

Aplicação da Simulação Discreta na Gestão de Estoques de Sobressalentes para Turbomáquinas numa Empresa Brasileira do Setor de Óleo e Gás

Edwin Benito Mitacc Meza¹, Lidiane Borges Silverio¹, Iara Tammela¹, Dalessandro Soares Vianna¹, Máximo Concepción Mitacc Meza²

¹ Instituto de Ciência e Tecnologia – ICT
Universidade Federal Fluminense (UFF) – Rio de Janeiro, RJ – Brasil
emitacc@id.uff.br, {lidi.silverio, iaratammela, dalessandro-
vianna}@gmail.com

² Departamento de Ingeniería Industrial
Universidad de Lima (Ulima) – Lima – Perú
mmitacc@correo.ulima.edu.pe

Resumo. No Brasil, as indústrias do setor de petróleo têm recentemente se deparado com o grande desafio de viabilizar a produção em um ambiente de maior complexidade de acesso e restrições operacionais, dentro de um cenário de cortes de orçamento e controle de custos. Sendo assim, a cadeia de suprimentos tem importante papel para a otimização de processos, na redução de custos de aquisição e estocagem. Neste contexto, o presente artigo trata da gestão de estoques de peças sobressalentes de uma oficina de manutenção de turbomáquinas de uma empresa petrolífera. A gestão de estoques de manutenção possui grande complexidade, devido as características intermitente e errática da demanda. Os sobressalentes das turbomáquinas também são de difícil gestão, são em sua maioria importados, de alto valor e com poucos fornecedores no mercado. Propõe-se então, neste trabalho, a utilização de técnicas de simulação discreta para comparação de diferentes políticas de gestão de estoques. Espera-se conhecer melhor os impactos das alterações nos níveis e políticas de estoques em toda a cadeia de suprimentos e estoques, visando adequar os níveis de estoque de sobressalentes aos níveis de serviço requeridos e otimizar os recursos imobilizados em estoque.

1 Introdução

O petróleo é uma importante fonte de combustíveis na matriz energética mundial, além de suas diversas aplicações na indústria petroquímica. Esta indústria mundial é reconhecida por seus grandes investimentos em pesquisa e desenvolvimento e pela relevância nos cenários políticos, sociais e econômicos de onde está inserida. No Brasil não é diferente, a indústria de óleo e gás tem papel fundamental no desenvolvimento econômico e social do país, particularmente na geração de emprego e renda, no desenvolvimento de novas tecnologias e disseminação de conhecimento.

O grande desafio para o desenvolvimento da indústria petrolífera brasileira é viabilizar a produção em águas profundas, a grandes distâncias da costa, o que demanda

maiores esforços logísticos e de planejamento. Neste ambiente adverso, a manutenção tem sua importância aumentada em função da dificuldade de acessibilidade, das restrições operacionais e da preocupação constante com segurança e meio-ambiente.

Nas últimas décadas, houve uma grande evolução do conceito de manutenção em todo o mundo, o que também contribuiu para tornar, esta função vital para a competitividade e sobrevivência das empresas que atuam no setor. Os conceitos de gestão da manutenção e controle de custos também se desenvolveram nestes últimos anos.

É dentro deste contexto que se insere o objeto deste estudo, a Oficina de Manutenção de Turbomáquinas de uma empresa do setor de óleo e gás. A oficina é uma instalação em terra que realiza a manutenção de equipamentos dinâmicos responsáveis por comprimir o gás produzido para transporte e gerar a energia necessária à produção das plataformas de produção *off-shore*.

Sabe-se que um equipamento de médio porte revisado pela oficina de manutenção de turbomáquinas pode ser composto de até 1000 itens, passíveis de reposição, itens estes que podem assumir custos elevados, considerando-se que fazem uso de super ligas para suportar as altas temperaturas de operação. A demanda para estes itens ocorre em intervalos irregulares e pouco frequentes. Soma-se ao problema o fato do mercado de turbomáquinas ser pouco competitivo, geralmente é o próprio fabricante que comercializa os sobressalentes, que são importados. Desta forma, os prazos de entrega são longos, as entregas sofrem atrasos e as flutuações de preços são grandes.

Diante deste cenário complexo, a gestão de estoques sobressalentes de turbomáquinas se torna fundamental para a redução de custos operacionais da companhia e garantia da continuidade operacional dos poços produtores de petróleo. De acordo com [1], o gerenciamento de sobressalentes é complexo e muito difícil. Uma falha custa normalmente entre 100 a 10000 vezes o preço dos sobressalentes ou serviços envolvidos, no entanto, manter em estoque o que não é necessário gera custos e não contribui para uma cadeia de suprimentos efetiva, eficiente e responsiva [1].

Os itens de estoque de manutenção geralmente possuem demanda intermitente [14], e errática [2], o que torna mais difícil a proposição de um modelo analítico. É por este motivo que este estudo propõe a aplicação de um modelo de simulação discreta para definição de melhor política de estoques de uma oficina de manutenção, considerando-se medidas de desempenho pré-definidas. Pretende-se comparar as políticas de reposição contínua e periódica de estoques para itens de criticidade elevada. Estes itens terão seu desempenho comparado considerando custos de estoque e nível de serviço.

2 A Gestão de Estoques

A gestão de estoques tem um papel importante para a competitividade das empresas, visto que deve equilibrar os custos do capital imobilizado e custo da falta do item. De acordo com [4], os estoques existem na cadeia de suprimento devido a incompatibilidade entre fornecimento e demanda. Ainda segundo [4], os estoques têm um impacto significativo no tempo de fluxo dos materiais na cadeia de suprimento.

