



Lauro Chagas e Sá
Bianca Passos Arpini
Paulo Henrique dos Santos
(Orgs.)

PESQUISA OPERACIONAL NO CAMPO DA LOGÍSTICA



Edifes

EXPLORANDO INTERFACES

Lauro Chagas e Sá
Bianca Passos Arpini
Paulo Henrique dos Santos
(Orgs .)

**PESQUISA OPERACIONAL
NO CAMPO DA LOGÍSTICA:
EXPLORANDO INTERFACES**



Edifes

Vitória - ES
2019



Edifes

Editora do Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Espírito Santo
R. Barão de Mauá, nº 30 – Jucutuquara
29040-689 – Vitória – ES
www.edifes.ifes.edu.br | editora@ifes.edu.br

Reitor: Jadir Jose Pela
Pró-Reitor de Administração e Orçamento: Lezi José Ferreira
Pró-Reitor de Desenvolvimento Institucional: Luciano de Oliveira Toledo
Pró-Reitora de Ensino: Adriana Pionttkovsky Barcellos
Pró-Reitor de Extensão: Renato Tannure Rotta de Almeida
Pró-Reitor de Pesquisa e Pós-Graduação: André Romero da Silva
Coordenador da Edifes: Nelson Martinelli Filho

Conselho Editorial

Ediu Carlos Lopes Lemos • Eliana Mara Pellerano Kuster • Diego Ramiro Araoz
Alves (Suplente) Estéfano Aparecido Vieira • Karin Satie Komati (Suplente) • Felipe
Zamborlini Saiter • Marcela Ferreira Paes (Suplente) • Nelson Martinelli Filho •
Poliana Daré Zampirolli Pires • Oscar Luiz Teixeira de Rezende (Suplente) • Raoni
Schmitt Huapaya • Marcos Vinicius Forecchi Accioly (Suplente) • Ricardo Ramos
Costa • Ana Paula Klauck (Suplente) • Priscila de Souza Chisté • Robson Malacarne
(Suplente) • Rossanna dos Santos Santana Rubim • Norma Pignaton Recla Lima
(Suplente) • Wallisson da Silva Freitas

Revisão e produção editorial: Roberta Patrocínio de Amorim
Projeto Gráfico, Diagramação e Capa: Assessoria de Comunicação Social do Ifes
Imagem de capa por vectorpouch / Freepik

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Bibliotecária Rossanna dos Santos Santana Rubim – CRB6- ES 403

P474 Pesquisa operacional no campo da logística : explorando interfaces / organizado por
Lauro Chagas e Sá, Bianca Passos Arpini e Paulo Henrique dos Santos. – Vitória, ES :
Edifes, 2019.
181 p. : il.

Vários autores.
ISBN: 9788582633199 (e-book).

1. Pesquisa operacional. 2. Logística. I. Sá, Lauro Chagas e, 1992-. II. Arpini,
Bianca Passos, 1989-. III. Santos, Paulo Henrique dos. IV. Título.

CDD 22 – 658.4033

@ 2019 Instituto Federal do Espírito Santo

Todos os direitos reservados.

É permitida a reprodução parcial desta obra, desde que citada a fonte.

O conteúdo dos textos é de inteira responsabilidade do autor.

PREFÁCIO

A Pesquisa Operacional (PO) pode ser definida, de forma simples, como o uso de métodos matemáticos para resolver problemas visando à otimização de recursos. Sua origem está associada à Segunda Guerra Mundial, pois, a fim de viabilizar a melhor alocação de recursos, houve a necessidade de aplicar o método científico e as ferramentas matemáticas em operações militares. Dada a similaridade entre os problemas enfrentados na guerra e aqueles que ocorrem nas empresas, esses métodos passaram a ser utilizados nas organizações.

A PO é composta por um conjunto de técnicas como programação (linear, inteira, não linear, dinâmica, etc), teoria dos grafos, teoria das filas, simulação, entre outras, as quais podem ser aplicadas a diversos problemas do mundo real, auxiliando, assim, a tomada de decisão.

Na língua inglesa, o termo consagrado é o *Management Science*, uma área de estudo que utiliza recursos matemáticos e computacionais para resolver problemas de negócios, privilegiando o raciocínio lógico. O objetivo desse mecanismo é converter dados em informações significativas, apoiar a tomada de decisão e criar sistemas úteis para usuários. Pode abranger qualquer problema de otimização de

produtos, de processos e de operações, ou seja, qualquer situação em que é buscada uma solução ideal, mais eficiente ou de menor custo.

Este livro trata de uma seleção de oito artigos relacionados à área de Pesquisa Operacional com aplicações em diversos campos da logística, mostrando como as ferramentas de PO podem ser utilizadas na prática. Para cada tema abordado, apresenta-se uma rápida descrição dos conceitos básicos necessários para a compreensão do assunto e, a seguir, uma aplicação.

Assim sendo, o livro tem como objetivo contribuir para o aprimoramento do processo de ensino em tomada de decisão com base na modelagem de problemas logísticos reais. É uma excelente oportunidade para o leitor vislumbrar novas pesquisas ou novas aplicações nas empresas em que trabalham e, com isso, alcançar vantagem competitiva sobre os seus concorrentes.

Fabício Broseghini Barcelos

APRESENTAÇÃO

A Pesquisa Operacional é a aplicação do método científico, por equipes multidisciplinares, a problemas envolvendo o controle de sistemas organizados de forma a fornecer soluções que melhor interessam a determinada organização. Esse ramo de pesquisa, por meio do uso de técnicas como a modelagem matemática para analisar situações complexas, dá aos executivos o poder de tomar decisões mais efetivas e de construir sistemas mais produtivos.

Com a crescente globalização econômica e com o nível de sofisticação industrial de produção e aplicações mais eficientes de serviços logísticos mais complexos, surge a necessidade de promover meios educacionais que fomentem a qualificação intelectual de um novo perfil laboral que possa atender às organizações empresariais de todos os setores (primário, secundário e terciário). Isso também decorre do fato de que, na área da administração dos serviços de logística, é crescente a procura por profissionais que tenham condições de analisar as diferentes estruturas e processos inerentes à atividade e administrar os serviços de forma profissional, buscando alternativas inovadoras em seu processo de gestão.

Como docentes da área de Pesquisa Operacional no Curso Superior de Tecnologia em Logística no Instituto Federal do Espírito Santo *campus* Avançado de Viana e como participantes do Grupo de Pesquisa em Educação Matemática e Educação Profissional (EMEP),

reunimos, neste livro, diferentes estudos em Pesquisa Operacional com aproximações no campo da logística.

No primeiro capítulo, intitulado “*Ensino de logística numa perspectiva interdisciplinar: contribuições da Modelagem Matemática*”, os autores analisam qualitativamente experiências da disciplina Pesquisa Operacional do Curso Superior de Tecnologia em Logística do Ifes, campus Viana, que estimula os alunos a realizarem estudos de caso com Modelagem Matemática para resolverem problemas logísticos.

O segundo e o terceiro capítulos deste livro apresentam modelos matemáticos para planejamento de atividades de carga e descarga e de produção e distribuição, respectivamente. O capítulo dois, *Modelo Matemático para o planejamento das atividades de carga e descarga de vagões em um terminal ferroviário*, propõe um modelo matemático baseado no *Resource Constrained Project Scheduling Problem* para realizar o planejamento das atividades em um terminal ferroviário, em função dos lotes ferroviários que serão recebidos por dia, visando minimizar o tempo de atraso desses vagões. Já o capítulo três, *Planejamento de produção e distribuição de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ): um modelo matemático*, apresenta um modelo matemático que tem como objetivo auxiliar no planejamento de produção e distribuição do CBUQ para atendimento à obras de pavimentação.

Dando continuidade às discussões relacionadas à Pesquisa Operacional na Logística, os capítulos quatro e cinco tratam da estocagem de produtos. Em “*Programação linear e gerenciamento de estoque em uma loja de artigos eletrônicos*”, quarto capítulo, os pesquisadores demonstram o quanto a Pesquisa Operacional e a Programação Linear são aplicáveis em problemas do cotidiano das empresas; minimizando os custos de estocagem, de modo que as empresas se tornem ainda mais lucrativas e competitivas. Já em “*Simulação discreta e otimização de estoques em uma oficina de manutenção do setor de óleo e gás*”, quinto capítulo do livro, os autores realizam a aplicação de simulação discreta para otimização de parâmetros de estoque de sobressalentes da oficina de manutenção, com o objetivo de reduzir custos, mantendo o nível de serviço adequado.

O capítulo seis, cujo título é “*Análise sobre o carregamento de caminhões de um centro de distribuição: um estudo sobre modelagem e simulação de sistemas de filas M/M/1*”, analisa o tempo de espera e a taxa de ocupação dos servidores de carregamento, também, o comportamento da fila, argumentando sobre o contraste entre os valores obtidos de forma analítica e através de simulação computacional. O capítulo sete, “*Modelagem e simulação utilizando o software flexsim: estudo na busca por melhorias no processo produtivo de indústria alimentícia*” explora a importância da eficiência em processos produtivos reconhecidos na literatura, apresentando a aplicação de modelagem e simulação. Nele analisam-se dados de saída preliminares para identificação de recursos de estrangulamento e ociosidade e, posteriormente, para identificação de possibilidades de melhorias em todo o processo produtivo.

Adentrando o setor de serviços, e encerrando as aplicações que listamos para este livro, o capítulo oito “*Desenvolvimento de um plano de compras em uma pizzaria utilizando a programação linear*” propõe um plano de compras, visando à minimização dos custos com materiais necessários para a produção, objetivando, também, manter a qualidade.

Assim, com esses textos, procuramos que os estudos permitam formar, com apoio da Pesquisa Operacional, os profissionais preparados para gerenciar a cadeia de suprimentos e para disponibilizar produtos com qualidade e com baixo custo para, no momento oportuno, ser utilizado de acordo com as necessidades do consumidor.

Os organizadores.

SOBRE OS AUTORES

Bianca Passos Arpini é graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes) (2012), especialista em Engenharia de Suprimentos pela Ufes (Ufes – PROMINP, 2015) e mestre em Engenharia Civil (Área de Transportes) pela Ufes (2015). Atua como Professora EBTT no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), *campus* Viana e tem experiência na área de pesquisa operacional com ênfase em modelos matemáticos aplicados à área de roteirização de veículos. E-mail de contato: bianca.arpini@ifes.edu.br.

Bruna Zution Dalle Prane é licenciada em Matemática pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes, 2010), pós-graduada em Educação Inclusiva e Diversidade pelo Centro de Estudos Avançados em Pós-Graduação e Pesquisas (CESAP) e mestre em Educação, na linha de Educação em Ciências e Matemática, pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). É professora efetiva do Ifes, atuando como docente do *campus* Vitória e participa do Grupo de Pesquisa em Educação Matemática e Educação Profissional (EMEP) e do Grupo de Pesquisa em Educação Matemática e Cultura. Ademais, tem experiência na área de Educação Matemática, atuando principalmente nos seguintes temas: Modelagem Matemática, Análise de erros, Divisão Matemática. E-mail de contato: bruna.prane@ifes.edu.br.

Dalessandro Soares Vianna é graduado em Ciência da Computação pela Universidade Federal Fluminense (UFF, 1996), mestre em Ciência da Computação pela UFF (1999) e doutor em Informática pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (2004). É professor adjunto da UFF. Atua como vice-diretor do Instituto de Ciência e Tecnologia da UFF (ICT/UFF). E é pesquisador no programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais (MESC/UFF), tendo como principais temas de pesquisa logística: Pesquisa Operacional, Metaheurística, inteligência computacional, programação paralela, programação matemática, otimização combinatória multiobjetivo e auxílio multicritério a decisão. E-mail de contato: dalessandrosoares@yahoo.com.br.

Edwin Benito Mitacc Meza é graduado em Engenharia Industrial pela Universidade de Lima (1997); mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (UFF, 2000) e em Computação Aplicada e Automação pela UFF (2001); e é doutor em Ciências da Computação pela UFF (2006). É professor adjunto da Universidade Federal Fluminense e atua como diretor do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT/UFF). ademais, é membro do programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais (MESC/UFF), tendo como principais temas: pesquisa logística, pesquisa operacional, metaheurística, inteligência computacional, simulação computacional, programação matemática e auxílio multicritério a decisão. E-mail de contato: emitacc@id.uff.br.

Fabiano Pereira Corrêa é estudante do curso de graduação em Engenharia de Produção, 10º semestre, pela INSTITUIÇÃO Universidade do Estado do Pará. Atualmente é estagiário na empresa Magalhães & Cumino LTDA – EPP. E desenvolve pesquisa na área de Logística com ênfase em Arranjo Físico. E-mail de contato: fabiano_pcorrea@hotmail.com.

Felipe Corrêa Veloso dos Santos é graduado em Licenciatura em Física pelo Instituto de Educação e Tecnologia da Bahia (2015) e em Tecnologia em Irrigação e Drenagem pelo Centro Federal de Educação Tecnológica Urutaí – GO (2008). É mestre (2016) e doutor

(2011) em Solo e Água pela Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás. Atua como professor assistente na Escola de Engenharia da Pontifícia Universidade Católica de Goiás e como professor titular na Faculdade Metropolitana de Anápolis. Também é colaborador do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás e tem interesse nas áreas de mecânica dos fluidos, climatologia física, modelagem de recursos hídricos, hidrologia estatística, estatística matemática, geoestatística. E-mail de contato: felipevsantos@hotmail.com.

Iara Tammela é graduada em Engenharia Mecânica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ, 1999), mestre em Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional pela Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ (2004) e doutora em Engenharia de Produção também pela COPPE/UFRJ (2009). É professora do curso de Engenharia de Produção da UFF de Rio das Ostras, onde é a atual Coordenadora do Mestrado Profissional em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais. Tem experiência na área de Engenharia de Produção, com ênfase em Pesquisa Operacional, atuando principalmente nos seguintes temas: gestão de operações, logística, vantagem competitiva, TBC e operações ágeis e responsiva. E-mail de contato: iaratammela@vm.uff.br.

José Elmo de Menezes é graduado em Licenciatura em Matemática pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp-1993), mestre em Matemática pela Universidade de Brasília (UnB-1998) e doutor em Estatística pela Universidade de São Paulo (USP-2005). Atualmente é professor adjunto da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO) e professor do Instituto Federal de Goiás (IFGO) *campus* Inhumas. Tem experiência na área de Matemática Aplicada e Probabilidade Aplicada, com ênfase em Teoria da Confiabilidade e Análise de Sobrevivência, atuando principalmente nos seguintes temas: processos estocásticos, *compensator process*, *martingales*, *reliability importance measure* e algoritmo. E-mail de contato: jelmo@ucg.br.

João Flávio de Freitas Almeida é graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Minas Gerais (2006), mestre (2009) e doutor em Engenharia de Produção pela UFMG (2015). Atualmente, é professor de Engenharia de Produção na UFMG e atuou como professor no IFMG, como engenheiro na Vale, na Usiminas, em empresas de eletroeletrônicos, de móveis e de bebedouros, entre outros. Tem experiência em otimização e simulação nos setores industriais e de serviço. E-mail de contato: joao.flavio@dep.ufmg.br.

Lauro Chagas e Sá é licenciado em Matemática pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes, 2014), especialista em Tecnologia Educacional pelo Instituto Superior de Educação de Afonso Cláudio (2015) e mestre em Educação em Ciências e Matemática pelo Ifes (2016). É professor efetivo do Ifes, atuando como docente de cursos técnicos e superiores do *campus* Viana. Lidera o Grupo de Pesquisa Educação Matemática e Educação Profissional – EMEP. Tem experiência na área de Educação Matemática, atuando principalmente nos seguintes temas: Teoria de Grafos, Educação Profissional e História da Matemática. E-mail de contato: lauro.sa@ifes.edu.br.

Leidimara Scheffer Favero é técnica em estradas pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes, 2012) e graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes, 2017). Atualmente está cursando pós-graduação em Gestão de Projetos na USP e Pós Graduação em Gestão Estratégica de Processo de Negócio na PUC-MG. Atua como Técnica Projetista na Vale S.A.. E-mail de contato: leidischeffer@gmail.com.

Lidiane Borges Silverio é graduada em Engenharia de Produção pela Universidade Federal Fluminense (2009), especialisata em Engenharia de Inspeção e Manutenção na Indústria do Petróleo pela Universidade Católica de Petrópolis (2014) e mestre em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais, com ênfase em Pesquisa Operacional e Simulação pela Universidade Federal Fluminense (UFF,2016). Atua como Engenheira de Produção em empresa do setor de petróleo na área de Planejamento de Manutenção. Tem experiência na área de Pesquisa Operacional, Gestão de Estoques e Sobres-

salentes e Previsão de Demandas. E-mail de contato: lidi.silverio@gmail.com.

Lucas de Barros Pimenta é graduado em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF, 2008); especialista em Métodos Estatísticos Computacionais pela UFJF (2010), em MBA em Gestão Empresarial pela Fundação Getúlio Vargas (2010), em Engenharia Ferroviária pela Faculdade Brasileira UNIVIX (2011); e mestre em Engenharia Civil (Área de Transportes) pela Universidade Federal do Espírito Santo (2018). Atua como Supervisor de Operações Ferroviárias da Vale S.A. E-mail de contato: lucas.barrospimenta@gmail.com.

Luiz Thiago Monteiro de Oliveira é estudante do curso de graduação em Engenharia de Produção, 10º semestre, pela Universidade do Estado do Pará. Atua como estagiário na empresa FACEPA – Fábrica de Papel da Amazônia S.A. Desenvolve pesquisa na área de Manutenção Industrial com ênfase em Diagnóstico e Otimização. E-mail de contato: luizthiagoengprod@gmail.com.

Marcos Alexandre Guimarães da Silva é graduado em Engenharia Ambiental pela Faculdade Araguaia/GO (2016) e sócio fundador da WorldGeo Engenharia e Consultoria Ambiental, atuando principalmente nas seguintes áreas: avaliação de impactos ambientais, planejamento ambiental, recuperação de áreas degradadas e contaminadas, geoprocessamento, balanço hídrico, hidrologia estatística e hidrometeorologia. E-mail de contato: marcosalexandre2608@hotmail.com.

Nathan José Mota Garcia é graduando em Engenharia de Produção pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (2017) e cursa Técnico em Segurança do Trabalho pelo Instituto Federal Sul de Minas (2018). E-mail de contato: nathan094@hotmail.com.

Patrícia Costa Louzada é graduada em Tecnologia em Metalurgia e Materiais pelo Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes, 2008) e em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes, 2010). Atua desde 2010 como Coordenadora Técnica de Projetos

relacionados a Infraestrutura de Transportes junto à IM Engenharia Ltda, destacando-se o gerenciamento de diversos projetos ferroviários para as principais concessionárias de ferrovia do Brasil. E-mail de contato: patylouzada@hotmail.com.

Paulo Henrique dos Santos é tecnólogo em Logística pelo Instituto Federal de Goiás (IFG, 2014), especialista em Docência Universitária pela Faculdade Católica de Anápolis e em Logística Empresarial pela FACEL/PR (2017), mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela PUC/GO, com ênfase em Gestão de Operações e Logística. Atua como Professor EBTT no Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), pesquisa as relações interorganizacionais, especificamente as Redes de Cooperação Empresariais (RCEs), em parceria com a universidade UNISINOS/RS. Tem experiência de sete anos na área de Logística voltada para análise de transportes e estoque. E-mail de contato: paulo.santos@ifes.edu.br.

Robson Malacarne é bacharel em Administração pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes, 2004), especialista em Gestão de Pessoas pela Ufes (2005) e em Adolescência e Juventudes no mundo contemporâneo pela Faculdade Jesuíta de Filosofia e Tecnologia (FAJE, 2008); mestre em Administração na Fucape-ES (2010); e doutor em Administração pela Mackenzie (2015). É professor efetivo do Instituto Federal do Espírito Santo (Ifes), *campus* Viana e coordenador dos Projetos de Extensão Cine Clube Inova Jovem e Espaço Empreendedor. Além disso, é associado à Agência de Desenvolvimento Social Jovem – ADESJOVEM e ao Observatório Capixaba de Juventude, desenvolvendo projetos de empreendedorismo, audiovisual, arte, cultura, inovação e desenvolvimento local. E-mail de contato: robson.malacarne@ifes.edu.br.

Rodrigo de Alvarenga Rosa é graduado em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Espírito Santo (Ufes, 1989), mestre em Informática (Roteirização de Veículos) pela Ufes (1996), doutor em Engenharia Elétrica (Planejamento Portuário) pela Ufes (2006) e pós-doutor em Engenharia de Transportes (PET) na COPPE – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ, 2015). Atua como professor

adjunto no Depto. Eng. Produção da Ufes; professor permanente do Mestrado de Engenharia Civil (Ufes) - Área de Transportes; e professor permanente do Mestrado Profissional de Gestão Pública (Ufes). Trabalhou em grandes empresas de logística e de transporte (portos e ferrovias). E é pesquisador de modelos matemáticos aplicados à: portos, ferrovias, localização e roteirização de veículos. E-mail de contato: rodrigo.a.rosa@ufes.br.

Romenique José Avelar é graduado em Bacharelado em Engenharia de Produção pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia De Minas Gerais (IFMG, 2016). E-mail de contato: romeniqueavelar@yahoo.com.br.

Solange da Silva é graduada em Ciências - Habilitação em Matemática pela Universidade Católica de Goiás (PUC/GO, 1988), especialista em Ciência da Computação pela PUC/GO (1995), mestre em Engenharia Elétrica e de Computação pela Universidade Federal de Goiás (UFG, 2000) e doutora em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU, 2005). Atualmente, é professora adjunta da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, na Escola de Ciências Exatas e de Computação. Além da graduação, também orienta dissertações no Programa de Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas da PUC/GO. Tem experiência na área de Redes de Computadores, tecnologia da informação (TI), telecomunicações e tecnologia RFID. E-mail de contato: solansilva.ucg@gmail.com.

Thiago Moura de Moraes é graduado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás (2015) e mestre em Engenharia de Produção e Sistemas pela PUC/GO (2018) com ênfase em climatologia, em modelagem estatística de recursos hídricos e em geoestatística. É membro do grupo de pesquisa da PUC/GO que avalia eventos climáticos extremos na cidade de Goiânia/Goiás. Atua na construção civil no planejamento e no controle de obras oferecendo soluções para melhoria da produtividade. Também atua na infraestrutura urbana na elaboração e na revisão de projetos de pavimentação e de drenagem fluvial. E-mail de contato: eng.thiagomoura@gmail.com.

Tiago Rodrigues da Costa é graduando em Bacharelado em Engenharia de Produção pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG, 2017). E-mail de contato: tiago-rodricosta@gmail.com.

Túlio Kennedy Oliveira Gaipo é graduando em Bacharelado em Engenharia de Produção pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG, 2017), cursa Técnico em Logística pelo Instituto Federal Sul de Minas (2018) e é técnico em Meio Ambiente pelo CECON rede de ensino (2010). E-mail de contato: tkog.gol@hotmail.com.

