cuja evolução do estoque está aparentemente atendendo as movimentações de saída. A análise da política de estoque adotada será complementada nesse trabalho considerando o custo médio de estoque e o nível de serviço.

A Tabela 4.2 apresenta as quatro principais classificações definidas por Gasnier [2002] para os itens selecionados.

Além de críticos, os itens selecionados são de uma forma geral itens que estão dentro da faixa de 95% do valor de consumo (categorias A e B), de comprabilidade complexa ou

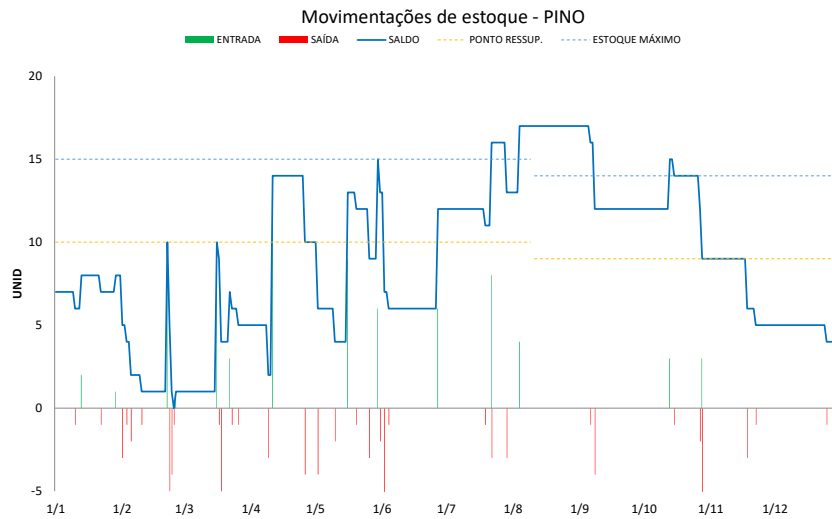


Figura 4.3: Movimentações de estoque - PINO

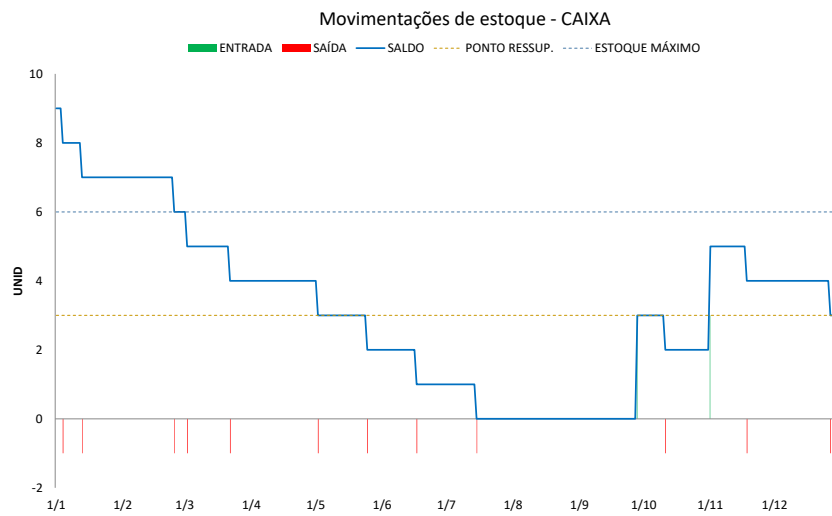


Figura 4.4: Movimentações de estoque - CAIXA

difícil e uma frequência de consumo de pelo menos uma unidade por mês.

1. PINO: esse item é utilizado em jumbos que são os equipamentos de perfuração para fazerem os furos nas rochas e avançarem com a exploração da mina. O preço unitário do mesmo não é tão alto em relação aos demais considerados neste trabalho porém o custo de parada do equipamento é o mais elevado. Possui uma popularidade P, ou seja, uma média de mais de uma retirada por semana. A média do prazo de entrega

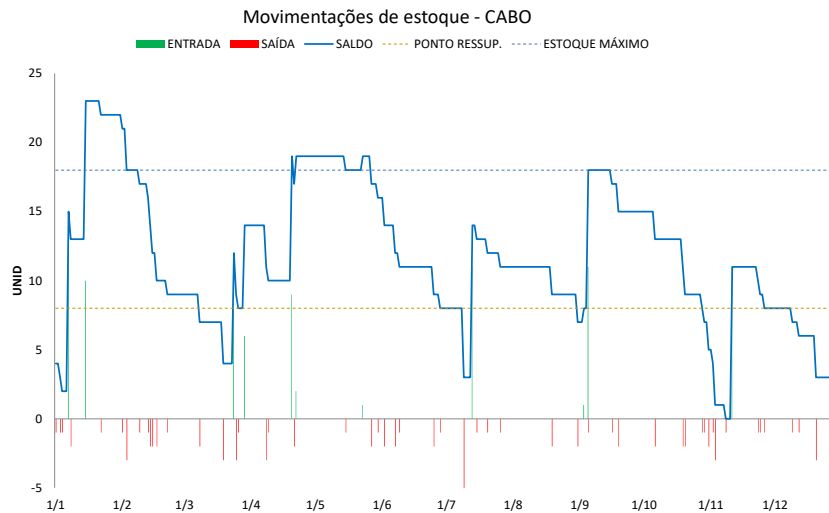


Figura 4.5: Movimentações de estoque - CABO

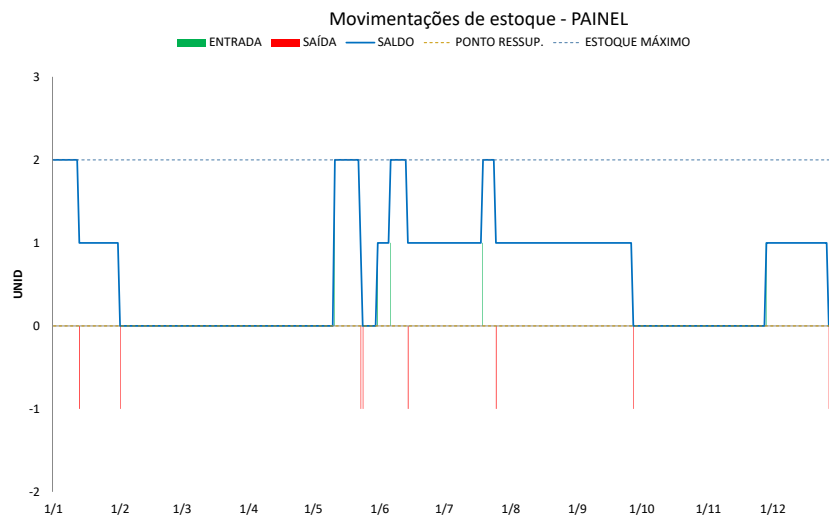


Figura 4.6: Movimentações de estoque - PAINEL

é de 39 dias, maior que o assumido pelo fornecedor. E por fim, está dentro dos itens que contribuem com 75% do consumo total (Curva A).

2. CAIXA: item de popularidade alta com uma média de uma retirada por mês e de valor unitário elevado, aproximadamente 2R\$mil. É um item crítico por ser consumido pelos caminhões AD45 que fazem o transporte do minério extraído até o processo de britagem. O custo de falta é considerado um dos mais elevados. Seu

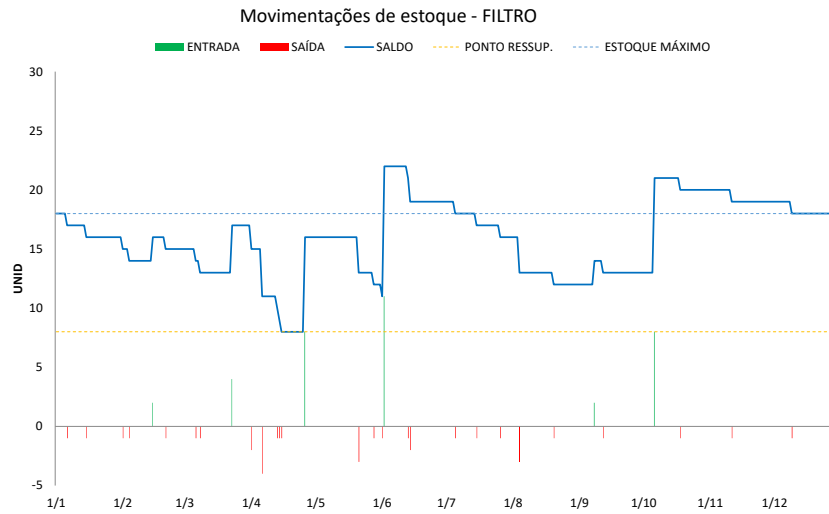


Figura 4.7: Movimentações de estoque - FILTRO

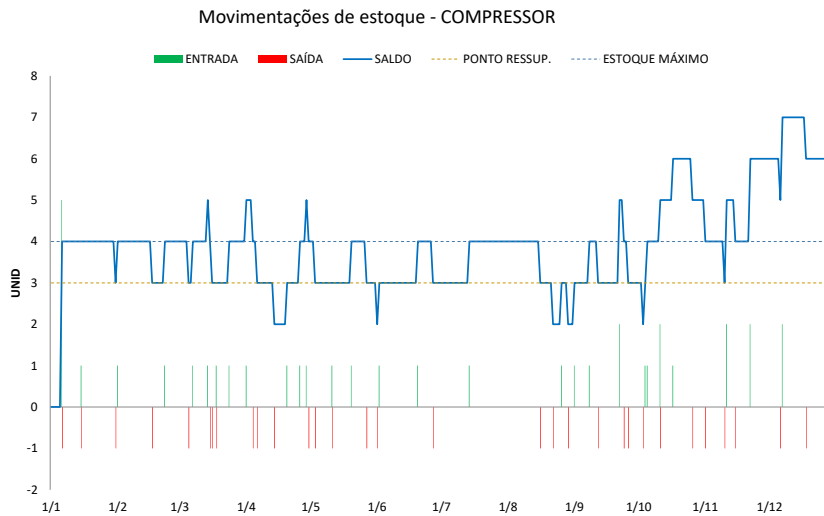


Figura 4.8: Movimentações de estoque - COMPRESSOR

leadtime teórico é o maior de todos, 90 dias, porém o real foi em torno de 30% acima, caracterizando uma comprabilidade de 1.

3. CABO: é o cabo de aço utilizado em fandrill, equipamento também utilizado para perfuração. Possui popularidade alta, com mais de uma troca por semana. Valor elevado, porém um prazo de entrega real consideravelmente menor que o previsto (7 dias x 25 dias). Dessa forma, considerou-se um item de comprabilidade mediana.



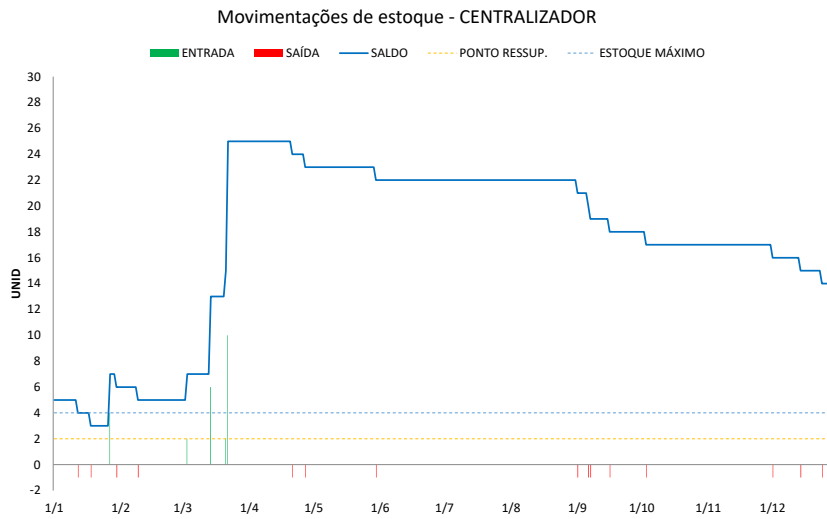


Figura 4.9: Movimentações de estoque - CENTRALIZADOR

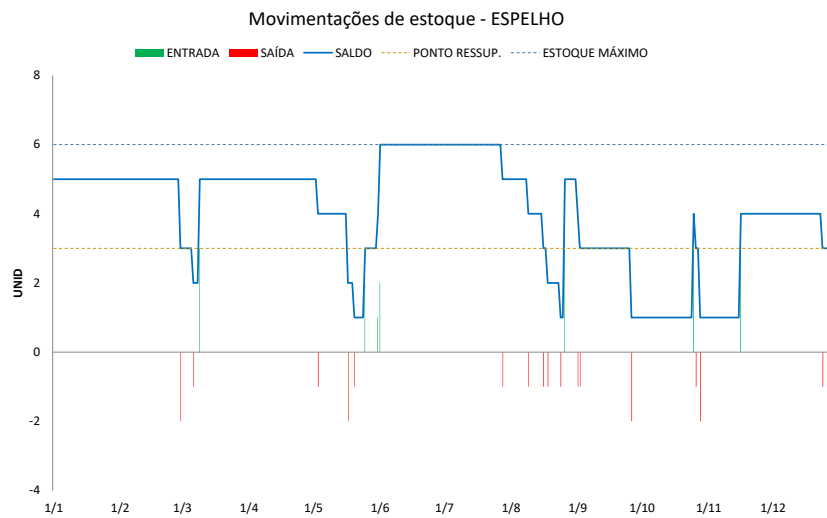


Figura 4.10: Movimentações de estoque - ESPELHO

4. PAINEL: item utilizado no modelo de carregadeira R1700 a qual abastece os caminhões de transporte da mina. O prazo de entrega é extenso, 54 dias, e possuem o maior valor unitário entre todos os itens avaliados. A popularidade é baixa uma vez que tem uma média de uma retirada a cada dois meses.
5. FILTRO: item com popularidade alta visto que tem uma média de consumo de mais de uma unidade por mês. Consumido pelos jumbos, cuja hora parada de produção é

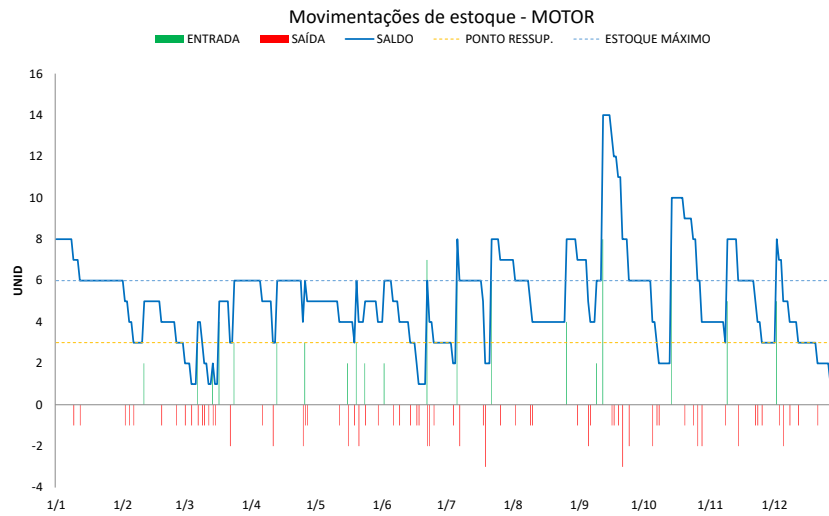


Figura 4.11: Movimentações de estoque - MOTOR

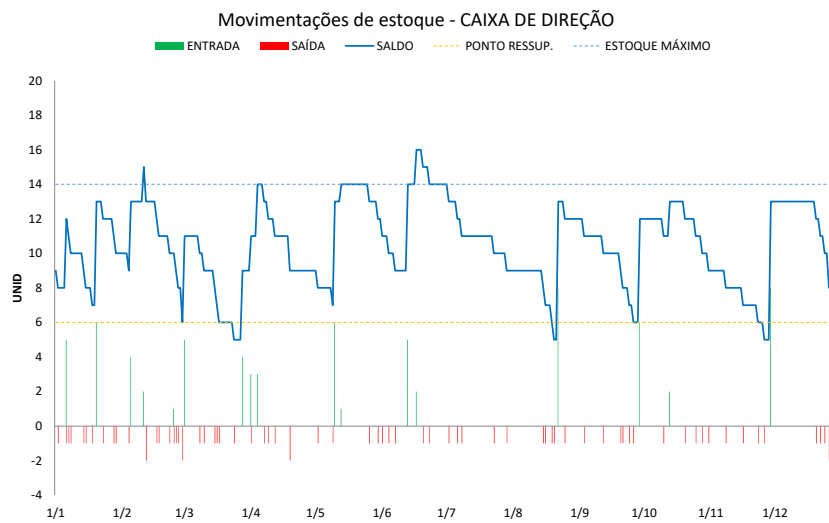


Figura 4.12: Movimentações de estoque - CAIXA DE DIREÇÃO

de maior custo. Valor unitário intermediário e prazo de entrega real sendo o dobro do acordado pelo fornecedor. Logo considerou-se uma comprabilidade complexa.

6. COMPRESSOR: item consumido por um outro modelo de caminhão, o AD30, também utilizado na movimentação de minério da frente de exploração até o processo de britagem. Frequência de consumo elevada porém de leadtime mais curto.

ITEM	ABC	PQR	XYZ	123
PINO	A	P	Z	1
CAIXA	B	Q	Z	1
CABO	A	P	Z	2
PAINEL	B	R	Z	1
FILTRO	B	Q	Z	1
COMPRESSOR	A	Q	Z	2
CENTRALIZADOR	B	Q	Z	2
ESPELHO	B	Q	Z	2
MOTOR	B	P	Y	3
CAIXA DIREÇÃO	A	P	Y	2

Tabela 4.2: Categorização dos itens selecionados

7. CENTRALIZADOR: item utilizado também nos jumbos de perfuração, possuindo portanto custo elevado de falta. Possui uma frequência de consumo alta visto que a média de retirada é de 2,5 unidades por mês. A comprabilidade considerada foi intermediária visto que apesar do fornecedor não cumprir o prazo previsto de cinco dias, o leadtime real não é tão elevado.
8. ESPELHO: esse é o espelho do lado direito do caminhão AD45, necessário para que o operador tenha uma visão da área ao redor do equipamento e então se locomover. Portanto, representa um item de segurança. É um item de frequência elevada, porém a demanda possui uma variabilidade alta, uma vez que enquanto em um mês não há consumo, no mês seguinte podem ser retiradas quatro unidades.
9. MOTOR: esse é um motor de partida utilizado nos chamados veículos leves, ou seja, caminhonetes. A ruptura do estoque compromete diretamente a movimentação de pessoas e peças dentro da mina. Entretanto, como dificilmente há parada de produção por esse motivo, considerou-se uma criticidade intermediária. Afinal como há um número maior desse tipo de veículo, um plano alternativo utilizado é o empréstimo de veículos similares de outra área. Além disso, como o prazo de entrega médio real é de 2 dias, considerou uma comprabilidade de 3, ou seja, de fácil acesso.
10. CAIXA DE DIREÇÃO: da mesma forma que o motor é um item utilizado nas caminhonetes. Item de valor elevado e de alta frequência, com uma média de consumo de 6 unidades por mês.

## Capítulo 5

# Definição da Distribuição de Probabilidade

A primeira definição a ser utilizada na parametrização do modelo diz respeito ao formato da distribuição de probabilidade obtido pelos dados de demanda e leadtime. Foram realizados testes de aderência partindo da hipótese de que a amostra de dados tem distribuição de Poisson, Normal ou Exponencial, com o objetivo de certificar se alguma dessas suposições poderia ser assumida.

As duas variáveis foram definidas da seguinte forma:

**Demanda:** número de unidades solicitadas por dia durante o período analisado.

**Leadtime:** quantidade de dias entre o momento da geração da requisição de compra e o momento em que o material está disponível para ser utilizado.

Por definição, a distribuição de Poisson é utilizada para representar variáveis aleatórias discretas e expressa a probabilidade de ocorrências em um determinado período desde que elas sejam independentes. Já a distribuição Exponencial representa o intervalo entre duas ocorrências representadas pela Poisson, assumindo apenas valores não negativos e com uma taxa de evolução constante  $\alpha > 0$ . E a distribuição Normal é uma das mais comuns distribuições de variáveis contínuas. Além disso, ela serve como uma excelente aproximação para uma grande classe de distribuições, que têm enorme importância prática. Segundo Axsäter [2015] o problema da distribuição normal é que existe sempre uma probabilidade

mínima da demanda ser negativa. Além disso, apesar da variável demanda durante um período ser na prática sempre um número inteiro não negativo, ou seja, uma variável discreta estocástica, o autor sugere o uso de modelos de demandas contínuas para aproximação em casos da demanda ser elevada. Para demandas mais baixas, recomenda o uso de modelos de demanda discreta.