A despeito da crescente utilização de políticas de *Just in Time*, em [7] citam os motivos para se manter estoque: Redução de Custos de Emissão de Pedidos, Redução de custos de *stockout* e redução de custos de aquisição para lotes maiores.

Em [8], afirmam que as principais decisões de estoque são quanto Pedir, quando pedir e com que frequência revisar os parâmetros de estoque. São estas particularidades que diferenciam os vários modelos e políticas de estoque existentes. Segundo [13], os primeiros modelos de gestão de estoques disponibilizados durante a 2ª Guerra Mundial são denominados reativos, pois permitem tomar as decisões de quando e quanto abastecer sem que seja necessário obter previsões sobre a demanda. Mais recentemente, a abordagem ativa de reposição de estoques foi muito discutida. Essa abordagem utiliza a previsão de demanda para ajuste de parâmetros de estoque.

Ainda de acordo com [13], o aumento da complexidade dos problemas surgidos com os modelos ativos favoreceu a utilização de simulação e de modelos de busca como instrumentos de tomada de decisões. Em [12] também afirmam que, com o desenvolvimento e aprimoramento do controle de estoques, os decisores tem-se utilizado de outras ferramentas como a simulação para a identificação de estratégias ótimas de gestão de estoques. A seguir são apresentados os principais modelos de reposição de estoques.

2.1 Lote Econômico de Compra (LEC)

O modelo de lote econômico de compra foi o primeiro método de controle de estoques publicado por Whitman Harris em 1913, se tornando alvo de inúmeras pesquisas que originaram novos modelos. Segundo [12], o LEC obtém a quantidade ótima a ser solicitada como função dos custos de manutenção do estoque e de realização de um pedido. É um método que foi bastante criticado por tender a aumentar níveis de estoque, visto que minimiza os custos de pedido e manutenção dos estoques. O LEC é calculado usando a seguinte equação:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2KD}{iC}} \quad (1)$$

Sendo Q^* a quantidade ótima de pedido, K é o custo fixo do pedido, D é a demanda, i é igual a taxa de encargos sobre o estoque e C é o custo unitário do produto.

2.2 Política de Reposição Contínua

A política de reposição contínua consiste no monitoramento contínuo dos estoques, de forma que a cada movimentação o saldo seja verificado para determinar se uma nova compra será necessária. De acordo com [15], o modelo consiste em estabelecer um nível fixo de reposição (r) ou ponto de pedido (PP) que, ao ser atingido, dispara a emissão de um novo pedido de tamanho (Q) pré-definido. O nível fixo de reposição r é dado pela equação (2), onde d é a demanda por unidade de tempo, o tempo t é o tempo de reposição e Q_s é o estoque de segurança.

$$r = d \cdot t + Q_s \quad (2)$$

Já o estoque de segurança (Q_s) é calculado como na equação (3), multiplicando-se m , o número de desvios padrão para o nível de serviço especificado pelo desvio padrão da demanda durante o tempo de ressuprimento.

$$Q_s = m\sigma \quad (3)$$

2.2 Política de Reposição Periódica

De acordo com [7], o modelo de gestão periódica revisa os níveis de estoque em intervalos de tempo fixos, e são feitos pedidos de material suficiente para devolver os níveis de estoque a certo nível pré-determinado. A quantidade a ser repostada poderá variar de acordo com a demanda e níveis de estoque em cada revisão. A quantidade a ser repostada deve ser suficiente para garantir a demanda até a próxima revisão mais o tempo de ressuprimento [15]. A fórmula de cálculo da quantidade Q é dada por:

$$Q = d \cdot (t_r + t) - Q_f - Q_p + Q_r + Q_s \quad (4)$$

O saldo final em estoque (Q_f) é o saldo restante em estoque no momento da revisão. A quantidade pendente (Q_p) diz respeito a quantidades em pedido em revisões anteriores que ainda não entraram em estoque, esta situação ocorre quando o tempo entre revisões é menor do que o tempo de ressuprimento. A quantidade reprimida (Q_r) representa quantidades solicitadas em estoque que não foram atendidas por motivo de rompimento de estoque.

O tempo ótimo entre as revisões (t_r) pode ser calculado utilizando a metodologia de lote econômico de compra, como proposto por [15], onde t_{ano} é igual ao número de dias do ano e D é a demanda do item para o período.

$$t_r = \frac{Q^* \cdot t_{ano}}{D} \quad (5)$$

Em [12] afirmam que a principal vantagem da reposição periódica é a flexibilidade na determinação da periodicidade a ser empregada. Já em [7] citam como desvantagem a exigência de maiores estoques de segurança visto que este tipo de modelo tem um maior risco de rupturas de estoque.

3 Descrição do Processo de Manutenção de Equipamentos

Os equipamentos mantidos no setor de manutenção analisado são as chamadas turbomáquinas. Estes equipamentos são rotativos de fluxo contínuo, através do qual passa um fluido que gerará energia motriz para algum equipamento acionado como é o caso das turbinas a gás, ou que receberá energia motriz do equipamento acionador e transferirá para o fluido de processo, como é o caso dos compressores centrífugos para compressão do gás produzido. De acordo com [9], as turbomáquinas são provavelmente os componentes mais críticos em termos construtivos e para a disponibilidade operacional de qualquer planta de processo.