Walter Filizola da Silva Neto é graduando em Engenharia de Produção, 10º semestre, pela Universidade do Estado do Pará. Atua como estagiário na empresa FACEPA- Fábrica de Papel da Amazônia S.A. Desenvolve pesquisa na área de Logística com ênfase em Arranjo Físico. E-mail de contato: wfilizola@gmail.com.

Yvelyne Bianca Iunes Santos é graduada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Pará (UFPA, 1995), mestre em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC/RJ, 1998) e doutora em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia pelo Instituto de Tecnologia da UFPA (2012). Atua como professora da Universidade do Estado do Pará (UEPA) nos cursos de Engenharia de Produção, Engenharia Ambiental e Tecnologia de Alimentos. Membro do Comitê Científico Interno da UEPA. Membro do Grupo de Pesquisa Núcleo de Pesquisa Aplicada ao Desenvolvimento Regional (NUPAD) e do Grupo Gestão de Sistemas Logísticos e de Sistemas Produtivos para o Desenvolvimento Regional. Tem experiência na área de Pesquisa Operacional, Planejamento e Controle da Produção e Sustentabilidade, com ênfase em Otimização de Recursos Produtivos. E-mail de contato: yvelyne@uepa.br.

CAPÍTULO 1

ENSINO DE LOGÍSTICA NUMA PERSPECTIVA INTERDISCIPLINAR: CONTRIBUIÇÕES DA MODELAGEM MATEMÁTICA

**Robson Malacarne
Lauro Chagas e Sá
Bruna Zution Dalle Prane**

1. Introdução

O Ensino da logística, ao longo dos anos, vem buscando preparar os profissionais para gerenciar a cadeia de suprimentos de modo a disponibilizar “produtos com qualidade, baixo custo e no momento oportuno para ser utilizado de acordo com as necessidades do consumidor” (BORNIA; LORANDI; ALBERTON, 2003, p.1). Nesse sentido, e de acordo com o Catálogo Nacional de Cursos Superiores de Tecnologia (BRASIL, 2016), um graduado em Logística pode ter como campo de atuação: distribuidoras e centros de distribuição; empresas de encomendas; indústria; comércio e serviços; portos; aeroportos; terminais de transporte e transportadoras; e institutos e centros de pesquisa. Assim, para que a logística atue de forma integrada e com processos que possam ser considerados de qualidade global, faz-se necessário o uso de ferramentas gerenciais para monitorar

o resultado em todas as etapas da cadeia logística. Segundo Bornaia, Lorandi e Alberton (2003, p.1),

A fase atual da logística, decorrente das mudanças nas necessidades do mercado, tem exigido uma estrutura integrada no canal de distribuição, desde a origem da matéria-prima até o consumidor final, o que está se denominando de gestão da cadeia de suprimentos ou SCM do inglês *Supply Chain Management*.

Neste sentido, este estudo busca analisar experiências da disciplina “Pesquisa Operacional Aplicada à Logística”, do Curso Superior de Tecnologia em Logística do Ifes *campus* Viana. Discutiremos como esse componente curricular tem estimulado os estudantes a realizarem estudos de caso e a aplicarem métodos matemáticos como ferramentas gerenciais para resolverem problemas logísticos. Para tanto, detalhamos a importância do uso de ferramentas gerenciais na logística, explicamos a metodologia utilizada na pesquisa e, logo depois, relatamos os estudos realizados pelos graduandos.

2. O ensino de Logística a partir das ferramentas gerenciais

As organizações multinacionais desenvolveram técnicas de administração, com intuito de permitir aos dirigentes controlar de maneira eficaz as unidades organizacionais localizadas nos diferentes países (PAGÈS *et al.*, 1987). Tais técnicas se aliam às práticas de gestão de pessoas que buscam a sedução e a fidelidade do trabalhador às regras das empresas (ENRIQUEZ, 2009), o que contribui para que os gerentes controlem as unidades organizacionais sem a necessidade de sua presença constante.

Motta *et al.* (2008, p. 89) afirmam que as organizações são “instâncias de produção de bens, de conhecimentos etc.; bem como instâncias de controle, a serviço de sistemas sociais maiores”. Neste contexto, as ferramentas gerenciais ganham importância por auxiliarem nesse controle, como o BSC, o Gerenciamento da Qualidade

Total (TQM), entre outros sistemas de regras. O *benchmarking*, por sua vez, pode ser compreendido dentro de uma perspectiva de melhoria de desempenho, na medida em que essa ferramenta é utilizada para aplicar melhorias nos processos operacionais e influenciar o desempenho organizacional (FRANCIS; HOLLOWAY, 2002).

A popularização de ferramentas gerenciais de controle faz parte do que Paula e Wood Jr. (2008, p. 129) definiram como “homogeneização de conceitos e práticas”, na qual “o mundo é controlável e todos os problemas do mundo podem ser resolvidos pela administração”. Pode-se citar, como exemplo, o caso da TQM: Sterman *et al.* (1997) reconhecem que essa ferramenta gerencial representa um avanço significativo para a aprendizagem organizacional, contudo, ela possui limitações, já que pressupõe que as causas dos defeitos de um determinado processo podem ser resolvidas sequencial e independente de outros processos, ou seja, o BSC assume que o mundo pode ser decomposto em causas independentes que geram efeitos independentes (AKKERMANS; OORSCHOT, 2005).

No entanto, percebe-se que, ao discutir a qualidade do BSC desenvolvido e a quantidade de indicadores necessários para a introdução de um painel de controle que subsidia a ação gerencial (KLEIJNEN; SMITS, 2003), esses autores enfatizam as questões objetivas, o que gera impacto na gestão de pessoas por não se levar em consideração as questões subjetivas (DAVEL; VERGARA, 2009). Verifica-se, portanto, que não há preocupação em como o ator organizacional lidará com o conflito entre o prescrito pela instituição e o vivido no cotidiano (ROULEAU, 2009).

Johnston *et al.* (2002) reconhecem o crescimento do uso do BSC nas corporações, mas faz crítica sobre o tempo destinado à alimentação dos sistemas de medição pelos gestores em vez de focar na tomada de decisões e na ação. O autor realizou uma pesquisa em seis instituições que utilizam sistema de gestão de desempenho e identificou maneiras que elas encontraram para dedicar maior tempo na melhoria do sistema do que na alimentação de informações. Uma alternativa encontrada foi o uso de medidas de desempenho

que apoiam a melhoria e o desempenho do sistema, e não simplesmente o controle e o acompanhamento das metas, o que resultou no maior comprometimento dos funcionários, já que suas ações se focaram nas melhorias e não apenas na manutenção do sistema. Lipe e Salterio (2000) demonstram a importância de integrar os indicadores de cada unidade de negócio à estratégia organizacional para alcançar os propósitos da organização.

De certa forma, Johnston *et al.* (2002) e Lipe e Salterio (2000) vão ao encontro da proposta de Becker *et al.* (2001) para a gestão de pessoas: ênfase na mensuração e na criação de indicadores alinhados à estratégia da empresa. Este modo de pensar representa a aplicação do paradigma que acredita que tudo deve ser mensurado e controlado na organização (PAULA; WOOD JR, 2008). Destaca-se que, este modo de pensar também se revela no espaço educacional, com o incentivo ao uso da modelagem matemática para solução de problemas logísticos. Assim, neste capítulo, busca-se compreender a experiência da disciplina “Pesquisa Operacional Aplicada à Logística” do Curso Superior de Tecnologia em Logística, ofertada no Ifes *campus* Viana.

3. Modelagem Matemática em experiências de ensino

Quando falamos de Modelagem Matemática, neste momento, não estamos nos restringindo a pensá-la apenas como sendo “a arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real” (BASSANEZI, 2009, p. 16). Nossa ideia de modelagem vai para além de trabalhar apenas os conceitos matemáticos. Ao desenvolver esse tipo de atividade em sala, vemos um “um ambiente de aprendizagem no qual os alunos são convidados a indagar e/ou investigar, por meio da matemática, situações oriundas de outras áreas da realidade (BARBOSA, 2001a, p. 6). Apesar desta visão mais ampla, não deixamos de seguir as etapas da Modelagem que, em linhas gerais, consiste em:

1) determinar a situação; 2) simplificar as hipóteses dessa situação; 3) resolver o problema matemático decorrente; 4) validar as soluções matemáticas de acordo com a questão real e finalmente, 5) definir a tomada de decisão com base nos resultados (MEYER; CALDEIRA; MALHEIROS, 2011, p. 28).

Ressaltamos que percebemos essas etapas não como estancques, mas sim como orientações para o professor desenvolver a atividade em sala de aula. Barbosa (2001b, p. 9) sugere as diferentes maneiras em que o professor pode introduzir uma atividade de modelagem no contexto escolar:

	<i>Caso 1</i>	<i>Caso 2</i>	<i>Caso 3</i>
<i>Elaboração da situação-problema</i>	professor	professor	professor/aluno
<i>Simplificação</i>	professor	professor/aluno	professor/aluno
<i>Dados qualitativos e quantitativos</i>	professor	professor/aluno	professor/aluno
<i>Resolução</i>	professor/aluno	professor/aluno	professor/aluno

Figura 1 – O aluno e o professor nos casos de Modelagem. Fonte: BARBOSA, 2001a.

No trabalho pedagógico realizado, optamos pelo segundo caso, em que o professor apresenta um problema que deseja resolver, conforme exposto na seção 5 deste capítulo. Essa escolha se justifica porque queríamos elaborar uma situação que tivesse relação com a realidade profissional dos alunos e que, do mesmo modo, tivesse como uma das possibilidades de resolução as ideias do Problema do Caixeiro Viajante (PCV)¹.

1 O PCV tem sido utilizado no experimento de diversos métodos de otimização por ser de fácil descrição e compreensão, mas de grande dificuldade de solução (TAUFER; PEREIRA, 2011). Ele consiste em um problema de roteamento que lida com passeios sobre os vértices de um grafo, que podem representar pontos de demanda, cidades, postos de trabalho, depósitos, etc.

Desenvolver atividades nessa perspectiva diferencia do paradigma do exercício, tradicional no sistema educacional, que “presupõe uma organização da aula de Matemática na qual o professor expõe o conteúdo, dá alguns exemplos, os alunos fazem exercícios e o professor verifica se os exercícios estão corretos” (ARAÚJO; *et al*, 2008, p. 12). Pelo contrário, as atividades propostas na disciplina permitiam diferentes maneiras de resolução, visto que também foi nosso objetivo ilustrar como os conteúdos desenvolvidos poderiam ser aplicados no contexto profissional e possibilitar a inter-relação com diferentes componentes curriculares do curso. Isso foi possível exatamente porque, ao trabalhar com atividades de modelagem, o professor atua como um mediador/orientador e pode proporcionar diferentes graus de liberdade que a atividade pode ter.

4. Percurso metodológico

Com o intuito de refletir sobre as experiências vivenciadas a partir da realização da modelagem matemática e do desenvolvimento de ferramentas gerenciais no ensino de Logística, foi realizado um estudo qualitativo (MERRIAM, 2002). A pesquisa qualitativa se justifica também pelo uso do ambiente natural como fonte de dados, no qual o pesquisador assume um papel fundamental neste processo, indo observar o fenômeno “no contexto em que ocorre e do qual faz parte” (GODOY, 1995).

Os sujeitos de pesquisa foram vinte e um estudantes do Curso Superior de Tecnologia em Logística do Ifes/Viana, que ingressaram em agosto de 2015 e que, na ocasião da oferta da disciplina, cursavam o quarto e penúltimo módulo do curso. Eram jovens de 22 a 29 anos, com profissões plurais e que buscavam qualificação na área de logística. A definição dos sujeitos de pesquisa teve como critérios básicos: participação na disciplina e desenvolvimento de estudos de caso utilizando modelagem matemática como ferramenta gerencial.

A disciplina de Pesquisa Operacional Aplicada à Logística possuía carga horária de 30h e tinha como principal objetivo resolver

problemas logísticos por meio de modelagem matemática, utilizando técnicas de Pesquisa Operacional. Sua ementa compreendia:

Origem, conceitos, objetivos e aplicações da Pesquisa Operacional. Programação linear: características, formulações e resoluções de modelos e aplicações à logística. Problemas de percurso em grafos, problemas de alocação e análise de fluxo em redes (IFES, 2016).

Para a oferta em 2017/1, a disciplina foi planejada com aulas expositivas e dialogadas, palestras, resolução e correção de exercícios, estudos de caso, relatórios, leitura crítica de artigos e seminários temáticos. Para os estudos de caso, fizemos uso de tecnologias da informação e comunicação (TIC), como *softwares* específicos e planilhas eletrônicas, a fim de realizar simulações de atividades no campo da Logística. Ao todo, foram efetivados quatro estudos de caso: o problema de entrega de urnas para eleição de Reitor, a criação de uma rede de distribuição de malotes institucionais, o planejamento do processo de *crossdocking* numa central de distribuição e a organização de funcionários nas filiais de uma indústria. Cabe citar que todos esses foram analisados à luz da Teoria de Grafos.

A análise dos dados deste capítulo ocorreu a partir dos pressupostos teóricos, dos resultados da revisão bibliográfica e das interpretações da pesquisa. Os dados qualitativos obtidos por meio da transcrição das entrevistas foram analisados, pelo processo de categorização e codificação, inspirados na proposta de análise textual de Flores (1994). O critério adotado para desenvolver esse processo foi o tema que resultou em metacategorias, obtidas por meio de uma análise a priori, com base no referencial teórico. Deste modo, o tratamento dos dados foi desenvolvido com foco em duas categorias, uma focada nas ferramentas gerenciais utilizadas nos estudos de casos e outra com enfoque no processo de modelagem matemática realizada pelos estudantes.

No primeiro momento, buscamos problematizar quais ferramentas gerenciais são utilizadas nos casos pesquisados pelos alunos

a partir da discussão proposta por Lorenzoni (2013). Em seguida, discutimos o uso de métodos matemáticos como ferramentas gerenciais nas experiências estudadas na disciplina Pesquisa Operacional. Em ambos os casos, o enfoque foi apontar contribuições para a formação profissional dos estudantes a partir dos estudos de caso desenvolvidos na disciplina.

Na experiência didática que detalharemos neste capítulo, adotamos como plano de fundo o primeiro estudo de caso realizado, que tratava processo de consulta para os cargos de reitor e diretores-gerais de 17 *campi* do Ifes. Admitimos que o Tribunal Regional Eleitoral do Espírito Santo (TRE-ES) cederia algumas urnas eletrônicas² para a eleição dos gestores do Ifes, o que aconteceria em 1º de junho de 2017, sendo que todas as urnas já deveriam estar nos devidos *campi* até o horário de almoço do dia anterior à eleição. Adicionalmente, consideramos que, além das urnas eletrônicas, a Justiça Eleitoral do Estado disponibilizaria duas equipes para orientar as Comissões Eleitorais Locais sobre procedimentos necessários à realização do pleito, em uma espécie de capacitação curta, com duração de 2 horas.

Neste estudo de caso, o transporte das urnas e das equipes seria de responsabilidade do Ifes, que já havia reservado para o serviço dois veículos modelo Hilux SW4, com motorista. A tarefa consistia, portanto, em distribuir as urnas eletrônicas nos *campi*, do modo mais econômico possível, e apresentar um cronograma de entrega. Os estudantes deveriam também evidenciar o horário de chegada em cada *campus*, de forma que as Comissões Eleitorais Locais pudessem se organizar para a capacitação com os funcionários do TRE-ES.

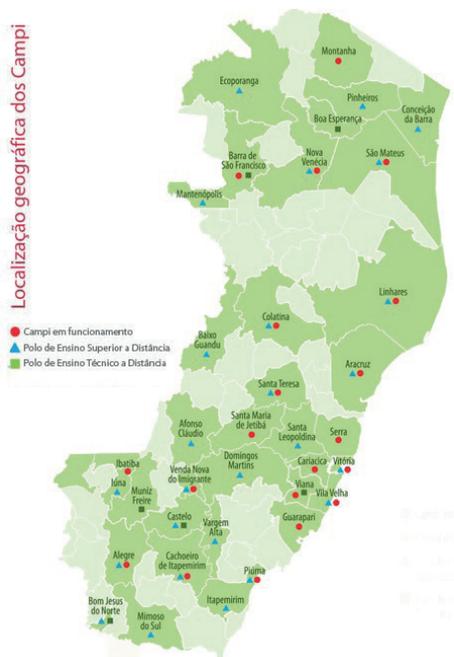
5. Reflexões acerca da modelagem matemática

Para resolver o problema de entrega das urnas, os alunos começaram verificando as especificações apresentadas no texto, que

² Entidades e instituições de ensino podem, de fato, solicitar à Justiça Eleitoral a cessão, por empréstimo, de urnas eletrônicas ou de urnas de lona, dependendo do caso, conforme a regulamentação existente.

eram: o tempo de treinamento com duração de 2 horas em cada um dos 17 *campi* definidos, a data estabelecida para a realização da eleição e a meta de entrega das urnas até o dia anterior à eleição. Depois, os estudantes identificaram no mapa os *campi* onde deveriam ser entregues as urnas, incluindo a unidade de Itapina que não estava definida no mapa retirado da internet. Um grupo, nesta etapa, considerou a participação dos alunos de cursos à distância e informou que esses alunos deveriam se dirigir aos *campi* mais próximos para participarem do processo eleitoral.

Figura 2 – Localização geográfica dos *campi* do Ifes.

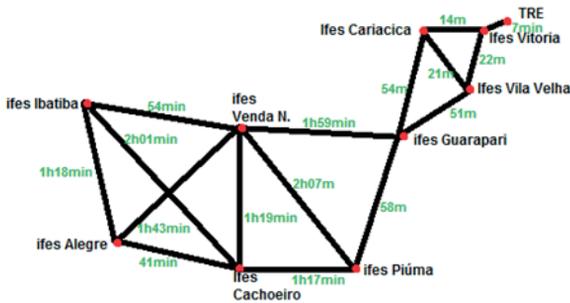


Fonte: Assessoria de Comunicação Social do Ifes, 2017.

A partir disso, todos os grupos dividiram os *campi* em dois blocos, uma vez que seriam disponibilizados dois carros e duas equipes para realização das entregas e dos treinamentos. Dessa

forma, ficou definido que haveria uma rota em direção ao norte do estado e outra que seguiria em direção ao sul capixaba. Neste momento, cada grupo construiu um grafo $G = (V, A)$ onde $V = \{1, \dots, n\}$ era o conjunto de nós, $A = \{1, \dots, m\}$ o conjunto de arestas de G e t_{ij} os a duração da viagem entre as cidades associadas aos vértices i e j , que, por sua vez, seria definida a partir do *Google Maps*. Um dos modelos produzidos pelos estudantes é apresentado a seguir.

Figura 3 – Grafo que modela o grupo de *campi* do sul capixaba.



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

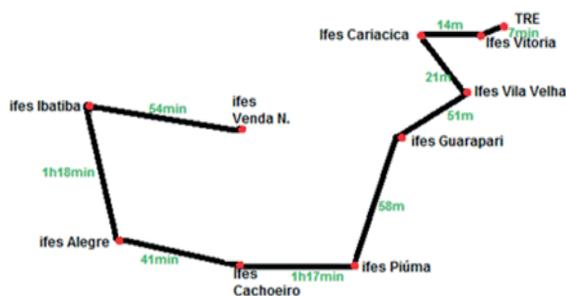
Foram definidos vários caminhos possíveis de serem seguidos, a partir dos quais seriam realizados os cálculos para encontrar a rota mais curta. Cabe ressaltar, neste ponto, que o problema clássico do caixeiro viajante consiste em localizar o menor ciclo hamiltoniano do grafo G (BOAVENTURA NETTO, 2006; TAUFER; PEREIRA, 2011). Ou seja, pretende-se visitar todas as cidades, passando apenas uma vez em cada, e retornar ao ponto de origem. No entanto, por se tratar de uma entrega de urnas com posterior retirada, o caminho buscado pelos estudantes deveria ser feito de forma a minimizar a distância total percorrida, mas sem a necessidade de encerrar no ponto de partida.

Uma forma de resolver os problemas do tipo PCV seria simplesmente enumerar todas as soluções possíveis e determinar aquela de menor custo. No entanto, o número total de rotas executáveis

para o caso de n campi é $(n-1)(n-2)...1$, ou simplesmente, $(n-1)!$. Na maioria dos casos, esse método torna-se impraticável, pois existe um grande número de soluções praticáveis e o tempo de processamento do algoritmo poderia levar dias, meses ou até anos (TAUFER; PEREIRA, 2011).

Como nosso objetivo principal era que os estudantes pudessem reconhecer situações de aplicação de grafos no contexto da Logística, permitimos que o problema fosse resolvido pelo algoritmo do vizinho mais próximo, que é fácil de implementar e executar rapidamente, apesar de, às vezes, perder rotas mais curtas, devido à sua natureza gulosa (BOAVENTURA NETTO, 2006).

Figura 4 – Rota traçada para entrega das urnas no sul do estado.



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

No que toca efetivamente o processo de reconhecimento das situações do contexto da Logística, foi interessante observar que enquanto alguns grupos decidiram que não considerariam fatores externos, como o trânsito, as pausas nos trajetos para descansar, as necessidades fisiológicas e os imprevistos que pudessem atrasar o percurso, outros estipularam um intervalo de 15 a 25 minutos entre as viagens. Unanimemente considerou-se também parada para almoço e lanche. Adicionalmente, alguns grupos chegaram a acessar o site de revistas especializadas em transporte para analisar o consumo médio do veículo que levaria a urna.

No contexto apresentado acima, percebemos que a modelagem matemática apresenta-se como importante metodologia para articulação entre a formação básica e a formação profissional dos educandos. Em experiência similar, Freitas (2013), ao investigar o processo de matematização em um projeto de modelagem desenvolvido por um grupo de alunos do ensino técnico integrado ao médio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG), verificou que o ambiente construído contou, de forma indireta, com as concepções trazidas pelas disciplinas do núcleo profissional. Em nosso caso, além dos conteúdos matemáticos relativos à Teoria de Grafos, durante a realização do projeto de matemática, também notamos que os alunos retomaram diversas disciplinas de formação específica. Procuramos, dessa forma, identificar quais disciplinas foram retomadas e como se deu esse processo durante os estudos de caso. A partir das respostas dadas pelos estudantes, por meio de um formulário eletrônico, sistematizamos o quadro seguinte.

Quadro 1 – Relações estabelecidas entre a pesquisa operacional e diferentes componentes curriculares do Curso Superior de Tecnologia em Logística, ofertado no Ifes/Viana.