Como os todos os itens avaliados neste trabalho são de movimentação elevada, foram testadas as três distribuições de probabilidade.

Como o comportamento da demanda de cada material bem como os prazos de entrega variam entre eles, cada um possui uma distribuição que mais se aproxima do comportamento real.

Para avaliar a aderência à Normalidade utilizou-se o teste de Shapiro Wilk e para as demais distribuições, Poisson e Exponencial, foram utilizados os testes não paramétricos de Qui-Quadrado e Kolmogorov Smirnov, respectivamente.

Em todos esses testes, definiram-se as seguintes hipóteses para análise considerando um erro aceitável de 5%:

**Hipótese Nula:** Variável aleatória adere a distribuição avaliada.

**Hipótese Alternativa:** Variável aleatória não adere a distribuição avaliada.

A forma mais comum de tomar a decisão é comparando o p-valor com o nível de significância assumido. Se o p-valor do teste for menor que o nível de significância, rejeita-se a hipótese de aderência a distribuição. O p-valor significa a probabilidade de se observar um valor tão grande ou maior do que o observado. Quanto menor o valor, maior a evidência de que os dados não seguem a distribuição em análise.

Utilizou-se o programa R para obtenção do p-valor e para construção dos histogramas e gráficos de probabilidade.

## 5.1 Aderência a distribuição de probabilidade

Razali et al. [2011] utilizou a simulação de Monte Carlo para realizar os seguintes testes de aderência da Normalidade: Anderson Darling, Lillieros, KolmogorovSmirnov e Shapiro Wilk. Esse último mostrou-se o mais adequado para essa função. Entretanto, nenhum deles

mostrou-se interessante para representar amostras pequenas. Essa conclusão também foi obtida em Torman et al. [2012] o qual recomenda procedimentos não paramétricos para a análise de amostras pequenas, em função da baixa performance dos testes de aderência à normalidade, dado o baixo percentual de acertos.

A baixa aderência à distribuição Normal dos itens foi observada tanto pelo resultado do teste de Shapiro Wilk quanto pelos gráficos de Qui-Quadrado, representados pelas Figuras 5.1 e 5.10. Conclui-se que os únicos que visualmente apresentaram uma certa proximidade a curva da Normal para a variável leadtime foram “PINO”, “CABO”, “PAINEL” e “FILTRO”. Entretanto, eles apresentaram aderência em pelo menos mais uma distribuição de probabilidade, o que impede a conclusão da aderência a normalidade.

Para a variável demanda a não aderência a Normalidade foi concluída tanto pelo teste quanto pela análise dos gráficos de Qui-Quadrado.

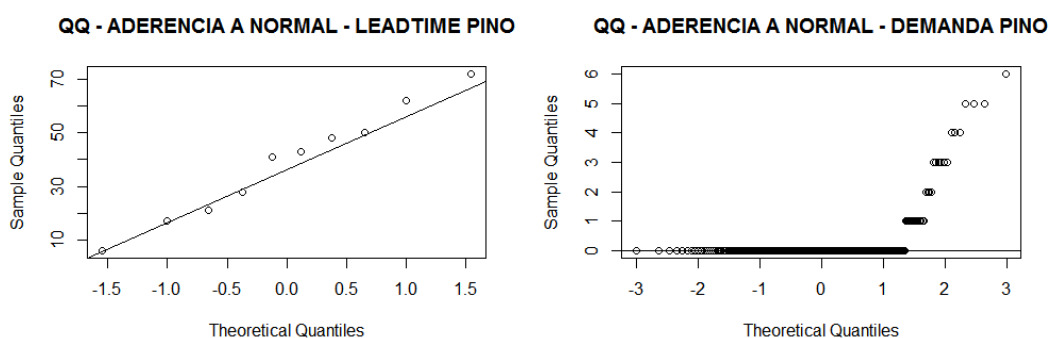


Figura 5.1: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “PINO”.

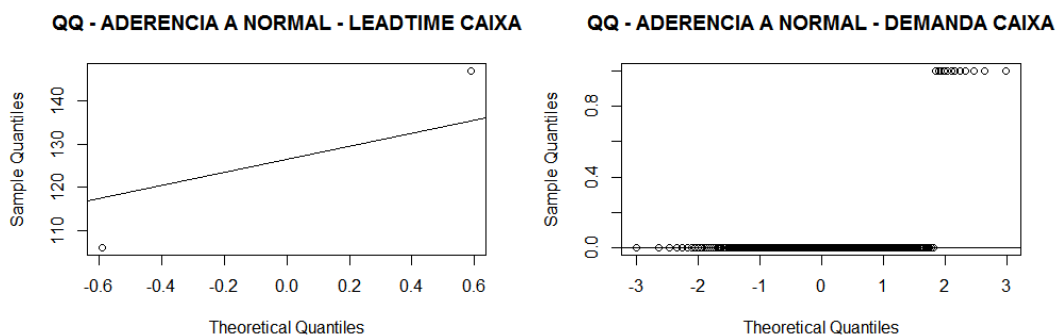


Figura 5.2: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CAIXA”.

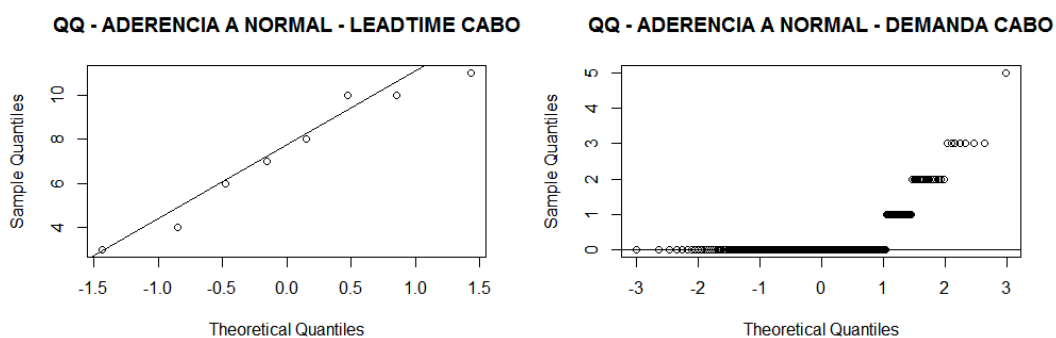


Figura 5.3: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CABO”.

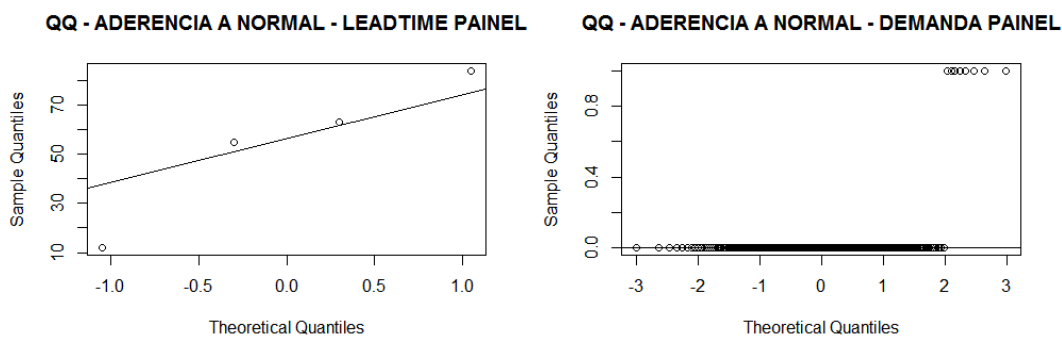


Figura 5.4: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “PAINEL”.

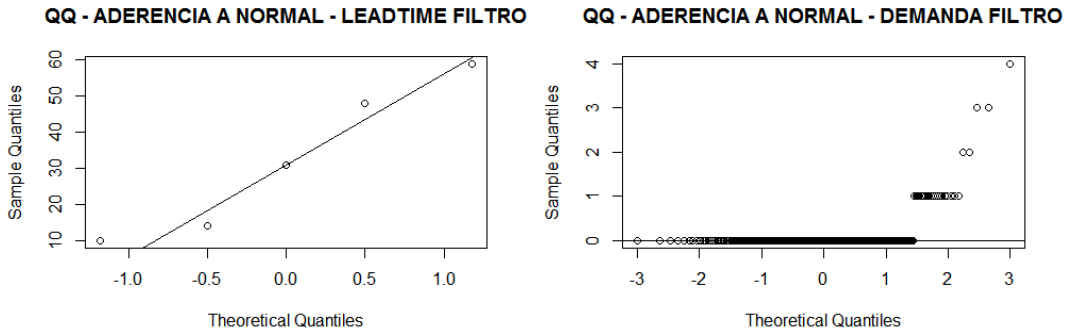


Figura 5.5: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “FILTRO”.

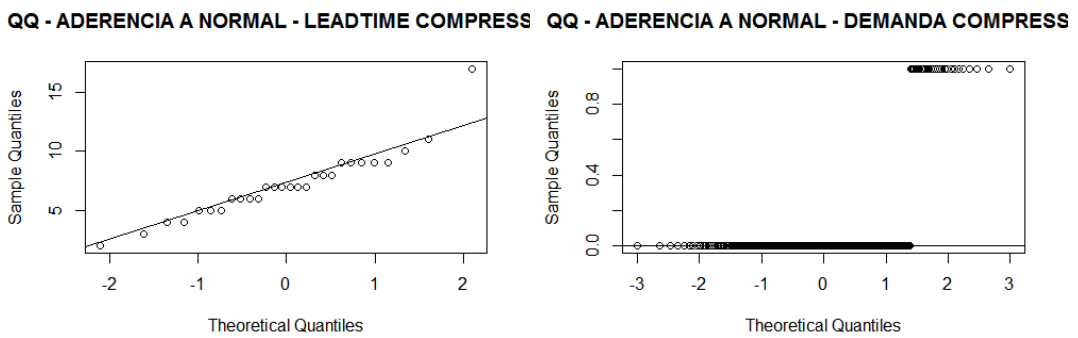


Figura 5.6: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “COMPRESSOR”.

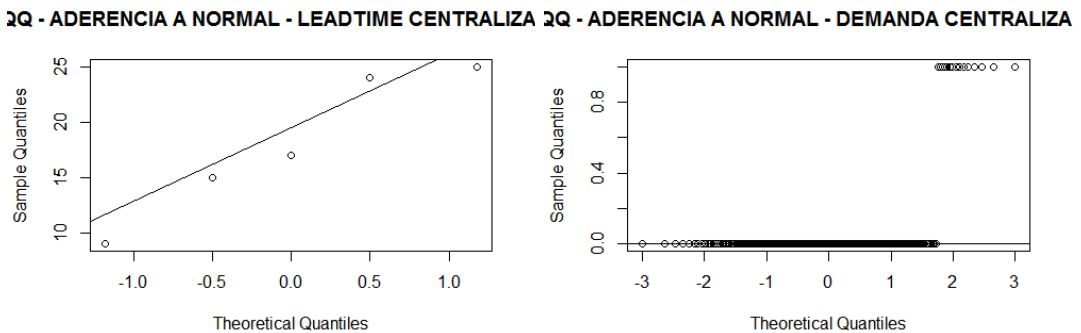


Figura 5.7: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CENTRALIZADOR”.



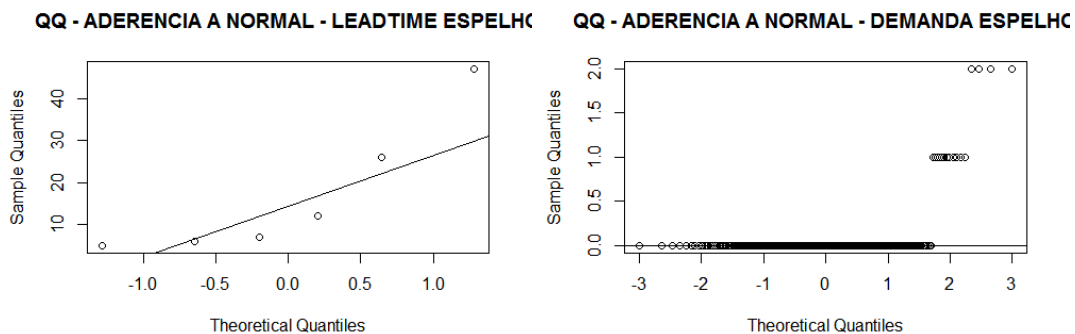


Figura 5.8: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “ESPELHO”.

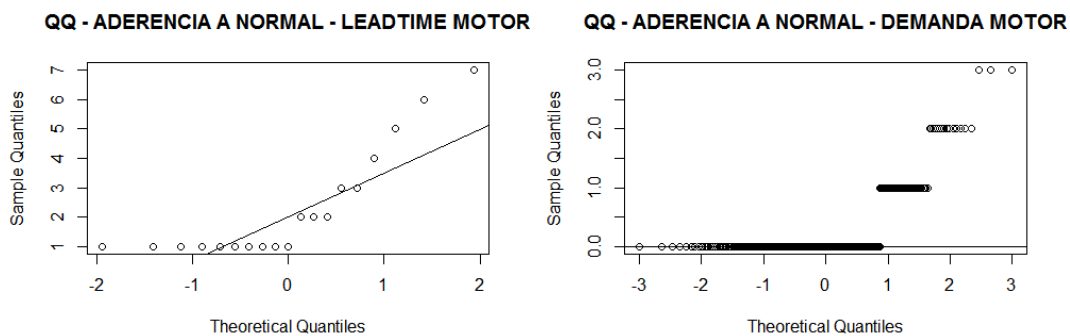


Figura 5.9: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “MOTOR”.

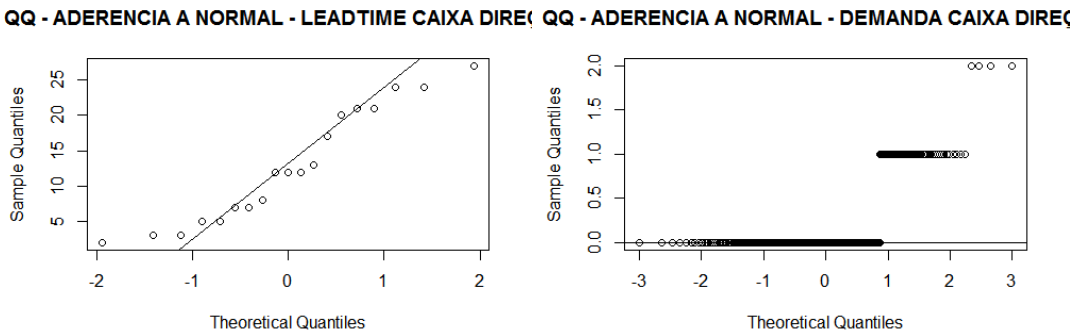


Figura 5.10: Gráficos QQ de aderência a Normalidade dos dados de demanda e leadtime do item “CAIXA DE DIREÇÃO”.

Em relação a aderência a Distribuição de Poisson, seja  $P_i$  a probabilidade hipotética de uma observação pertencer à categoria  $i$  de resposta,  $i = 1, \dots, k$  com  $\sum_{i=1}^k P_i = 1$ .

Seja  $n_i$  o número de indivíduos classificados na categoria  $i$  e  $e_i$  o seu respectivo valor esperado. Define-se a estatística qui-quadrado como

$$Q = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - e_i)^2}{e_i} \quad (5.1)$$

A estatística qui-quadrado busca aferir o quanto os dados são compatíveis com os valores de probabilidades fornecidos. Sua lógica consiste em comparar os dados observados com os dados que deveriam ser observados numa amostra de hipotética (amostra de referência) que obedecesse fielmente às probabilidades fornecidas.

Basicamente a estatística qui-quadrado é a distância quadrática entre os valores da amostra e da amostra de referência, ponderada pelos valores esperados sob a hipótese de que a estrutura de probabilidades fornecida é correta. Quanto maior o valor dessa estatística, maior é a evidência de que os dados não seguem a estrutura de probabilidades fornecida.

Para avaliar a aderência dos dados à distribuição Exponencial, foi realizado o teste de Kolmogorov Smirnov comumente utilizado para avaliar aderência a distribuições contínuas.

Segundo Test a estatística  $D$  do teste representa a diferença entre a função acumulada da distribuição observada  $F_0(x)$  e a função acumulada da distribuição esperada  $F_e(x)$ . Quanto menor for o  $D$ , mais aderentes são os dados à distribuição avaliada.

$$D = \max |F(x) - G(x)| \quad (5.2)$$

Os testes foram realizados individualmente para cada item analisado, tanto para a variável leadtime quanto para variável demanda.

Na Tabela 5.1 há uma consolidação dos resultados contendo o tamanho da amostra, o p-valor e as distribuições probabilísticas cujo p-valor foi acima de 5% (consideradas na coluna “Dist. Aderente”), para ambas variáveis leadtime e demanda. Na coluna “Dist. Aderente”, os nomes das distribuições Poisson, Normal e Exponencial foram abreviados para “POIS”, “NORM” e “EXP”, respectivamente.

Pela Tabela 5.1 observa-se que apenas três itens apresentaram aderência a apenas uma

ITEM	TAMANHO AMOSTRA		DIST. PROB	P-VALOR		DIST. ADERENTE	
	LEADTIME	DEMANDA		LEADTIME	DEMANDA	LEADTIME	DEMANDA
PINO	10	366	POISSON	0,0000	0,0000	NORM/EXP	NENHUMA
			NORMAL	0,9532	0,0000		
			EXP	0,4604	$\leq 2,2E - 16$		
CAIXA	2	366	POISSON	1,0000	0,9552	POIS/NORM/EXP	POIS
			NORMAL	0,9532	0,0000		
			EXP	0,3743	$\leq 2,2E - 16$		
CABO	8	366	POISSON	0,7878	0,0000	POIS/NORM/EXP	NENHUMA
			NORMAL	0,5941	0,0000		
			EXP	0,3333	$\leq 2,2E - 16$		
PAINEL	4	366	POISSON	0,975	0,0000	POIS/NORM/EXP	NENHUMA
			NORMAL	0,6582	8,184E-35		
			EXP	0,4622	$\leq 2,2E - 16$		
FILTRO	5	366	POISSON	0,0000	0,0000	NORM/EXP	NENHUMA
			NORMAL	5,77E-01	1,01E-35		
			EXP	0,7934	$\leq 2,2E - 16$		
COMPRESSOR	28	366	POISSON	0,1689	0,8163	POIS	POIS
			NORMAL	1,62E-02	7,12E-35		
			EXP	0,0015	$\leq 2,2E - 16$		
CENTRALIZADOR	5	366	POISSON	0,1100	0,9357	POIS/NORM/EXP	POIS
			NORMAL	6,09E-01	9,86E-37		
			EXP	0,3265	$\leq 2,2E - 16$		
ESPELHO	6	366	POISSON	0,0000	0,0000	EXP	NENHUMA
			NORMAL	5,56E-02	1,16E-36		
			EXP	0,7586	$\leq 2,2E - 16$		
MOTOR	19	366	POISSON	0,0815	0,0011	POIS	NENHUMA
			NORMAL	2,00E-04	6,23E-31		
			EXP	0,0187	$\leq 2,2E - 16$		
CAIXA DIREÇÃO	19	366	POISSON	0,0000	0,4657	NORM/EXP	POIS
			NORMAL	1,29E-01	6,48E-31		
			EXP	0,5153	$\leq 2,2E - 16$		

Tabela 5.1: Compilação dos resultados dos testes de aderência

distribuição de probabilidade, sendo eles o “COMPRESSOR”, “ESPELHO” e “MOTOR”. Os demais itens apresentaram um p-valor acima de 5% para mais de uma distribuição. Acredita-se que esse resultado se deva principalmente ao fato das amostras do leadtime serem consideravelmente pequenas, variando de 2 a 28 ocorrências, referentes ao período de um ano.

Quando a amostra é pequena qualquer teste é mais provável de aceitar a hipótese nula. Afinal não há dados suficientes para descartá-la. Mesmo que aumentasse o período desse banco de dados, passando-o para dois a três anos, por exemplo, o tamanho da amostra permaneceria pequeno.

Já a variável demanda é caracterizada por uma amostra de tamanho considerável, ou seja, 366 ocorrências. A maioria dos itens apresentaram p-valores muito pequenos para os três testes, não permitindo concluir aderência a nenhuma dessas distribuições. Apenas os

itens “CAIXA”, “COMPRESSOR”, “CENTRALIZADOR” e “CAIXA DE DIREÇÃO” apresentaram uma aderência a distribuição de Poisson.

Para embasar a conclusão foi feita uma análise visual do histograma bem como das curvas referentes às distribuições de probabilidade para que se pudesse optar pela distribuição mais adequada para as duas variáveis. Os gráficos estão representados pelas Figuras de 5.11 a 5.20.