Na oficina de manutenção podem ser realizadas manutenções corretivas, efetuadas após a pane com o objetivo de que o equipamento retorne a operação, ou preventivas, que são feitas de acordo com critérios prescritos para evitar falhas ou degradação. A maior parte dos equipamentos mantidos sofrem manutenção preventiva, cuja necessidade é detectada a partir de inspeções preditivas. As manutenções preventivas realizadas na oficina são chamadas de revisão geral e já tem escopo pré-definido. Os sobressalentes envolvidos neste tipo de revisão também são previamente levantados e supridos em estoque. Será apresentado a seguir o processo de revisão geral típico de um modelo de turbina a gás e também o processo de reposição dos sobressalentes.

3.1 Processo de Revisão de Turbomáquinas

As revisões (manutenções preventivas) realizadas consistem no recebimento do equipamento, desmontagem, triagem, inspeção inicial, reparo, inspeção final e montagem do equipamento. A manutenção é dividida nas etapas a seguir:

- Fase A - Desmontagem, Triagem, Cadastro, Limpeza e Inspeção inicial.
- Fase B - Reparo e Inspeção Final.
- Fase C - Montagem.

Quando o equipamento é recebido na oficina se inicia a Fase A, quando ele é todo desmontado e suas peças são triadas, cadastradas, passam por limpeza para retirada de incrustações e resíduos de modo a facilitar a próxima etapa de inspeção. Os sobressalentes envolvidos na revisão podem ser de dois tipos:

- *Itens de troca obrigatória*: Peças que não são inspecionados e devem ser substituídas obrigatoriamente. Esses sobressalentes são solicitados do estoque assim que a manutenção se inicia. São exemplos de itens de troca obrigatória parafusos, aruelas, gaxetas, anéis de vedação, sensores, entre outros.
- *Itens passíveis de inspeção*: São materiais que após a desmontagem e limpeza, passam por inspeção, que irá determinar se estão em condições de uso, se devem ser reparados ou substituídos. Se enquadram neste tipo de item palhetas estatoras e rotoras, diafragmas, selos e etc. Este tipo de material é solicitado após o término da fase A quando se tem o resultado da inspeção inicial. Esses materiais têm característica de demanda intermitente.

Após o término das inspeções (Fase A), os materiais que podem ser reparados seguem para reparo e os materiais a serem substituídos são solicitados, podendo existir ou não em estoque. Itens de pouco uso normalmente não tem parâmetro de ressuprimento de estoque e são comprados sob demanda, já os de uso mais provável são mantidos em estoque. Os itens passíveis de inspeção podem ser subdivididos em dois tipos:

- *Itens de Demanda unitária*: Quando se utiliza apenas uma unidade do determinado item por equipamento ou quando se utiliza mais do que uma unidade do item por equipamento, mas a reprovação na inspeção inicial se dá sempre por lote, de forma que as peças são sempre substituídas em sua totalidade, podendo ser consideradas como demandas unitárias.
- *Itens de demanda errática*: Quando se utiliza mais de uma unidade por equipamento e as quantidades consumidas por manutenção podem variar.

A Fase B, consiste no reparo e inspeção final, quando os materiais que retornam de reparo são inspecionados novamente. Só então os materiais solicitados no início da fase A no caso dos itens de troca obrigatória e ao término da Fase A para os casos de itens inspecionáveis, precisam estar disponíveis para a fase final de montagem. A partir deste ponto a falta de sobressalentes afeta o andamento da revisão do equipamento, como mostra a Figura 1. Caso a oficina esteja com sua capacidade de manutenção de equipamentos comprometida quando da chegada de um novo equipamento para revisão, pode-se optar por enviá-lo para outra oficina reparadora. Neste caso, o tempo da revisão será aumentado em função da necessidade de contratação e desembaraço para exportação do equipamento, podendo a manutenção ficar mais cara do que em oficina própria.

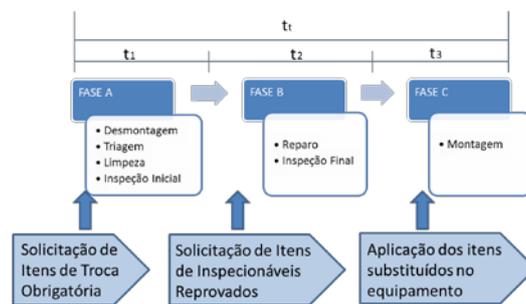


Fig. 1. Solicitação e aplicação de sobressalentes durante manutenção. Fonte: Própria

3.2 Processo de Reposição de Sobressalentes

Quando é feita uma solicitação de material durante a manutenção, o sistema de planejamento de materiais chamado MRP (*Material Resource Planning*), irá comparar os parâmetros de estoque cadastrados para o material, com o saldo em estoque e as necessidades colocadas, gerando assim uma requisição de compra, caso necessário.

A requisição de compra, logo que é gerada, deve ser analisada por equipe responsável, que irá encaminhar para o grupo comprador daquele tipo de item. A partir daí, tem início o processo de compra, que é encerrado com a colocação e envio de pedido de compra para o fornecedor. Decorrido o prazo de fornecimento, o material é entregue e conferido para entrada em estoque. A Figura 2 ilustra o processo de reposição.