Componente curricular	Módulo do curso	Argumentos trazidos pelos alunos
Fundamentos de Logística	2º	“para administração dos tempos de entregas dos produtos e encomendas”, “porque para resolver os estudos de casos propostos é necessário saber um pouco de logística para saber como é importante a entrega e distribuição das mercadorias”, “Esta disciplina contribuiu para que tivéssemos uma visão dos componentes logísticos e uma ideia do funcionamento de um armazém, por exemplo, o que facilitou a interpretação dos estudos de caso”

Marketing Logístico	2°	“Devido falar sobre as estratégias de uma boa prestação de serviço sendo eficiente”
Gestão de Custos Logísticos	3°	“porque usamos o tempo para economizar dinheiro”, “principalmente no trabalho das Docas, por que geralmente os atrasos e os carros dedicados oneram muito as operações causando prejuízo”, “a disciplina contribuiu para que compreendêssemos os principais custos logísticos, como por exemplo, o combustível, o que nos fez levar o fator custo em consideração no decorrer da resolução dos problemas”
Tecnologia de informação Aplicada à Logística	3°	“porque usamos a internet e o computador para resolução de rotas, usamos a internet para realização das rotas”
Estratégias e Processos Gerenciais	4°	“porque foi preciso ter diversas estratégias para definir as rotas e caminhos mais viáveis para se chegar até o destino esperado”
Técnicas de Negociação	4°	“porque foram usadas técnicas para negociar tempo de chegadas e partidas”, “esta disciplina é fundamental para resolução dos estudos de caso, pois, eles foram realizados em grupo e cada membro defendeu suas ideias para resolução de cada caso, onde houve a necessidade de utilizar as técnicas de negociação para que o objetivo final fosse alcançado”

Transportes e Seguros	4°	“porque usamos veículos”, “foi essencial para entender o tipo de veículo que utilizamos para realizar entregas e como a roteirização é importante para reduzir os custos”, “Foi utilizado no trabalho da distribuição das urna e nos ajudou na tomada de decisão principalmente sobre qual veículo usar para executar a tarefa apresentada”, “em relação para a escolha da melhor e menor rota para as entregas, escolha do modal, visando redução de custos”, “foi levado em consideração os meios de transporte utilizados”
Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos	4°	“foi importante porque conseguimos definir e gerenciar toda a cadeia de suprimentos da rota para prever futuros erros e satisfazer o cliente final ou seja resolver o problema proposto nos estudos de caso”, “a necessidade de toda a integração da cadeia para alcançar um resultado final satisfatório”, “esta matéria foi importante para a organização e distribuição. Por exemplo, no estudo de caso da distribuição dos malotes”

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

Observamos, no quadro anterior, que os conteúdos do núcleo profissional envolvidos do processo de modelagem foram apresentados aos alunos em todos os quatro módulos de curso. Assim, ao retomarmos os conteúdos matemáticos e profissionais explorados, acreditamos ter desenvolvido um trabalho interdisciplinar. Isto é, percebemos como esta abordagem favoreceu a compreensão dos conceitos pelos alunos por conta da “reconstituição da totalidade pela relação entre os conceitos originados a partir de distintos recortes da realizada; isto é, dos diversos campos da ciência representados em disciplinas” (RAMOS, 2005, p.116).

A partir do exposto por Ramos (2005), percebemos, então, que “conhecimentos gerais e conhecimentos profissionais se distinguem metodologicamente e em suas finalidades situadas historicamente; porém, epistemologicamente, esses conteúdos formam uma unidade” (RAMOS, 2005, p. 120). Adicionalmente, uma questão importante que deve ser destacada é “a forma como cada área utilizou seus ‘saberes’ nessa primeira aproximação, principalmente quando esse ‘saberes’ aponta para o desenvolvimento de projetos de modelagem” (FREITAS, 2016, p. 9).

6. Aprendizagens discentes na disciplina “Pesquisa Operacional”

Uma das preocupações dos professores do curso durante o período da pesquisa sobre a aplicação de modelos na logística era a de desenvolver iniciativas que pudessem aprimorar as práticas de gestão na logística, com a participação dos jovens a serem beneficiados na disciplina Pesquisa Operacional. Observa-se, portanto, que a competência a ser apreendida, nos projetos, não era considerada um atributo prévio, mas algo a ser desenvolvido no caminho, a partir da prática, das dificuldades e das experiências enfrentadas no percurso do projeto. Neste sentido, os discentes foram incentivados a criar e a desenvolver suas ideias, buscando modos de inserir a perspectiva da gestão de uma forma crítica no processo da logística.

Como exemplo desta perspectiva, pode-se citar o processo de aprendizagem vivenciado na referida disciplina, a qual procurou analisar os diversos conhecimentos do curso superior de Tecnologia em Logística, de modo a encontrar soluções integradas para os problemas logísticos. Diante do exposto, abaixo destacamos a avaliação dos alunos sobre a disciplina e as aprendizagens desenvolvidas:

[...] com esta matéria conseguimos resolver problemas propostos que puderam abrir nossa visão de conhecimento quanto a pesquisa operacional, estabelecendo relações entre variáveis para que pudéssemos minimizar movimentos e maximizar retornos, esta visão com certeza será importante na vida profissional dos que estiveram envolvidos na disciplina.

Pode-se compreender essa iniciativa dentro da discussão realizada por Elkjaer (2003) sobre aprendizagem social, o indivíduo foi considerado um sujeito que se desenvolve na interação com os outros. A estratégia de participação foi estimulada durante o processo, na medida em que o discente precisou se dedicar a refletir sobre um problema vivido no cenário de investigação, e, a partir disso, a realizar decisões sobre fatos, aprendizagens e dificuldades enfrentadas no percurso, apontando oportunidades e inovação e identificando lacunas que poderiam representar melhorias de eficiência e de eficácia.

Em meu entendimento a teoria de grafos [...] possibilita ao usuário uma esquematização de problemas difíceis de solucionar, com regras simples utilizadas por pessoas que estudaram essa teoria anteriormente.

Como o trabalho foi desenvolvido em equipe, o processo foi marcado por visões compartilhadas entre os integrantes, que precisaram encontrar respostas conjuntas diante das questões propostas. Entre as competências desenvolvidas nesse percurso, pode-se destacar a competência interpessoal que envolve as atitudes da liderança e da cooperação, além da competência estratégica, fortalecida nas decisões dos jovens e dos coordenadores sobre a viabilidade das ideias e as maneiras mais eficientes para realizá-las (WIEK; WITHY-COMBE; REDMAN, 2010).

ao meu ver, utilizamos estatística aplicada para analisar as opções e a montagem de tabelas, juntamente com a informática aplicada, devido aos problemas utilizarem conhecimentos de informática que aprendemos na matéria, como a utilização de *writer* e *calc*. Apesar de não utilizar para a resolução do problema, pois conseguimos solucionar a maior parte dos problemas com cálculos e intuição, os estudos de caso nos fez lembrar matérias como fundamentos da logística; estratégias e processos gerencias; transportes e seguros e gerenciamento da cadeia de suprimentos, devido aos estudos serem em relação à estes assuntos.

Nesse processo, os atores envolvidos desenvolveram a Competência Antecipatória, pois se dedicaram a identificar cenários a partir de visões compartilhadas sobre as ações que devem ser realizadas para promover melhorias de gestão na logística (WIEK; WITHYCOMBE; REDMAN, 2010). Neste sentido, a oportunidade do desenvolvimento de competências ocorre quando os envolvidos compreendem que a sua ação inovadora colabora para a solução de problemas concretos, que fazem parte do processo de gestão da cadeia de logística. A corresponsabilidade neste processo promove uma mudança na cultura dos atores, incentivando-os a agir diante da realidade complexa (LANS; BLOK; WESSELINK, 2013). A partir do momento em que os sujeitos envolvidos adquirem essa visão holística da realidade e desenvolvem a competência do pensamento sistêmico, reconhece-se com mais facilidade as oportunidades e definem-se melhor as decisões diante dos cenários identificados. Nesse sentido, a aprendizagem social experimentada nessas iniciativas mencionadas qualificam os sujeitos para serem protagonistas no processo de gestão da logística, na medida em que a educação voltada para a ação proporciona espaços críticos para o jovem colocar a sua ideia em prática, refletindo e agindo a partir das dificuldades encontradas (JACOBI; GRANJA; FRANCO, 2006).

7. Considerações finais

Neste capítulo, apresentamos que os sujeitos foram inseridos em contextos que favoreceram o desenvolvimento de competências, tais como o trabalho em equipe vivenciado na disciplina Pesquisa Operacional. Esse processo foi importante pois estimulou os alunos a atuarem de modo cooperativo, compartilhando visões na busca por soluções inovadoras no campo da gestão da cadeia logística. Isso se tornou possível devido às dinâmicas realizadas nas atividades, que provocaram o exercício da liderança e da cooperação na busca pelos objetivos. Neste processo, a tomada de decisões foi uma rotina, na qual se exercitou a competência estratégica, que é desenvolvida

por meio da análise da viabilidade das ideias e a eficiência ou não de sua aplicação. Essas questões foram possíveis em decorrência da metodologia de ensino que se buscou trabalhar em sala de aula, a saber, a Modelagem Matemática. Vimos nessa metodologia uma grande aliada para o trabalho pedagógico em cursos técnicos, isso porque o seu foco é trabalhar com problemas da realidade e do interesse do estudante, neste caso, buscamos problematizar uma realidade que os alunos encontrarão no seu âmbito profissional. Desenvolver atividades nesta perspectiva vai ao encontro do que se espera de um curso que considera o mundo do trabalho.

A competência do pensamento sistêmico e a competência antecipatória, por sua vez, também foram aprimoradas nos espaços dedicados ao planejamento e às discussões. Neste sentido, a capacidade de envolver diversos atores nos debates, proporcionou a oportunidade de compartilhar visões sobre as ações a serem realizadas diante da realidade complexa, o que favoreceu o desenvolvimento da competência normativa. Destaca-se, ainda, que, durante o processo, a competência da inovação também foi aprimorada, a qual foi estimulada pela ausência de modelos de soluções para as dificuldades vividas, fato que provocou os sujeitos a inovar e a criar alternativas para agir diante da rede de relações e interesses, manifestados durante o percurso da disciplina.

A análise dos dados no mostrou o quanto é fecundo o desenvolvimento da modelagem em cursos de formação profissional, não só porque os conteúdos da disciplina de Pesquisa Operacional foram abordados, mas também porque os alunos puderam utilizar conteúdos de outra disciplina para a resolução da atividade. Essa integração ficou mais evidente, pois a atividade foi desenvolvida com alunos que já tinham experiências de suas profissões e já tinham cursado quase todos os componentes curriculares previstos na matriz do curso. Por fim, gostaríamos de ressaltar que o desenvolvimento da modelagem é também frutífero para os primeiros semestres dos cursos técnicos, isso porque o professor pode trabalhar com

o primeiro caso proposto por Barbosa (2001b), em que, a partir de dados reais, pode haver uma resolução de um problema.

Referências

AKKERMANS, H. A.; OORSCHOT, K. E. V. Relevance Assumed: A Case Study of *Balanced Scorecard* Development Using System Dynamics **The Journal of the Operational Research Society**, v. 56, n. 8., agop. 931-941, 2005.

BARBOSA, J. C. **Modelagem matemática: concepções e experiências de futuros professores**. 2001. 253f. Tese (Doutorado em Educação Matemática) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, SP, 2001a.

_____. Modelagem na Educação Matemática: contribuições para o debate teórico. In: Reunião Anual da ANPED, 24., 2001, Caxambu. **Anais...** Rio Janeiro: ANPED, 2001b. p. 1- 30. 1 CD-ROM.

BASSANEZI, R. C.. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia**. 3ª ed. 1ª reimp. São Paulo: Contexto, 2009.

BOAVENTURA NETTO, P. O.. **Grafos: Teoria, Modelos e Algoritmos**. 4.ed. São Paulo: E. Blücher, 2006.

BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica. **Catálogo Nacional de Cursos Superiores de Tecnologia**. Brasília, DF: MEC/Setec, 2016. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/index.php?option=com_docman&view=download&alias=44501-cncst-2016-3edc-pdf&category_slug=junho-2016-pdf&Itemid=30192>. Acesso em 31 ago. 2017.

DAVEL, E.; VERGARA, S. C. **Gestão com Pessoas e Subjetividade**. São Paulo: Atlas, 2009.

ELKJAER, B. Social learning theory: learning as participation in social process. In: EASTERBY-SMITH, M., LYLES, M.A. (Ed.). **The Blackwell handbook of organizational learning and knowledge management**. Oxford: UK: Blackwell Publishing, 2003. p. 38-53.

ENRIQUEZ, E; Interioridade e organizações. In: DAVEL, E.; VERGARA, S. C.. **Gestão com Pessoas e Subjetividade**. São Paulo: Atlas, 2009.

FRANCIS, G.; HOLLOWAY, J. Beyond Comparisons-The Role for the Operational Researcher in Benchmarking. **The Journal of the Operational Research Society**, v. 53, n. 3, Part Special Issue: Performance Management, mar., 2002, p. 283-291.

FREITAS, W. S. de. **A Matematização crítica em projetos de modelagem**. Tese (Doutorado em Educação). Faculdade de Educação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

_____. O encontro entre as disciplinas da matemática e da área técnica no desenvolvimento de um projeto de modelagem matemática. In: Conferência Nacional sobre Modelagem na Educação Matemática, 9a. **Anais eletrônicos**. São Carlos, SP, 2015.

IFES. **Projeto do Curso Superior de Tecnologia em Logística**. Viana, 2016.

JOHNSTON, R. *et al.* 'Good Enough' Performance Measurement: A Trade-Off between Activity and Action. **The Journal of the Operational Research Society**, Vol. 53, No. 3, Performance Management, mar., 2002, p. 256-262.

- JOVCHELOVICTH, S.. Vivendo a vida com os outros: intersubjetividade, espaço público e Representações Sociais. In: GUARESHI, P. A.; JOVCHELOVITCH, S.. **Textos em Representações Sociais**. 8a Ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 1995.
- KLEIJNEN, J. P. C; SMITS, M. T.. Performance Metrics in Supply Chain Management **The Journal of the Operational Research Society**, v. 54, n. 5, mai., 2003, p. 507- 514.
- LANS, T.; BLOK, V.; WESSELINK, B.. Renate Wesselink Learning apart and together: towards an integrated competence framework for sustainable entrepreneurship in higher education. **Journal of Cleaner Production**, p 1-11, 2013.
- LIPE, M. G.; SALTERIO, S. E. The *Balanced Scorecard*: Judgmental Effects of Common and Unique Performance Measures. **The Accounting Review**, v. 75, n. 3. jul., 2000, p. 283-298.
- LORENZONI, L. L.. Aplicações de programação linear em empresas do Estado do Espírito Santo. In: SOUZA, M. A. V. F. de; MEDEIROS, R. L. (Org.). **Contribuições para a Engenharia de Produção em perspectivas**. 1 ed. Serra: Gráfica Formar, 2013, p. 112-125.
- MEYER, J. F. C. A; CALDEIRA, A. D; MALHEIROS, A. P. S. **Modelagem em educação matemática**. Belo Horizonte: Editora Autêntica, 2011.
- MOTTA, F. C. P.; VASCONCELOS, I. F. F. G de; WOOD JR, T. O novo sentido da liderança: controle social nas organizações. In: WOOD JR, T.. **Mudança Organizacional**. São Paulo: Atlas, 2008.
- PAGÈS, M. *et al.* **O Poder das Organizações**. São Paulo: Atlas, 1987.
- PAULA, A. P. P. de; WOOD JR, T.. Pop-management. In: WOOD JR, T.. **Mudança Organizacional**. São Paulo: Atlas, 2008.

ROULEAU, L; Emoção e Repertórios de gênero nas Organizações. In: DAVEL, E.; VERGARA, S. C.. **Gestão com Pessoas e Subjetividade**. São Paulo: Atlas, 2009.

STERMAN, J. D. Unanticipated Side Effects of Successful Quality Programs: Exploring a Paradox of Organizational Improvement. **Management Science**, v. 43, n. 4, Frontier Research in Manufacturing and Logistics, abr., 1997, p. 503-521.

RAMOS, M.. Possibilidades e desafios na organização do currículo integrado. In: FRIGOTTO, G.; CIAVATTA, M.; RAMOS, M. (orgs). **Ensino Médio Integrado: concepção e contradições**. São Paulo: Cortez, 2005.

ROULEAU, L; Emoção e Repertórios de gênero nas Organizações. In: DAVEL, E.; VERGARA, S. C.. **Gestão com Pessoas e Subjetividade**. São Paulo: Atlas, 2009.

TAUFER, F. S. G.; PEREIRA, E. C.. Aplicação do Problema do Caixeiro Viajante na otimização de roteiros. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXXI. **Anais eletrônicos**. Belo Horizonte, MG, 2011.

WIEK, A.; WITHYCOMBE, L; REDMAN, C. Key competencies in sustainability: a reference framework for academic program development. **Research System for Sustainability Science**, United Nations University, 2011.

CAPÍTULO 2

MODELO MATEMÁTICO PARA O PLANEJAMENTO DAS ATIVIDADES DE CARGA E DESCARGA DE VAGÕES EM UM TERMINAL FERROVIÁRIO³

**Lucas de Barros Pimenta
Rodrigo de Alvarenga Rosa
Patrícia Costa Louzada
Bianca Passos Arpini**

1. Introdução

A carga transportada pelas ferrovias brasileiras aumentou 133% entre os anos de 1997 e 2012, passando de 137,2 bilhões de TKU para 320,0 bilhões de TKU (CNT, 2013). Composto esse sistema, destaca-se a importância dos pátios ferroviários, uma vez que esses impactam sobremaneira os custos e os resultados operacionais da ferrovia. Os pátios ferroviários representam mais de 50% dos custos de uma nova ferrovia e constituem um terminal ferroviário especializado em carregamento e descarregamento de cargas e estima-se que 70% de toda a frota de vagões de uma ferrovia fiquem, em um dado momento, dentro de um terminal ferroviário realizando alguma

³ Baseado no artigo originalmente publicado nos anais do XXX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte, realizado no Rio de Janeiro de 16 a 18 de novembro de 2016.

atividade e que passam mais da metade de sua vida útil dentro de pátios ferroviários (ROSA, 2016).

Cada trem, em função da sua formação e de sua carga transportada, deve passar por um conjunto específico de atividades para concluir seu carregamento e/ou descarregamento visando a estar liberado para iniciar outra viagem. O tempo para concluir essas atividades é crítico para o desempenho operacional da ferrovia, além disso, elas podem ser manobras ferroviárias, bem como outras atividades realizadas no terminal, as quais demandam diversos recursos. Dentre estas atividades, citam-se: como movimentação entre linhas, descarregamento/carregamento, inspeções, testes, etc. Elas demandam diversos recursos para serem executadas, a saber: linhas de pátio, operadores de trem, operadores de manobra, locomotivas, terminais de descarga e carregamento. Esses recursos são usualmente escassos, devido ao alto valor de aquisição, manutenção e/ou instalação. Com a finalidade de adequar o processamento dos trens a realidade prática, convencionou-se a divisão desses trens em lotes de 40 vagões. Dessa maneira, os trens que chegam ao terminal são separados na quantidade de 40 vagões, para viabilizar seu processamento e a formulação do modelo.

Como diversos trens operam simultaneamente em um terminal, suas atividades podem concorrer por um mesmo recurso. Assim, o planejador do terminal deve tomar a decisão de entregar um recurso para um trem operar e paralisar a operação de outro trem que ficará aguardando esse mesmo recurso. Essas decisões visam à redução do tempo de estadia de todos os trens. Planejar estas atividades e a alocação dos recursos do terminal objetivando diminuir o tempo de estadia do material rodante no terminal ferroviário é uma tarefa complexa. Apesar disso, atualmente, na grande maioria das ferrovias, esse processo é feito de maneira manual e empírica.

Assim sendo, este capítulo propõe um modelo matemático para planejamento das atividades ferroviárias e respectivas alocações de recursos com o objetivo de reduzir o tempo total de estadia do material rodante no terminal ferroviário. Na pesquisa bibliográfica

realizada, foram encontrados alguns estudos que tratam de pátios ferroviários, a saber: Boysen, Jaehn e Pesch (2011) formularam um problema de sequenciamento básico de transbordo de contêineres em trens, utilizando pórticos, considerando áreas de estocagem e tendo como função objetivo a minimização do número de contêineres em que o transbordo não poderia se realizar para os trens planejados. Kellner, Boysen e Fliedner (2012) apresentaram uma solução para a localização ideal de estacionamento de vagões carregados com contêiner, denominando o problema como *Train Location Problem* (TLP), que tem por objetivo reduzir a movimentação vertical e horizontal das pontes rolantes e, conseqüentemente, agilizar o processamento dos trens posicionados para transbordo; Rosa (2009) tratou um modelo de simulação aplicado à avaliação de capacidade dos recursos de um terminal ferroviário; e Weigmans *et al.* (2007) exploraram, por meio de simulação, a comparação de um novo tipo de pátios de manobra integrados às redes de abastecimento (*Hub-and-spoke*) utilizando eficientes técnicas de transbordo de contêineres de um vagão para outro com o tradicional sistema de classificação de vagões por gravidade.

Poucos, no entanto, abordaram o tema de forma mais específica. He *et al.* (2003) citaram a importância da criação e da implantação de modelos matemáticos para auxiliar os Controladores de Pátios e Terminais (CPT) nas decisões que tem que tomar em pátios ferroviários, não considerando as interfaces de carregamento e descarga de vagões. Descreveram, também, que o principal papel do CPT é centrado em como fazer as possíveis conexões entre os trens que chegam e partem. Nessa perspectiva, após extensa pesquisa bibliográfica, não foi encontrado nenhum estudo que utilizasse um modelo matemático para o planejamento das atividades em um terminal ferroviário.

Para testar o modelo matemático proposto, ele foi aplicado a um caso real de um terminal ferroviário, localizado no estado do Espírito Santo, em um grande complexo portuário. Teve-se como objetivo receber, por transporte ferroviário vagões do tipo *Hopper*, carre-

gados de grãos agrícolas (principalmente soja e farelo de soja) da Região Centro-Oeste e do Oeste do estado de Minas Gerais, com vistas a formar carga em nos armazéns do terminal para, posteriormente, carregar navios que levarão esses insumos para o exterior, e vagões do tipo plataforma com produtos siderúrgicos que serão transportados para duas grandes usinas siderúrgicas do interior do país. Os resultados mostraram que o modelo foi capaz de analisar os recursos críticos e reduzir o tempo total de atraso para realizar as atividades.

O capítulo é organizado como segue: na seção 2, tem-se uma revisão teórica sobre atividades em terminais ferroviários, conceitos de programação linear, além de pesquisa bibliográfica de um modelo que se adequasse às características desse contexto; na seção 3, apresenta-se a metodologia em que o capítulo foi desenvolvido; na seção 4, expõe-se o modelo matemático proposto; na seção 5, exibem-se os resultados obtidos; e, finalmente, na seção 6, revela-se as conclusões.

2. Referencial Teórico

2.1 Atividades em Terminais Ferroviários

Um pátio ferroviário pode ser explicado como um local especial de manobras e de movimentação de cargas, ligado a uma ferrovia onde trens são processados, em que são realizadas as seguintes atividades: coletas, manobras, descargas, momentânea alocação, carregamentos e/ou reorganização (BOYSEN, 2013). Ele é formado por diversas linhas, normalmente agrupadas em feixes, que formam subpátios. Esses, por sua vez, são separados visando agilizar as manobras ferroviárias (ROSA, 2016).