Através da Figura 5.11 reforça-se a conclusão de que ambas variáveis leadtime e demanda do item “PINO” não apresentam aderência a nenhuma distribuição de probabilidade, visto que as curvas não seguem o mesmo comportamento das colunas do histograma.

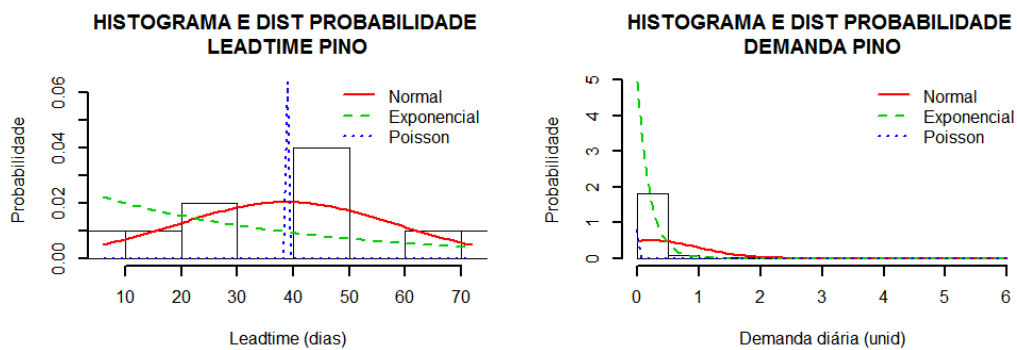


Figura 5.11: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - PINO

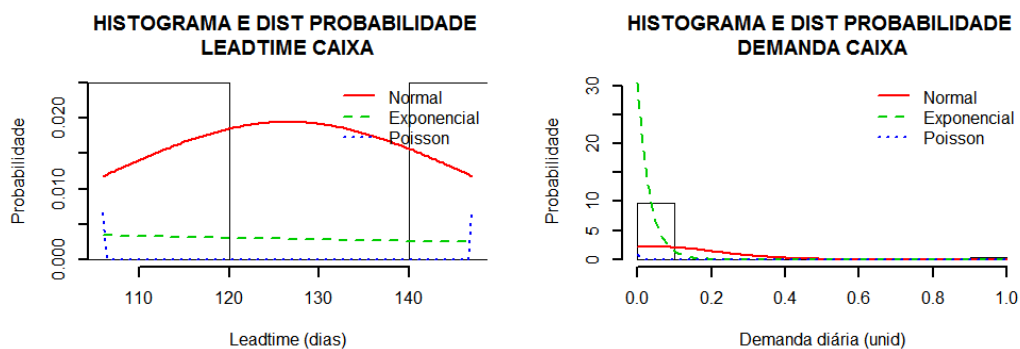


Figura 5.12: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CAIXA

Apesar do teste Qui-quadrado ter aceitado a hipótese nula de aderência a distribuição de Poisson da variável demanda do item “CAIXA”, esse alinhamento não é observado no

segundo gráfico da Figura 5.12. E no caso do leadtime, não se pode concluir nenhuma aderência das curvas de distribuição às colunas de frequência do histograma.

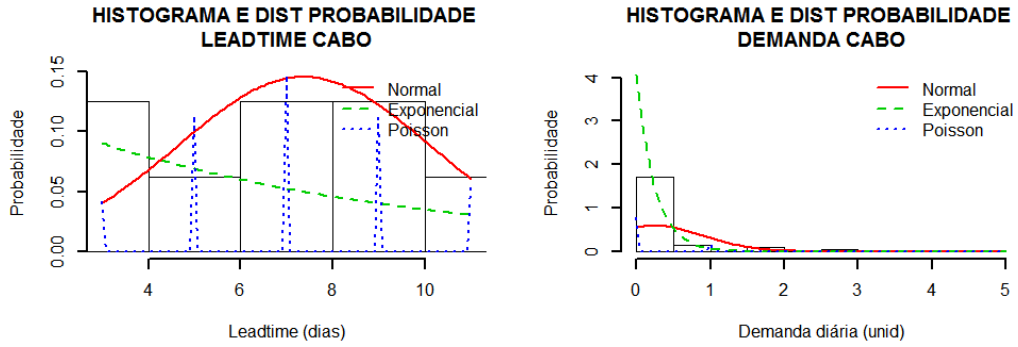


Figura 5.13: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CABO

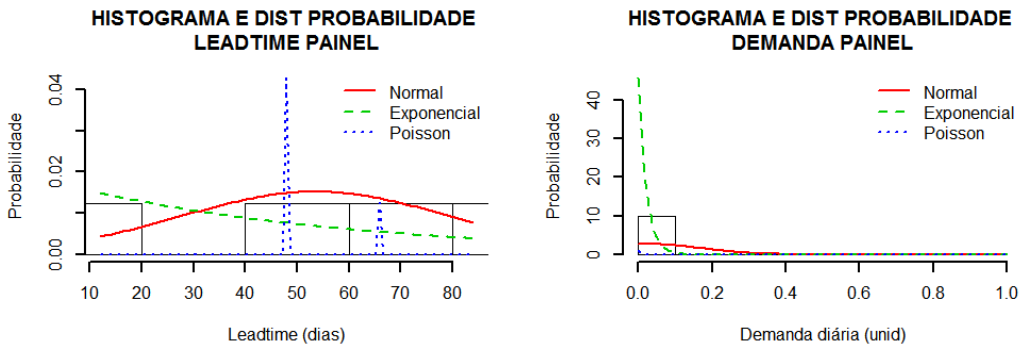


Figura 5.14: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - PAINEL

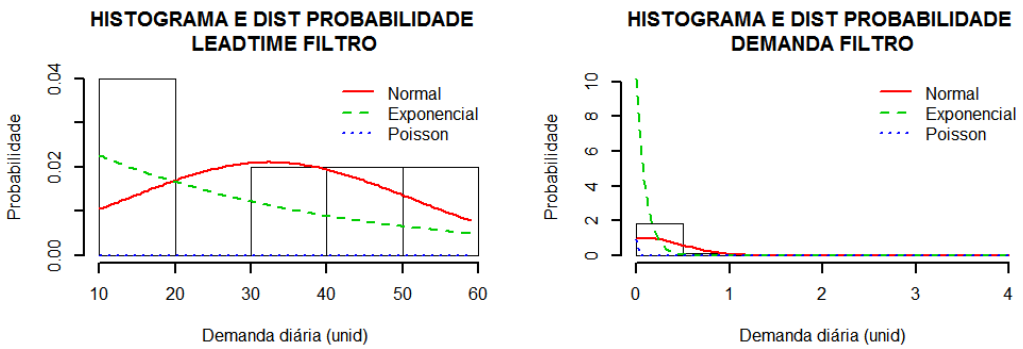


Figura 5.15: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - FILTRO

A conclusão dos testes de aderência para o item os itens “CABO” “PAINEL” e “FIL-TRO” podem ser confirmadas respectivamente pelas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15. Afinal não se observa uma proximidade no comportamento das curvas de distribuição de probabilidade às colunas do histograma, tanto para leadtime quanto para demanda.

A aderência da variável leadtime do item “COMPRESSOR” à distribuição de Poisson concluída pelo teste de aderência Qui-Quadrado pode ser confirmada pela Figura 5.16. Observa-se também que a curva da distribuição Normal se aproxima relativamente ao comportamento das colunas do histograma. Entretanto essa aderência não foi sinalizada pelo teste de Shapiro Wilk.

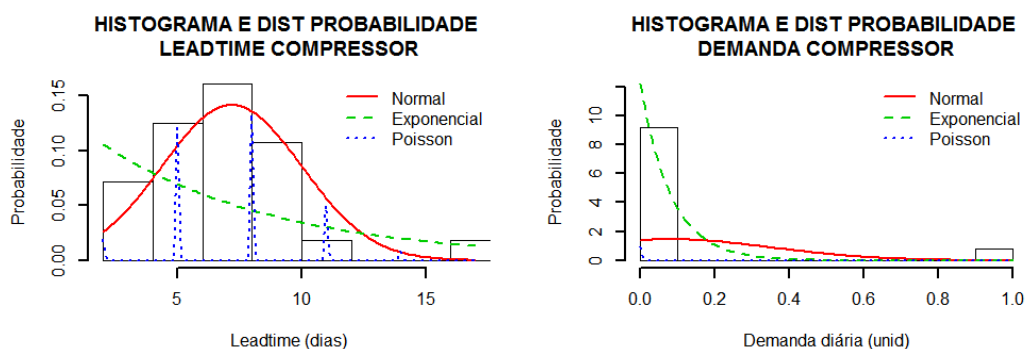


Figura 5.16: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - COMPRESSOR

Observa-se que pela Figura 5.17 que assim como concluído pelos testes, não há aderência a nenhuma das três distribuições de probabilidade para ambas variáveis do item “CENTRALIZADOR”.

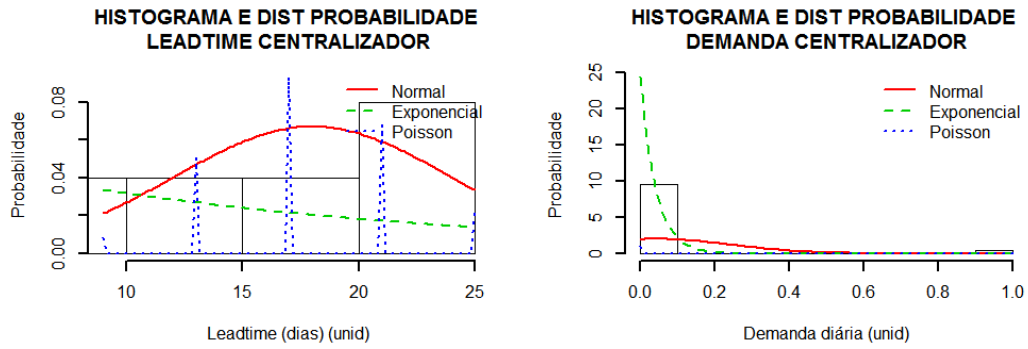


Figura 5.17: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CENTRALIZADOR

No caso do “ESPELHO”, a aderência à distribuição exponencial concluída pelo teste de Kolmogorov Sminorv não pode ser confirmada pela Figura 5.18. Entretanto como o p-valor encontrado no teste foi elevado (0,76), considerou-se essa distribuição no modelo de simulação.

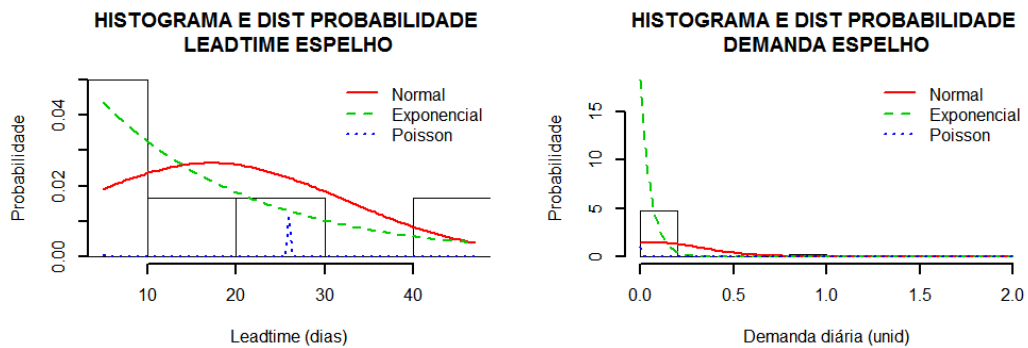


Figura 5.18: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - ESPELHO

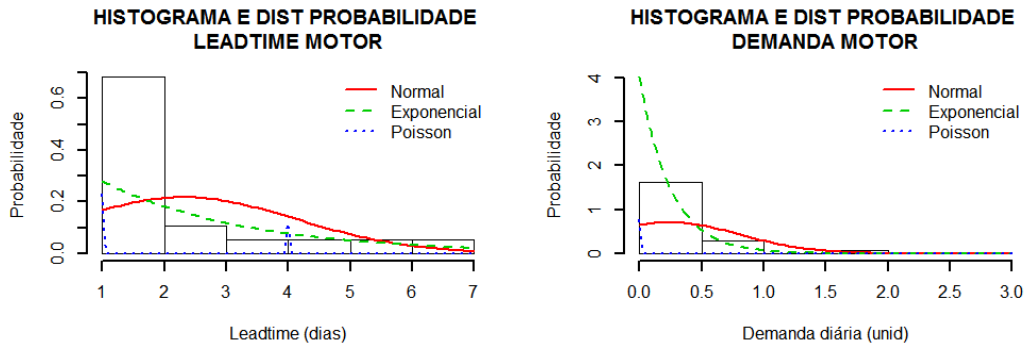


Figura 5.19: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - MOTOR

Apesar do teste de Qui-Quadrado não rejeitar a hipótese de aderência a distribuição de Poisson da variável leadtime do item “MOTOR”, não é possível observar claramente esse comportamento no primeiro gráfico da Figura 5.19. Já para o item “CAIXA DE DIREÇÃO” observa-se pela Figura 5.20 uma certa similaridade da curva da Poisson ao histograma da variável demanda, chegando a mesma conclusão do teste de aderência.

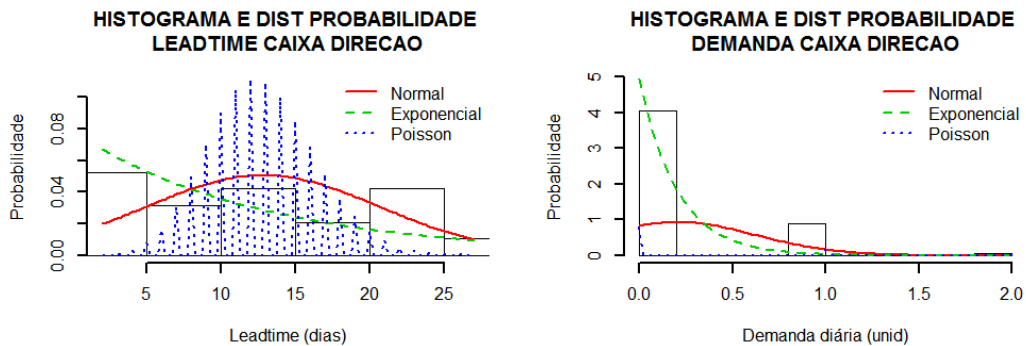


Figura 5.20: Histogramas e curvas das distribuições de probabilidade - CAIXA DE DIREÇÃO

Portanto, para os itens que apresentaram incoerência entre os resultados dos testes de aderência e os da análise visual de proximidade do comportamento das curvas de distribuição com o histograma para ambas variáveis, foi considerada na simulação a função *sample*. Com o uso dessa distribuição empírica utilizou-se a mesma proporção real do período considerado.



## 5.2 Aproximação pela normal

Foi realizado um segundo cenário de previsão de demanda assumindo a premissa de que a demanda e o leadtime seguem uma distribuição normal.

Utilizaram-se as fórmulas analíticas (5.3) e (5.4) para obter respectivamente a média e a variabilidade da demanda durante o leadtime, ver por exemplo Nahmias and Olsen [2015]. Os resultados obtidos para cada um dos itens avaliados estão apresentados na Tabela 5.2.

$$\mu = \mu_\tau \lambda \quad (5.3)$$

$$\sigma^2 = \mu_\tau \nu^2 + \lambda^2 \sigma_\tau^2 \quad (5.4)$$

onde  $\mu_\tau$  é a média do leadtime,  $\lambda$  a média da demanda,  $\sigma_\tau$  o desvio padrão do leadtime e  $\nu$  o desvio padrão da demanda.

A demanda é medida em unidades por dia e o leadtime medido em dias. Com isso a demanda obtida durante o leadtime é medida em unidades solicitadas em todo o período de leadtime.

ITEM	DEMANDA DIÁRIA		LEADTIME		DEMANDA DURANTE LEADTIME	
	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP	MÉDIA	DP
PINO	0,20	0,79	38,80	19,64	7,84	6,33
CAIXA	0,03	0,18	126,50	20,50	4,15	2,11
CABO	0,25	0,67	7,38	2,74	1,81	1,95
PAINEL	0,02	0,15	53,50	26,20	1,17	1,21
FILTRO	0,10	0,41	32,40	18,94	3,19	2,97
COMPRESSOR	0,08	0,27	7,18	2,82	0,59	0,77
CENTRALIZADOR	0,04	0,20	18,00	5,93	0,74	0,88
ESPELHO	0,05	0,27	17,17	15,12	0,94	1,39
MOTOR	0,25	0,56	2,32	1,84	0,58	0,97
CAIXA DIREÇÃO	0,20	0,43	12,79	7,88	2,59	2,21

Tabela 5.2: Parâmetros da distribuição Normal da demanda e leadtime

Para calcular o nível de serviço assumindo que o comportamento da demanda segue uma distribuição normal, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$z = \frac{R - E(D)}{\sigma} \quad (5.5)$$

onde

- $R$  foi variado de 1 até  $EM - 1$ ;
- $E(D)$  é a média real da demanda durante o leadtime de cada item;
- $\sigma$  é o desvio padrão da demanda durante o leadtime de cada item.

Após calcular o valor de  $z$ , encontrou-se o nível de serviço através da consulta na tabela da normal reduzida, uma vez que:

$$P(D \leq R) = L \quad (5.6)$$

onde  $L$  é o nível de serviço e  $D$  segue distribuição normal.

## Capítulo 6

# Resultados da Simulação

### 6.1 Curva do nível de serviço x ponto de ressuprimento

Através do modelo de simulação, calculou-se inicialmente o nível de serviço para cada valor de  $R$  obtendo assim a curva Nível de Serviço x Ponto de Ressuprimento de cada item analisado. Em seguida, adicionou-se ao gráfico a curva obtida com a aproximação das variáveis demanda e leadtime a distribuição normal.

De uma forma geral a curva da normal apresentou um comportamento mais conservador, ou seja, para um mesmo ponto de ressuprimento obteve-se um nível de serviço menor do que os obtidos na simulação.

Foram testados dois cenários referentes ao período da simulação: 120 e 180 dias. Quanto maior esse período mais inclinada é a sua curva, apresentando resultados mais coerentes. Portanto, utilizou-se como base o cenário de 180 dias. Entretanto, para os casos em que esse cenário apresentasse um comportamento pouco esperado, foi gerado um terceiro cenário, com 360 dias o qual foi utilizado para continuação da análise.

As Figuras 6.1 a 6.10 apresentam os gráficos da curva do nível de serviço x ponto de ressuprimento de cada item. Para melhor visualização dos pontos dos gráficos, em caso que os mesmos estão mais sobrepostos, foi gerado um segundo gráfico com uma visão mais ampliada do primeiro. Como referência, sinalizou-se o ponto de reposição atual no eixo horizontal de cada gráfico.

## ITEM 1 - PINO

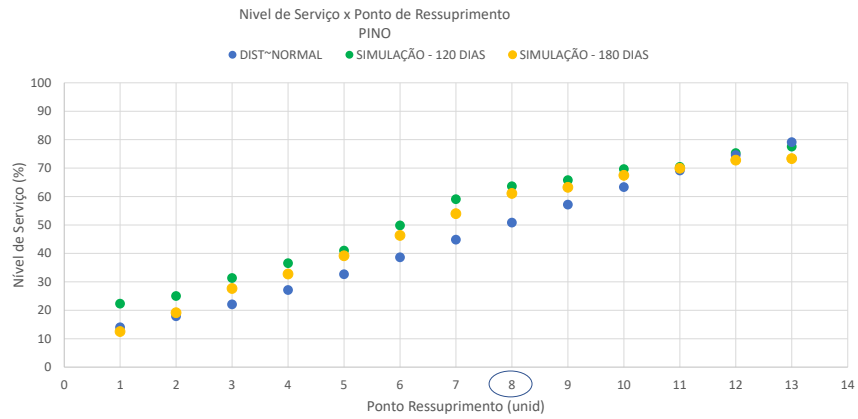


Figura 6.1: Nível de Serviço do PINO - Simulação x Demanda Normal

Para o item “PINO” observa-se que para os parâmetros considerados na simulação não são possíveis atingir níveis de serviço superiores a 80%. Ou seja, para aumentar o nível de serviço, deve-se aumentar o estoque máximo parametrizado. Para o ponto de ressuprimento atual de 8 unidades, os níveis de serviço obtidos com a aproximação pela normal e a simulação de 180 dias foram 50% e 60%, respectivamente.