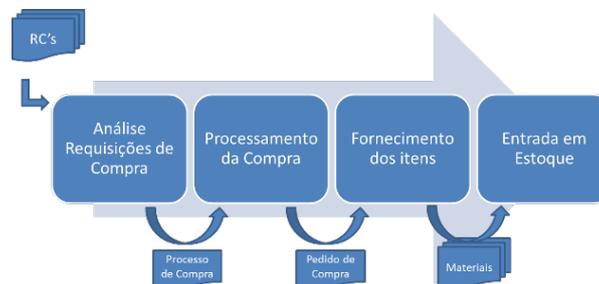


Fig. 2. Processo de reposição de materiais em estoque. Fonte: Própria.

4 Etapas de um Projeto de Simulação Discreta

A simulação é uma importante ferramenta para entender o comportamento de um sistema, construir hipóteses e com base nos resultados, propor melhorias. De acordo com o exposto em [6], a simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação.

A simulação computacional pode ser classificada com relação ao tempo em contínua ou discreta. A simulação contínua é utilizada quando os estados do sistema variam de forma contínua ao longo do tempo e a discreta quando os estados do sistema variam a partir de ocorrência de eventos em momentos discretos no tempo [5]. De acordo com [3], os modelos discretos são os mais utilizados em Engenharia de Produção e Pesquisa Operacional, diferentemente dos modelos analíticos de filas, que são modelos experimentais e em geral, relativamente fáceis de serem aplicados.

Segundo [10], um modelo pode ser determinístico quando não contém componentes aleatórias ou seja, a saída é determinada uma vez que o conjunto de dados de entrada e as relações no modelo foram especificadas. Já os modelos probabilísticos produzem saídas aleatórias que podem ser tratadas apenas como uma estimativa das características reais do modelo.

Em [5] são descritas as principais etapas de um projeto de simulação:

1. Concepção ou formulação do modelo: Deve-se entender claramente o sistema a ser simulado e seus objetivos; Criar um modelo conceitual; Coletar os dados.
2. Implementação do modelo: Conversão do conceitual para computacional; Comparação do modelo computacional com conceitual para avaliar se a operação atende ao que foi estabelecido na etapa de concepção.
3. Análise dos resultados do modelo: Realização das rodadas do modelo; Análise e documentação dos resultados.

A seguir, serão descritos cada um destes passos para o problema de gestão de estoques de uma oficina de manutenção de turbomáquinas.

5 Definição do Sistema e Modelo Conceitual

De acordo com o processo mapeado no item 3, foram definidas as premissas para modelagem, medidas de desempenho do sistema, entidades do sistema, processos e parâmetros de entrada do modelo. Uma das premissas utilizadas foi a não inclusão no modelo dos recursos e movimentações envolvidas em cada processo, pois o objetivo deste estudo é analisar o comportamento dos estoques e seus parâmetros de ressuprimento, não sendo relevante no presente estudo o detalhe dos processos envolvidos no consumo e ressuprimento dos sobressalentes. Outra premissa utilizada foi a de restringir a modelagem para apenas um dos modelos de equipamento revisados na oficina.

Para efeito de análise de desempenho serão verificadas as seguintes medidas de desempenho do sistema: Valor médio em estoque, Custo Total de Pedido, Quantidade de ocorrências de faltas de sobressalentes observadas, e Tempo médio de espera do equipamento por chegada de sobressalentes.

O modelo conceitual foi construído de acordo com a Figura 3, utilizando a simbologia IDEF-SIM, proposto em [11]. As entidades deste diagrama estão relacionadas na Tabela 1. Será considerado na simulação um modelo de equipamento a ser revisado (entidade 1) que segue uma distribuição de probabilidade a ser definida posteriormente.

Caso a Oficina de manutenção não tenha capacidade para atendimento de novo equipamento, ele sai do sistema. Se houver capacidade, o equipamento segue no sistema e são solicitados itens de troca obrigatória. Neste momento o controle de MRP atrelado a esta função irá gerar requisições de compra caso seja necessário, ao mesmo tempo em que será iniciada a Fase A da manutenção. Após o término da Fase A, novos sobressalentes denominados passíveis de inspeção são solicitados e o equipamento segue para a Fase B, ao mesmo tempo em que novas requisições poderão ser geradas pelo controle de MRP. Quando a fase B termina, caso todos os materiais solicitados não estejam disponíveis em estoque, o equipamento esperará a chegada dos itens pendentes no estoque para realizar a baixa do saldo em estoque de todos os itens necessários e executar a montagem, última fase da manutenção.

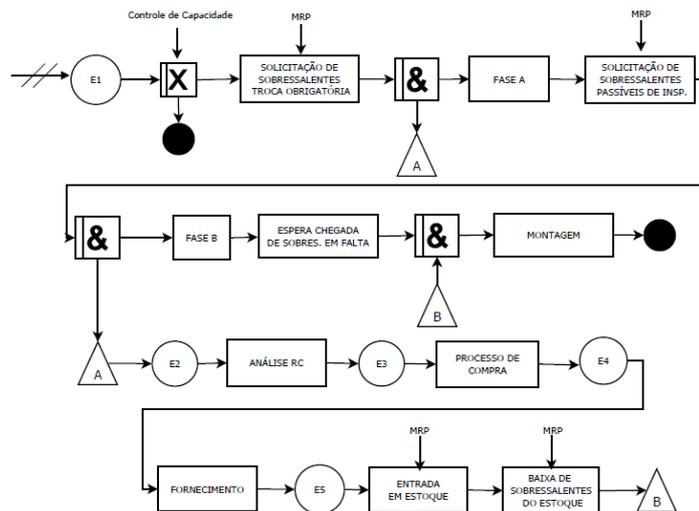


Fig. 3. Modelo Conceitual linguagem IDEF-SIM. Fonte: Própria.