As operações ferroviárias típicas normalmente encontradas em pátios ferroviários podem ser congregadas, de uma maneira geral, nas seguintes atividades: recebimento e inspeção de entrada; classificação ou separação; espera por anexação; manobra de triagem e anexação; e inspeção de saída e partida (PETERSEN, 1977).

Um pátio ferroviário é composto por linhas ferroviárias, materiais rodantes para executar as manobras, áreas de carregamento e de descarga de produtos, pessoal treinado para as manobras ferroviárias e outros recursos. Terminais ferroviários são pátios ferroviários especializados em carregamento e descarga de materiais, alocados, principalmente, em locais de grande movimentação de cargas, como complexos portuários ou regiões de transbordo intermodais (ROSA, 2016).

2.2 Conceitos de programação linear

A programação linear trata do problema de alocação ótima de recursos escassos para a realização de atividades. Sobre essa afirmativa, cabe explicar que: por ótimo compreende-se que não existe uma outra solução que seja melhor do que a oferecida, podendo haver outras tão boas quanto; por recursos escassos, a realidade de existência finita de recursos; e as atividades se referem, por exemplo, à fabricação de produtos, à mistura de substâncias, ao atendimento ao público, ao transporte e armazenagem de mercadorias, etc (COLIN, 2013).

Outras definições relevantes são os de modelo e de função linear. Um *modelo* é uma representação simplificada da realidade expressa na forma de equações matemáticas que serve para simular a realidade. Uma *função linear* é uma função $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ das variáveis x_1, x_2, \dots, x_n do tipo $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1 x_1, c_2 x_2, \dots, c_n x_n$, sendo c_1, c_2, \dots, c_n valores constantes. Sendo b um número qualquer e $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ uma função linear, define-se uma *inequação linear* como qualquer uma do tipo $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b$ ou $f(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq b$ (COLIN, 2013).

Com base nos conceitos apresentados, afirma-se que a programação Linear (PL) é uma técnica utilizada para resolver problemas de otimização e consiste em um modelo que representa o problema real usando apenas *funções lineares*. Dessa forma, a PL utiliza um modelo que abrange, de forma geral (COLIN, 2013):

- a) *Variáveis de decisão*: referem-se às variáveis usadas no modelo que podem ser controladas e alteradas. Para se encontrar a solução do problema testam-se diversos valores de variáveis.
- b) *Parâmetros*: concerne às variáveis que servem como dados de entrada do problema analisado e cujos valores não podem ser alterados.
- c) *Função objetivo*: diz respeito à função matemática que define e mensura o principal objetivo do tomador de decisão. Ela pode ser de minimização (de custos, erros, etc) ou de maximização (de lucro, utilização de espaço, etc).
- d) *Restrições*: trata-se de regras que dizem o que se pode (ou não) fazer e/ou quais são as limitações dos recursos ou das atividades que estão associados ao modelo. Podem ser expressas por meio das inequações lineares, ou seja, linguagem matemática que representa relações de desigualdade (\leq , \geq), ou por meio de equações de igualdade.

Na programação linear, usa-se o termo *solução* para representar atribuições de valores às variáveis de decisão. Conforme Colin (2013), as soluções podem ser *viáveis*, *inviáveis* e *ótimas*. As primeiras são aquelas cujos valores das variáveis de decisão atendem à todas as restrições. As segundas, aquelas cujos valores das variáveis fazem com que pelo menos uma das restrições não seja atendida. As terceiras além de serem viáveis, geram um valor de função objetivo extremo: maior valor dentre todos os existentes no caso da maximização e menor valor no caso da minimização.

2.3 Modelos matemáticos aplicados a terminais ferroviários

Existem algumas utilizações de modelos matemáticos aplicados a terminais ferroviários, que, no entanto, não consideram o planejamento das atividades mediante os recursos disponíveis em um terminal ferroviário. Blasum et al. (1999) citam a aplicação de um modelo de otimização para reduzir a necessidade de manobras para

formação de trens na manhã seguinte, após o posicionamento em um galpão de transbordo, dado a chegada dos trens em um dia e o planejamento de partida de trens no dia seguinte. Dahlhaus et al. (2000) abordam a necessidade de linhas para classificação de vagões, em um pátio com classificação por gravidade, com base na chegada de trens, na formação de novas composições e, sobretudo, na quantidade de clientes.

He *et al.* (2003) desenvolveram em sua pesquisa um modelo matemático aplicado inicialmente a um pátio simplificado, com um *humpyard* (estrutura de classificação de vagões por gravidade, por meio de uma crista, onde os vagões são separados e manobrados), uma locomotiva de manobra e uma máquina de chave, para, a partir disso, aumentarem a quantidade de recursos. Ainda assim, não abordaram a realização de manobra de triagem sem classificação de vagões, bem como, a interface com processos de carregamento e descarga de vagões que não utilizam carga de contêiner.

No que tange ao modelo matemático utilizado, na literatura científica é proposto o *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), o qual tem por objetivo a minimização do tempo entre o início e o fim de uma sequência de atividades, chamado *makespan*. O RCPSP é um problema de otimização combinatória que considera recursos limitados e atividades com quantidade de recursos e durações estabelecidas, ligadas por relações de precedências. Ele realiza o sequenciamento dessas atividades e a alocação de recursos limitados, ou seja, ele designa recursos para uma determinada atividade de forma que os recursos alocados não excedam a disponibilidade.

Tal modelo pode realizar a alocação de recursos renováveis ou não renováveis. Os recursos renováveis são limitados em quantidade, mas podem ser utilizados mais de uma vez, enquanto os não renováveis têm sua quantidade limitada para o projeto como um todo e podem ser utilizados uma única vez. No sequenciamento de atividades, o RCPSP permite que as atividades sejam realizadas sem interrupção ou possam ser interrompidas.

O *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) com variantes é encontrado na literatura científica para aplicações práticas em diversas áreas, como distribuição de energia (OKUBO *et al.*, 2015), aeronaves em aeroportos (KELLENBRINK e HELBER, 2015). Okubo *et al.* (2015) propuseram uma nova variante chamado RCPSP / π RC, que lidava com restrições realistas de distribuição de energia apresentando um modelo de programação inteira (IP) e um modelo de programação por restrições (CP) do RCPSP / π RC, além do algoritmo de cálculo chamado *mask calculation algorithm* para restringir modos para a RCPSP / π RC usando tempo e consumo de recursos. Kellenbrink e Helber (2015) analisaram o problema dos projetos de agendamento usando o RCPSP em turnos de aeronaves em aeroportos, supondo que a estrutura era fornecida com antecedência, como uma estrutura flexível, introduziram os conceitos de atividades opcionais e atividades dependentes e, também, apresentaram um Algoritmo Genético (GA) para resolver este tipo de problema.

Depois desta revisão, não se encontrou nenhum estudo que especificamente tratasse do planejamento das atividades ferroviárias em terminais ferroviários considerando a utilização de todos os recursos do terminal.

3. Metodologia

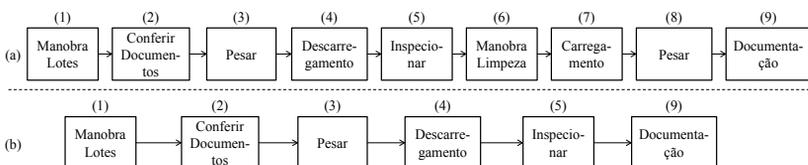
O terminal ferroviário em estudo, como muitos terminais ferroviários localizados em complexos portuários, recebe os vagões do tipo *Hopper*, carregados de granéis agrícolas (soja, milho e farelo de soja) da Região Centro-Oeste e da região do triângulo mineiro, zona oeste do estado de Minas Gerais, com objetivo de formar carga para carregar navios que levarão esses insumos para o exterior. Esse terminal também é responsável pelo recebimento e movimentação de vagões do tipo plataforma, carregados com produtos siderúrgicos, a fim de atender duas grandes usinas siderúrgicas do interior do país, que também buscam o terminal portuário para exportar seus produtos.

Esses produtos só têm a opção de chegar ao terminal por meio ferroviário. No retorno desses vagões, duas opções podem ocorrer: ou são manobrados para a área de carregamento de fertilizante (no caso do vagão tipo Hopper) ou para o terminal de carregamento de produtos siderúrgicos (vagões plataforma), após isso, então, os trens são novamente formados e liberados para viagem.

O fertilizante, a ser carregado nos vagões, vem pelo modal marítimo do exterior e é descarregado do navio e armazenado nos armazéns para posterior carregamento dos vagões. Já os vagões plataforma, quando carregados com produtos de retorno, possuem sua carga siderúrgica vinda de um ramal ferroviário ligando o terminal ferroviário em estudo a uma usina siderúrgica situada ao lado desse complexo portuário. Da mesma forma que outros terminais ferroviários, os dois produtos de retorno (fertilizantes e produtos siderúrgicos) podem sair do terminal por transporte ferroviário e/ou por transporte rodoviário dependendo da opção do cliente. Neste capítulo, será tratado somente o transporte ferroviário.

As atividades pelas quais os vagões devem passar para poderem ser liberados para viajar possuem os fluxos de processamento dos lotes apresentados na Figura 1. O fluxo (a) representa aqueles lotes que passarão por descarregamento e carregamento dentro do terminal. Já o fluxo (b), aqueles que apenas serão descarregados no terminal e não possuem programação de carregamento, ou seja, serão disponibilizados para formação de trens vazios. Assim, os lotes do fluxo (a) possuem nove atividades sucessivas a serem executadas pelo terminal (atividades de 1 a 9). Já os lotes do fluxo (b) realizam apenas seis atividades (atividades 1, 2, 3, 4, 5 e 9).

Figura 1 – Fluxos de processamento dos lotes pelo terminal: a) Descarregamento e Carregamento, b) Apenas descarregamento.



Similar a diversos terminais ferroviários, o terminal estudado possui linhas de acesso dos lotes aos diversos recursos em que serão processados. Para esse processamento é necessário que sejam realizadas as manobras ferroviárias de posicionamento, tração e retirada. Cabe reassaltar que são recursos desse terminal, conforme Tabela 1: duas moegas de descarregamento de vagões Hopper com granéis agrícolas, três balanças estáticas para pesagem de vagões, uma área de carregamento de fertilizante, uma área de carregamento de vagões plataforma com produtos siderúrgicos e duas linhas de limpeza de vagão que podem ser usadas pelos vagões de granéis agrícolas, após descarregarem na moega e antes de serem posicionados para carregamento de fertilizantes. Além dos recursos citados, estão disponíveis duas locomotivas de manobra (operadas por maquinistas de pátio), três manobreadores e uma equipe de inspeção mecânica. Todos dedicados exclusivamente ao terminal.

Tabela 1 – Recursos disponíveis no terminal

Tipos de recurso	Manobreador	Locomotiva	Balança	Moega Grão	Port. Carreg. Sider.	Linha limpeza	Carreg. Fertilizantes	Port. Desc. Sider.	Inspeção
Quantidades	3	2	3	2	1	2	1	1	1

À medida que os trens vão chegando ao terminal, são manobreados e separados em lotes de quarenta vagões de uma mesma carga e de um mesmo cliente, para isso são necessários uma locomotiva e um oficial. A quantidade de vagões em um lote foi definida com base nas capacidades de tração das locomotivas de manobra, somadas às restrições dos tamanhos das linhas de carregamento, de limpeza e de descarga. Essa restrição também auxilia na programação de recebimento e partida dos trens, uma vez que o trem tipo da ferrovia que abastece esse terminal é de oitenta vagões. Após a separação, são verificados os documentos dos vagões pelos manobreadores e, a partir da confirmação que a documentação está correta, o lote de vagões é direcionado para o processo de pesagem assim que uma balança, uma locomotiva e um manobreador estiverem dispo-

níveis. Depois de pesado, os recursos balança, locomotiva e manobreiro são liberados para serem usados por outras operações e o lote é manobrado para a próxima etapa, que é a descarga.

Esse lote, então, aguarda que uma das moegas (no caso dos vagões do tipo Hopper), ou que o Terminal Siderúrgico (no caso dos vagões do tipo plataforma), esteja disponível. Tendo um desses pontos de descarga disponível (Moega 1 ou 2 ou o Terminal Siderúrgico), somado a uma locomotiva e um manobreiro, o lote é manobrado até o ponto de descarga para passar pelo processo de descarregamento. Uma vez que tenha sido realizada a descarga de todos os vagões, o lote é direcionado para o processo de inspeção. Os recursos moega, locomotiva e manobreiro são liberados. E, por fim, uma equipe de inspeção mecânica avalia se os vagões estão liberados para viajar ou se terão que passar por alguma manutenção.

De forma análoga a diversos terminais ferroviários, nem todos os lotes que descarregaram terão programa de carregamento no mesmo terminal. A maior parte deles, inclusive, retorna ao ponto de carregamento vazio. No entanto, para aqueles que passarão pelo processo de carregamento, existe um processo específico que somente os vagões que carregarão fertilizantes devem ser submetidos. Eles devem passar pelo processo de limpeza por ar comprimido. Para ocorrer essa operação, é necessário realizar a manobra de posicionamento desses lotes na limpeza, a qual exige a reserva de uma locomotiva, um manobreiro e uma linha de limpeza. Os vagões do tipo plataforma, pelo fato de não carregarem produtos granéis, não precisam passar por esse processo de limpeza.

Depois da limpeza concluída, esses lotes, bem como os lotes de vagão plataforma que têm programa de carregamento, devem ser direcionados aos pontos de carregamento. Para isso, são necessários uma locomotiva, um manobreiro e os respectivos pontos de carregamento de fertilizantes e de produtos siderúrgico livres. Após carregar, esses lotes devem ainda passar pela pesagem para viabilizar as informações necessárias para o processo de documentação. Novamente, para pesagem, são necessários uma locomotiva, um

manobreiro e uma balança disponíveis. Qualquer uma das balanças pode ser utilizada. Após pesado, libera-se a balança e os recursos locomotiva e manobreiro.

A partir desse momento, os lotes devem esperar pela preparação da documentação de viagem, que é realizada pelo manobreiro, para então serem liberados para a estação a fim de que nela possam ser colocados em uma locomotiva de viagem e iniciar o transporte. A estadia termina quando os vagões são liberados para a estação. O tempo de preparação da documentação é maior para vagões carregados do que vazios, uma vez que para os primeiros, são necessários nota fiscal e despacho dos materiais carregados, enquanto que para lotes vazios não.

Para cada uma dessas atividades existe um tempo conhecido por dados históricos do terminal. Por exemplo, para os processos de carregamento e descarregamento do *hopper*, i.e., de carregamento de grãos, de limpeza e de carregamento de fertilizante, existem as seguintes atividades: manobra de lotes, 1 hora; conferência de documentos, 2 horas; pesagem, 3 horas; descarregamento, 3 horas; inspeção, 2 horas; manobra para limpeza, 2 horas; carregamento, 12 horas; Pesar, 3 horas e documentação, 2 horas. Estes tempos são definidos para todos os processos do terminal.

Para entendimento do capítulo, convencionaram-se os valores de tempo particionados em 30 minutos. Assim, quando uma atividade tiver necessidade de durar 3 (três) unidades de tempo, ela demandará 1h30min dos recursos necessários. Isso se deve ao fato de que num contexto de planejamento de atividades em um terminal ferroviário de carga não há necessidade de planejamento e execução em uma escala de maior detalhe. A Tabela 2 apresenta os recursos necessários e suas respectivas quantidades de tempo para cada atividade que o lote precisa executar no terminal.

Tabela 2 – Recursos demandados por cada atividade

Tarefas	Manobreiro		Locomotiva		Balança		Moega Grão		Port. Carg. Sider		Linha limpeza		Carreg. Fertil.		Port. Desc. Sider		Mecânico Insp.		
	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	Hopper	Plat.	
Manobra Lotes	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conferir documentos	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pesar	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Descarregamento	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Inspeccionar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Manobra Limpeza	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Carregamento	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Pesar	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Documentação	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Uma vez descritas às operações necessárias para o carregamento e o descarregamento dos lotes de vagões dos tipos Hopper e Plataforma, foram coletados, do terminal estudado, dados amostrais aleatórios da movimentação do terminal de grãos e de produtos siderúrgicos que são os 7 primeiros cenários da Tabela 3. No Cenário 2, por exemplo, a demanda por atividades a serem realizadas pelo modelo foi a de 4 lotes. Nesse sentido, um lote seria apenas processado na descarga de grãos e, após isso, viajaria vazio; outro passaria pela descarga de grãos e pelo carregamento de fertilizantes, para então viajar; um terceiro seria enviado para a descarga de plataformas, sem demanda para carregamento; e um quarto descarregaria e carregaria os vagões plataforma, para então ser processado para viajar.

Os Cenários 8, 9 e 10 são equivalentes aos Cenários 4, 5 e 6, respectivamente, porém com mais 1 recurso manobreiro. Os Cenários 11, 12 e 13 são equivalentes aos Cenários 4, 5 e 6, respectivamente, porém, com mais 1 recurso locomotiva. Assim, foram propostos 13 cenários, conforme a Tabela 3, para testar o modelo.

Tabela 3 – Cenários de teste do modelo

Cenário	Nº Lotes				Recursos									
	Descarga de grãos	Descarga de grãos e carreg. de fertilizante	Descarga de plataforma	Descarga e carreg. de plataforma	Mano-breiro	Locomotiva	Balança	Moega Grão	Pórtico Carreg. Sider.	Linha Limpeza	Carreg. Fertilizante	Pórtico Descar. Sider.	Mecânico Inspeção	Horizonte planej. (h)
1		1	1		3	2	3	2	1	2	1	1	1	36
2	1	1	1	1	3	2	3	2	1	2	1	1	1	36
3	4				3	2	3	2	1	2	1	1	1	36
4	4	1	2	1	3	2	3	2	1	2	1	1	1	48
5	8	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	1	1	48
6	9	1	2		3	2	3	2	1	2	1	1	1	48
7	10	2	2	2	3	2	3	2	1	2	1	1	1	60
8	4	1	2	1	4	2	3	2	1	2	1	1	1	60
9	8	2	1	1	4	2	3	2	1	2	1	1	1	60
10	9	1	2		4	2	3	2	1	2	1	1	1	60
11	4	1	2	1	3	3	3	2	1	2	1	1	1	60
12	8	2	1	1	3	3	3	2	1	2	1	1	1	60
13	9	1	2		3	3	3	2	1	2	1	1	1	60

4. Modelo matemático proposto

O modelo matemático proposto tomou como base o *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSp) e foi inspirado em um processo industrial, no qual a indústria recebe a matéria prima, transforma e produz um produto final. Ainda sobre as similaridades com o processo industrial, o pátio ferroviário recebe vagões carregados e os transforma em vagões vazios e o mesmo é feito no sentido dos vagões vazios que são carregados. Assim, cada lote de vagão pode ser visto como uma tarefa que deve passar por um conjunto de atividades em uma ordem específica (descarregamento, manobras, carregamento, inspeções, testes, etc.) que demanda cada uma, um conjunto de recursos (locomotivas, manobreiros, áreas de limpeza e terminais de descarga e carregamento). Muitos desses recursos são solicitados por diversas atividades ao mesmo tempo, gerando conflitos na disponibilização, o que pode gerar atrasos para a realização de alguma atividade e, conseqüentemente, para o lote de vagão. No caso estudado pelo modelo, além dessa concorrência, há o fato das atividades terem que seguir uma seqüência de processamento definida. Dessa maneira, existe uma matriz de precedência das atividades.

O modelo proposto é uma adaptação do RCPSP encontrado na literatura e visa a planejar a sequência de atividades de um terminal ferroviário. Considerando os recursos limitados, tem como características a introdução de um horário solicitado de início para cada atividade, e, conseqüentemente, a alteração na função objetivo (FO).

A introdução do horário solicitado de início para cada atividade pelo usuário garante que elas não comecem antes do horário determinado, além disso, a alteração da FO minimiza a somatória dos atrasos de todas as atividades no lugar do *makespan*. Optou-se pela alteração da FO uma vez que minimizar a somatória dos atrasos é mais interessante para o problema estudado, pois significa diminuir os custos operacionais. Ela garante que as atividades fora do caminho crítico (uma sequência de atividades que não podem atrasar sem impactar o horário de conclusão da última atividade), se houver, sempre tenham início o mais cedo possível, gerando a menor somatória dos atrasos.

Os conjuntos do modelo matemático são: J - conjunto de atividades que varia de 1 a J ; T - conjunto de períodos de tempo que varia de 1 a T ; K - conjunto de tipos de recursos que varia de 1 a K . Os parâmetros do modelo são: P_j - tempo de processamento da atividade $j \in J$; K - número de tipos de recursos; R_k - disponibilidade do recurso $k \in K$; r_{jk} - quantidade do recurso $k \in K$ que a atividade $j \in J$ necessita; s_j - momento de chegada do lote de vagões $j \in J$; T - horizonte de planejamento; a_{jh} - predecessoras da atividade $j \in J$, assumindo o valor de 1 se a atividade $h \in J$ é predecessora de $j \in J$, e 0 caso contrário. A variável de decisão do modelo é x_{jt} , que adota o valor 1 se a atividade $j \in J$ termina no instante t e o valor 0 caso contrário.

Função objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (t - s_j - p_j) x_{jt} \quad (1)$$

Restrições:

$$\sum_{t=1}^T x_{jt} = 1 \quad j \in J \quad (2)$$

$$\sum_{t=0}^{s_j + p_j - 1} x_{jt} = 0 \quad j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{t=s_h + p_h}^T x_{ht} \leq \sum_{t=s_j + p_j}^T (t - p_j) x_{jt} \quad j \in J, h \in J \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J r_{jk} \sum_{b=t}^{t+p_j-1} x_{jb} \leq R_k \quad k \in K \quad (5)$$

$$x_{jt} \in \{0, 1\} \quad j \in J, t \in T \quad (6)$$

A função objetivo, Equação (1), que deve ser minimizada, representa a soma da diferença entre a chegada do lote de vagões até o seu atendimento. As Restrições (2) asseguram que cada atividade é realizada apenas uma vez e as Restrições (3) garantem que a atividade não terá início antes do horário solicitado. Ademais, as relações de precedência estão definidas nas Restrições (4) e as restrições relativas aos recursos disponíveis são dadas pelas Restrições (5). Por último, as Restrições (6) definem a variável binária de decisão.

5. Apresentação e análise de resultados

Utilizou-se o CPLEX 12.6 para executar o modelo matemático proposto em um computador com processador Intel i7 com 16GB de

memória RAM. Um resumo dos resultados para cada cenário é apresentado na Tabela 4, nela pode-se observar que o CPLEX alcançou o resultado ótimo para 12 dos 13 cenários testados. Somente o Cenário 7 que é o maior cenário testado com 16 lotes não alcançou o mesmo resultado, apresentando GAP de 0,19%, após 5 horas e 39 minutos de execução. Vale ressaltar que este é um dia atípico do terminal, tendo sido o recorde de movimentação. Para avaliar os cenários, como visto anteriormente, serão comparados os Cenários 4, 8 e 11, sendo o primeiro considerado a base e os demais, idênticos a este com aumento, contudo, de 1 manobreiro para o Cenário 8 e de 1 locomotiva para o Cenário 11. Pelo gráfico (a) da Figura 2, pode-se perceber que o Cenário 4 gerou um atraso médio de 9,1 horas. O aumento de locomotiva, no Cenário 11, traz uma diminuição maior do atraso médio dos lotes, o qual passa a ser de 8,5 horas. No Cenário 8, o aumento de 1 manobreiro trouxe uma diminuição em relação ao Cenário 4, nesse caso, constatou-se um atraso de 9,0 horas. Esta redução foi pequena e foi menor que a redução do Cenário 11, no entanto, é preciso considerar que o aumento de locomotivas gera mais custo para o terminal do que o de manobreiro.