## ITEM 2 - CAIXA

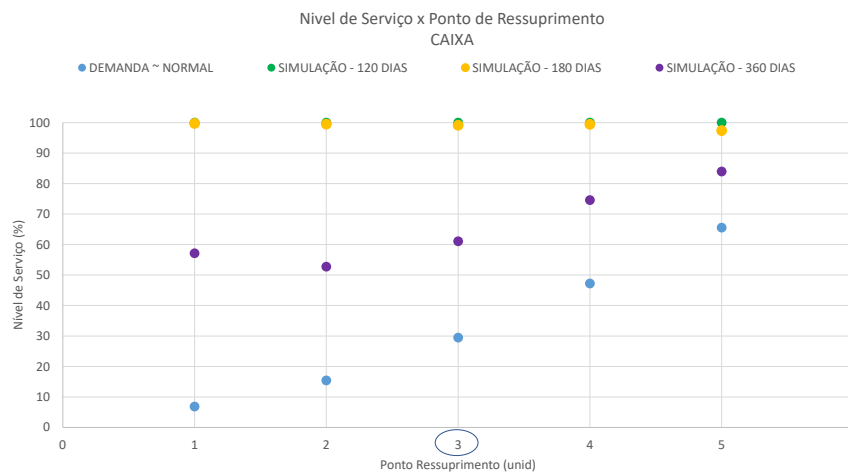


Figura 6.2: Nível de Serviço do CAIXA - Simulação x Demanda Normal

No caso do item “CAIXA”, a curva referente a aproximação da demanda a distribuição normal está bastante distante das curvas obtidas através da simulação. Não se obtém níveis de serviços acima de 70% pela aproximação a distribuição normal e sim pela simulação. Além disso, a curva do cenário de 180 dias apresentou um comportamento diferente do esperado, ou seja, uma tendência de queda do nível de serviço a medida que aumentava o  $R$ . Por esse motivo foi realizado um terceiro cenário para o item “CAIXA”, o de 360 dias, cuja curva apresentou um comportamento mais coerente. Ao avaliar os níveis de serviço obtidos para o ponto de ressuprimento parametrizado atualmente  $R = 3$  observa-se que há uma diferença considerável entre o valor obtido pela normal (30%) e o obtido pela simulação (60%).

### ITEM 3 - CABO

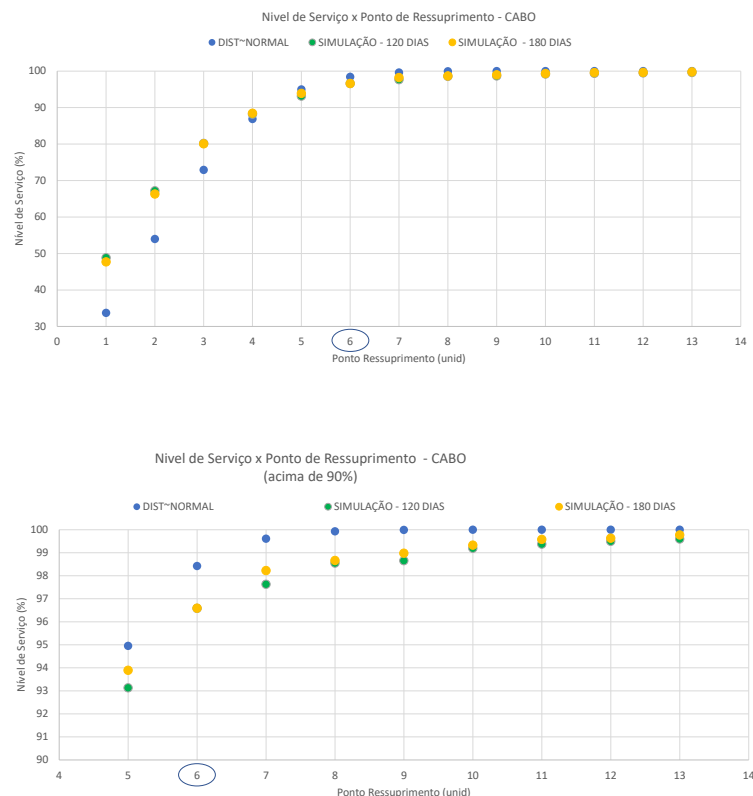


Figura 6.3: Nível de Serviço do CABO - Simulação x Demanda Normal

Para o item “CABO”, as curvas de nível de serviço obtidas tanto pela simulação quanto

pela aproximação a normal, ficaram bastante próximas como pode ser observado pela Figura 6.3.

#### ITEM 4 - PAINEL

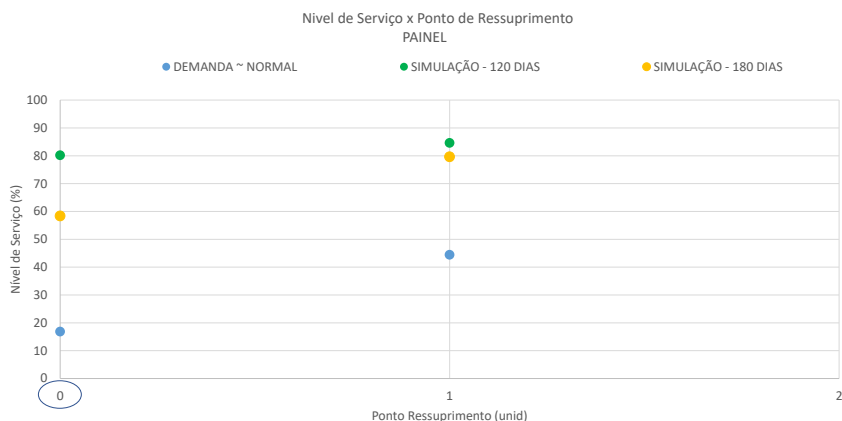


Figura 6.4: Nível de Serviço do PAINEL - Simulação x Demanda Normal

Como a premissa da parametrização do modelo de simulação foi variar o ponto de ressuprimento de 1 até  $EM - 1$ , no caso do “PAINEL” gerou-se inicialmente apenas uma rodada com  $R = 1$ . Entretanto, para se obter uma curva e não somente um ponto e aumentar a abrangência da análise, foi feita uma nova rodada partindo do  $R = 0$  cujos resultados estão apresentados na Figura 6.4. Observou-se uma discrepância considerável entre a curva da normal com as curvas obtidas com a simulação. Comparando com o  $R$  atual, cuja reposição do estoque só é feita quando o saldo zera, a simulação apresentou como melhor proposta não esperar zerar para repor. E sim disparar o pedido quando atingir o saldo de uma unidade.

#### ITEM 5 - FILTRO

No caso do “FILTRO” o cenário com 180 dias apresentou níveis de serviço similares a medida que se aumentava o ponto de ressuprimento. Portanto também foi gerado o cenário com 360 dias para esse item o qual apresentou resultados mais coerentes e cuja curva se aproximou da curva que assumia a distribuição normal para a demanda e leadtime. Como

pode ser concluído pela Figura 6.5, essas duas últimas curvas apresentam uma inclinação maior em relação a simulação de 180 dias. Ou seja, o nível de serviço aumenta consideravelmente a medida que se acrescenta uma unidade no ponto de ressuprimento. Para o ponto de ressuprimento atual de 8, os resultados obtidos tanto pela curva da Normal quanto pela da simulação de 360 dias foram próximos, sendo 94,7% e 93,9% respectivamente.



Figura 6.5: Nível de Serviço do FILTRO - Simulação x Demanda Normal

## ITEM 6 - COMPRESSOR

Para o item “COMPRESSOR” a curva da nível de serviço pela aproximação a normal cresce com maior inclinação, porém apresenta uma variação pequena em relação as demais curvas obtidas pela simulação. Para todos cenários foram obtidos um nível de serviço acima de 70%, independente do ponto de ressuprimento. Para o parâmetro atual de  $R = 3$ , a curva da normal apresentou um nível de serviço de quase 100% e o cenário de

180 dias foi o que chegou mais próximo desse valor, com 96,2%.

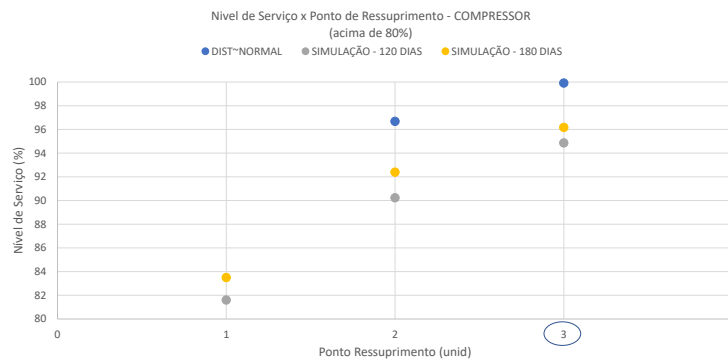
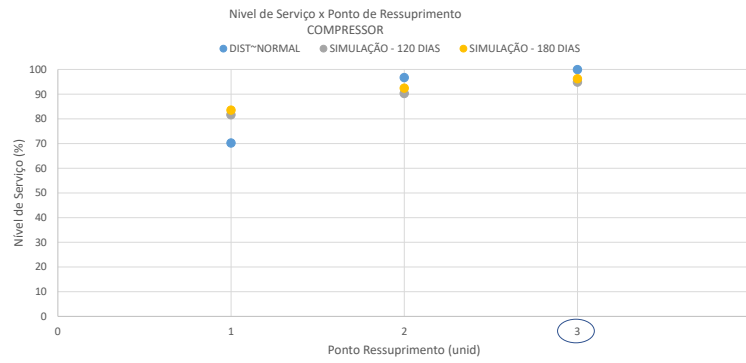


Figura 6.6: Nível de Serviço do COMPRESSOR - Simulação x Demanda Normal

## ITEM 7 - CENTRALIZADOR

No caso do “CENTRALIZADOR” tanto a simulação quanto a curva da normal apresentaram um nível de serviço acima de 90% para o ponto de ressuprimento parametrizado atualmente de duas unidades.



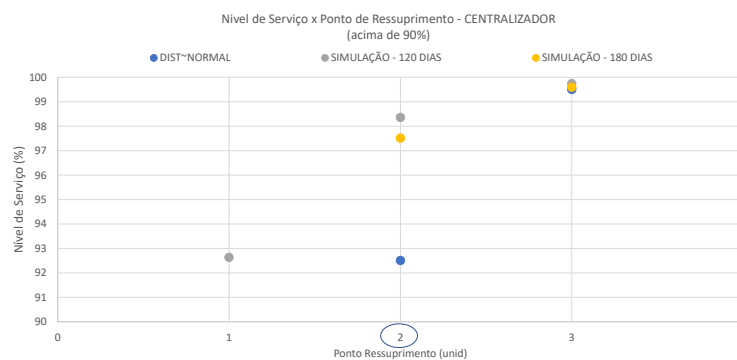
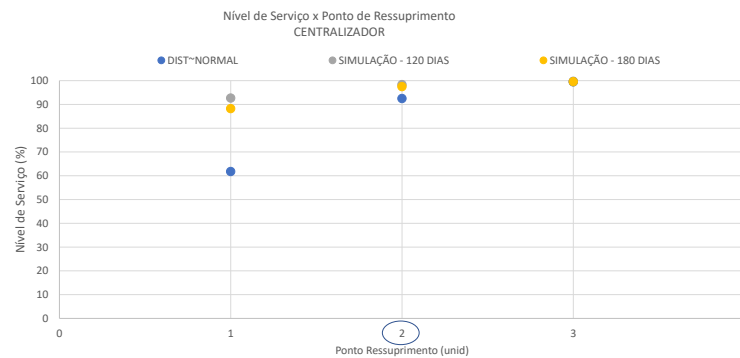


Figura 6.7: Nível de Serviço do CENTRALIZADOR - Simulação x Demanda Normal

### ITEM 8 - ESPELHO

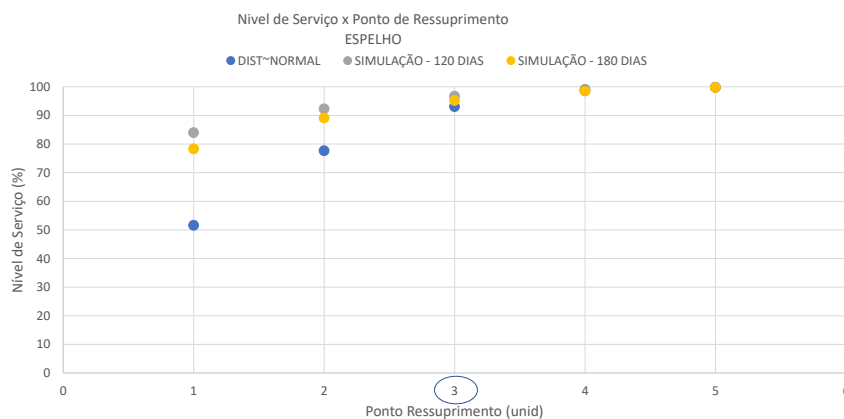


Figura 6.8: Nível de Serviço do ESPELHO - Simulação x Demanda Normal

Pela Figura 6.8 observa-se que todas as curvas apresentaram um crescimento gradativo, diferenciando entre si pela sua inclinação. Para o ponto atual  $R = 3$  os níveis de serviço obtidos foram bem próximos e acima de 90%.

### ITEM 9 - MOTOR

Assim como o item “ESPELHO”, as curvas do “MOTOR” também apresentaram um crescimento gradativo, se sobrepondo a medida que aumentava o ponto de ressuprimento. Para  $R = 3$  todos resultados obtidos foram acima de 98%, o que pode ser verificado pela Figura 6.9.

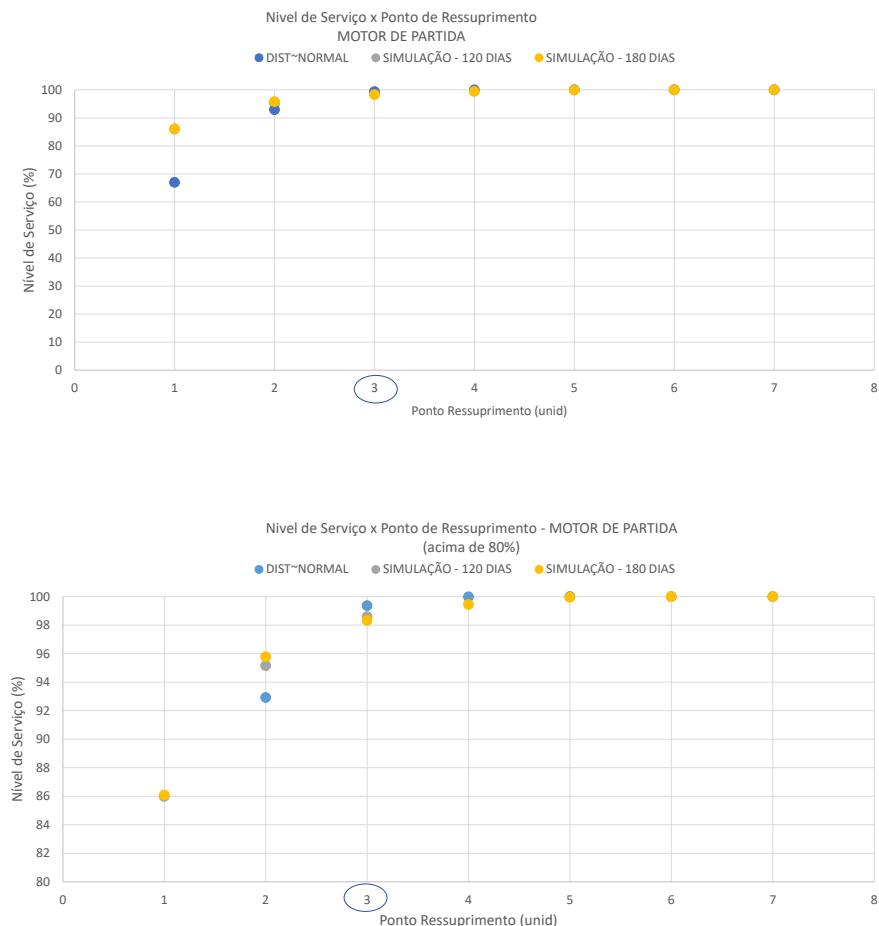


Figura 6.9: Nível de Serviço do MOTOR - Simulação x Demanda Normal

## ITEM 10 - CAIXA DE DIREÇÃO

Um comportamento similar ao "MOTOR" ocorreu com o item "CAIXA DE DIREÇÃO", sendo que para o parâmetro atual  $R = 6$  os valores obtidos variaram de 94 a 96%, conforme Figura 6.10.

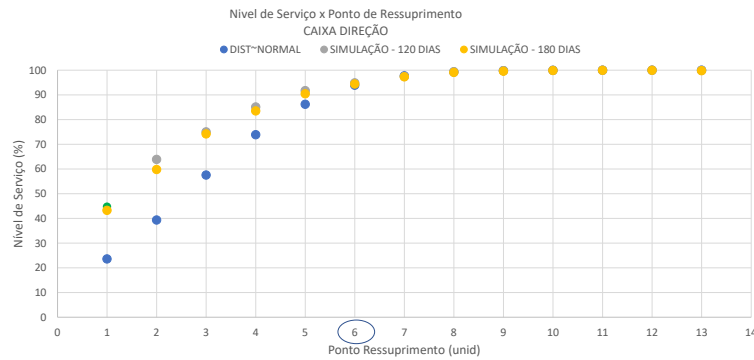


Figura 6.10: Nível de Serviço do CAIXA DIREÇÃO - Simulação x Demanda Normal

## 6.2 Custo médio por dia de estoque

No modelo de simulação foi implementada a seguinte lógica para cálculo do custo: Se o saldo for negativo, soma-se ao custo total o custo da falta por dia. Caso seja positivo, soma-se o custo de oportunidade de estoque considerando uma taxa de retorno financeira aplicada ao custo unitário de estoque do item.

Custo médio de estoque por dia =  $(\text{Custo excesso} + \text{Custo falta}) / n^{\circ}$  dias da simulação

Onde:

Custo excesso =  $11,5\% * \text{Valor unit} * \text{Saldo positivo do dia}$

Custo falta = Custo do equipamento parado por dia conforme Figura 4.1

Segundo Axsäter [2015] esse custo unitário de falta por unidade de tempo é relevante em casos de peças cuja falta implica em parada da máquina. Como foram considerados

peças críticas para os equipamentos pesados de operação, caso não tenha algum desses itens em estoque, o equipamento em manutenção não será liberado.

O custo por falta é similar ao custo de estoque. A única diferença é que o custo da falta ocorre quando o nível de estoque está negativo e o custo de estoque quando ele está positivo. Ou seja, o custo de estoque  $h$  pode ser considerado como a penalidade por unidade e por unidade de tempo para as unidades que estão aguardando demanda.

As Figuras de 6.11 a 6.20 representam a evolução do custo do cenário de 180 dias, com exceção dos itens “CAIXA” e “FILTRO” cujo cenário base foi o de 360 dias pois foram os que apresentaram resultados mais coerentes.

Como o custo de falta é consideravelmente maior que o custo de estoque, observa-se uma queda do custo a medida que o  $R$  vai adquirindo valores maiores. Afinal, quanto maior o  $R$ , menor é a probabilidade de rupturas. Entretanto, a partir de determinado valor de  $R$ , a curva do custo total volta a subir, indicando o  $R$  mais próximo do ótimo. Em cada um dos gráficos foi destacado o valor atual de  $R$ . Observa-se que muitos deles não correspondem ao ponto de menor custo representando oportunidade de redução de custo sobre as políticas de estoque adotadas atualmente.