Tabela 1. Entidades do Sistema.

Entidade	Descrição
E1	Equipamento a ser revisado
E2	Requisição de Compra
E3	Processo de Compra
E4	Pedido de Compra
E5	Item sobressalente

As funções de Solicitação de Sobressalentes de troca obrigatória e passíveis de inspeção poderão gerar requisições de Compra (entidade 2). Para os itens passíveis de inspeção, eles poderão ser ou não solicitados pelo modelo mediante histórico de utilização em revisões anteriores. As duas funções de Solicitação de Materiais possuem um controle (MRP) que consulta os parâmetros de estoque para verificar se a solicitação de materiais gerará ou não Requisição de Compra de acordo com níveis de estoque. É neste ponto do modelo que será possível introduzir as diferentes políticas e níveis de estoque para comparar o desempenho de cada uma delas.

A função análise de Requisição de Compra irá agrupar as Requisições de cada material em um processo de compra único que será efetuado (entidade 3) e terá como resultado a emissão do pedido de compra (entidade 4) com os devidos prazos de fornecimento de cada item. Após o fornecimento, a entidade analisada passa a ser o item sobressalente entregue pelo fornecedor (entidade 5), que levará um tempo para processamento e entrada no estoque, após o qual ocorrerá a baixa de estoque, caso seja um material solicitado para algum equipamento em revisão. Após a chegada dos materiais pendentes, caso existam, a manutenção pode ser finalizada através da montagem do equipamento.

Os dados de entrada do modelo foram coletados com base em registros históricos do sistema ERP da empresa nos últimos 3 anos. Foram selecionados 10 itens sobressalentes para a simulação, nomeados de A à J. Os materiais de A à E são os de troca obrigatória e os de F à J são os do tipo passível de inspeção. A escolha destes materiais foi baseada em elevado histórico de consumo, aliado a grande criticidade dos itens para o modelo de equipamento estudado. Dos 5 materiais escolhidos do tipo passível de inspeção, os itens de F à H possuem comportamento de demanda unitária e os materiais I e J possuem demanda errática.

Para análise dos dados foi utilizado o pacote ExpertFit do software de Simulação FlexSim 7.5. O ExpertFit fornece histogramas e determina as melhores distribuições de probabilidade que representam os eventos.

A Tabela 2 apresenta o percentual histórico de utilização para os itens de demanda unitária. Já a Tabela 3 apresenta a unidade de medida utilizada e a distribuição de probabilidade aplicada para cada dado de entrada no modelo. É importante ressaltar que o tempo de processamento não se ajustou a nenhuma distribuição de probabilidade e foi utilizada então uma distribuição empírica. O tempo entre chegada de equipamentos foi o único parâmetro que teve dados históricos coletados de um prazo maior que 3 anos, foram utilizados 10 anos para melhorar a previsão de demanda de manutenção de equipamentos. Ressalta-se que durante o período de 10 anos não houve alterações da frota em operação deste modelo de equipamento.

Tabela 2. Percentual de Utilização Itens de Demanda Unitária.

Item	Percentual de Utilização
Material F	75%
Material G	68,80%
Material H	56,30%

Tabela 3. Distribuições de Probabilidade.

Dados de entrada	Unidade	Distribuição (Parâmetros Flexsim)
Tempo entre chegadas de equipamentos	Dias	Beta (0.61, 405.10, 0.71, 2.15)
Tempo de Processamento Fase A	Dias	Johnson SB (1.35, 35.77, 0.77, 1.04)
Tempo de Processamento Fase B	Dias	Beta (26.39, 281.81, 0.66, 1.06)
Tempo de Proc.Análise RC	Dias	Binomial Negativa (3.00, 17.95)
Tempo de Proc. de Compra	Dias	Empírica
Tempo de Proc. de Entrada de Material no estoque	Dias	Log-logistic (0.00, 2.92, 2.27)
Tempo de Fornecimento Material A	Dias	Johnson SB (84.47, 260.65, -0.03, 0.70)
Tempo de Fornecimento Material B	Dias	Log-logistic (0.00, 132.96, 3.25)
Tempo de Fornecimento Material C	Dias	Johnson SB (34.32, 266.09, 0.18, 0.74)
Tempo de Fornecimento Material D	Dias	Johnson SB (51.88, 297.04, 0.27, 0.53)
Tempo de Fornecimento Material E	Dias	Gama (38.49, 20.92, 4.59)
Tempo de Fornecimento Material F	Dias	Inversa Gaussiana (10.5, 106.8, 304.2)
Tempo de Fornecimento Material G	Dias	Inversa Gaussiana (10.5, 106.8, 304.2)
Tempo de Fornecimento Material H	Dias	Weibull (32.75, 100.86, 1.81)
Tempo de Fornecimento Material I	Dias	Johnson SB (53.76, 250.70, 0.58, 0.64)
Tempo de Fornecimento Material J	Dias	Johnson SB (53.76, 250.70, 0.58, 0.64)
Consumo I	Unid.	Binomial Negativa (1.00, 24.17)
Consumo J	Unid.	Binomial Negativa (1.00, 18.03)

A Figura 4 apresenta o gráfico de comparação entre histograma e a distribuição de probabilidade selecionada Beta.