Outra avaliação realizada se deu entre os Cenários 5, 9 e 12, sendo o Cenário 5 basilar e idêntico aos Cenários 9 e 12, . Aumentou-se, para os cenários similares, respectivamente, 1 manobreiro e 1 locomotiva. Pelo gráfico (b) da Figura 2, pode-se perceber que o Cenário 5 gerou um atraso médio de 12,5 horas. O aumento de 1 locomotiva, no Cenário 12, traz uma diminuição maior do atraso médio dos lotes, o qual passa a equivaler a 11,6 horas. No Cenário 9, o aumento de 1 manobreiro trouxe uma abreviação do atraso em

relação ao Cenário 5, que se tornou de 12,3 horas. Esta redução foi pequena e menor que a redução do Cenário 12.

Tabela 4 – Resultados Encontrados pelo CPLEX

Cenário	Tempo de Execução (s)	FO (período de 30 min)	UB (h)	LB (h)	GAP (%)	Tempo médio de atraso por manobra (h)
1	1,0	169,0	-	-	0,0	4,7
2	1,0	475,0	-	-	0,0	6,6
3	1,0	381,0	-	-	0,0	5,3
4	18,0	1314,0	-	-	0,0	9,1
5	499,0	2698,0	-	-	0,0	12,5
6	7077,0	2634,0	-	-	0,0	12,2
7	20365,0	-	4720,0	4710,9	0,19	16,4
8	16,0	1297,0	-	-	0,0	9,0
9	23,0	2655,0	-	-	0,0	12,3
10	4.162,0	2528,0	-	-	0,0	11,7
11	12,0	1228,0	-	-	0,0	8,5
12	34,0	2515,0	-	-	0,0	11,6
13	487,0	2413,0	-	-	0,0	11,2

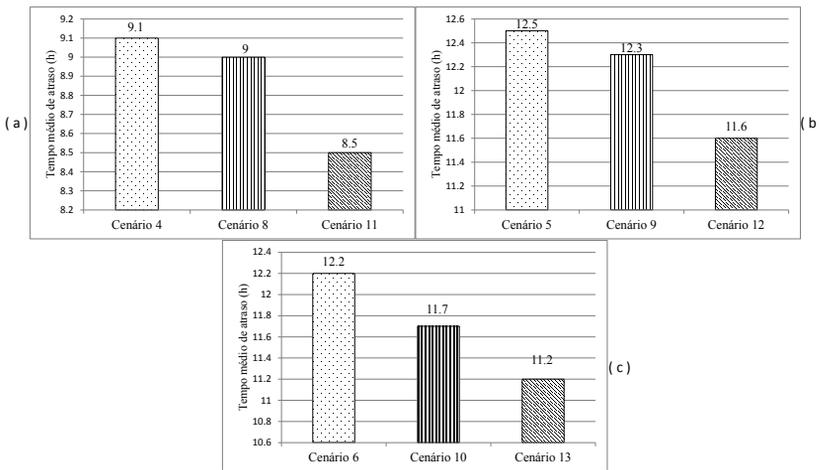
Uma última avaliação foi feita entre os Cenários 6, 10 e 13, sendo o Cenário 6 basilar e idêntico aos Cenários 10 e 13 – e, nessa análise foi aumentado, para os cenários similares, respectivamente, 1 manobreiro e 1 locomotiva. Pelo gráfico (c) da Figura 2, pode-se perceber que o Cenário 6 gerou um atraso médio de 12,2 horas. O aumento de 1 locomotiva, no Cenário 13, traz a maior diminuição do atraso médio dos lotes, reduzindo para 11,2 horas. No Cenário 10, a inserção de 1 manobreiro trouxe uma diminuição, em relação ao Cenário 6, que tornou o atraso equivalente à 11,7 horas. Esta redução foi pequena e menor que a redução do Cenário 13.

Observando os resultados obtidos no gráfico, conclui-se que os recursos manobreiro e locomotiva realmente estavam servindo como gargalo da movimentação dos lotes, no terminal ferroviário em estudo. No entanto, apesar de ser demandado em uma menor quantidade de atividades que o recurso manobreiro, o recurso locomotiva tem, nos cenários iniciais, a quantidade disponível de apenas

2, sendo mais escasso que o recurso manobreiro, que possui quantidade disponível igual a 3.

Desta forma, pode-se perceber a relevância de um modelo, como o proposto neste capítulo, que auxilie o planejamento operacional das atividades de um terminal ferroviário, bem como o planejamento estratégico de recursos a serem alocados no terminal.

Figura 2 – Resultados do CPLEX, Cenários: a) 4, 8 e 11; b) 5, 9 e 12; c) 6, 10 e 13



6. Conclusão

Este capítulo propôs um modelo matemático baseado no *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP) para o planejamento de atividades em um terminal ferroviário, considerando recursos limitados e objetivando de minimizar a estadia dos vagões no terminal. Sua relevância se justifica, pois, por meio da revisão da literatura existente, não foi encontrado, até o presente momento, um modelo matemático para o planejamento das atividades em terminais rodoviários.

Os cenários analisados mostraram que o CPLEX consegue resolver cenários que representam um dia padrão de operação do terminal, no entanto, em cenários atípicos, o CPLEX não conseguiu chegar a uma solução ótima, porém chegou a uma solução com uma competência bem próxima desta, com gap de apenas 0,19%, apesar de ter levado aproximadamente 5 horas para executar.

O modelo matemático proposto mostrou-se adequado para a minimização da somatória dos atrasos de todas as atividades sequenciadas e para melhorar a gestão de recursos em um terminal ferroviário, aumentando, assim, sua eficiência. Além disso, apresentou-se eficaz para sequenciar atividades que necessitam de recursos limitados, para determinar espaços vazios no planejamento das atividades e para indicar quais recursos são mais solicitados e onde está o gargalo na operação. Desse modo, foi possível visualizar os recursos que mais impactam no tempo de estadia total, o que pode servir de ferramenta de auxílio aos investimentos e planejamentos de mão-de-obra. Por outro lado, o modelo também pode ser utilizado para alocar atividades que não haviam sido planejadas nos espaços vazios e ainda determinar quais são os melhores horários para realização de manutenção dos recursos, ou os intervalos para trocas de turno.

Propõe-se como possível continuação da pesquisa a elaboração de uma meta-heurística para solução do estudo proposto visando a reduzir o tempo de processamento, permitindo inclusive a reprogramação dinâmica do terminal, quando uma atividade não prevista inicialmente tiver de ser executada, mudando as premissas do planejamento em curso.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPES (458/2013, 0271/2016, 524/2016) e ao CNPq (477357/2013-0) pelo apoio financeiro.

Referências

BLASUM, U.; et al. Scheduling trams in the morning. **Mathematical Methods of Operations Research**. 1999.

BOYSEN, N.; et al. Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications. **European Journal of Operational Research**, v. 220, p. 1-14, 2013.

COLIN, E. C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

CNT. **O Sistema Ferroviário Brasileiro**. Brasília: Confederação Nacional do Transporte. Disponível em: <www.cnt.gov.br>. Acesso em: 03 abr. 2016.

DAHLHAUS, E.; et al. The train marshalling problem. **Discrete Applied Mathematics**, v. 103, p. 41-54, 2000.

HE, S.; SONG, R.; CHAUDHRY, S. S. An integrated dispatching model for rail yards operations. **Computers and Operations Research**. 2003.

KELLNER, M.; BOYSEN, N.; FLIEDNER, M. How to park freight trains on rail-rail transshipment yards: The train location problem. **OR Spectrum**. 2012.

OKUBO, H.; et al. Project scheduling under partially renewable resources and resource consumption during setup operations. **Computers & Industrial Engineering**, v. 24, p. 91-99, 2015.

ROSA, R. A. Modelo de simulação aplicado à avaliação de capacidade dos recursos de um terminal ferroviário. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO

DE PESQUISA OPERACIONAL, 41, 2009, Salvador. **Anais ...** Salvador: SOBRAPO, 2009.

ROSA, R. A. **Operação Ferroviária**. Rio de Janeiro: LTC, v. 1, 2016.

WEIGMANS, B. W.; STEKELENBURG, D. T.; VERSTEEGT, C.;
BONTEKONING, Y. M. Modeling rail-rail exchange operations:
An analysis of conventional and new-generation terminals.
Transportation Journal, v. 46, n. 4, p. 5-20, 2007.

CAPÍTULO 3

MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE CONCRETO BETUMINOSO USINADO A QUENTE (CBUQ)

**Leidimara Scheffer Favero
Rodrigo de Alvarenga Rosa
Bianca Passos Arpini**

1. Introdução

O asfalto é um dos mais antigos e versáteis materiais de construção utilizados pelo homem e seu manual lista mais de 100 das principais aplicações desse material, desde a agricultura até a indústria (IA, 2001). O uso desse elemento em pavimentação é um dos mais importantes e primitivos entre todos. Na maioria dos países, a pavimentação asfáltica é a principal forma de revestimento (BERNUCCI *et al.*, 2006).

No Brasil um dos tipos de revestimento asfáltico mais usados é o concreto asfáltico (CA), também conhecido como Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) (BAPTISTA, 1976). Existem cidades inteiramente pavimentadas com paralelepípedos que utilizam esse material por questões históricas. De outro modo, há cidades intei-

ramente pavimentadas com asfalto, onde não se pensa em utilizar outro tipo de elemento por possuírem usina própria de CBUQ (NABESHIMA, 2011).

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente vem sendo amplamente usado no Brasil como forma de referência na área da pavimentação. No entanto, tendo em vista que o custo de implantação de usinas de CBUQ é alto, torna-se impossível ter uma em cada obra. Assim sendo, faz-se necessário planejar uma logística de distribuição do material das usinas para as obras. Essa logística apresenta alguns desafios, dentre eles, o mais importante é manter a temperatura do concreto adequada para sua aplicação durante o transporte para a obra. Além disso, é preciso considerar que o período entre a produção e a aplicação é limitado em aproximadamente em 06 horas, no verão (ou regiões quentes), e 03 horas, no inverno (ou regiões frias); e que 10% desse tempo poderá ser gasto com possíveis interferências ao se transitar até a obra. Nesse contexto, muitas empresas analisam, no planejamento de distribuição, a possibilidade de comprar CBUQ de outras usinas não próprias, a fim de atingir os padrões de qualidade explicados anteriormente e a redução de custo e de investimento; cabe citar que elas também refletem sobre a expansão de sua própria usina e a implantação de novas usinas. Dessa forma, este estudo apresenta um modelo matemático para apoiar a tomada de decisão das empresas sobre o quanto de CBUQ produzido por ela deve ser enviado para suas obras e o quanto deve ser comprado de usinas de terceiros. Considerou-se, para esse estudo, que as empresas que têm usina produtora desse material também fazem sua aplicação e possuem, pelo menos, uma obra própria. Para testar o modelo proposto, foi analisada uma empresa do Espírito Santo que possui uma usina de CBUQ e diversas obras.

Com base no levantamento bibliográfico realizado não foram até o momento encontrados estudos que propusessem um modelo matemático para avaliar o planejamento de distribuição do CBUQ. Assim, este estudo justifica-se pelo fato de que existem poucas pesquisas realizadas sobre o assunto.

O capítulo é organizado como segue: na Seção 2, há uma breve revisão sobre conceitos de programação linear. Na Seção 3, é apresentada a metodologia do estudo. Na Seção 4, é proposto o modelo matemático. Na Seção 5 constam os resultados obtidos. Por fim, na Seção 6, são expostas as conclusões.

2. Conceitos de Programação Linear

A *Programação Matemática* (PM) é um campo da ciência de gerenciamento que descobre a forma ideal ou mais eficiente de utilizar recursos limitados para alcançar os objetivos de um indivíduo ou de uma empresa. Por essa razão, é usualmente denominada de *otimização* (RAGSDALE, 2011). As técnicas de PM possuem uma série de aplicações práticas para auxiliar as tomadas de decisão, tais como: determinação de mix de produtos, fabricação, roteamento e logística, planejamento financeiro, entre outros (RAGSDALE, 2011).

Os problemas de otimização envolvem três elementos: *variáveis de decisão*, *restrições* e *função objetivo*. As *variáveis de decisão*, em um modelo matemático, usualmente são representadas pelos símbolos X_1, X_2, \dots, X_n , que são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo. Elas podem representar, por exemplo, as quantidades de diferentes produtos que o gerente de uma fábrica escolheu produzir; ou a quantidade de distintas peças de mercadoria a ser enviada de um armazém para uma dada loja; ou, ainda, a quantidade de dinheiro a ser aplicada em diferentes investimentos. As *restrições* são as expressões contornais do problema, ou seja, todas as disponibilidades e as limitações levantadas, sendo funções das variáveis de decisão que devem ser “menor ou igual” (\leq), “maior ou igual” (\geq) ou “igual” ($=$) a um valor específico; além disso, servem para limitar as variáveis de decisão a seus valores possíveis (ou viáveis). A *função objetivo* identifica alguma função das variáveis de decisão que o tomador de decisão deseja maximizar ou minimizar. Em resumo, a meta na otimização é encontrar os valores das variá-

veis de decisão que maximizam (ou minimizam) a função objetivo sem violar nenhuma das restrições (RAGSDALE, 2011).

Entre as diversas técnicas de programação matemática está a *Programação Linear* (PL), que envolve a criação e a resolução de problemas de otimização com funções objetivo lineares e restrições lineares. Um modelo de PL assume a forma geral (RAGSDALE, 2011):

$$\text{MAX (ou MIN):} \quad c_1 X_1 + c_2 X_2 + \dots + c_n X_n \quad (1)$$

$$\text{Sujeito a:} \quad a_{11} X_1 + a_{12} X_2 + a_{1n} X_n \leq b_1 \quad (2)$$

$$a_{k1} X_1 + a_{k2} X_2 + \dots + a_{kn} X_n \geq b_k \quad (3)$$

$$a_{m1} X_1 + a_{m2} X_2 + \dots + a_{mn} X_n = b_m \quad (4)$$

As notações c_1, c_2, \dots, c_n da equação (1) são chamadas de coeficientes da função objetivo e podem representar, por exemplo, os custos ou os lucros associados às variáveis de decisão X_1, X_2, \dots, X_n , respectivamente. A notação a_{ij} que aparece nas equações (2) a (4) simboliza o coeficiente numérico na restrição i para a variável X_j . A função objetivo e as restrições de um problema de PL representam distintas somas ponderadas das variáveis de decisão. As notações b_i nas restrições simbolizam valores “menores a”, “maiores a” ou “iguais a”, que a combinação linear correspondente das variáveis de decisão deverá assumir.

Conforme Rosa (2012), devido ao resultado da *função objetivo* e das *restrições modelo*, a Programação Linear se divide nas seguintes áreas de estudo: Programação Contínua, Programação Estruturada, Programação Inteira e Programação 0/1.

- a) *Programação Contínua*: variáveis que podem assumir qualquer valor real, contínuo, positivo;
- b) *Programação Estruturada*: área que trata de modelos unitários, uma fábrica, um produto ou um período de tempo, que são

- replicados em várias fábricas, em vários produtos ou em multi-períodos;
- c) *Programação inteira*: variáveis que admitem somente valores inteiros;
 - d) *Programação 0/1*: recurso que assume valores iguais a 0 (zero) ou a 1 (um) para todas as variáveis, ou seja, se 0, o item não é usado e, se 1, o item é usado.

3. Metodologia

Para avaliar o modelo matemático proposto, tem-se como fonte de dados históricos a utilização das informações da Serrabetume Engenharia. Leva-se em consideração, nesse estudo, uma única composição de custo de produção da usina por tonelada para todas as fornecedoras de CBUQ. A fim de calcular esse preço, foi utilizado o custo de pessoal para usinagem, o custo com matérias-primas, o custo com insumos e o custo operacional da usina. Além disso, é preciso considerar a temperatura de aplicação do CBUQ, de acordo com a norma DNIT 031/2006, a qual deve ser determinada para cada tipo de ligante em função da relação viscosidade X temperatura. Pela experiência e comprovação, por meio de ensaios de grandes empresas do Espírito Santo nesse ramo, um tempo ideal para que a mistura chegue à obra, após sair da usina, e não perca suas características é de, no máximo, 06 horas no verão e 03 horas no inverno, passando desse tempo o material estará inapropriado para a aplicação.

Considerou-se para esse trabalho que as empresas vendem o produto para suas próprias obras, pois esse valor entra no centro de custo da usina. Além disso, consideram-se, como obras próprias, as obras executadas pela mesma empresa fornecedora do CBUQ.

Para o estudo, foram elaborados 32 cenários, dos quais 16 direcionaram o estudo no verão e 16, o estudo no inverno. A fim de conservar a confidencialidade das informações, todos os dados foram multiplicados, aleatoriamente, por um fator de ajuste. Os cenários foram divididos em quatro grupos, Grupo A, Grupo B,

Grupo C e Grupo D, definidos para avaliar o impacto das variações da Produção da Usina, do Custo de Produção, do Custo de Compra e da Produção da Obra, respectivamente. Assim, os cenários de teste da estação quente podem ser vistos na Tabela 1 Cenários desenvolvidos para teste do modelo proposto para o Verão e os cenários de teste da estação fria podem ser vistos na Tabela 2. A especificação “Padrão”, nas Tabelas 1 e 2, em qualquer coluna, representa que naquela coluna não houve variação de valor nos cenários testados.

TABELA 1 – CENÁRIOS DESENVOLVIDOS PARA TESTE DO MODELO PROPOSTO PARA O VERÃO

Grupo	Cenário	Produção Usina	Custo de Produção (R\$)	Custo de Compra (R\$)	Produção da Obra
A	1	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	2	Padrão + 30%			
	3	Padrão + 50%			
	4	Padrão + 100%			
B	5	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	6		300,00		
	7		307,00		
	8		308,60		
C	9	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	10			600,00	
	11			610,00	
	12			620,00	
D	13	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	14				Padrão + 30%
	15				Padrão + 50%
	16				Padrão + 100%

**TABELA 2 – CENÁRIOS DESENVOLVIDOS PARA TESTE DO MODELO PROPOSTO
PARA O INVERNO**

Grupo	Cenário	Produção Usina	Custo de Produção (R\$)	Custo de Compra (R\$)	Produção da Obra
A	1	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	2	Padrão + 30%			
	3	Padrão + 50%			
	4	Padrão + 100%			
B	5	Padrão	1,00	Padrão	Padrão
	6		Padrão		
	7		300,00		
	8		350,00		
C	9	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	10			400,00	
	11			500,00	
	12			600,00	
D	13	Padrão	Padrão	Padrão	Padrão
	14				Padrão + 30%
	15				Padrão + 50%
	16				Padrão + 54%

Alguns desses cenários foram testados com uma pequena variação do custo de produção e do custo de compra, essa diferença mínima foi estabelecida para se ter uma melhor visão nos gráficos relacionados ao resultado financeiro, conforme será descrito nas análises dos gráficos na Seção 5. Para o Cenário 5 do inverno, testou-se um resultado com um valor do custo de produção mínimo de 1 real, pois esse é o maior valor inteiro diferente de zero. Caso usasse zero, o custo de produção seria zerado e não se conseguiria uma análise eficiente. O custo de produção de 1 real é impossível de se conseguir na realidade, porém, analisá-lo trouxe resultados

eficientes para a tomada de decisão, conforme será descrito na análise da Seção 5.

4. Modelo Matemático Proposto

Este estudo propõe um modelo matemático para o planejamento de produção e de distribuição do asfalto CBUQ, para as obras de pavimentação. É importante mencionar que o modelo pode ser aplicado a qualquer empresa que produza Concreto Betuminoso Usinado a Quente e que tenha que o distribuir por diversas obras.

O modelo matemático proposto visa a planejar a logística de distribuição de CBUQ de diversas usinas para variadas obras em diferentes localidades, com o objetivo de aumentar o resultado financeiro gerado por empresas ao comprar e ao vender esse material para suas obras e para obras de terceiros. Tal modelo é apresentado em cinco partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Quando se fala em capacidade de produção da obra, refere-se ao índice de produção para execução do serviço de pavimentação asfáltica em CBUQ, conforme planilha do índice de produtividade do DER-ES.

- **Conjuntos**

N_{Usina}	Conjunto de usinas para produção de CBUQ, $i=1... n$;
N_{Obras}	Conjunto de obras de pavimentação que receberão o CBUQ, $i=1... n$;

- **Parâmetros**

$T_{Viag_{ij}}$	Tempo de viagem da usina à obra, em horas;
$TempoViagem_{ij}$	Limite máximo de tempo de viagem;
P_{Usina_i}	Capacidade de produção das usinas, em tonelada por dia;
P_{Obra_j}	Capacidade de produção das obras, em tonelada por dia;

$CProd_i$	Custo de produção do CBUQ (material e usinagem) de cada usina, sendo esse o custo da tonelada de CBUQ para as obras próprias;
$CVenda_i$	Custo de venda da tonelada de CBUQ para obras de terceiros;
$CViag_{ij}$ $j \in N$	Custo da viagem.

Variáveis de decisão

x_{ij}	Quantidade de CBUQ (toneladas) produzida na usina;
	$i \in NUsina, j \in NObras$;

• Função Objetiv

Minimizar (5)

• Restrições

$$\sum_{i \in NU} x_{ij} = PObra_j \quad \forall j \in NO \quad (6)$$

$$\sum_{j \in NO} x_{ij} \leq PUsina_i \quad \forall i \in NU \quad (7)$$

$$TViag_{ij} \leq TempoViagem_{ij} \quad \forall i \in NU, \forall j \in NO \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in NU, \forall j \in NO \quad \underline{(9)}$$

A função objetivo, Equação (5), representa o custo total de compra do CBUQ, que é o custo de venda pela usina acrescentado do custo de produção e de transporte da usina à obra, ou seja, busca mostrar ao comprador do produto a melhor usina que irá fornecer o produto com a qualidade necessária e menor preço. A função obje-

tivo deve ser minimizada, reduzindo, assim, o custo com a compra e com a obra.

As Restrições (6) asseguram o limite de produção diária das obras, de acordo com a quantidade de frente de serviço e com o índice de produtividade para a execução da aplicação do CBUQ.

As Restrições (7) confirmam o limite de produção diária das usinas de concreto asfáltico em tonelada, de acordo com a capacidade de produção de cada usina específica.

As Restrições (8) atestam o limite do tempo de viagem para o transporte do material permitido no inverno e no verão, para que se cumpram as exigências de qualidade do produto ao chegar à obra para sua aplicação.