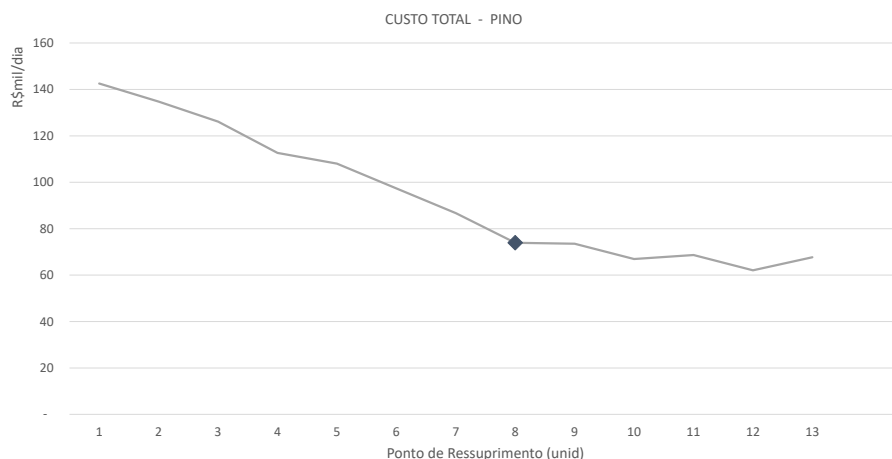


Figura 6.11: Custo médio esperado - PINO

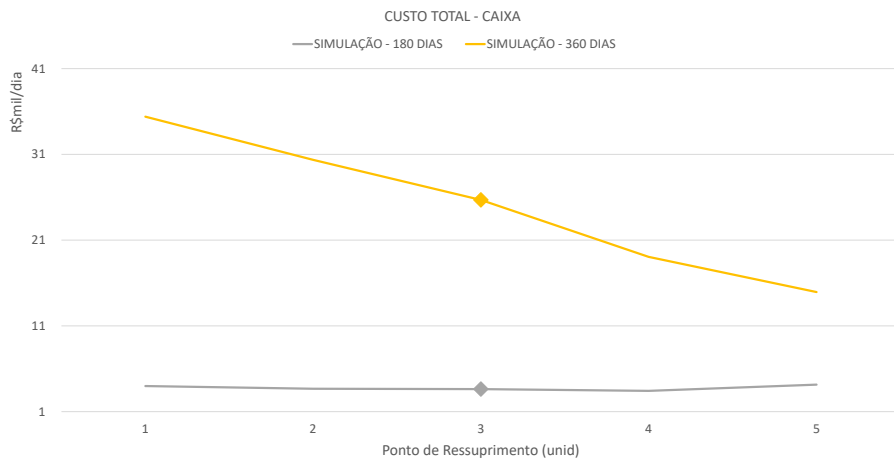


Figura 6.12: Custo médio esperado - CAIXA

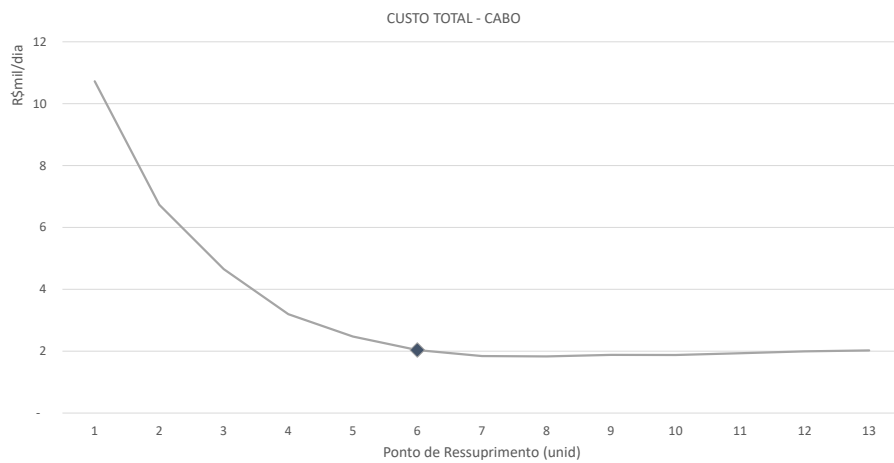


Figura 6.13: Custo médio esperado - CABO

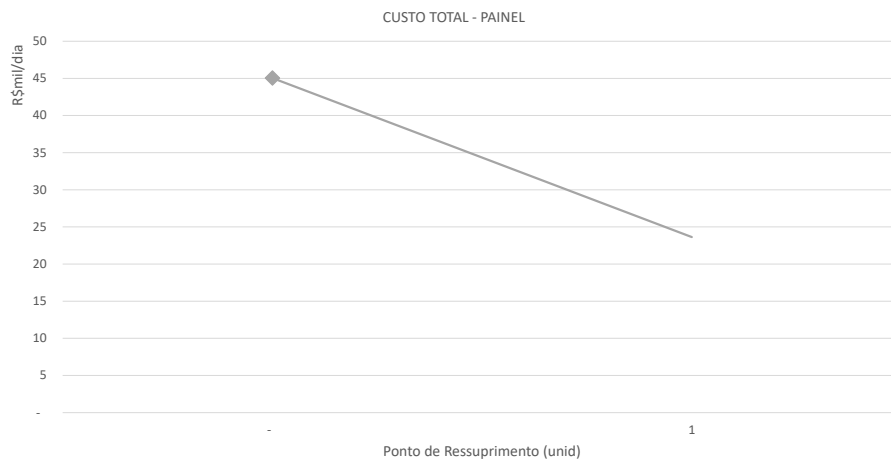


Figura 6.14: Custo médio esperado - PAINEL

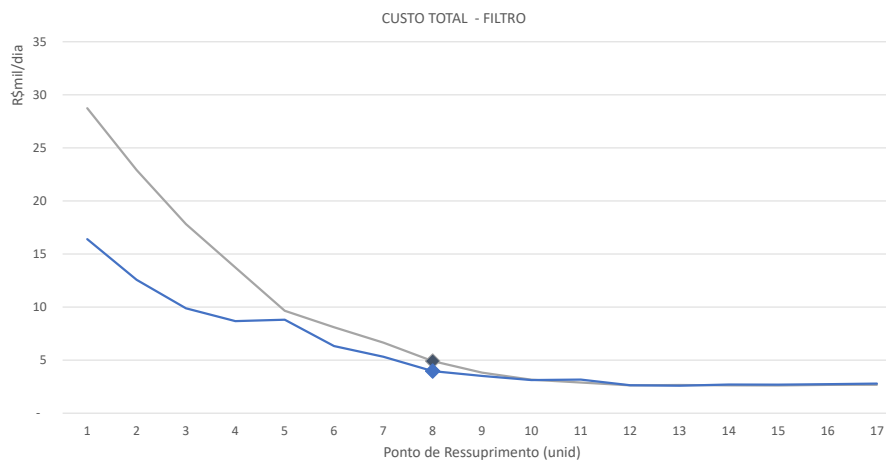


Figura 6.15: Custo médio esperado - FILTRO

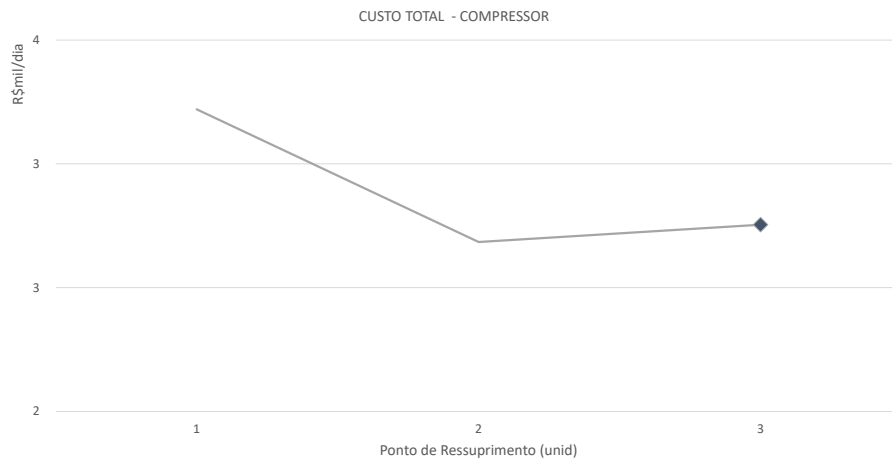


Figura 6.16: Custo médio esperado - COMPRESSOR

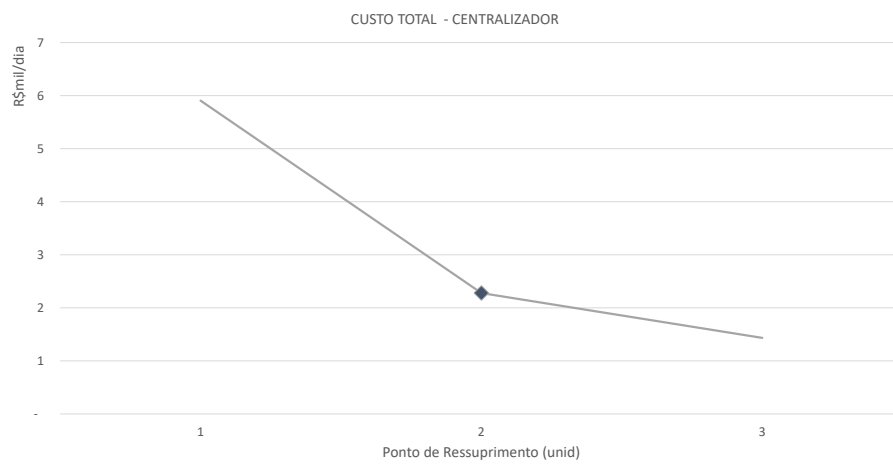


Figura 6.17: Custo médio esperado - CENTRALIZADOR

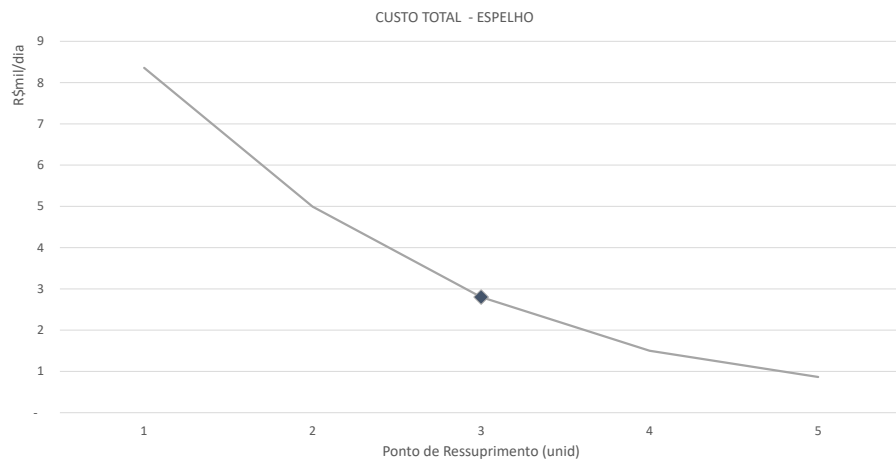


Figura 6.18: Custo médio esperado - ESPELHO

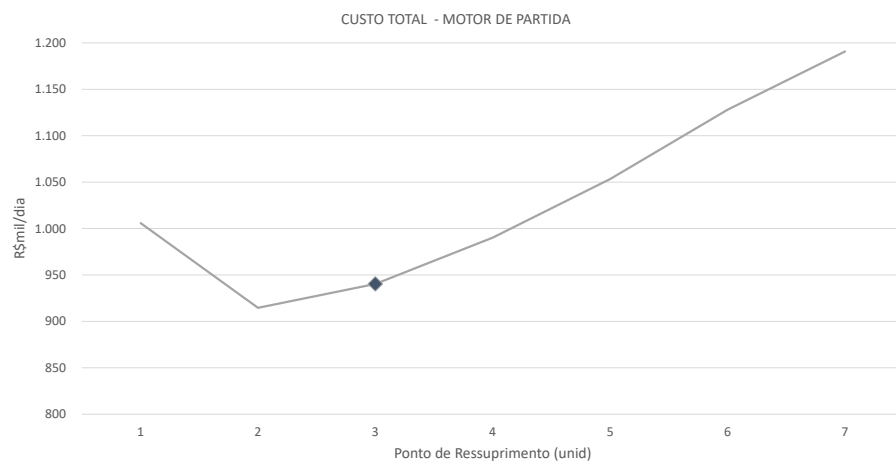


Figura 6.19: Custo médio esperado - MOTOR



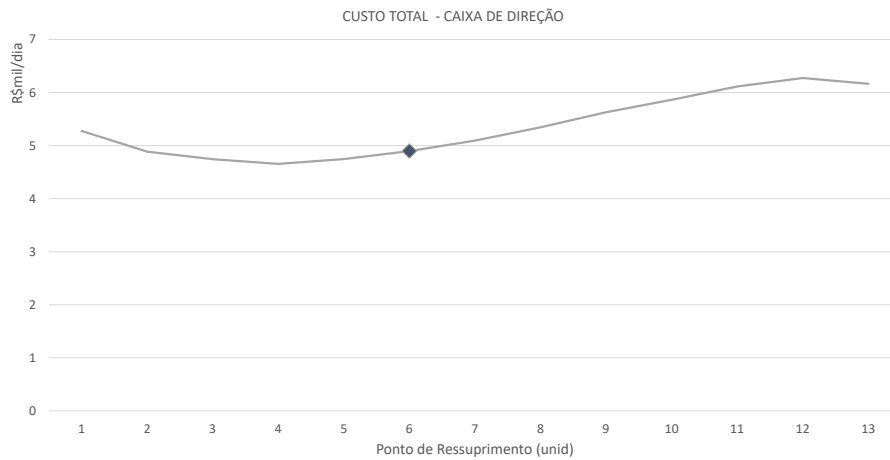


Figura 6.20: Custo médio esperado - CAIXA DE DIREÇÃO

### 6.3 Cenários de variabilidade do leadtime

Com o objetivo de identificar oportunidades de melhoria na política de estoque adotada atualmente, foram desenvolvidos alguns cenários reduzindo a variabilidade ou a média do leadtime. O objetivo era verificar o impacto do leadtime no custo médio de estoque. Ou seja, avaliar o ganho financeiro caso o fornecedor melhorasse sua performance de entrega.

Os cenários avaliados foram:

- **CENÁRIO LT VARIÁVEL:** Leadtime observado, considerando a variabilidade (Cenário Base);
- **CENÁRIO LT FIXO REAL:** Leadtime fixo conforme média real;
- **CENÁRIO LT FIXO TEÓRICO:** Leadtime fixo conforme previsão definida pelo fornecedor;
- **CENÁRIO LT FIXO REDUZIDO:** Leadtime fixo conforme metade da média real;

- **CENÁRIO LT REDUZIDO:** Metade do leadtime observado, considerando a variabilidade;

Esses cenários foram baseados no cenário base de 180 dias com o leadtime variável, com exceção dos itens “CAIXA” e “FILTRO”. Como relatado anteriormente, esses dois itens apresentaram resultados mais coerentes na simulação de 360 dias, base utilizada para o desenvolvimento dos demais cenários.

Os valores do leadtime de cada cenário estão resumidos na Tabela 6.3.

ITEM	DESCRIÇÃO	REAL	TEÓRICO	REDUZIDO
1	PINO	39	30	20
2	CAIXA	127	90	64
3	CABO	7	25	4
4	PAINEL	54	30	27
5	FILTRO	32	15	16
6	COMPRESSOR	7	3	4
7	CENTRALIZADOR	18	5	9
8	ESPELHO	17	5	9
9	MOTOR	2	15	1
10	CAIXA DIR	13	5	7

Tabela 6.1: Leadtime fixo dos itens (dias)

### ITEM 1 - PINO

No caso do item “PINO”, se o prazo pré-definido pelo fornecedor de 30 dias fosse cumprido, haveria uma redução considerável no custo total de 55%. Caso a média atual do leadtime fosse reduzida pela metade, a queda no custo seria ainda mais expressiva, de 85%. Como a variabilidade do leadtime desse item não é expressiva, conforme apresentado na Tabela 5.2, o ganho em custo com eliminação da variabilidade pode ser desconsiderado. Observa-se na Figura 6.21 que as curvas referentes a esses dois últimos cenários são bem próximas.

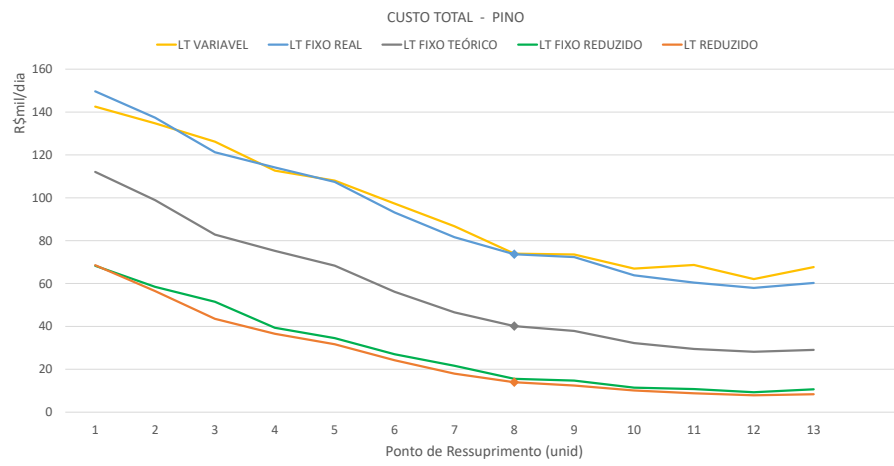
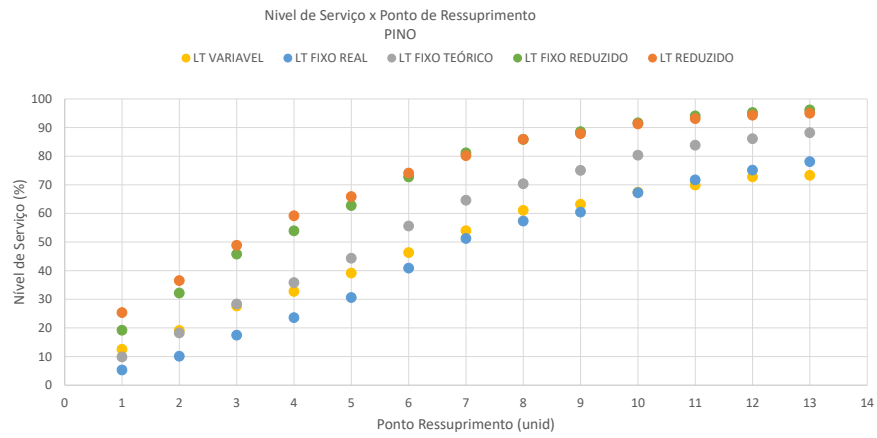


Figura 6.21: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - PINO

## ITEM 2 - CAIXA

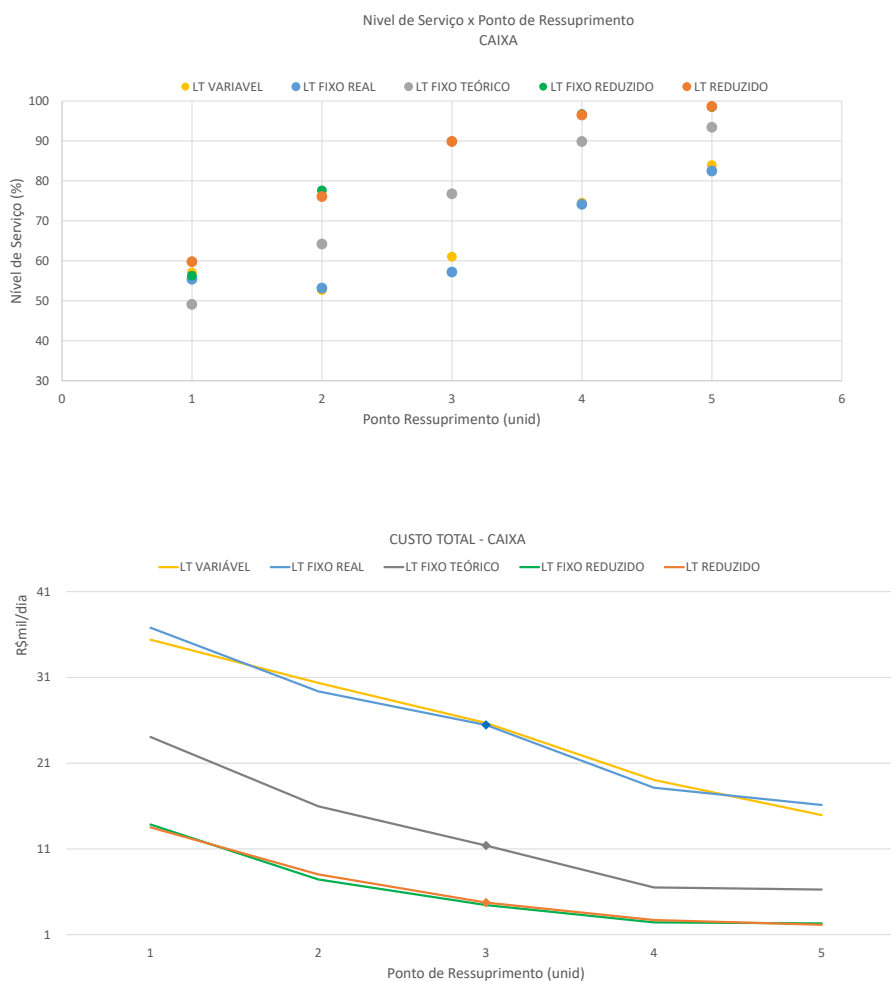


Figura 6.22: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CAIXA

No caso do item “CAIXA”, o ponto de ressuprimento que apresentou o menor custo total foi 5. A eliminação da variabilidade no leadtime proporciona um aumento de 8% no custo total para esse ponto. Entretanto, para cenários com outros pontos de ressuprimento essa variação foi negativa. Por exemplo, nos pontos de ressuprimento 2 e 4, o cenário com leadtime sem variabilidade proporcionou um custo total menor. Esse resultado pode ser explicado pelo fato da amostragem ser de duas ocorrências (106 e 147 dias). No cenário base, cada um desses valores possui 50% de chance de ocorrer. Fixar o leadtime na média

de 127 dias, no caso do cenário “LT fixo real”, pode ser favorável em relação a opção de 147 dias ou desfavorável em relação ao leadtime de 106 dias. Assim o impacto positivo ou negativo no custo total depende da quantidade de pedidos recebidos no cenário. As reduções de custo mais consideráveis foram obtidas nos dois últimos cenários, onde a média real é dividida pela metade, porém um considera a variabilidade e o outro não. A redução obtida no cenário “LT fixo teórico” foi menor visto que o leadtime de 90 dias é um valor intermediário entre os demais cenários.