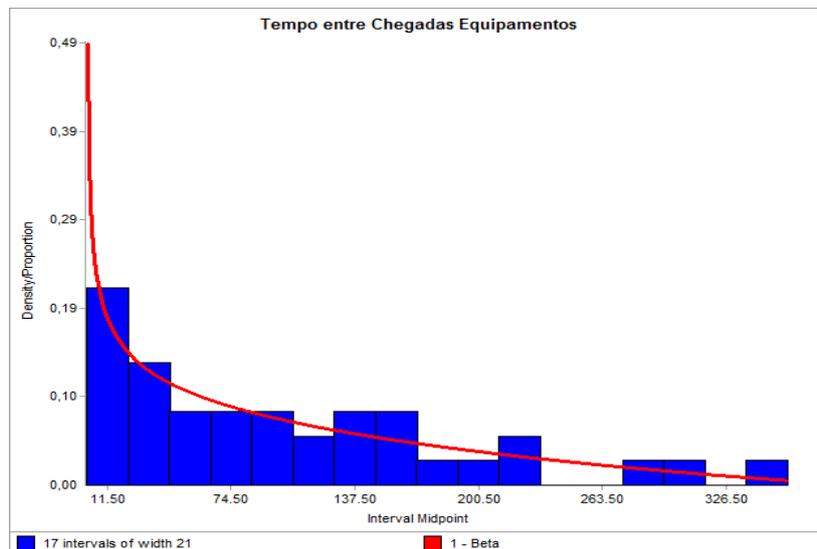


Fig. 4. Gráfico da Distribuição de Probabilidade do Tempo entre chegadas. Fonte: ExpertFit.

6 Construção do Modelo Computacional

O modelo conceitual foi implementado utilizando-se o software FlexSim 7.5, Versão Acadêmica, onde todos os parâmetros de entrada e medidas de desempenho citados no item anterior foram configurados. A Figura 5 apresenta o modelo construído no software FlexSim. Para determinar o período de aquecimento do sistema foram realizadas 5 replicações e analisados os níveis de estoque e filas do sistema, chegando-se a conclusão de que o sistema entra em regime permanente com cerca de 500 dias simulados.

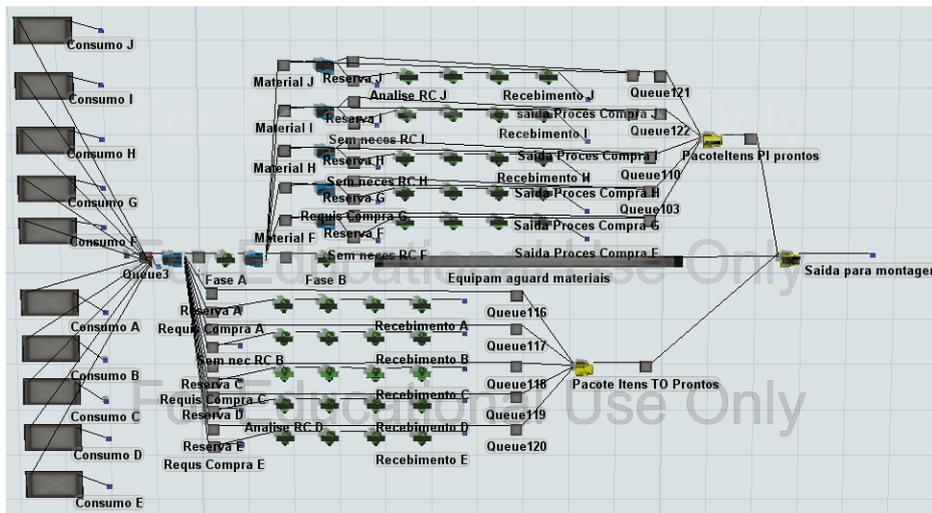


Fig. 5. Modelo construído no software FlexSim. Fonte: FlexSim.

Para encontrar o número ideal de replicações, foram realizadas 20 replicações e avaliados os resultados das medidas de desempenho para uma confiança de 95%. De acordo com [5], o número ideal de replicações é dado por:

$$n^* = n \cdot \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 \quad (6)$$

Em (6), n^* é o número de replicações necessárias, n é igual ao número de replicações da amostra piloto, h é a precisão da amostra piloto e h^* é a precisão desejada.

A Tabela 4 apresenta os valores calculados de replicações mínimas para o nível de precisão desejado, onde se verifica que devem ser feitas 222 replicações. A tabela também apresenta o resultado das 222 replicações. Apesar de algumas das medidas de desempenho ficarem com precisão um pouco acima da desejada, o número de 222 replicações foi considerado satisfatório, pois os desvios em relação a precisão desejada não foram muito significativos. Foi estipulado um período de simulação de 4 anos para se aumentar a precisão do modelo, em função dos longos prazos de ressuprimento e de manutenção observados.

Tabela 4. Número mínimo de replicações.