As Restrições (9) certifica que o limite de produção da usina e da obra $i \in NUsina$ e $j \in NObra$ seja maior ou igual à zero.

$$i \in NUsina, j \in NObra$$

5. Apresentação e análise dos resultados

Os testes computacionais foram realizados utilizando um computador Intel i5 com 8 GB de memória RAM e um *solver* CPLEX versão 12.6. Na Tabela 3 Resultados apresentados pelo CPLEX para os cenários desenvolvidos no Verão e na Tabela 4 são apresentados os resultados alcançados pelo CPLEX. A título de explicação: a coluna Grupo informa o grupo dos cenários que serão analisados; a coluna Cenário informa o número do Cenário; a coluna Tempo de Execução apresenta o tempo necessário para o CPLEX chegar à solução ótima; a coluna FO aponta a função objetivo que o CPLEX encontrou; e as colunas CC - Custo de Compra, CP - Custo de Produção e CT - Custo de Transporte mostram os resultados do CPLEX separados para cada custo. Todas as instâncias testadas foram resolvidas pelo CPLEX de forma ótima, ou seja, tiveram GAP igual a 0,0%.

TABELA 3 – RESULTADOS APRESENTADOS PELO CPLEX PARA OS CENÁRIOS DESENVOLVIDOS NO VERÃO

CPLEX						
Grupo	Cenário	Tempo de Execução(s)	FO (R\$) x100mil	CC (R\$) x100mil	CP (R\$) x100mil	CT (R\$) x100mil
A	1	42,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	2	14,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	3	14,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	4	18,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
B	5	14,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	6	12,0	11,1226	8,16	1,44	1,5226
	7	18,0	11,1455	8,88	0,7348	1,5307
	8	12,0	10,1514	8,60	0	1,5514
C	9	18,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	10	18,0	8,8411	2,40	4,501	1,9401
	11	18,0	8,8811	2,44	4,501	1,9401
	12	17,0	6,4411	0	4,501	1,9401
D	13	14,0	7,6411	1,20	4,501	1,9401
	14	16,0	10,0014	1,56	5,8513	2,5901
	15	17,0	11,6110	1,80	6,7515	3,0595
	16	22,0	18,2775	4,548	7,851	5,8785

TABELA 4 – RESULTADOS APRESENTADOS PELO CPLEX PARA OS CENÁRIOS DESENVOLVIDOS NO INVERNO

CPLEX						
Grupo	Cenário	Tempo de Execução(s)	FO (R\$) x100mil	CC (R\$) x100mil	CP (R\$) x100mil	CT (R\$) x100mil
A	1	16,0	8,02480	2,4	3,858	1,7668
	2	14,0	7,99460	2,4	3,858	1,7366
	3	17,0	7,99460	2,4	3,858	1,7366
	4	14,0	7,99460	2,4	3,858	1,7366
B	5	13,0	4,1908	2,4	0,024	1,7668
	6	16,0	8,0248	2,4	3,858	1,7668
	7	19,0	11,1226	8,16	1,440	1,5226
	8	15,0	11,1672	9,6	0	1,5672
C	9	12,0	8,0248	2,4	3,858	1,7668
	10	15,0	8,8248	3,2	3,858	1,7668
	11	17,0	9,6248	4,0	3,858	1,7668
	12	15,0	10,4248	4,8	3,858	1,7668
D	13	18,0	8,0248	2,4	3,858	1,7668
	14	18,0	10,6172	3,24	4,9511	2,4261
	15	16,0	12,5774	4,44	5,3369	2,8005
	16	21,0	14,1167	5,916	5,189	3,0117

Observa-se que o CPLEX encontra a solução ótima de forma rápida, com o maior tempo entre os cenários de inverno e de verão de 42 segundos. Dessa forma, é possível encontrar a melhor decisão de produção, de compra e de quantidade de CBUQ a ser adquirida em curto espaço de tempo.

5.1. Análise dos grupos do verão

Com os cenários dos grupos do verão, testou-se o impacto financeiro com o aumento da capacidade de produção de todas as usinas nos cenários do Grupo A. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, observou-se o resultado financeiro com os dados reais; nos Cenários 2, 3 e 4, testou-se o impacto financeiro com o aumento de 30%, 50% e 100% da capacidade de produção de

todas as usinas. Após a execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 1, na qual constatou-se que, com os aumentos da capacidade de produção das usinas, não houve variação nos custos de compra, de venda e de transporte; e, conseqüentemente, no custo total. Ou seja, as usinas já produzem uma quantidade suficiente de CBUQ para atender às obras.

Analisou-se o impacto financeiro com o aumento do custo de produção de CBUQ nos cenários do Grupo B. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, verificou-se o resultado financeiro com os dados reais; enquanto nos Cenários 2, 3 e 4, testou-se o impacto financeiro com o valor do custo de produção do CBUQ de R\$160,75, R\$300,00, R\$307,00 e R\$308,60. Após a execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 2. Pelos resultados desta, pode-se observar que, com o aumento do custo de produção de CBUQ, há um crescimento na compra do produto por usinas terceiras uma diminuição na compra de produto próprio, indo a zero a busca por material próprio no Cenário 4, em que não seria mais viável produzir a um custo de R\$308,60.

FIGURA 1 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO A DO VERÃO

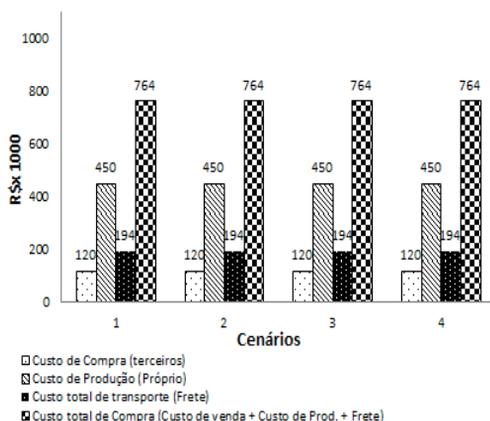
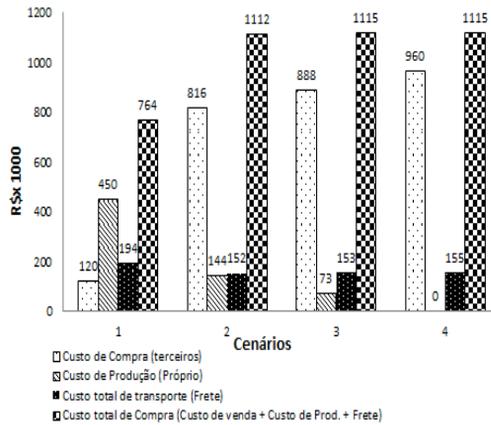


FIGURA 2 –RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO B DO VERÃO



Avaliou-se o impacto financeiro com o aumento do custo de compra do CBUQ nos cenários do Grupo C. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, observou-se o resultado financeiro com os dados reais; e nos Cenários 2, 3 e 4, testou-se o impacto financeiro com o custo de compra do CBUQ de R\$300,00, R\$600,00, R\$610,00 e R\$620,00. Após a execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 3, a partir da qual verifica-se que nos Cenários 2 e 3 conforme o custo de compra aumenta, nota-se um crescimento no custo de compra (terceiros) e um aumento no custo total, além disso, percebe-se que o custo de produção e transporte se mantém constante. Desse modo, cada usina continua distribuindo CBUQ para a mesma obra. No Cenário 4, há um aumento no custo de produção e de transporte, porém o custo de compra (terceiros) vai a zero, ou seja, atinge seu limite. Assim, com um custo de compra de usinas terceiras igual ou maior que 620,00 reais para a tonelada de CBUQ, passa a ser mais viável financeiramente a compra do produto da própria usina para atendimento às obras.

Testou-se, por fim, o impacto financeiro com o aumento da capacidade de produção da obra nos cenários do Grupo D. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, consi-

derou-se o resultado financeiro com os dados reais; enquanto nos Cenários 2, 3 e 4 fez-se uso do impacto financeiro com o aumento da capacidade de produção em 30%, 50% e 100%, sendo necessário a produção de mais CBUQ para atender às obras. Depois da execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 4, a qual indica que conforme aumenta a capacidade de produção das obras, há um crescimento proporcional do custo de compra, do custo de produção, do custo de transporte e, conseqüentemente, do custo total de compra, concluindo-se que as obras continuaram a comprar das mesmas obras do Cenário 1, porém em quantidade maior. Como não há uma busca por outras usinas, pode-se concluir, também, que a capacidade de produção das usinas atende à demanda.

FIGURA 3 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO C DO VERÃO

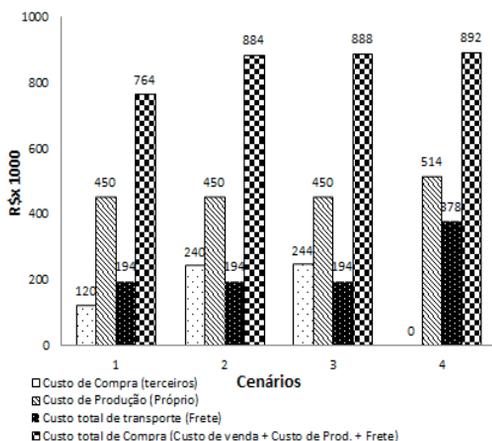
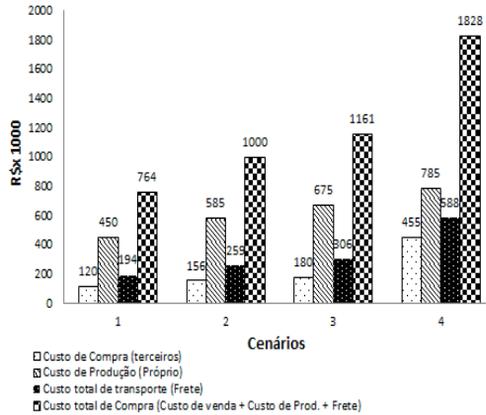


FIGURA 4- RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO D DO VERÃO



5.2 Análise dos grupos do inverno

Analisando os cenários dos grupos do inverno, testou-se o impacto financeiro com o aumento da capacidade produção de todas as usinas nos cenários do Grupo A. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, verificou-se o resultado financeiro com os dados reais; enquanto nos Cenários 2, 3 e 4, testou-se o impacto financeiro com o aumento de 30%, 50% e 100% da capacidade de produção de todas as usinas. Após a execução do CPLEX chegou-se ao gráfico da Figura 5, em que se observa que, com os aumentos da capacidade de produção das usinas, não houve variação nos custos de compra e venda, porém houve variação no custo de transporte e, conseqüentemente, no custo total dos Cenários 2, 3 e 4 quando comparados ao Cenário 1. Ou seja, é necessário um aumento grande na capacidade de produção das usinas para ter variação no custo de compra e venda.

Testou-se o impacto financeiro com o aumento do custo de produção de CBUQ nos cenários do Grupo B. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 2, observou-se o resultado financeiro com os dados reais; e nos Cenários 1, 3 e 4 analisou-se o impacto

financeiro com o valor do custo de produção do CBUQ de R\$100,00, R\$160,75, R\$300,00 e R\$350,00. Após a execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 6, a partir da qual analisou-se que de um cenário extremo, Cenário 1, para o Cenário 2 a variação se dá apenas pelo custo de produção, ou seja, as usinas continuam enviando para as mesmas obras. Já no Cenário 3 e 4, há alteração no custo de transporte, sendo assim, o CBUQ é enviado para obras diferentes.

FIGURA 5 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO A DO INVERNO

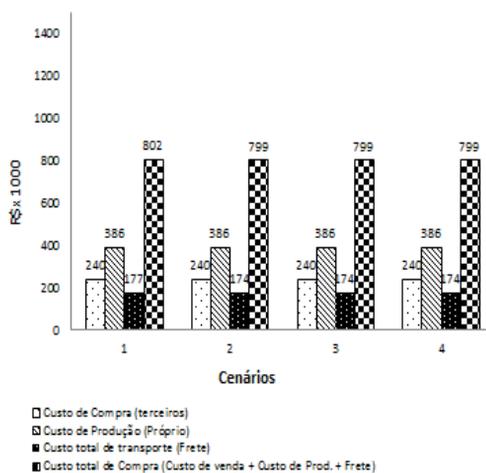
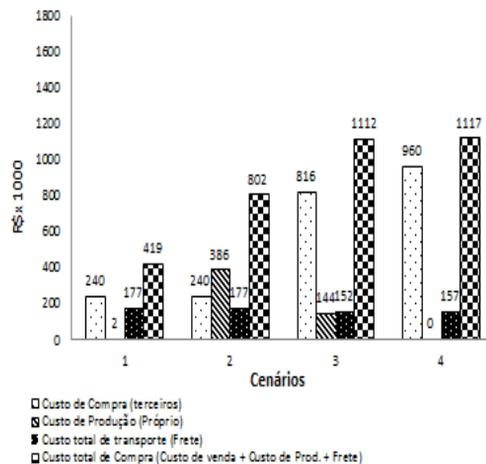


FIGURA 6 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO B DO INVERNO



Considerou-se o impacto financeiro com o aumento do custo de compra do CBUQ nos cenários do Grupo C. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, verificou-se o resultado financeiro com os dados reais; e nos Cenários 2, 3 e 4, testou-se o impacto financeiro com o custo de compra do CBUQ de R\$300,00, R\$400,00, R\$500,00 e R\$600,00. Depois da execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 7, a qual revela que o custo com a compra de CBUQ de usinas de terceiros aumentou, mas as obras continuaram a comprar material das mesmas usinas, uma vez que não houve alteração no custo de transporte.

Analisou-se, por fim, o impacto financeiro com o aumento da capacidade de produção da obra nos cenários do Grupo D. Sobre este grupo tem-se as seguintes verificações: no Cenário 1, observou-se o resultado financeiro com os dados reais; enquanto nos Cenários 2, 3 e 4, examinou-se o impacto financeiro com o aumento da capacidade de produção em 30%, 50% e 54%, sendo necessário a produção de mais CBUQ para atender às obras. Após a execução do CPLEX, chegou-se ao gráfico da Figura 8, a qual constata que conforme aumenta a capacidade de produção das obras, há um crescimento proporcional do custo de compra, do custo de produção, do custo de transporte e, conseqüentemente, do custo total de compra. Tem-se como conclusão que as obras continuaram a comprar das mesmas obras do Cenário 1, porém, em quantidade maior. Como não há uma busca por outras usinas, pode-se concluir, também, que a capacidade de produção das usinas atende à demanda.

FIGURA 7 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO C DO INVERNO

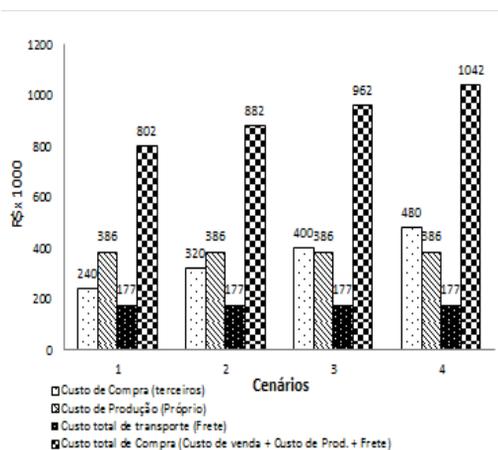
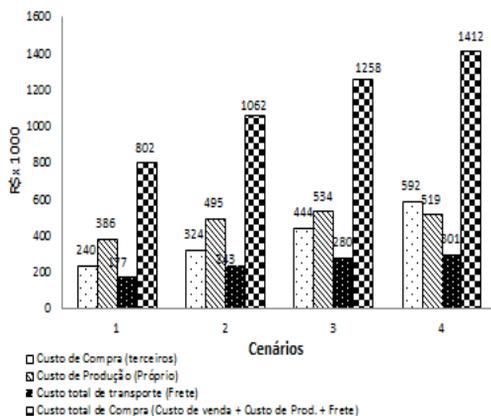


FIGURA 8 – RESULTADO FINANCEIRO DO GRUPO D DO INVERNO



4.3 Comparação entre os resultados do verão e do inverno

Comparando os resultados do inverno e verão, percebeu-se que com o aumento da capacidade de produção de todas as usinas, o resultado de produção e de distribuição é indiferente, tanto para

os cenários do verão quanto para os cenários do inverno. Ou seja, não há variação na quantidade de material que sai de uma usina e vai para obra, além disso, todas as obras continuam comprando das mesmas usinas que de antes de ter o aumento da capacidade de produção das obras.

Quando há um aumento do custo de produção (próprio), as obras passam a comprar de usinas terceiras, tanto nos cenários do verão quanto do inverno. Porém, nos cenários do inverno, esse processo ocorre mais rápido pelo fato de ter restrições mais fortes no tempo total de viagem, visto que o CBUQ esfria mais rápido, endurecendo, perdendo seu valor comercial e danificando os caminhões. Por conseguinte, é necessário buscar usinas mais próximas, mesmo que elas vendam CBUQ mais caro, pois o importante é que se atenda aos requisitos de qualidade quanto à temperatura.

Em relação ao aumento do custo de venda (terceiros), no verão, as usinas passam a vender mais para obras próprias. Já no inverno, vende-se mais para obras de terceiros. Esta situação ocorre pelo fato de ter restrições mais fortes no tempo de viagem, como explicado anteriormente.

Quanto ao aumento da capacidade de produção das obras, percebeu-se que não tem um comportamento parecido com o dos casos anteriores, nem no verão e nem no inverno, pois os resultados possuem variações que não mostram uma tendência de crescimento ou de queda nos valores.

6. Conclusão

Este capítulo propôs um modelo matemático para o planejamento de produção e distribuição do Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) para atendimento das obras de pavimentação, considerando a capacidade de produção das obras e das usinas e o tempo máximo de viagem que se pode ter das usinas às obras.

Na pesquisa bibliográfica, não foi encontrado, até o momento, um modelo matemático para tratar o planejamento de produção

e de distribuição de CBUQ. Assim, entende-se que esta é uma nova abordagem e contribui para futuros estudos sobre o assunto.

Realizou-se uma análise da variação da quantidade de compra e venda de CBUQ, de acordo com: o aumento da capacidade de produção das usinas; o aumento do custo de compra; o aumento do custo de venda; e o aumento da capacidade de produção da obra. Dessa forma, pôde-se concluir que, para as empresas do ramo melhorarem seus resultados é preciso analisar o modelo para cada situação específica, de acordo com a localização da obra em relação às usinas, uma vez que a variação de compra de terceiros e próprios não é contínua, sendo necessária a análise do modelo e/ou a análise gráfica para ver o que se torna mais viável.

Conclui-se que o modelo proposto pode atingir bons resultados no planejamento de produção e distribuição de CBUQ, alcançando a maximização dos resultados financeiros da empresa. Para a empresa em estudo, o modelo se mostrou como uma ferramenta eficiente.

Como trabalhos futuros, sugere-se uma análise econômico financeira da instalação de novas usinas, bem como novos estudos de localização.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Serrabetume Engenharia pelo fornecimento de dados para avaliação do modelo. Agradecem à FAPES (75528452/2016) e CNPq (307439/2016-0) pelo apoio financeiro à pesquisa.

Referências

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. D.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, v. 504, 2006.

BAPTISTA, Cyro Nogueira. **Pavimentação**. 2 ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1976.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTE. DNIT-ES 031/2006: Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificação de Serviço. Rio de Janeiro: IPR, 2006. 14 p. Disponível em: < http://ipr.dnit.gov.br/normas-e-manuais/normas/especificacao-de-servicos-es/dnit031_2006_es.pdf>. Acesso em: 10 março. 2015.

IA – INSTITUTO DO ASFALTO. **Manual de asfalto**. Rio de Janeiro: IA, 2001.

NABESHIMA, Cinthia Kaori Yabe; ORSOLIN, Kátia; SANTOS, Rafael Kresko Xavier dos. **Análise comparativa entre sistemas de pavimentação urbana baseados em concreto asfáltico e blocos de concreto intertravados (pavers)**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Paraná, 2011.

RAGSDALE, C. T. **Modelagem e Análise de Decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2011.

ROSA, R. de A. **Gestão Logística**. 2.ed. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração /UFSC; [Brasília]:CAPES: UAB, 2012.

CAPÍTULO 4

PROGRAMAÇÃO LINEAR E GERENCIAMENTO DE ESTOQUE EM UMA LOJA DE ARTIGOS ELETRÔNICOS⁴

**Nathan José Mota Garcia
Romenique José Avelar
Tiago Rodrigues da Costa
Tulio Kennedy Oliveira Gaipo
João Flávio de Freitas Almeida**

1. Introdução

O setor de eletroeletrônicos prevê faturar R\$133,4 bilhões em 2017. Embora o valor seja 3% maior em relação ao faturamento de 2016, nos últimos quatro anos o setor tem apresentado queda no faturamento e na produção física, o que leva à redução do uso da capacidade produtiva e do número de empregados (ABINEE, 2017). Nesse cenário, as empresas do setor enfrentam desafios relacionados à redução dos custos operacionais e logísticos.

No Brasil há uma carência de informações atualizadas sobre custos logísticos. Quando estes dados não representam a realidade, fica difícil avaliar o desempenho das operações ou compará-las ao

⁴ Este capítulo foi originalmente publicado em forma de artigo nos anais do XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, realizado em Fortaleza de 13 a 16 de outubro de 2015.

desempenho de outros países. Além de tudo, a falta de um histórico inviabiliza a análise da evolução do custo logístico (LIMA, 2006). Os custos logísticos englobam, dentre outros, os relacionados ao transporte, à movimentação e aos estoques.

Empresas industriais ou comerciais têm dificuldade em fazer o dimensionamento dos estoques. Um dos motivos é a falta de uma metodologia adequada. A manutenção de estoques e a variação no seu tamanho são parâmetros que tem influência no custo, e estes devem ser rateados para o custo dos produtos. O aumento no custo do produto pode gerar duas consequências negativas: a primeira é reduzir a margem de lucro, quando se mantém o preço de venda; e a segunda é manter a margem de lucro, mas aumentar o preço de venda. A última alternativa pode, ainda, comprometer a competitividade da empresa frente a seus concorrentes. Por isso, a redução de custos de estoques é um objetivo compartilhado por empresas dos mais diversos segmentos de atuação e de porte.

A empresa alvo deste estudo situa-se em uma cidade do centro-oeste mineiro. Ela atua no segmento de comercialização de artigos eletroeletrônicos. A demanda de seus produtos é variada, assim, por desconhecer técnicas eficientes para resolver esse problema, a empresa mantém grandes volumes de estoque, evitando perda de vendas. Este trabalho tem como enfoque a avaliação dos estoques da empresa e a aplicação de um método para minimizar os custos de estocagem, a partir da modelagem matemática e da programação linear, técnicas de Pesquisa Operacional. Prezou-se pelo uso de um modelo matemático simplificado, capaz de atender a demanda dessa empresa de pequeno porte, com o uso de uma metodologia viável financeiramente e que pode ser facilmente replicada. A contribuição científica do estudo consiste em demonstrar a aplicabilidade da Pesquisa Operacional como ferramenta de apoio à tomada de decisões no cotidiano das empresas.