### ITEM 3 - CABO

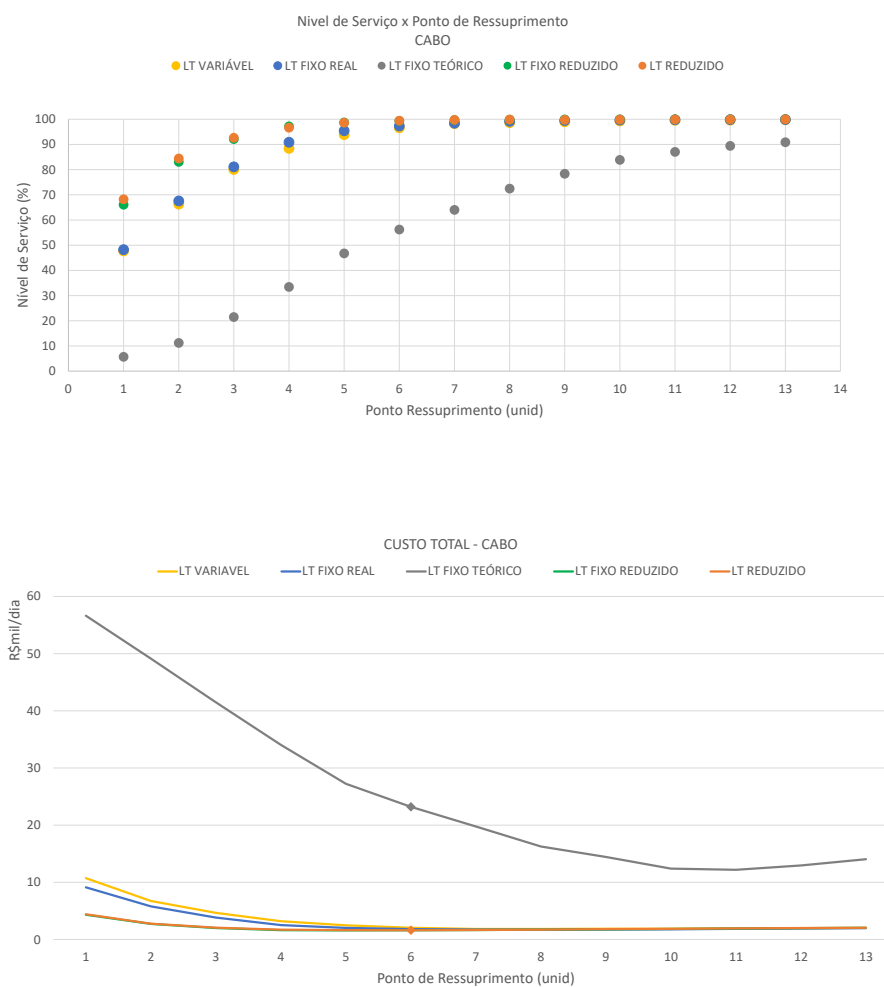


Figura 6.23: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CABO

Pela Figura 6.23 observa-se que o custo total obtido com o leadtime fixo teórico é consideravelmente maior que o custo total do cenário base, visto que o leadtime (25 dias) é mais do que o triplo da média do leadtime realizado (7 dias). A curva que mais se distancia das demais é a referente ao cenário do leadtime teórico, para ambos gráficos. O ganho com os demais cenários é baixo, ou seja, 7%, devido ao fato do leadtime do cenário base já ser reduzido.

#### ITEM 4 - PAINEL



Figura 6.24: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - PAINEL

Observa-se pela Figura 6.24 que o ganho maior em custo foi com a redução do leadtime pela metade. O terceiro e quarto cenários, por considerarem leadtime próximos (30 e 27 dias, respectivamente), apresentaram resultados similares. Não houve um impacto significativo com o acréscimo da variabilidade no cenário do leadtime reduzido.

## ITEM 5 - FILTRO

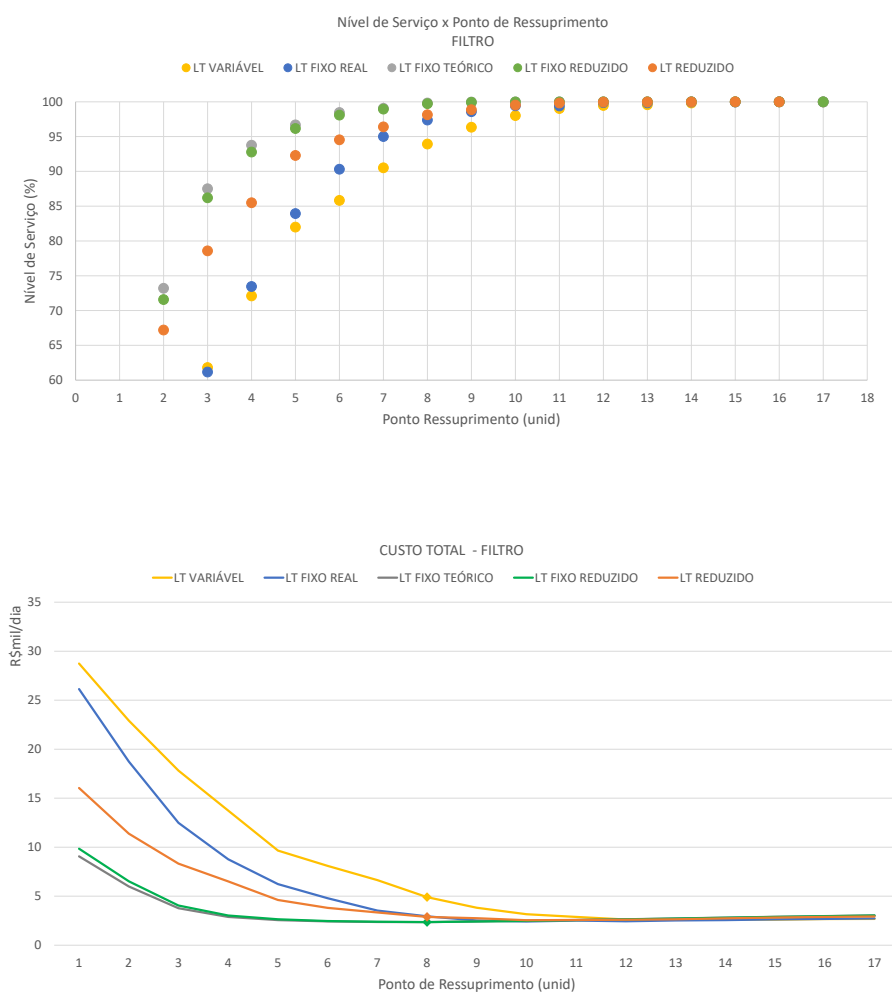


Figura 6.25: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - FILTRO

No caso do “FILTRO” obteve-se um ganho de 25% apenas zerando a variabilidade e, ao reduzir a média pela metade, esse impacto passou para aproximadamente 75% (cor-

respondente aos cenários do leadtime do fornecedor e do fixo reduzido). A proximidade desses dois cenários pode ser concluída através dos gráficos da Figura 6.25.

## ITEM 6 - COMPRESSOR

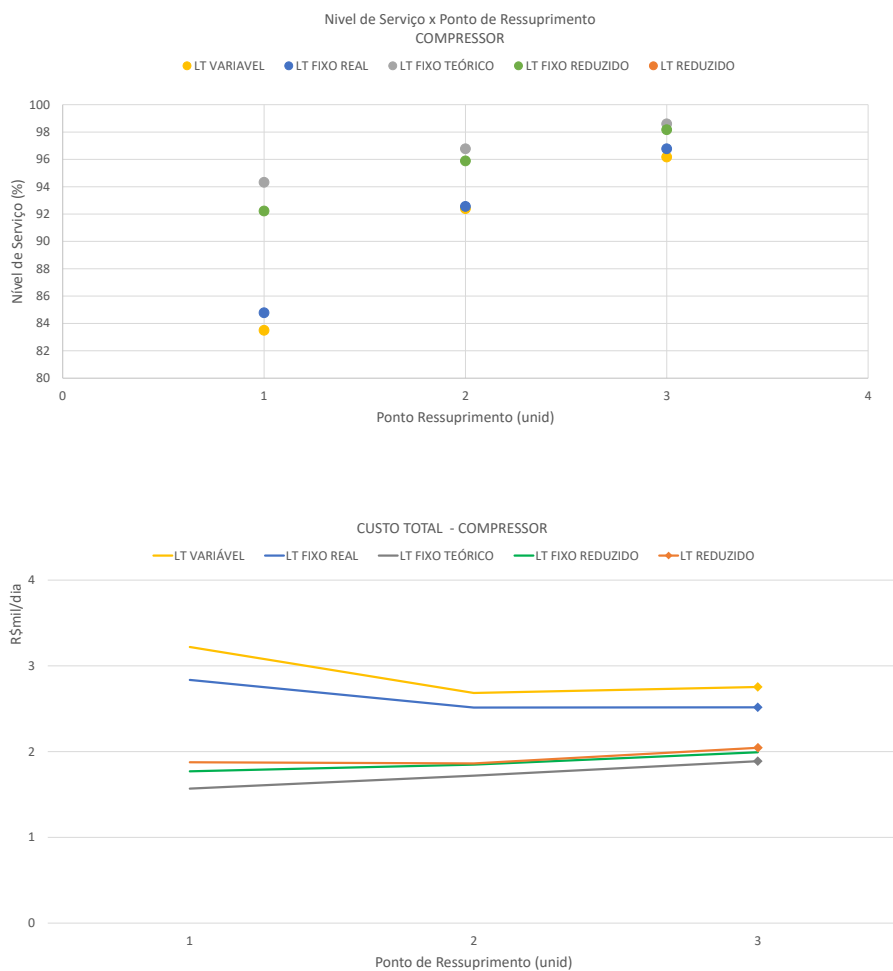


Figura 6.26: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - COMPRESSOR

No caso do “COMPRESSOR”, o cenário base bem como o leadtime fixo na média real de 7 dias são os que apresentam maior custo total e menor nível de serviço para um mesmo ponto de ressuprimento. Se o fornecedor realizasse o prazo acordado inicialmente de 3 dias, o ganho em custo seria de 36%.



## ITEM 7 - CENTRALIZADOR

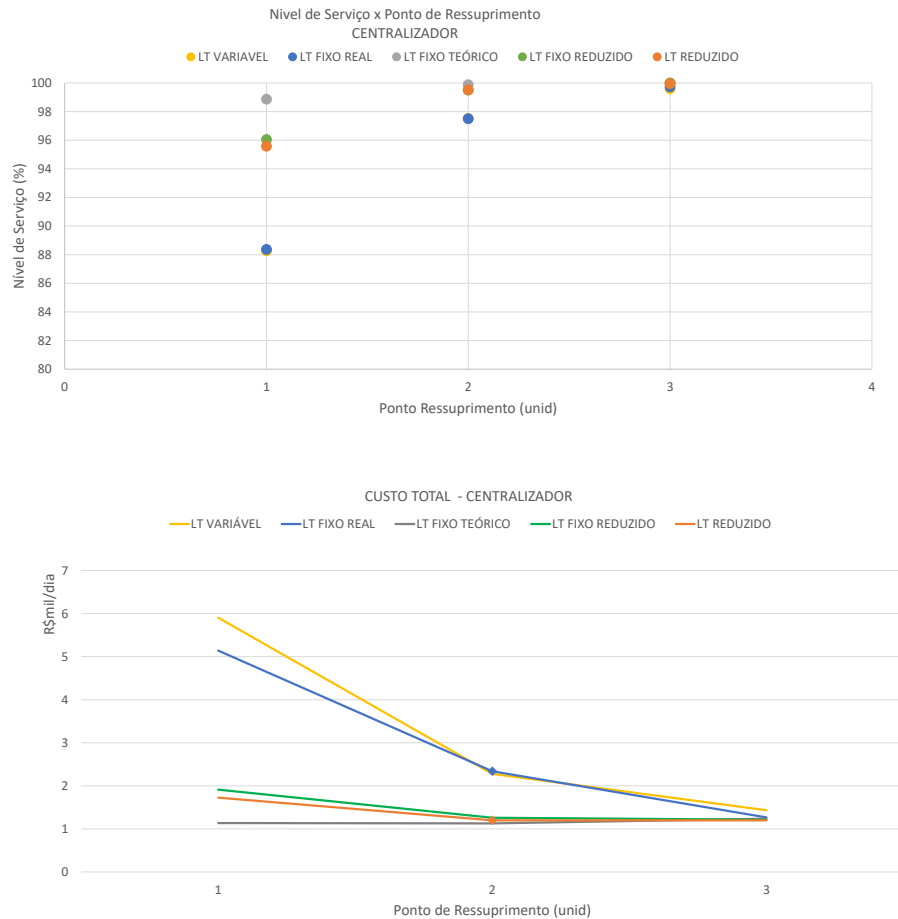


Figura 6.27: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CENTRALIZADOR

Pela Figura 6.27 conclui-se que apenas zerando a variabilidade do leadtime real, obtém-se um ganho de 12% no custo total. Caso o fornecedor cumprisse o prazo acordado, a redução seria de 14% para a base do ponto de ressuprimento de 2 e o nível de serviço seria acima de 98% para qualquer ponto de ressuprimento. A média real hoje é maior que o triplo do prazo definido pelo fornecedor, gerando uma diferença considerável entre os cenários base e o fixo teórico esse item.

## ITEM 8 - ESPELHO

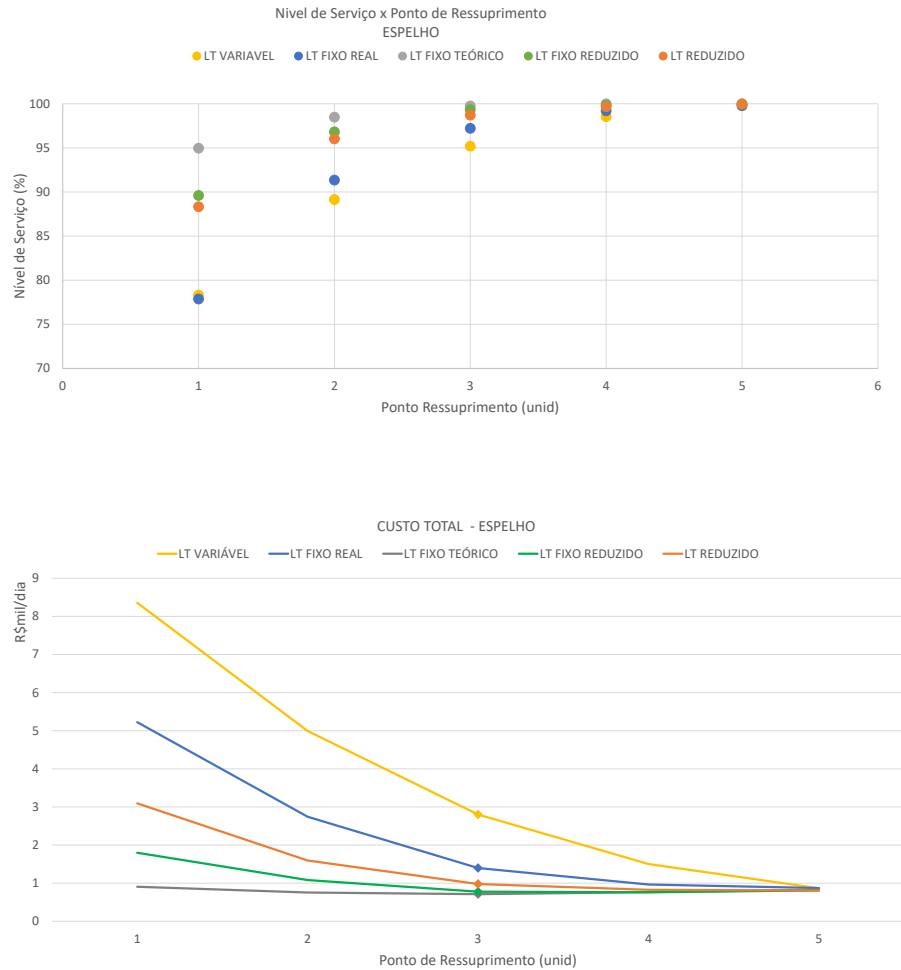


Figura 6.28: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - ESPELHO

Para o item “ESPELHO” observou-se um ganho considerável em custo apenas com a eliminação da variabilidade do leadtime do cenário base. Como o prazo teórico (5 dias) é bem menor que a média real de 17 dias, o terceiro cenário apresentou a melhor curva de custo de estoque. A distância entre as curvas de cada cenário é explicada pela diferença considerável de seus prazos.

## ITEM 9 - MOTOR

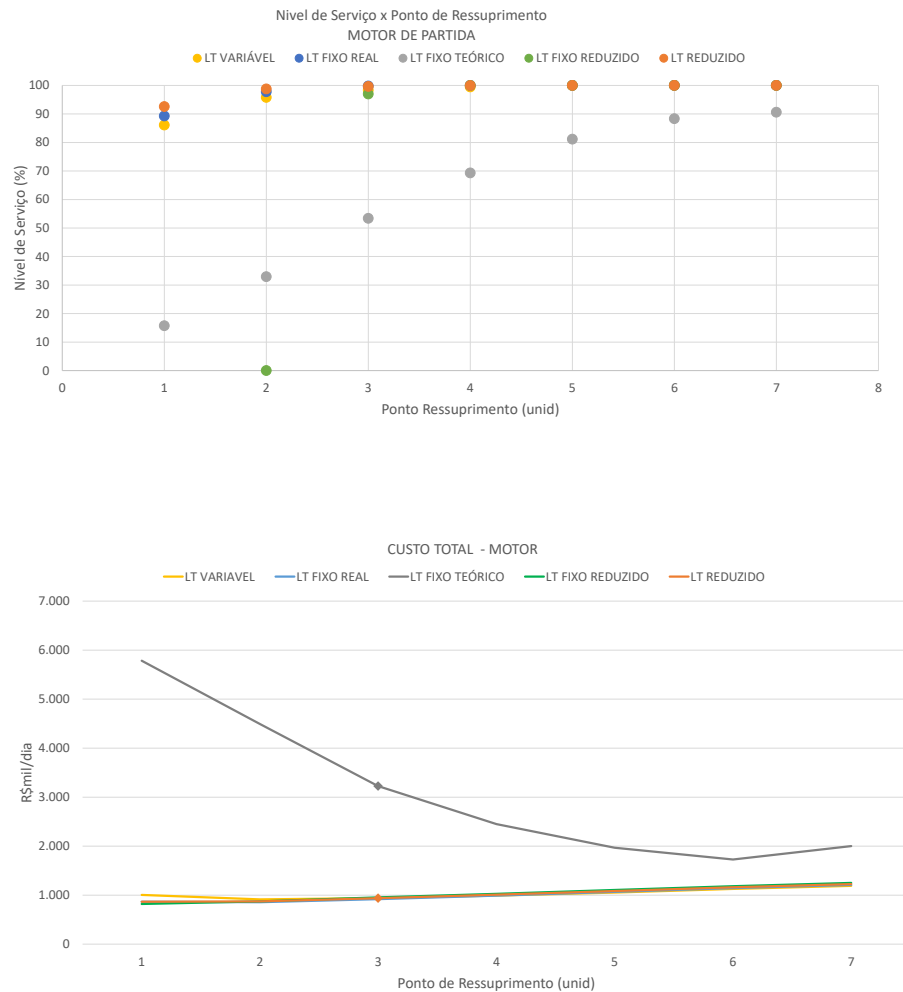


Figura 6.29: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - MOTOR

O destaque para o item “MOTOR” é a discrepância entre o cenário do leadtime teórico com os demais, uma vez que a média realizada é de 2 dias e o prazo acordado de 15 dias. Nesse caso, identifica-se uma necessidade de se revisar o prazo teórico junto ao fornecedor e negociar uma possível redução na variabilidade devido ao potencial de redução de custo.