Medida de Desempenho	n=20				n=222	
	Média	h	h*	n*	Média	h
Estoque Médio Mat A	698	142	50	161	654	53
Estoque Médio Mat B	449	68	30	103	455	26
Estoque Médio Mat C	501	70	35	80	522	29
Estoque Médio Mat D	395	45	25	65	440	17
Estoque Médio Mat E	30,5	5	2	125	29,7	1,8
Estoque Médio Mat F	121	19	8	113	119,2	6,3
Estoque Médio Mat G	64	17	5,5	191	64	6,7
Estoque Médio Mat H	2,86	0,42	0,2	88	2,661	0,107
Estoque Médio Mat I	5,12	0,7	0,35	80	5,17	0,47
Estoque Médio Mat J	10,4	2,8	0,85	217	10,07	0,56
Tempo Médio de Espera por Equipamento	83 dias	30	9	222	66,1 dias	7,7
Média de Equipamentos Aguardando Materiais	2,49	0,67	0,25	144	1,97	0,18

Para a simulação do cenário atual, cuja política de gestão de estoques é a de revisão contínua, foram incluídos no modelo os parâmetros de ressuprimento R e $R+Q^*$, calculados de acordo com a demanda anual para cada item e média histórica dos tempos de ressuprimento. No cenário atual os parâmetros de ressuprimento R e $R+Q^*$ são ajustados de forma que sejam divisíveis pela quantidade aplicada em cada equipamento para os casos de troca obrigatória e passíveis de inspeção com demanda unitária, evitando assim um nível de “estoque morto”, que não tem quantidade suficiente para atendimento a demanda solicitada. O estoque de segurança foi dimensionado para cobertura de 45 dias. Os parâmetros utilizados estão listados na Tabela 5.

Tabela 5. Parâmetros de Ressuprimento de Estoque.

Material	Revisão Contínua				Revisão Periódica	
	Qs	R ajustado	Q*	R+Q* ajustado	tr*	d.(tr*+t) ajustado
A	210	1392	360	1856	77	1646
B	114	696	474	1160	186	1278
C	91	588	714	1176	354	1477
D	62	378	652	1008	476	1072
E	8	51	5	68	30	43
F	29	176	5	264	8	235
G	22	82	5	164	10	142
H	0	3	1	4	183	2
I	1	6	1	7	46	6
J	2	13	2	15	43	12

Os resultados das medidas de desempenho para o cenário atual encontram-se na Tabela 6. É importante ressaltar que após a execução do modelo computacional, que busca de maneira simplificada retratar o cenário atual, foram comparados os resultados desta simulação com os dados levantados pela coleta realizada. Com base nos dados gerados como resultado do modelo de simulação foi possível verificar a aderência destes com a realidade.

Tabela 6. Medidas de Desempenho Cenário Atual.

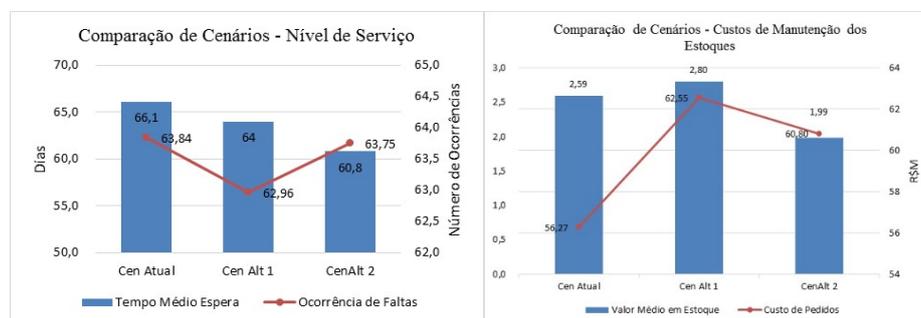
Medida de Desempenho	Valor
Valor Médio em Estoque	R\$ 2.593.319,20
Custo Total de Pedidos	R\$ 56.270,44
Tempo médio de Espera por Equipamento	66,1 dias
Número Médio de Ocorrência de Faltas de Itens	63,84
Média de Equipamentos Aguardando Materiais	1,97
Média de Equipamentos liberados para montagem	10,11

7 Proposta de Cenários Alternativos

Foram simulados cenários alternativos com o objetivo de comparar com o cenário atual, buscando melhores resultados, que equilibrem o valor imobilizado em estoque com o nível de serviço desejado. Para tanto, foram escolhidos dois cenários alternativos, o primeiro utilizando-se da política de revisão periódica de parâmetros de estoque (cenário alternativo 1) e o segundo analisando o impacto de se estabelecer contrato de longo prazo com o fornecedor (cenário alternativo 2). O contrato de longo prazo diminui o tempo de processamento da compra, apesar de não alterar o prazo de fornecimento, haja vista que o fornecedor mantém os mesmos prazos de fornecimento para compras com e sem contrato.

Foram realizados reajustes nos dados de entrada do modelo para os dois cenários alternativos. Os parâmetros de ressurgimento utilizados para o cenário alternativo 1 estão listados na Tabela 5. Para o cenário alternativo 2, foram coletados dados históricos de compras realizadas através de contrato e encontrada a seguinte distribuição de probabilidade para o tempo de processamento da compra: Exponencial com média 5,1.

Através da Figura 6 é possível comparar o resultado das principais medidas de desempenho para cada cenário. Percebe-se que no cenário alternativo 1, os níveis de serviço permanecem praticamente iguais aos do cenário atual, porém o valor médio em estoque teve um aumento de 8% e os custos de pedido também sofreram aumento. Já o cenário alternativo 2 apresentou uma queda de 23% nos estoques médios, acompanhada de pequena alta nos custos de pedido, além de apresentar os melhores resultados na medida de desempenho Tempo Médio de Espera por Equipamento.

**Fig. 6.** Comparação de cenários.

A Figura 7 estratifica as ocorrências de falta de material por item. Percebe-se que o número de ocorrências de faltas para cada item são muito próximos uns dos outros para todos os cenários simulados. Os itens I e J são os que mais tiveram ocorrência de falta nos 3 diferentes cenários, devido ao caráter aleatório de consumo, cuja característica da demanda é errática. Sendo assim, foi realizada uma última simulação utilizando-se os parâmetros do cenário atual, mas aumentando-se os parâmetros apenas dos itens I e J, de acordo com a média do terceiro quartil de consumo destes itens registrados nas simulações anteriores. Os resultados da Tabela 7, mostram uma melhora nos níveis de serviço do modelo. Com esta pequena alteração, o tempo médio de espera de equipamento caiu de 66,1 dias para 56,1 dias, uma redução de 18% com incremento nos estoques de apenas 1,7%.