A estrutura desse trabalho baseia-se em fazer uma revisão da literatura, aprofundando o entendimento sobre a gestão de estoques e seu impacto nas organizações, e o entendimento do modo

como a Pesquisa Operacional pode auxiliar a modelagem de operações de forma a reduzir os custos de estoques. Além disso, são apresentados os métodos e as técnicas utilizados na realização da pesquisa. Coletou-se dados dos tipos de produtos comercializados pela empresa, do histórico de vendas dos últimos doze meses, dos preços e compras de cada produto, bem como do custo de armazenagem de cada mercadoria. Na sequência, um modelo matemático foi elaborado e implementado computacionalmente por meio do software livre *Gnu Linear Programming Kit* (GLPK) (MAKHORIN, 2008), pela interface do GUSEK. Posteriormente é feita a análise dos resultados e a comparação com a situação real, de modo a constatar a eficiência da programação linear no auxílio do gerenciamento do estoque e na redução dos custos. Finalmente, concluímos sobre o resultado eficaz de redução de custos na empresa estudada e refletimos sobre a importância da Pesquisa Operacional para a melhoria dos resultados de empresas do mesmo porte.

2. Revisão de literatura

O estoque é um fator estratégico para as empresas, pois viabiliza o atendimento da demanda de forma continuada, assim, mesmo que apareçam problemas no setor de suprimentos ou de manufatura da empresa, a produção não para por falta de matéria prima e os clientes recebem seus produtos dentro do prazo. Dessa forma, uma das maneiras de garantir o atendimento é manter estoques em níveis altos. Contudo, embora os estoques apresentem as vantagens apresentadas, existe o custo de mantê-los, os quais influenciam o resultado financeiro da empresa. Nesse caso, a previsão de demanda e o planejamento das vendas têm um papel fundamental do dimensionamento dos estoques e na manutenção de um bom nível de atendimento ao cliente (SCHWITZKY, 2001).

Estoques de produtos regulam as diferenças entre as taxas de produção dos produtos e de demanda do mercado. Essas diferenças podem ter sua origem em função de decisões gerenciais ou por

ocorrências inesperadas, por isso é necessário ter estoque (CORRÊA, GIANESI E CAON, 2000).

Segundo Moreira (2006) estoques são recursos armazenados de forma improdutiva por determinado período de tempo, sendo estes de matéria-prima e de produtos acabados, esperando para serem comercializados. De acordo com Tadeu (2010, p. 8), “A gestão de estoques lida com a administração de itens e do fluxo destes ao longo de toda organização”. Além disso, os estoques são visto de diferentes formas na organização: para o setor operacional, são o meio de assegurar a produção com demandas variadas, enquanto que, para o setor financeiro, são recursos financeiros que geram custo (MOREIRA, 2006).

Segundo Moraes *et al.* (2015), “O custo pode ser entendido como sacrifício financeiro relativo à aquisição de bens e serviços que serão utilizados na produção de outro bem ou serviço”. No passado, o custo de estoque ou armazenagem era considerado irrelevante para as empresas, porém, com o desenvolvimento industrial, o número de itens em estoque aumentou consideravelmente e, junto com este, seu custo. Tal custo deixou de ser irrelevante e tornou-se fator que merece grande importância nas empresas. Para reduzir os custos com estoques, recorre-se às técnicas de Pesquisa Operacional.

A Pesquisa Operacional teve sua origem no ano de 1938, para alocar recursos escassos a várias operações militares na Segunda Guerra Mundial. Terminado o conflito, deu-se início à Pesquisa Operacional propriamente dita nas organizações (MOREIRA, 2013, p.2).

Pesquisa Operacional lida com problemas de como conduzir e coordenar certas operações em uma organização, e têm sido aplicada a diversas áreas, tais como: indústria, transportes, telecomunicações, finanças, saúde, serviços públicos, operações militares, etc. (MOREIRA, 2013, p.3).

De acordo com Arenales *et al.* (2007), modelos matemáticos são traduções de leis que regem fenômenos, processos ou sistemas,

possíveis de serem modelados a partir das relações matemáticas. Logo, a Pesquisa Operacional é uma ferramenta científica de extrema importância que auxilia engenheiros de produção a tomarem decisões complexas, possibilitando a alocação ótima de recursos escassos.

Com os conceitos discutidos, percebe-se que os custos referentes à estocagem, devem ser bem geridos, de modo que tenham pouca influência no custo final dos produtos. Assim, o uso da Pesquisa Operacional é indicado como uma boa alternativa, pois usa métodos científicos, como a Programação Linear, para reduzir os custos ou para aumentar o lucro das organizações, pela elaboração e implementação de modelos matemáticos.

A Programação Linear é uma das técnicas mais empregadas na abordagem de problemas em Pesquisa Operacional, pois além da simplicidade do modelo envolvido, também tem sua aplicação facilitada por possuir uma técnica de solução programável em computador. A ferramenta é mais comumente empregada em sistemas estruturados, como os de produção, de controles de estoque, de finanças, etc. (SILVA *et al*, 1998).

O modelo matemático de programação linear é composto de uma função objetiva linear, e de restrições técnicas representadas por um grupo de inequações também lineares. (SILVA *et al*, 1998, p. 14).

O exemplo abaixo se refere a um modelo matemático de programação linear criado por Silva *et al* (1998). Ele é formado pela Eq. (1) e pela função objetivo de maximizar o lucro $f(x)$, estando sujeito às restrições técnicas do processo (2) e (3) e às restrições de não negatividade (4) e (5).

$$\text{Maximizar Lucro} = 2x_1 + 3x_2 \quad (1)$$

Sujeito à:

$$4x_1 + 3x_2 \leq 10 \quad (2)$$

$$6x_1 - x_2 \geq 20 \quad (3)$$

$$x_1 \geq 0, x_2 \geq 0 \quad (4) (5)$$

Onde, x_1 e x_2 são variáveis de decisão, para medir o desempenho do sistema apresentado na função objetivo, ou seja, a capacidade de gerar lucro para cada solução. Para garantir que as barreiras técnicas impostas pelo sistema sejam satisfeitas, são criadas as restrições (2) e (3) e as restrições de não negatividade, como ilustrado nos paradigmas (4) e (5). A parte mais complexa é o desenvolvimento do modelo matemático, pois não há uma regra fixa para a realização desse processo. Para facilitar a construção do modelo, sugere-se a utilização do seguinte roteiro:

- a. Definir as variáveis de decisão, que podem ser o quanto produzir e estocar num período para programar a produção, ou o quanto investir em se tratando de um problema de programação de investimento, ou seja, vai depender do problema a ser abordado.
- b. Determinar o objetivo, que pode ser de maximização dos lucros ou minimização dos custos, etc. Este objetivo é traduzido na função objetivo.
- c. Decidir as restrições que devem ser expressas como uma afinidade linear de igualdade ou desigualdade, elaborada com as variáveis de decisão.

3. Metodologia

Este trabalho se trata de um estudo de caso, que, segundo Ventura (2017), representa um “instrumento de investigação, uma modalidade de pesquisa que pode ser aplicada em diversas áreas do conhecimento”. Os benefícios em usar essa modalidade de pesquisa estão na possibilidade do desenvolvimento de nova teoria e de

augmentar o entendimento sobre eventos reais e contemporâneos (MIGUEL, 2007).

De acordo com sua natureza, esta é uma pesquisa aplicada, na qual o interesse é buscar soluções que atendam à uma loja de artigos eletrônicos, no que diz respeito ao melhor gerenciamento de estoques, por meio da elaboração de um modelo matemático que proporcione a redução dos custos inerentes à formação de estoques, além de fornecer informações sobre o quanto à empresa deve comprar de produtos.

O estudo tem uma abordagem quantitativa, em que é realizada a coleta de dados para formular o modelo matemático, além de verificar sua eficiência em fornecer informações para a tomada de decisão na empresa, objeto de estudo deste trabalho. Dessa forma, para calcular o *custo de estoque*, ou custo de armazenamento, adota-se a equação (CARLOMAGNO, 2006):

$$H = \frac{Q}{2} \times P \times T \times I \quad (6)$$

Onde as variáveis representam:

H Custo de estoque ou custo de armazenagem;

Q Quantidade de material em estoque no tempo considerado;

P Preço unitário do material;

I Taxa de armazenagem;

T Tempo considerado de armazenagem.

Os valores podem ser obtidos coletando-se os dados na empresa onde se deseja efetuar o cálculo do custo de armazenagem, exceto a taxa de armazenagem (*I*), esta pode ser obtida por meio da equação (7):

$$I = I_a + I_b + I_c + I_d + I_e + I_f \quad (7)$$

Em que:

I_a Taxa de retorno de capital;

I_b Taxa de armazenagem físico;

- I_c Taxa de seguro;
 I_d Taxa de transporte, manuseio e distribuição;
 I_e Taxa de obsolescência;
 I_f Outras taxas.

Os valores acima podem ser encontrados pelas seguintes equações:

$$I_a = \frac{100 \times \text{Lucro}}{(\text{Valor de estoque})} \quad (8)$$

$$I_b = \frac{100 \times (\text{Custo anual do armazenamento}) \times (\text{Área ocupada pelo estoque})}{(\text{Consumo anual}) \times (\text{Preço unitário})} \quad (9)$$

$$I_c = \frac{100 \times (\text{Custo anual de seguro})}{(\text{Valor de Estoque}) + (\text{Edifício})} \quad (10)$$

$$I_d = \frac{100 \times (\text{Depreciação anual do equipamento})}{(\text{Valor de Estoque})} \quad (11)$$

$$I_e = \frac{100 \times (\text{Perdas anuais por obsolescência})}{(\text{Valor de Estoque})} \quad (12)$$

$$I_f = \frac{100 \times (\text{Despesas anuais})}{(\text{Valor de Estoque})} \quad (13)$$

É relevante citar que a empresa não possuía planejamento sobre a quantidade de produtos comprados e estocados, evidenciando a necessidade de utilização de algum método eficaz para tal fim. Optou-se, então, pelo desenvolvimento de um modelo matemático capaz de obter a melhor combinação de quantidades de produtos comprados e estocados. Havendo demanda pelos produtos, é de suma importância supri-la. Destaca-se, também, que a melhor combinação está associada à um custo mínimo de estocagem. O

modelo matemático para resolver o problema pode ser observado a seguir:

Considerando os conjuntos:

M Conjunto de produtos, $i = 1, \dots, m$

T Períodos de Planejamento, $i = 1, \dots, T$

Coletam-se os dados (ou parâmetros):

E_i Estoque inicial do produto i

D_{it} Previsão de demanda do produto i no período t

K_i Custo unitário do produto i

H_i Custo unitário de estoque do produto i

Consideramos as seguintes variáveis de decisão:

X_{it} Quantidade a ser comprada do produto i no período t

S_{it} Quantidade a ser estocada do produto i no período t

Formulando o modelo matemático:

$$\text{MinimizarCusto} = \sum_{i=1}^m \sum_t^T K_i x_{it} + H_i s_{it} \quad (14)$$

Sujeito a:

$$s_{it} = E_i \quad \forall i \in M, t=0 \quad (15)$$

$$x_{it} + s_{it-1} = D_{it} + s_{it} \quad \forall i \in M, \forall t \in T \quad (16)$$

$$s_{it} \geq 0, \forall D_{it} \quad \forall i \in M, \forall t \in T \quad (17)$$

Sobre os paradigmas, cabe elucidar que: a função objetivo (14) busca a minimização dos custos totais (soma do custo de compra com o custo de estoque); a restrição (15) é responsável por atribuir os valores do estoque inicial (pré-estipulado) à quantidade estocada do produto i no período inicial ($t=0$); a restrição (16) simboliza o balanço de fluxo da quantidade de produtos comprados, estocados e vendidos, de forma que a quantidade x_{it} de produtos i , adquiridos

no período t e somados à quantidade S_{it-1} de estoque do produto i no período anterior ($t-1$), tem que ser equivalente à demanda D_{it} do mesmo produto i no período em questão somada ao estoque S_{it} desse produto i nesse período t ; a restrição (17) foi implementada com o propósito de não permitir que o estoque fique zerado, a fim de ter um estoque de segurança, assim, o gerente da empresa estipulou um estoque dessa natureza que equivalente, aproximadamente, à 15% da quantidade de demanda prevista. Por conta disso, os valores escolhidos para determinar o estoque de segurança foram obtidos em função da demanda.

4. Resultados

A empresa (trata-se de uma loja que revende produtos eletrônicos) trabalha com uma grande variedade de produtos, assim, foi escolhida uma amostra, por meio da técnica de amostragem probabilística do tipo aleatória simples (LAKATOS, MARCONI, 2003, p.224) formada por cinco produtos. Houve então a coleta dos dados para formulação dos parâmetros e das variáveis utilizadas. O *custo de estoque* precisou ser calculado, para isso recorreu-se à equação (6). Ademais, os parâmetros dessa equação foram substituídos pelos dados coletados na empresa, com exceção da taxa de armazenamento (I), que foi calculada por meio da equação (7).

O modelo matemático considera os seguintes produtos: computador, impressora, pendrive, celular e cartão de memória. Foi previsto uma demanda mensal dos produtos num período de seis meses, desse modo, a solução desenvolvida teve sua aplicação iniciada no mês de dezembro de 2014 e terminada em maio de 2015. A loja de artigos eletrônicos compra uma quantidade de itens e os revende e os custos unitários desses produtos foram tratados como sendo os preços de aquisição, os quais podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Custo unitário de compra

Produtos	Computador	Impressora	Celular	Pendrivel	Cartão de Memória
Custo unitário de compra (R\$)	683,00	113,00	67,55	11,90	14,90

Fonte: Elaborada pelos autores.

Os custos apresentados na Tabela 2 são referentes à estocagem. Eles foram calculados por intermédio da equação (7) e variam conforme o tipo de produto. Vale informar que os dados utilizados para tal cálculo não foram apresentados em respeito à solicitação do proprietário da empresa:

Tabela 2 – Custo unitário de estoque

Produtos	Computador	Impressora	Celular	Pendrivel	Cartão de Memória
Custo unitário de estoque (R\$)	29,25	4,28	2,77	0,31	0,29

Fonte: Elaborada pelos autores.

A demanda dos produtos ao longo do período (dezembro de 2014 até maio de 2015) foi estipulada pela própria empresa. Assim sendo, o número de produtos solicitados são demonstrados na Tabela 3, enquanto que o estoque inicial dos cinco tipos de produtos está disposto na Tabela 4.

Tabela 3 – Demanda dos produtos

	Mês	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Produto (Unidade)	Computador	17	15	15	13	18	17
	Impressora	21	20	18	20	23	18
	Celular	38	40	36	28	39	33
	Pendrivel	238	220	210	170	260	265
	Cartão	211	198	181	120	215	180

Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 4 – Estoque inicial

Produto	Compu- tador	Impressora	Celular	Pendrivel	Cartão de memória
Estoque inicial (Unidade)	23	41	350	838	757

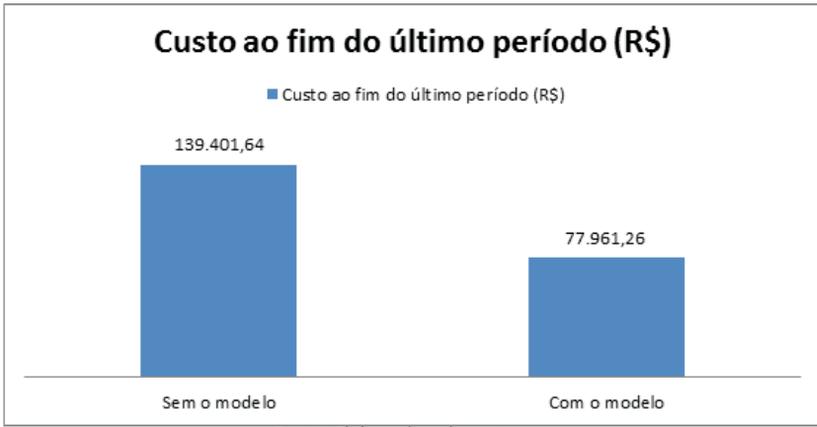
Fonte: Elaborada pelos autores.

Ao implementar a solução apresentada pelo modelo matemático a empresa reduziria 44% dos seus custos, o que equivale a R\$ 61.440,38, pois no período analisado, a empresa teve um custo de R\$ 139.401,64. Se as decisões de compra e armazenagem fossem baseadas na proposta do modelo, esse custo passaria para R\$ 77.961,38. Com o valor economizado, a empresa poderia investir na ampliação do negócio e, assim, atingir uma maior fatia de mercado. A Figura 1 apresenta a comparação dos valores obtidos pela utilização ou não do modelo para tomar decisões.

No início do estudo, a empresa trabalhava com alto volume de estoque para ter a garantia de ter o produto disponível na prateleira para o cliente, porém isso acarreta um aumento substancial nos custos da empresa. A quantidade de estoque ao longo do período era constante, à medida que se vendia as mercadorias, fazia-se a compra da mesma quantidade vendida, ou seja, efetuava-se apenas uma reposição de estoque. O modelo matemático elaborado faz uma análise da relação entre estoque, demanda, preços e custos, permi-

tindo um planejamento adequado para a empresa. Dessa forma, mesmo que se reduza a quantidade de estoques, a demanda será atendida no prazo.

Gráfico 1 - Comparação entre o custo total no período abordado pelo trabalho



Fonte: Elaborado pelos autores.

6. Conclusão

Este trabalho avaliou o uso da programação linear para apoio à gestão de estoques de uma loja de artigos eletrônicos. A empresa analisada tem a necessidade de reduzir os custos de estoque de cada produto para manter-se competitiva no ambiente onde está inserida, assim, para superar seus concorrentes, é preciso reduzir os custos de estoque e, ao mesmo tempo, atender o cliente no momento do pedido, visto que a empresa não pode perder vendas por falta de produtos.

A organização, embora conte com algum tipo de controle, não possui planejamento, resultando em custos excessivos de estocagem. Nesse sentido foi usada a técnica de programação linear junto a uma pesquisa de demanda de mercado com duração de seis meses, referentes ao período de desenvolvimento deste trabalho.

É notória a relevância do uso de modelos matemáticos como ferramentas de auxílio à tomada de decisões, haja vista que sua implementação na empresa estudada possibilitaria uma redução de aproximadamente 44% nos custos de estocagem. O uso da programação linear como uma ferramenta de apoio a decisão é fundamental para a empresa determinar os níveis de estoque para cada produto. A solução do modelo aponta a quantidade ótima de produtos a serem adquiridos e estocados, sem deixar de atender a demanda dos clientes, melhorando, assim, sua lucratividade a partir da redução do custo de estocagem excessiva.

Referências

ABINEE, Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica.

Desempenho setorial. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.html>>. Acesso em: 29 ago. 2017.

ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa Operacional:** para cursos de engenharia. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier. 2007.

CARLOMAGNO, Fernando Santos. **Uma abordagem de custos na formação de estoques.** 2006.

CORRÊA, H.L.; GIANESI, I.G.; CAON, M. **Planejamento, Programação e Controle da Produção - MRPII/ERP - 3**ª ed., São Paulo: Atlas, 2000.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de Metodologia Científica.** 5 ed. São Paulo: Atlas, 2003. 311 p.

LIMA, M. P. **Custos Logísticos na Economia Brasileira.**

Revista Tecnológica. São Paulo, SP, 2006. Disponível em: <<http://www.rslima.unifei.edu.br/download1/pqe02/CustosLogisticosTecnologica.pdf>>, acesso em 07/12/2014.

MAKHORIN, Andrew *et al.* **GLPK (GNU linear programming kit)**. 2008.

MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na engenharia de produção:** Estruturação e recomendações para sua condução. Produção. v.17. n.1. p. 216-229. São Paulo:[s.n]. jan/abr 2007.

MORAES, Marcelo C. M. M. *et al.* Nova perspectiva de custo de produção na agropecuária: proposta de avaliação para sistemas de integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF). **Congresso Brasileiro de Custos**, Natal, RN, nov. 2014.

MOREIRA, D. A., **Administração da Produção e Operações**. São Paulo, SP: Thomson, 2006.

MOREIRA, D. A., **Pesquisa Operacional:** Curso introdutório. 2 ed. São Paulo, SP: Cengage Learning. 2013.

SCHWITZKY, M. **Acuracidade dos métodos de previsão e a sua relação com o dimensionamento dos estoques acabados**. Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia, Florianópolis. 2001.

SILVA, Medeiros da Silva *et al.* **Pesquisa Operacional: Programação linear e Simulação**. 3. Ed. São Paulo: ATLAS S.A, 1998. 184 p.

TADEU, H. F. B. **Gestão de estoques:** Fundamentos, modelos matemáticos e melhores práticas aplicadas. São Paulo, SP: Cengage Learning, 2010.

VENTURA, M. M. **O estudo de caso como modalidade de pesquisa**. Rev SOCERJ. 2007. Disponível em: <http://www.polo.unisc.br/portal/upload/com_arquivo/o_estudo_de_caso_como_modalidade_de_pesquisa.pdf>. Acesso em 08 de set. de 2014.

CAPÍTULO 5

SIMULAÇÃO DISCRETA E OTIMIZAÇÃO DE ESTOQUES EM UMA OFICINA DE MANUTENÇÃO NO SETOR DE ÓLEO E GÁS⁵

**Lidiane Borges Silverio
Edwin Benito Mitacc Meza
Iara Tammela
Dalessandro Soares Vianna**

1. Introdução

As organizações do mundo corporativo têm multiplicado esforços para otimizar estoques com o objetivo de reduzir custos e aumentar o nível de serviço ao cliente. Entretanto, cenários complexos podem dificultar a escolha de políticas ótimas de estoque. É o que ocorre, principalmente, na gestão de estoques de manutenção no ambiente *offshore*. Segundo Altay e Lital (2011), a gestão de sobressalentes é complexa e difícil, nela uma falha custa, normalmente, entre 100 a 10000 vezes o preço das peças ou serviços envolvidos, no entanto, manter em estoque o que é desnecessário gera custos e não contribui para uma cadeia de suprimentos efetiva, eficiente e responsiva.

5 Este capítulo foi originalmente publicado em forma de artigo nos anais do XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, realizado em Fortaleza de 13 a 16 de outubro de 2015.

É importante ressaltar que a indústria de petróleo brasileira possui grande importância para o desenvolvimento econômico e social do país, pois os desafios demandados pelas condições adversas de produção do setor alavancam o desenvolvimento de novas tecnologias e disseminação de conhecimento. O presente trabalho se insere neste contexto, pois estuda a gestão de estoques de sobressalentes numa Oficina de Manutenção de Turbomáquinas que realiza a manutenção de equipamentos dinâmicos responsáveis por comprimir o gás produzido para transporte e por gerar a energia necessária à produção das plataformas *offshore*.