## ITEM 10 - CAIXA DE DIREÇÃO

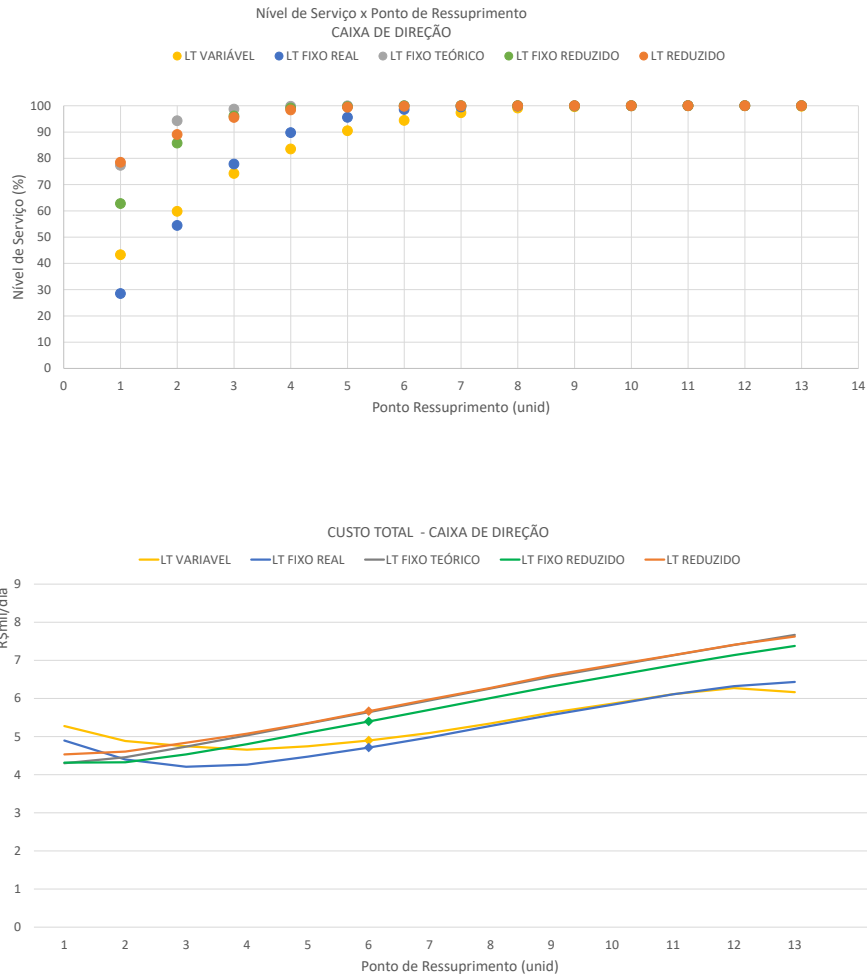


Figura 6.30: Curvas Nível de serviço e Custo médio de estoque - Cenários Leadtime - CAIXA DIREÇÃO

No caso da “CAIXA DIREÇÃO” há uma redução de 8% ao eliminar a variabilidade quando o ponto de ressuprimento é 4. De uma forma geral, não há uma diferença significativa entre as curvas de custo dos cenários, como pode ser observado no segundo gráfico da Figura 6.30. O motivo desse resultado pode ser a menor discrepância entre os custos de falta e de estoque para os itens que não param diretamente a produção.

## 6.4 Definição do estoque máximo

Para definição do estoque máximo, fixou-se o  $R$  referente ao menor custo médio obtido na simulação da Seção 6.2 e variaram-se os valores de estoque máximo de  $R+1$  até o dobro do estoque máximo atual, intervalo considerado suficiente para testar as combinações de menor custo. Nos casos em que o estoque máximo de menor custo encontrado fosse o último do intervalo, foi feita uma nova rodada de simulação estendendo ainda mais o limite máximo.

A medida que o custo total esperado de cada combinação  $(R, EM)$  era menor que a combinação anterior, armazenava-se esse custo como sendo o menor custo esperado. Juntamente a análise de custo, avaliou-se também o número de pedidos recebidos no período simulado. Afinal, um cenário com custo reduzido porém que gera uma quantidade elevada de pedidos a serem recebidos pode ser uma opção operacionalmente inviável.

Portanto, a definição do estoque máximo foi feita baseada em uma análise conjunta entre o custo total, a quantidade de pedidos recebidos e o nível de serviço obtido.

ITEM	POLITICA ATUAL		POLITICA OBTIDA	
	R	EM	R	EM
PINO	8	14	12	25
CAIXA	3	6	5	16
CABO	6	14	8	10
PAINEL	0	2	1	9
FILTRO	8	18	15	17
COMPRESSOR	3	4	2	3
CENTRALIZADOR	2	4	3	5
ESPELHO	3	6	5	6
MOTOR	3	8	2	4
CAIXA DIRECAO	6	14	4	6

Tabela 6.2: Comparação entre políticas atual e melhor opção obtida pela Simulação

Em seguida há um detalhamento da análise realizada para cada um dos itens selecionados para este trabalho. As Tabelas 6.3 a 6.12 contém os dados de estoque máximo, custo médio total, intervalo de chegadas e nível de serviço de cada cenário, bem como a variação do custo e do nível de serviço em relação ao cenário base. Nessa análise de sensibilidade, houve variação do nível de serviço mesmo fixando um ponto de ressurgimento, pois com a variação do estoque máximo há alteração na quantidade de ciclos de chegada dos pedidos.

### ITEM 1 - PINO

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2		
<b>EM</b>	unid	25	16	28		
<b>CUSTO TOTAL</b>	R\$mil/dia	33.364	49.564	49%	34.317	3%
<b>INTERVALO ENTRE CHEGADAS</b>	dias	60	30	90		
<b>NÍVEL DE SERVIÇO</b>	%	72,1	74,9	4%	70,0	-3%

Tabela 6.3: Análise de cenários da política de estoque do item 1 - PINO

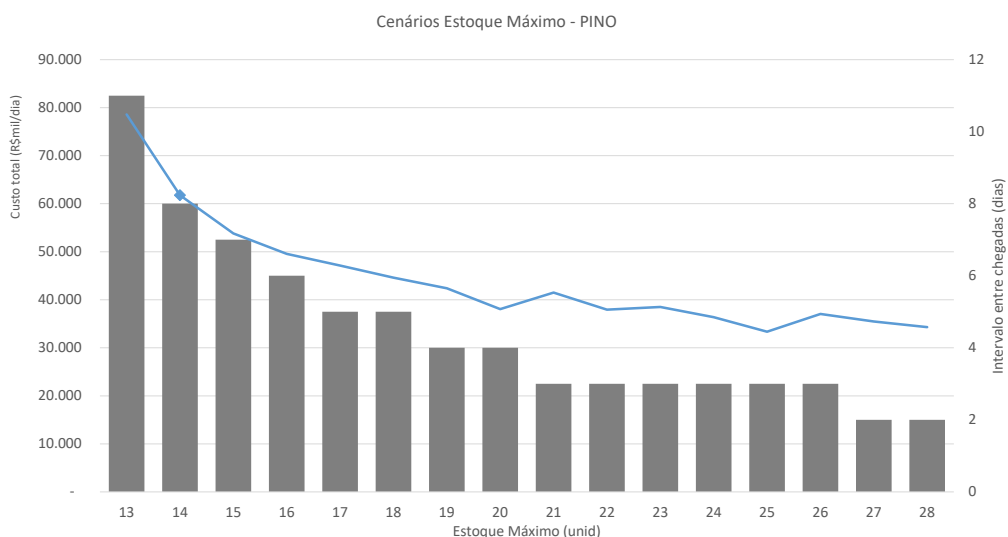


Figura 6.31: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - PINO

Baseado no cenário do  $R$  de menor custo, 12, observa-se pela Tabela 6.3 que o menor custo médio é obtido com a combinação  $(R, EM)=(12, 25)$  com um nível de serviço de 72% e um pedido sendo recebido a cada dois meses. O aumento do nível de serviço para 75% impactaria em um aumento de custo de 49%. Como o  $R$  atual é 8 e  $EM$  é 14, conclui-se que há oportunidades de aumentar o ponto de ressuprimento para atendimento da demanda do item.

## ITEM 2 - CAIXA

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2		
EM	unid	16	7	6		
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	6.155	11.550	88%	13.990	127%
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	360	120	72		
NÍVEL DE SERVIÇO	%	79,2	84,3	6%	84,9	7%

Tabela 6.4: Análise de cenários da política de estoque do item 2 - CAIXA

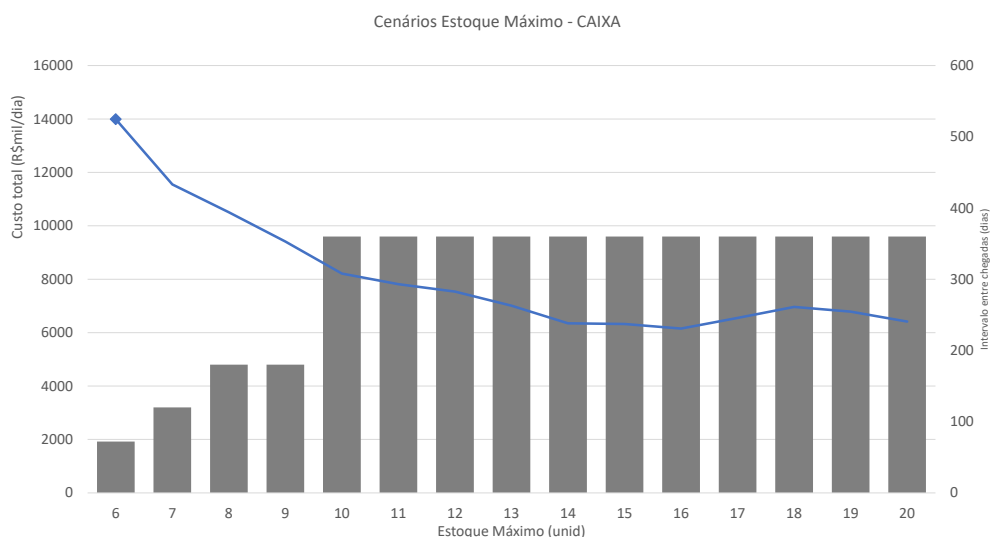


Figura 6.32: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CAIXA

No caso do item “CAIXA”, conforme apresentado na Tabela 6.4 o melhor cenário é caracterizado pela combinação de  $(R, EM)=(5, 16)$ , recebimento de um pedido no ano e um nível de serviço de 79%. O aumento do número de pedidos recebidos praticamente dobra o custo total, o que elimina os cenários 1 e 2 como um dos cenários a serem adotados. No período analisado da amostragem dos dados, foram recebidos dois pedidos no período de um ano, cada um com 3 unidades do item. Comparando esse resultado com os parâmetros atuais de  $(3, 6)$ , conclui-se que há oportunidades de se aumentar a quantidade solicitada nos pedidos e minimizar o custo total. Se o item não tiver risco de degradação e restrições de armazenagem, essa seria uma opção interessante.

### ITEM 3 - CABO

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1		CENÁRIO 2	
<b>EM</b>	unid	10	11		15	
<b>CUSTO TOTAL</b>	R\$mil/dia	1.578	1.649	5%	1.869	18%
<b>INTERVALO ENTRE CHEGADAS</b>	dias	11	14		30	
<b>NÍVEL DE SERVIÇO</b>	%	99,2	99,0	0%	89,9	0%

Tabela 6.5: Análise de cenários da política de estoque do item 3 - CABO

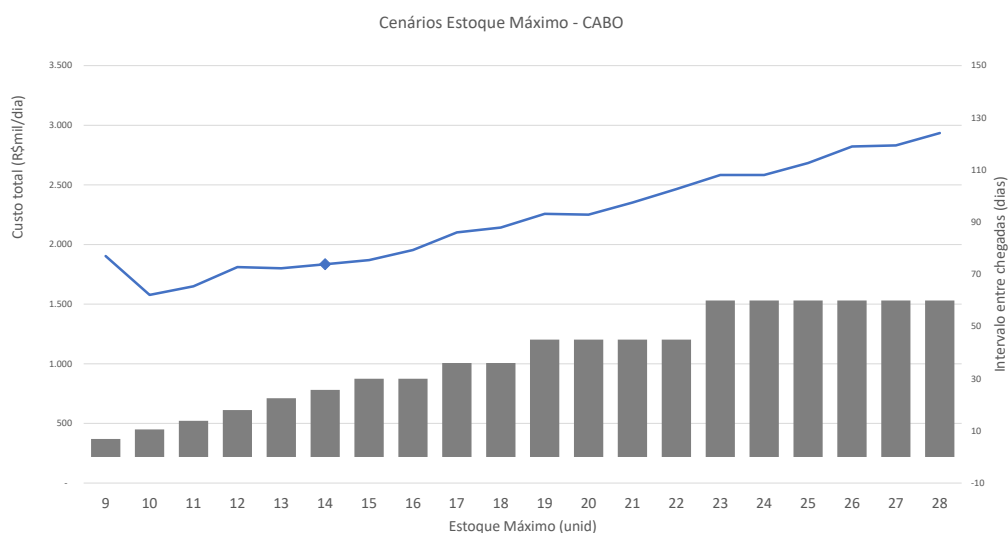


Figura 6.33: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CABO

Pela Tabela 6.5 observa-se que a política de menor custo obtida na simulação é representada por  $(R, EM)=(8, 10)$ , recebimento de um pedido a cada 11 dias e um nível de serviço de 99,2%. Para aumentar o intervalo entre as chegadas para 30 dias, onera-se o custo em 18% e não há impacto significativo no nível de serviço. A política obtida no cenário 2  $(R, EM)=(8, 15)$  é a mais próxima da política adotada atualmente  $(R, EM)=(6, 14)$ .



#### ITEM 4 - PAINEL

Após fixar o  $R = 1$  o qual corresponde ao cenário de menor custo definido na Seção 6.2, variou-se o estoque máximo de 2 até 4. Entretanto, como o menor custo foi para o cenário de  $EM = 4$ , uma nova rodada foi realizada no modelo de simulação aumentando o intervalo de avaliação do estoque máximo. Como resultado, obteve-se um estoque máximo de 9, ou seja, um valor mais elevado do que estava sendo considerado na primeira rodada. A melhor política obtida opta por manter um estoque maior ao longo do ano e reduzir a quantidade de pedidos recebidos. Entretanto, obtém-se um nível de serviço de aproximadamente 72%. Para elevar esse nível de serviço para 78%, obtém-se uma política que implique em um recebimento a cada três meses, o que é operacionalmente viável, porém cujo custo é 45% maior. O cenário 1  $(R, EM) = (1,2)$  é o que representa uma situação mais próxima dos parâmetros atuais  $(0,2)$ , porém é o que apresentou maior elevação do custo em relação ao cenário base. Portanto há uma oportunidade de reduzir consideravelmente o custo total aumentando-se o estoque máximo desse item para 9 unidades. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.6.

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2	
EM	unid	9	2	3	
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	13.380	23.709	77% 19.425	45%
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	180	60	90	
NÍVEL DE SERVIÇO	%	71,7	79,9	11% 78,3	9%

Tabela 6.6: Análise de cenários da política de estoque do item 4 - PAINEL

#### ITEM 5 - FILTRO

Pela Tabela 6.7 a melhor opção para o item “FILTRO” é a combinação  $(R, EM)=(15, 17)$ , obtendo 100% de nível de serviço e recebendo um pedido por mês. Se desejar aumentar o intervalo de chegadas de pedidos, a opção mais adequada seria  $(15, 20)$ , o que aumentaria 10% no custo. Com isso, conclui-se que os parâmetros atuais de  $(8, 18)$  podem estar subestimados para atendimento da demanda.

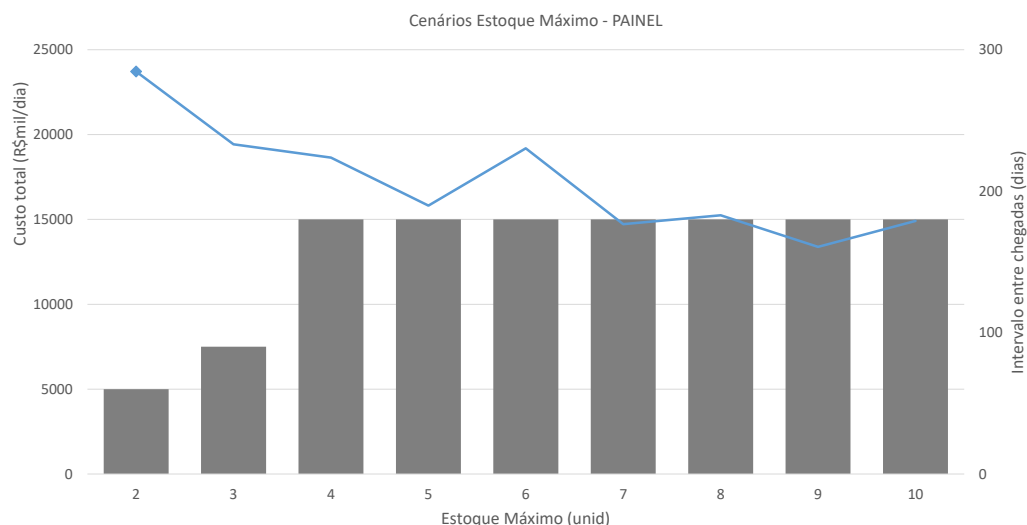


Figura 6.34: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - PAINEL

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
EM	unid	17	20	25
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	2.561	2.813	3.242
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	30	60	120
NÍVEL DE SERVIÇO	%	100,0	99,9	99,9

Tabela 6.7: Análise de cenários da política de estoque do item 5 - FILTRO

#### ITEM 6 - COMPRESSOR

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
EM	unid	3	5	7
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	2.619	2.857	3.307
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	13	23	36
NÍVEL DE SERVIÇO	%	94,9	89,9	84,9

Tabela 6.8: Análise de cenários da política de estoque do item 6 - COMPRESSOR

Para o item “COMPRESSOR” obteve-se como melhor política o par  $(R, EM) = (2, 3)$

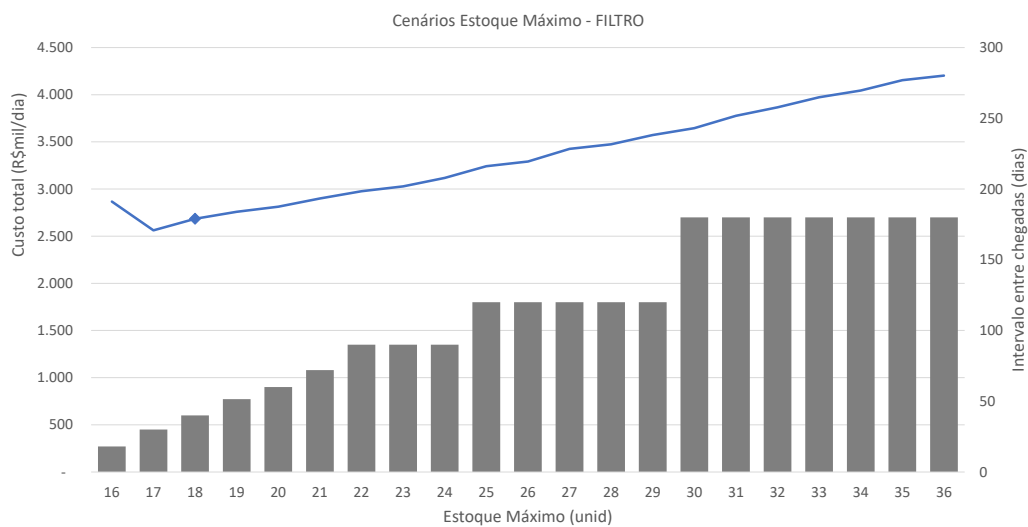


Figura 6.35: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - FILTRO

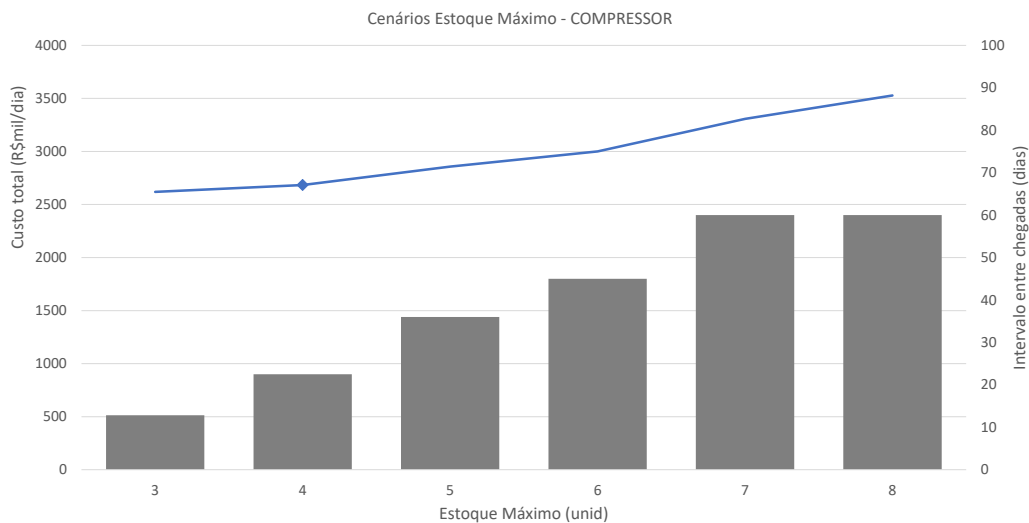


Figura 6.36: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - COMPRESSOR

com um nível de serviço desejável de 95%. O ponto de atenção nesse caso é a frequência de chegadas dos pedidos que deve ocorrer a cada 13 dias. Objetivando um aumento no intervalo entre os recebimentos, há a opção de aumentar o estoque máximo para 5, porém um acréscimo de 9% no custo. Conclui-se portanto que os parâmetros atuais de (3, 4) podem estar aumentando o custo sem necessidade.