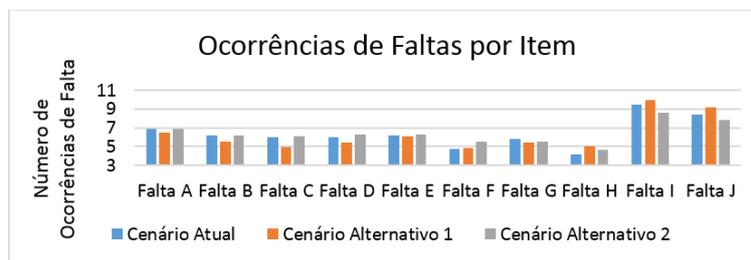


Fig. 7. Ocorrência de Faltas por item.

Tabela 7. Medidas de Desempenho Cenário Atual com parâmetros de I e J ajustados.

Medida de Desempenho	Valor
Valor Médio em Estoque	R\$ 2.637.828,17
Custo Total de Pedidos	R\$56.715,68
Tempo médio de Espera por Equipamento	56,1 dias
Número Médio de Ocorrência de Faltas de Itens	63,32
Média de Equipamentos Aguardando Materiais	1,86
Média de Equipamentos liberados para montagem	10,39

7 Conclusões

Com base nos resultados obtidos nas simulações dos três diferentes cenários, conclui-se que o modelo de revisão periódica é o menos eficiente para o problema em questão, pois apresentou níveis de estoque mais elevados para o mesmo nível de serviço do modelo de revisão contínua. Este fato corrobora a afirmação em [7], de que este tipo de modelo exige maiores níveis de estoque devido ao elevado risco de ruptura de estoque. Verificou-se também que o terceiro cenário, de revisão contínua com a utilização de um contrato, pode trazer grandes economias de estoque, mantendo-se o mesmo nível de serviço. Além disto, constata-se que o ajuste seletivo de parâmetros nos itens com maior ocorrência de faltas pode aumentar os níveis de serviço, com pequenos incrementos nos de estoque.

O modelo se mostrou satisfatório para auxiliar nas tomadas de decisões referentes a políticas de gestão de estoques, pois tornou possível quantificar os impactos de alterações em parâmetros de ressurgimento e tipos de políticas de estoque, bem como avaliar novas estratégias e ações a serem implementadas para otimização dos processos da cadeia de suprimento. Os cenários avaliados ressaltaram também o comportamento peculiar dos sobressalentes de demanda errática, evidenciando a necessidade de tratamento diferenciado para este tipo de material.

Referências

1. Altay, N., Literal, L. (Edit).: Services Parts Management – Demand Forecasting and Inventory Control, 3ª ed. Springer: London, 2011.
2. Bartezzaghi, E., Kalchschmidt, M.: The Impact of Agregation Level on Lumpy Demand Management. In: Altay, N., Literal, L. (Edit). Services Parts Management: Demand Forecasting and Inventory Control, 3ª ed. Springer: London, 2011.
3. Cauchick M., Paulo A.: Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2ª edição. São Paulo: Campus, 2012.
4. Chopra, S., Meindl, P.: Supply chain management: Strategy, Planning and Operation. New Jersey: Prentice Hall, 2007.
5. Chwif, L., Medina, A.: Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações, 3ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
6. Freitas P. J.: Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena, 2ª edição. São Paulo: VisualBook, 2008.
7. Gaither, N., Frazier, G.: Administração da Produção e Operações 8ª ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learnig, 1999
8. Garcia, E., Reis, L., Machado, L., Ferreira, V. J.: Gestão de estoques: otimizando a logística e a cadeia de suprimentos. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.
9. Juliani, A.: Turbomáquinas Principais Modelos e Tipos Usados Em Plantas De Separação De Gases - Teoria E Prática. In: XVIII Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 2003, São Paulo. Disponível em: <http://www.abmbrasil.com.br/cim/download/XVIII-Encontro-de-Gases-3229.pdf>, Acesso em: 04/03/2015
10. Law, A. M., Kelton, W. D.: Simulation modeling and analysis. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
11. Leal, F., Almeida, D. A., Montevechi, J. A. B.: Uma proposta de técnica de modelagem conceitual para a simulação através de elementos do IDEF. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2008, João Pessoa-PB: Anais XL Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional.
12. Rosa, H., Mayerle, S. F., Gonçalves, M. B.: Controle de estoque por revisão contínua e revisão periódica: uma análise comparativa utilizando simulação. Produção, v. 20, n. 4, dez. 2010.
13. Santoro, C. M., Freire, G.: Análise comparativa entre modelos de estoque. Revista Produção, v. 18, n. 1, p. 89-98, 2008.
14. Syntetos, A., Boylan, J.: Intermittent Demand: Estimation and Statistical Properties, In: Altay, N., Literal, L.: Services Parts Management: Demand Forecasting and Inventory Control, 3ª ed. Springer: London, 2011.
15. Tubino, D. F.: Planejamento e Controle da Produção – Teoria e Prática. 1ª Edição. São Paulo. Editora Atlas, 2007.