## ITEM 7 - CENTRALIZADOR

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
<b>EM</b>	unid	5	4	6
<b>CUSTO TOTAL</b>	R\$mil/dia	1.446	1.506 4%	1.580 9%
<b>INTERVALO ENTRE CHEGADAS</b>	dias	60	36	90
<b>NÍVEL DE SERVIÇO</b>	%	99,5	99,5 0%	99,4 0%

Tabela 6.9: Análise de cenários da política de estoque do item 7 - CENTRALIZADOR

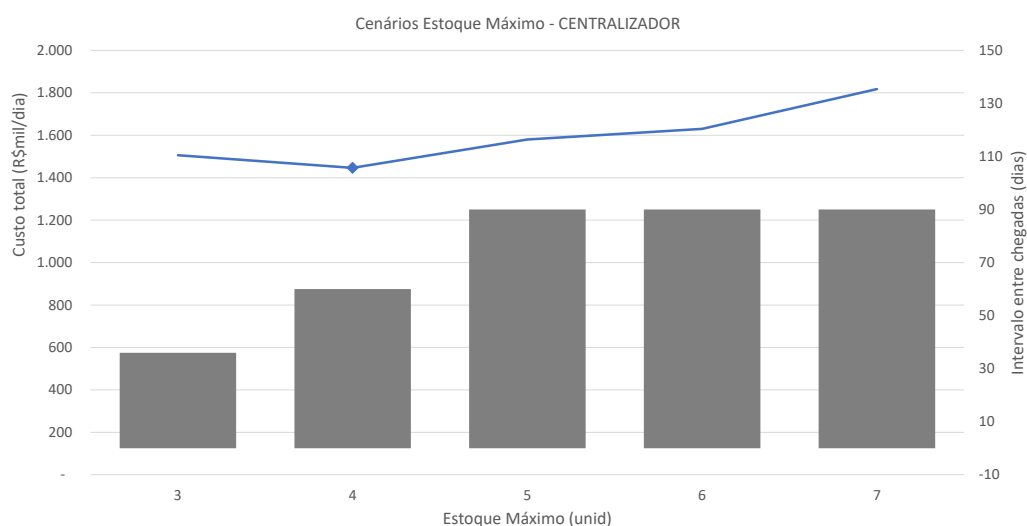


Figura 6.37: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CENTRALIZADOR

No caso do “CENTRALIZADOR” a política de menor custo encontrada na simulação foi aquela cuja combinação (R, EM) é (3, 5), bem próxima da política atual de (2, 4) e implica em um pedido a cada dois meses. De acordo com a simulação a adoção da política (3, 4) aumentaria o custo em 4%, o que não é tão significativo, porém aumentaria o número de pedidos recebidos no período.

## ITEM 8 - ESPELHO

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
EM	unid	6	7	8
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	894	973 9%	1.138 27%
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	23	36	60
NÍVEL DE SERVIÇO	%	99,7	99,7 0%	99,6 0%

Tabela 6.10: Análise de cenários da política de estoque do item 8 - ESPELHO

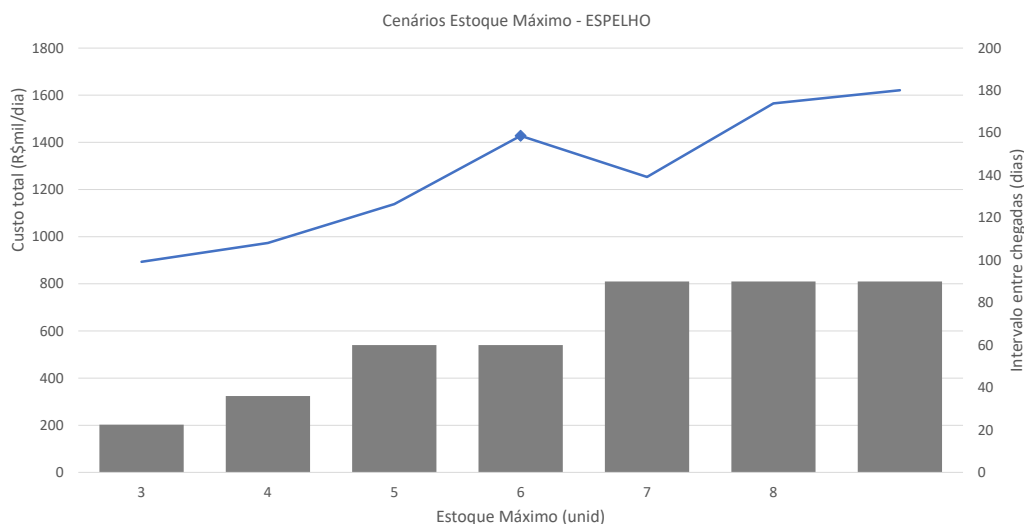


Figura 6.38: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - ESPELHO

Para o item “ESPELHO” obteve-se como melhor cenário o par  $(R, EM)=(5, 6)$  com um intervalo de chegadas de 23 dias. Para aumentar esse intervalo para 36 dias, deve-se aumentar o estoque máximo em uma unidade, porém o custo total é impactado em 9%. Considerando os parâmetros atuais de  $(3,6)$  conclui-se que há possibilidade de aumento do ponto de ressuprimento de 3 para 5 para obter uma redução no custo médio envolvido.

## ITEM 9 - MOTOR

Com os resultados da simulação apresentados na Tabela 6.11, observa-se que os parâmetros atuais do “MOTOR” de  $(3, 8)$  podem estar provocando um estoque em excesso. A política

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
EM	unid	4	5	9
<b>CUSTO TOTAL</b>	R\$mil/dia	681	753 11%	985 45%
<b>INTERVALO ENTRE CHEGADAS</b>	dias	23	36	60
<b>NÍVEL DE SERVIÇO</b>	%	96,3	95,4 -1%	95,2 -1%

Tabela 6.11: Análise de cenários da política de estoque do item 9 - MOTOR

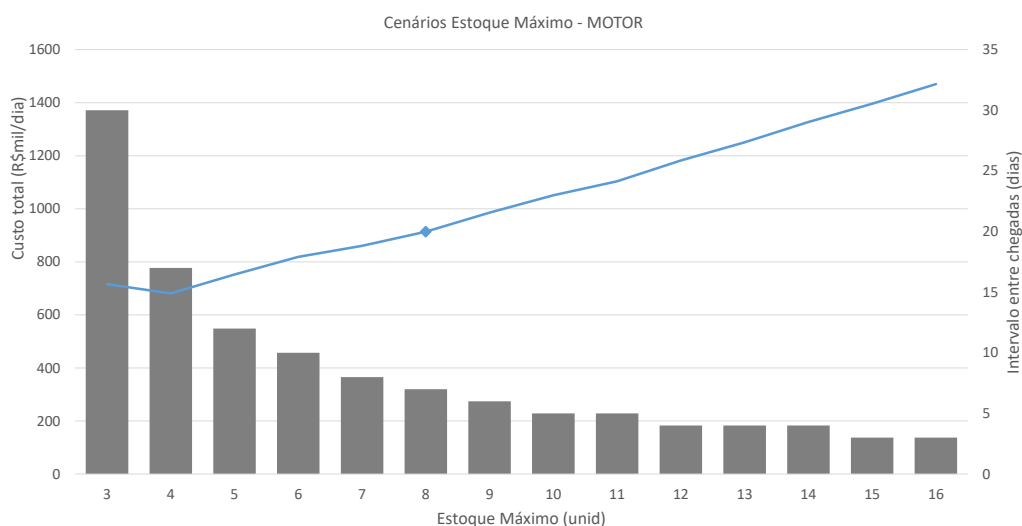


Figura 6.39: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - MOTOR

(2, 4) proporcionaria um nível de serviço de 96,3% e um recebimento de pedidos a cada 23 dias, o que é operacionalmente viável. Para aumentar o intervalo entre as chegadas dos pedidos, foram obtidos alguns cenários que proporcionassem níveis de serviço próximos porém aumentando o custo em 11% ou até mesmo 45%.

## ITEM 10 - CAIXA DE DIREÇÃO

	UNID MEDIDA	CENÁRIO BASE	CENÁRIO 1	CENÁRIO 2
EM	unid	6	9	14
CUSTO TOTAL	R\$mil/dia	3.347	3.718 11%	4.702 40%
INTERVALO ENTRE CHEGADAS	dias	13	30	60
NÍVEL DE SERVIÇO	%	85,3	83,1 -3%	83,6 -2%

Tabela 6.12: Análise de cenários da política de estoque do item 10 - CAIXA DE DIREÇÃO

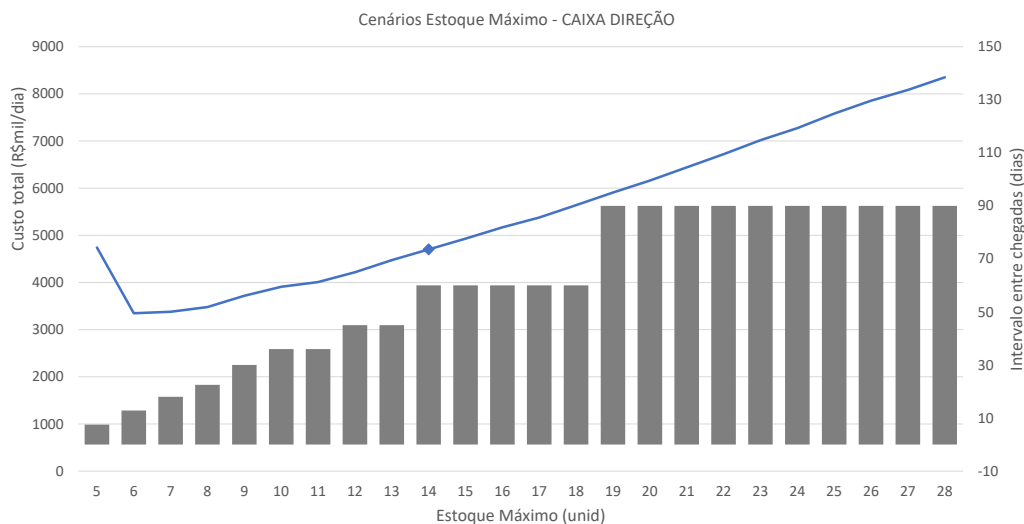


Figura 6.40: Variação custo esperado e intervalo de chegada dos pedidos - CAIXA DIREÇÃO

Finalmente para o item “CAIXA DE DIREÇÃO” conclui-se que a política de menor custo representa uma chegada a cada 13 dias, partindo da base do  $R = 4$ . Objetivando aumentar o intervalo entre chegadas para 30 dias, aumenta-se o estoque máximo de 6 para 9 impactando em 11% no custo total. Não há mudança considerável no nível de serviço entre os cenários. Com isso, conclui-se que a política atual de (6, 14) possa estar superestimada.

## 6.5 Síntese dos resultados

Pelos resultados obtidos observa-se que na maioria dos itens os pontos de ressuprimento atuais deveriam ser maiores visando minimizar o custo médio de estoque. Apenas em três itens a análise sugere uma redução do ponto de reposição de no máximo 2 unidades, que é o caso “COMPRESSOR”, “MOTOR” e “CAIXA DE DIREÇÃO”.

Como o nível de serviço está relacionado com a probabilidade da demanda ser menor ou igual ao ponto de ressuprimento, entende-se portanto que o nível de serviço real também poderia ser maior na maioria dos casos.

Além disso, de uma forma geral, o nível de serviço aumenta mais rapidamente a medida que se aumenta o ponto de ressuprimento para os cenários de menor leadtime. Afinal quanto menor o tempo necessário para a reposição do estoque maior é a probabilidade de atendimento da demanda pelo material. Conseqüentemente a curva do custo total tende a apresentar valores menores visto que haverá menos falta do estoque.

Em relação aos cenários de variabilidade do leadtime, observa-se de que na maioria dos casos o maior ganho obtido em custo foi com a redução da média do leadtime. A eliminação da variabilidade do prazo de entrega gerou uma redução menos significativa no custo. Portanto, entende-se que uma possível negociação com o fornecedor objetivando economia para a empresa e melhor atendimento aos clientes internos, deveria ser em manter seu prazo de entrega mais baixo, sem variar tanto de uma entrega para outra.



## Capítulo 7

# Conclusão e Estudos Futuros

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo com o objetivo de reduzir o custo médio de estoque de itens de manutenção de equipamentos pesados, portanto de valores unitários e custo por falta expressivos. Para geração das variáveis demanda e leadtime foram feitos testes de aderência a algumas distribuições de probabilidade bem como uso da fórmula analítica da distribuição normal, objetivando uma parametrização do modelo mais próxima possível do cenário real. Na análise dos resultados, foram avaliados tanto o nível de serviço e o custo médio total bem como o impacto da variação do leadtime para definição do ponto de ressuprimento dos itens de estoque.

O modelo desenvolvido, apesar de ter sido aplicado em alguns itens, pode ser utilizado nas demais peças mantidas em estoque, desde que seja atualizados os parâmetros de entrada como distribuição de probabilidade e custo unitário.

Devido a facilidade de cálculo representada pelas fórmulas analíticas (5.3) e (5.4), a premissa da distribuição normal para as variáveis demanda e leadtime pode ser considerada uma opção pois apresentaram resultados razoáveis. O uso da simulação pode ser recomendado para os itens cujo custo de estoque e custo da falta são mais elevados, para se obter uma maior acurácia na análise.

Por fim, foi possível observar que há uma oportunidade de ganho com redução de custo médio de estoque considerável, uma vez que os pontos de ressuprimento reais estão, de uma forma geral, abaixo dos níveis recomendados pela análise. Dessa forma, o risco de não atendimento da demanda pelo material e conseqüentemente maior tempo de equipamento

parado é maior.

Para dar continuidade a este trabalho, foram identificadas algumas oportunidades de análises futuras. A primeira delas seria estender o estudo realizado para outros itens críticos. Este trabalho focou nos itens consumidos pela manutenção de equipamentos pesados. Entretanto existem outros grupos de materiais de grande impacto na Operação, sendo eles i) os itens de infraestrutura da mina que são de menor valor porém de alto impacto na Operação, ii) os insumos da planta de processamento do minério que são importados, representam um montante alto e com média e variabilidade do leadtime elevados e iii) itens de manutenção da planta de processamento do minério extraído, cujas peças de reposição são de valores elevados, fornecedor exclusivo e de prazos de entrega extensos.

A falta dos materiais da Infraestrutura pode impedir a operação de determinada área dentro da mina por não permitir condições físicas (ventilação, tubulação, bombeamento de água, por exemplo) para tal. No caso tanto dos insumos quanto itens de manutenção da planta, caso falte alguma dessas matérias-primas, o processamento do minério é comprometido.

Como uma segunda oportunidade de estudo podemos citar a análise de itens que não são mantidos em estoque e sim adquiridos conforme demanda. Muitos desses itens possuem uma movimentação considerável e de grande impacto na Operação. Portanto sugere-se avaliar a movimentação desses itens bem como o custo total esperado e concluir se devem ou não serem inseridos na gestão de estoque.

Como uma terceira possibilidade, propõe-se acrescentar uma análise de sensibilidade do custo estimado de falta dos itens consumidos pelos veículos leves no cálculo do custo esperado total. Como a parada desses veículos não para a produção, porém impacta diretamente no abastecimento de materiais e de pessoas da Operação, há uma dificuldade em definir o custo da falta de suas peças em estoque.

De uma forma geral as peças que compõem esses equipamentos são de um preço menor e de maior facilidade de reposição em relação as peças de equipamentos pesados. Além disso, como há uma quantidade de veículos similares dentro da empresa, cada um de responsabilidade de uma área específica, há como fazer empréstimo entre si em casos de situações extremas com o objetivo de minimizar o impacto na produção.

# Referências Bibliográficas

- Marcus Ang, Jing-Sheng Song, Mingzheng Wang, and Hanqin Zhang. On properties of discrete  $(r, q)$  and  $(s, t)$  inventory systems. *European Journal of Operational Research*, 229(1):95–105, 2013.
- Kenneth J Arrow, Theodore Harris, and Jacob Marschak. Optimal inventory policy. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, pages 250–272, 1951.
- Sven Axsäter. *Inventory control*. Springer Science & Business Media, 3 edition, 2015.
- M Zied Babai, Zied Jemai, and Yves Dallery. Analysis of order-up-to-level inventory systems with compound poisson demand. *European Journal of Operational Research*, 210(3):552–558, 2011.
- Liwei Bai, Christos Alexopoulos, Mark E Ferguson, and Kwok-Leung Tsui. A simple and robust batch-ordering inventory policy under incomplete demand knowledge. *Computers & Industrial Engineering*, 63(1):343–353, 2012.
- Jose Roberto do Rego and Marco Aurelio de Mesquita. Demand forecasting and inventory control: A simulation study on automotive spare parts. *International Journal of Production Economics*, 161:1–16, 2015.
- Daniel Georges Gasnier. *A dinâmica dos estoques: guia prático para planejamento, gestão de materiais e logística*. IMAM, 2002.
- Suresh K. Goyal and Ahmet T. Satir. Joint replenishment inventory control: Deterministic and stochastic models. *European Journal of Operational Research*, 38(1):2 – 13, 1989. ISSN 0377-2217. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(89\)90463-3](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(89)90463-3). URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0377221789904633>.

- AG Lagodimos, IT Christou, and K Skouri. Computing globally optimal  $(s, s, t)$  inventory policies. *Omega*, 40(5):660–671, 2012.
- Steven Nahmias and Tava Lennon Olsen. *Production and operations analysis*. Waveland Press, 2015.
- Walid W Nasr and Bacel Maddah. Continuous  $(s, s)$  policy with mppp correlated demand. *European Journal of Operational Research*, 246(3):874–885, 2015.
- George Nenes, Sofia Panagiotidou, and George Tagaras. Inventory management of multiple items with irregular demand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 205(2):313–324, 2010a.
- George Nenes, Sofia Panagiotidou, and George Tagaras. Inventory management of multiple items with irregular demand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 205(2):313–324, 2010b.
- Eric Porras and Rommert Dekker. An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research*, 184(1):101–132, 2008.
- Uday S Rao. Properties of the periodic review  $(r, t)$  inventory control policy for stationary, stochastic demand. *Manufacturing Service Operations Management*, 5(1):37–53, 2003.
- Nornadiah Mohd Razali, Yap Bee Wah, et al. Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. *Journal of statistical modeling and analytics*, 2(1):21–33, 2011.
- Herbert Scarf. The optimality of  $(5, 5)$  policies in the dynamic inventory problem. 1959.
- Edward A Silver and Diane P Bischak. The exact fill rate in a periodic review base stock system under normally distributed demand. *Omega*, 39(3):346–349, 2011.
- Aris A Syntetos and John E Boylan. Demand forecasting adjustments for service-level achievement. *IMA Journal of Management Mathematics*, 19(2):175–192, 2008.
- Aris A Syntetos, John E Boylan, and JD Croston. On the categorization of demand patterns. *Journal of the Operational Research Society*, 56(5):495–503, 2005.

- Aris A Syntetos, M Keyes, and MZ Babai. Demand categorisation in a european spare parts logistics network. *International journal of operations & production management*, 29(3):292–316, 2009.
- Chit-Square Test. Chi-square test. *EEC*, 686:785.
- Vanessa Bielefeldt Leotti Torman, Rodrigo Coster, and João Riboldi. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. *Clinical & Biomedical Research*, 32(2), 2012.
- Ann Vereecke and Peter Verstraeten. An inventory management model for an inventory consisting of lumpy items, slow movers and fast movers. *International Journal of Production Economics*, 35(1-3):379–389, 1994.
- Thomas R Willemain, Charles N Smart, and Henry F Schwarz. A new approach to forecasting intermittent demand for service parts inventories. *International Journal of forecasting*, 20(3):375–387, 2004.
- Yi Yang, Quan Yuan, Weili Xue, and Yun Zhou. Analysis of batch ordering inventory models with setup cost and capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, 155:340–350, 2014.