Os equipamentos mantidos nesta oficina possuem grande gama de peças passíveis de substituição, com custos elevados devidos às características especiais de projeto. Muitos dos itens substituídos possuem demanda pouco frequente, em intervalos irregulares, além disso, os prazos de entrega são longos e as entregas sofrem atrasos. Diante deste cenário complexo, a gestão de estoques desses sobressalentes é essencial para a redução de custos operacionais da companhia e para a garantia da continuidade operacional dos poços produtores de petróleo. Assim, o objetivo deste estudo é otimizar os parâmetros de ressuprimento da atual política de estoques da citada oficina de manutenção de turbomáquinas, considerando-se os custos de estoques e a falta de sobressalentes envolvidos. Foi utilizado um modelo de simulação discreta, pois os itens de estoque de manutenção geralmente possuem demanda intermitente e errática (ALTAY; LITERAL, 2011), o que torna mais difícil a proposição de um modelo analítico.

2. A Gestão de Estoques e os Sobressalentes de Manutenção

A gestão de estoques tem um papel importante para a competitividade das empresas, visto que deve equilibrar os custos do capital imobilizado e os custos da falta do item. De acordo com Chopra e Meindl (2007), os estoques existem na cadeia de suprimento devido à incompatibilidade entre fornecimento e demanda. Já a gestão de

estoques de sobressalentes é um tema mais complexo devido à especificidade das peças de reposição, que podem ter diferentes, funções, aplicações, padrão de consumo e criticidade. Consoante Basten e Houtum (2014), estocar a quantidade adequada é difícil, especialmente para componentes de alto valor que falham com pouca frequência e tem um longo lead time de reposição.

Garcia et al. (2006) 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. Embora as políticas de gestão de estoques estejam bem consolidadas, os estoques de manutenção possuem uma administração mais árdua. Segundo Santoro e Freire (2008), o aumento da complexidade dos problemas surgidos com modelos ativos de estoque, que consideram também dados de previsão de demanda, favoreceu a utilização da simulação e de modelos de busca como instrumentos de tomada de decisões. Ademais, Rosa et al. (2010) afirmam que, com o desenvolvimento e o aprimoramento do controle de estoques, os decisores têm utilizado de outras ferramentas, como a simulação para a identificação de estratégias ótimas de estoques. A seguir serão apresentados os principais modelos de reposição de estoques e os custos envolvidos.

2.1 Lote econômico de compra (LEC)

O modelo de lote econômico de compra foi o primeiro método de controle de estoques publicado na literatura, tornando-se alvo de inúmeras pesquisas que originaram novos modelos. Segundo Rosa et al. (2010), o LEC obtém a quantidade ótima a ser solicitada como função dos custos de manutenção do estoque e de realização de um pedido. Trata-se de 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 (1), em que Q^* é a quantidade ótima de pedido, K é

o custo fixo do pedido, D é a demanda, i é a taxa de encargos sobre o estoque e C é o custo unitário do produto.

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

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 Rosa *et al.* (2010), esse modelo baseia-se em estabelecer um nível fixo de reposição (r) que, ao ser atingido, dispara a emissão de um novo pedido de tamanho Q pré-definido. Tal nível é dado pela equação (2), na qual d é a demanda por unidade de tempo, t é o tempo de reposição e Q_s é o estoque de segurança:

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

O estoque de segurança Q_s é calculado usando a equação (3), multiplicando-se m por σ , sendo aquele o número de desvios padrão para o nível de serviço especificado e este o desvio padrão da demanda durante o tempo de ressuprimento.

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

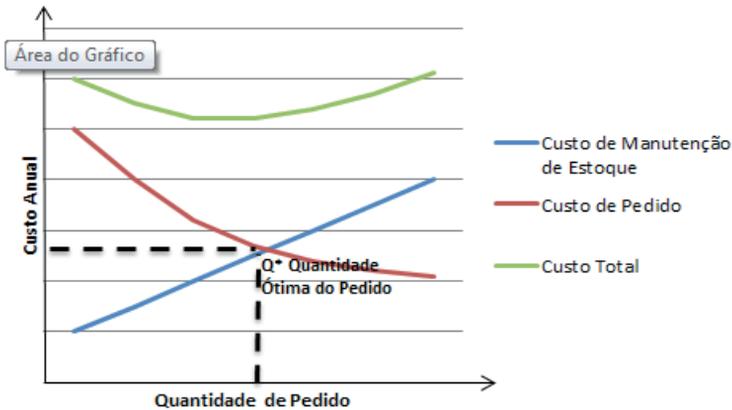
Uma variante desse modelo é a política de estoque base, que possui apenas um parâmetro de estoque, que é o estoque base. O estoque base, ao ser atingido, dispara nova compra com a quantidade necessária para que o estoque base seja repostado.

2.3 Custos de estoque

O conhecimento dos custos dos estoques é essencial para se definir uma boa política de estoques, pois possibilita quantificar

a relação de *trade-off* que existe entre a manutenção de itens em estoque e as consequências da falta do item. O ponto ótimo de estoques é atingido quando se equilibra os custos de manutenção de estoques, os custos de pedidos e o custo da falta de estoques, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 - Custo total de estoque.



Fonte: Próprio Autor

Os custos mais importantes que incorrem nos itens em estoque são:

- a) Custos de manutenção dos Estoques: podem ser divididos em 1) custos de armazenagem, que contemplam os custos fixos e as variáveis associados às instalações de armazenagem, o manuseio dos materiais, o seguro, as perdas, a obsolescência, entre outros; e 2) custo de oportunidade, que é o custo do capital imobilizado em estoque;
- b) Custos de Pedidos: são os custos de emissão de ordem de compra ou pedido;
- c) Custo de falta de estoque: também denominado de custo de ruptura dos estoques, pode envolver situações como a perda de receita ocasionada por venda perdida, o custo adicional

de compra em caráter emergencial e a perda de produção devido à parada de equipamentos. Sobre esse aspecto, Sarker e Haque (2000) citam também a perda de capacidade e mão-de-obra ociosa.

3. Etapas de um Estudo de Simulação

A simulação é uma excelente ferramenta para prever o comportamento de sistemas complexos e auxiliar na tomada de decisões. De acordo com Pegden (1995, apud FREITAS, 2008), a simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e de conduzir experimentos com o propósito de entender seu comportamento e de avaliar estratégias para sua operação. O processo de simulação segue o método científico, ou seja, formula as hipóteses, prepara o experimento, testa as hipóteses com a realização do experimento e, por último, valida as hipóteses a partir dos resultados obtidos. Chwif e Medina (2010) apontam alguns passos que devem ser seguidos num projeto de simulação:

- 1) Concepção ou formulação do modelo: nessa etapa deve-se entender claramente o sistema a ser simulado e seus objetivos; criar um modelo conceitual; definir fronteiras, premissas, entidades, recursos e medidas de performance do sistema; além de coletar os dados de entrada;
- 2) Implementação do modelo: trata-se da conversão do modelo conceitual para o modelo computacional através de lógica de simulação; da comparação do modelo computacional com o conceitual para avaliar se a operação atende ao que foi estabelecido na etapa de concepção; e da validação e verificação do modelo;
- 3) Análise dos resultados do modelo: ocupa-se da realização das rodadas do modelo; da comparação de cenários alternativos; e da análise e documentação dos resultados.

3. Metodologia

A seguir serão descritas as etapas para implementação do modelo de simulação.

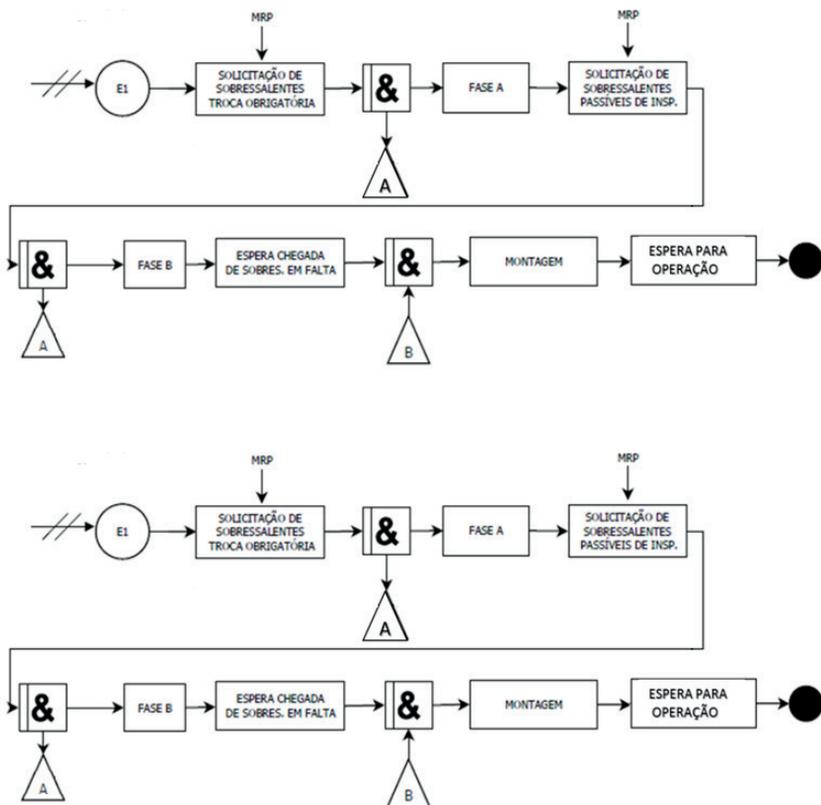
3.1 Modelo Conceitual

O foco do estudo é a atividade de manutenção *offshore* das turbomáquinas, que são os equipamentos rotativos responsáveis pela geração de energia para o processo produtivo e, também, pela compressão do gás produzido pelas unidades operacionais. Periodicamente, esses equipamentos precisam ser removidos de suas instalações e encaminhados para revisão geral em centro de manutenção.

Os sobressalentes envolvidos na manutenção em estudo podem ser de dois tipos: os de troca obrigatória, que são obrigatoriamente substituídos em todas as manutenções, como vedações e parafusos; e os passíveis de inspeção, cuja substituição é definida somente após inspeção da peça, como as palhetas, os mancais, as sapatas e etc. Estes ainda podem ter perfil de demanda intermitente, quando a quantidade substituída a cada manutenção se mantém constante; ou perfil irregular, quando, além da demanda intermitente, os itens podem sofrer variação na quantidade utilizada a cada manutenção.

Os processos da atividade de manutenção avaliada, que impactam diretamente na gestão dos estoques sobressalentes e que, por isso, serão simulados, correspondem aos procedimentos de manutenção de equipamentos e de aquisição de sobressalentes. Estes são representados nas figuras 2 e 3, respectivamente, as quais apresentam o modelo conceitual, conforme simbologia IDEF-SIM, apresentada por Leal et al. (2008). Os dois processos são interconectados, como pode ser visto nas figuras citadas, por intermédio dos triângulos conectores A e B.

Figura 2 – Processo de Manutenção dos Equipamentos.



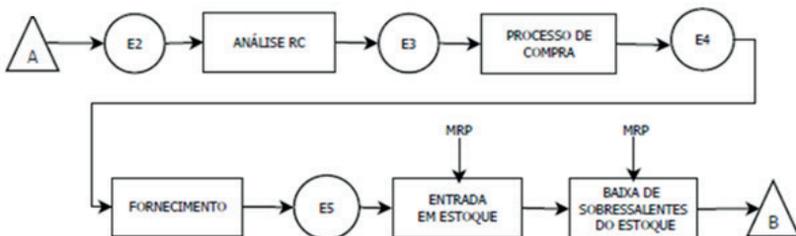
Fonte: Próprio Autor

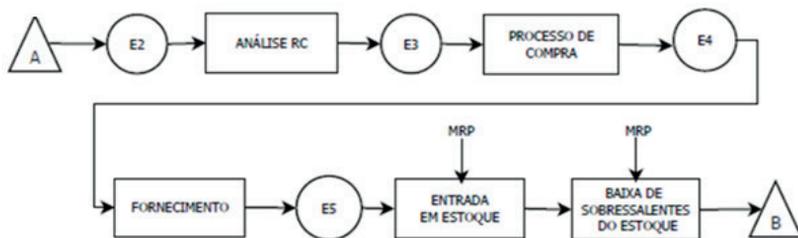
Na figura 2, que representa o processo de manutenção, o equipamento é representado pela entidade E1, que entra no sistema quando a operação é interrompida e a manutenção tem início. A primeira atividade executada é a solicitação dos sobressalentes de troca obrigatória, cuja compra será processada através do processo de aquisição de sobressalentes, que será detalhado a seguir. Após a solicitação destes itens, inicia-se a primeira fase da manutenção denominada Fase A, na qual o equipamento é desmontado e suas

peças são triadas e inspecionadas. São solicitados então os sobressalentes passíveis de inspeção que foram reprovados na inspeção, os quais serão encaminhados para compra e o equipamento segue para a Fase B da manutenção, que consiste na execução dos reparos identificados na inspeção.

Após esta fase, o equipamento só é encaminhado para a montagem, que é a Fase C, quando todas as peças solicitadas estão disponíveis. Posteriormente, o equipamento está revisado e aguarda então o momento de retornar à operação, quando deixará o sistema. Uma vez que os equipamentos estudados são primordiais para a produção de petróleo e as revisões gerais são longas, a empresa possui um *pool* de equipamentos reservas para substituição dos que são removidos para manutenção. Os equipamentos reservas evitam grandes interrupções de produção quando ocorre quebra ou quando um equipamento precisa passar por manutenção preventiva. Se um equipamento não tiver sua manutenção finalizada e, não havendo outro equipamento reserva disponível quando ocorrer uma quebra, haverá perda de produção. Ademais, após a manutenção de um equipamento, ele pode se tornar reserva, se após o término da manutenção não houver necessidade de operação do mesmo, ou retornar direto para a operação caso não haja outro equipamento reserva. No último caso ocorre a perda de produção.

Figura 3 – Processo de Aquisição de Sobressalentes.





Fonte: Próprio Autor

Na figura 3 está representado o processo de aquisição de sobressalentes. Caso a solicitação de material provoque a necessidade de aquisição de sobressalentes, é gerada uma Requisição de Compra (RC), representada pela entidade E2, no sistema MRP (*Manufacturing Resource Planning*) da empresa. As requisições de compra são encaminhadas para a área responsável pelas contratações da empresa, que irá realizar a análise da RC, esta, por sua vez, consiste em verificar se as informações dessa requisição estão adequadas; se existe estoque excedente do material em algum armazém da empresa; ou se há contrato disponível para a aquisição. Após esta etapa, as RC's são agrupadas em processos de compra, representados pela entidade E3, de acordo com a similaridade, e são enviadas para um comprador que irá realizar o processo de compra, a partir da análise de cotações e da emissão do Pedido de Compras, representado pela entidade E4.

Posteriormente ao processamento da compra, será necessário aguardar pela entrega do material pelo fornecedor, de acordo com o prazo de fornecimento estabelecido no pedido de compra, o que constitui a fase de Fornecimento do Pedido de Compra, cujos materiais fornecidos estão representados pela entidade E5. Por fim, o setor de armazenagem recebe os materiais, confere a documentação, verifica se não há divergências e seleciona um depósito e uma posição para armazenagem do item. Este processo pode durar de um a alguns dias e corresponde à fase de Entrada em Estoque. Se

houver solicitação para algum dos itens fornecidos, ocorre a baixa do estoque.

A empresa estudada se utiliza, atualmente, do tempo de ressurgimento da última compra, da demanda planejada de manutenções para os períodos futuros e do conhecimento empírico dos técnicos dos equipamentos para estimar seus níveis de estoque. É utilizada a política de revisão contínua de estoques do tipo (s,S), citada por Sarker e Haque (2000) *maintenance and spare parts inventory policies are treated separately or sequentially. To ensure availability of spare parts for a production system use, when necessary, there is always a tendency to overstock them. Excess inventory involves substantial working capital. The stock level of spare parts is dependent on the maintenance policy. Therefore, maintenance programs should be designed to reduce both maintenance and inventory related costs. In this paper, a manufacturing system is considered with stochastic item failure, replacement and order lead times of statistically identical items. The development of mathematical model for such a system is extremely difficult. A simulation model is therefore developed for the system operating with block replacement and continuous review inventory policy. The response of the system was studied for a number of case problems. The study clearly shows that the jointly optimized policy produces better results than that of the combination of separately or sequentially optimized policies.*, “author” : [{ “dropping-particle” : “”, “family” : “Sarker”, “given” : “Ruhul”, “non-dropping-particle” : “”, “parse-names” : false, “suffix” : “” }, { “dropping-particle” : “”, “family” : “Haque”, “given” : “Amanul”, “non-dropping-particle” : “”, “parse-names” : false, “suffix” : “” }], “container-title” : “Applied Mathematical Modelling”, “id” : “ITEM-1”, “issue” : “10”, “issued” : { “date-parts” : [[“2000”, “8”]] }, “note” : “Compara\u00e7\u00e3o de pol\u00edtica conjunta de estoques e manuten\u00e7\u00e3o preventiva (S,s, T).

3.2 Premissas

De acordo com o processo mapeado no item 3.1, foram definidas as premissas para modelagem, para medidas de desempenho do sistema, para entidades, para processos e para parâmetros de entrada do modelo. Assim, uma das premissas utilizadas foi a não inclusão no modelo dos recursos e das movimentações envolvidas em cada processo, pois o objetivo deste estudo é analisar o comportamento dos estoques e seus parâmetros de ressurgimento, não sendo relevante para o presente estudo o detalhe dos processos envolvidos no consumo e ressurgimento dos sobressalentes. Outra premissa utilizada foi a de restringir a modelagem para um único modelo de equipamento. Além disso, cabe citar que a simulação é apenas para manutenções preventivas, para as quais existem mais dados disponíveis.

O modelo foi programado de forma que os equipamentos deixam o sistema na mesma ordem em que entraram. Não há a possibilidade de término de uma manutenção sem que as manutenções de equipamentos anteriores sejam finalizadas, no entanto, para os itens passíveis de inspeção com demanda unitária, é previsto o remanejamento de peças de um equipamento, cuja peça foi aprovada em inspeção, para outro equipamento que necessite da peça primeiro.

3.3 Coleta e Tratamento dos dados de Entrada do Modelo

Os dados de entrada do modelo foram coletados com base em registros históricos do sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa dos últimos 3 anos. Foram selecionados 10 itens sobressalentes para a simulação, nomeados de A à J, escolhidos com base no histórico de consumo, aliado à grande criticidade dos itens para o modelo de equipamento estudado. Os materiais de A à E são os de troca obrigatória e os de F à J são os do tipo passível de inspeção. Dos 5 materiais passíveis de inspeção, os itens de F à H possuem demanda unitária e os materiais I e J possuem demanda errática. A

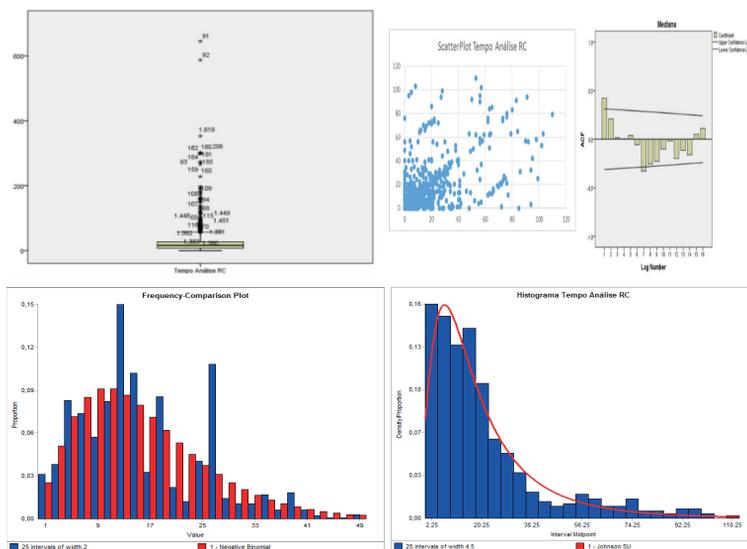
Tabela 1 apresenta o percentual histórico de utilização para os itens de demanda unitária.

Tabela 1 - Percentual de Utilização Itens de Demanda Unitária

Item	Material F	Material G	Material H
Percentual de utilização	75%	68,8%	56,3%

Para análise dos dados, foram utilizados os softwares SPSS, para análise e tratamento dos dados; o pacote ExpertFit do software de Simulação FlexSim, para ajuste das distribuições de probabilidade; as ferramentas de BoxPlot para determinar os outliers; o correlograma e ScatterPlot para verificar a estacionariedade das séries; e os testes de aderência Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling e Qui-Quadrado, para ajuste das curvas. A figura 4 apresenta as ferramentas para tratamento dos dados de entrada da variável Tempo de Processamento Análise de RC.

Figura 4 – Tratamento dos Dados Coletados Tempo de Processamento Análise RC.



Fonte: Próprio Autor

Tabela 2 – Distribuições de probabilidade

Dados de entrada	Unidade	Distribuição (Parâmetros Flexsim)
Tempo entre chegadas de equipamento	Dias	Beta (0.61, 405.10, 0.71, 2.15)
Tempo de Processamento Fase A	Dias	Jonhson 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 Processamento Análise RC	Dias	Negative Binomial (3.00, 17.95)
Tempo de Processamento de Compra	Dias	Empírica
Tempo de Proc. de Ent. de Mat. no estoque	Dias	Log-logistic (0.00, 2.92, 2.27)
Tempo de Fornecimento Material A	Dias	Jonhson 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	Jonhson SB (34.32, 266.09, 0.18, 0.74)
Tempo de Fornecimento Material D	Dias	Jonhson 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 (10.50, 106.75, 304.15)
Tempo de Fornecimento Material G	Dias	Inversa Gaussiana (10.50, 106.75, 304.15)
Tempo de Fornecimento Material H	Dias	Weibull (32.75, 100.86, 1.81)
Tempo de Fornecimento Material I	Dias	Jonhson SB (53.76, 250.70, 0.58, 0.64)
Tempo de Fornecimento Material J	Dias	Jonhson 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)
Manutenção em oficina externa	Dias	Jonhson SB (128.21, 732.74, -0.34, 0.68)

A Tabela 2 apresenta a distribuição de probabilidade obtida para cada dado de entrada. 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 a chegada de equipamentos teve dados históricos coletados de um prazo de 10 anos para melhorar a previsão de demanda de manutenção dos equipamentos.

3.4 Medidas de desempenho

Para efeito de análise de desempenho serão verificados: *Custo Total de Pedido*, *Custo de Manutenção de Estoque*, *Custo da Falta de Sobressalentes*, *Número de Ocorrências de Faltas Observadas* e *Dias de Perda de Produção*. O custo total de pedido foi calculado de acordo com a equação (4), em que k representa cada material sobressalente, variando de A à J:

$$\text{CustoTotaldePedido} = \sum_{k=A}^J \text{NúmerodePedidos}_k \cdot \text{CustoUnitárioPedido}_k \quad (4)$$

O custo de manutenção de estoques foi calculado a partir dos custos de armazenagem e do custo de oportunidade do capital imobilizado, de acordo com a equação (5), em que l representa a taxa percentual de custos de armazenagem, tt simboliza o período total da simulação em anos e CMPC equivale ao custo médio ponderado de capital, calculado a partir da média de CMPC de grandes empresas do setor de óleo e gás, em 2014.

$$CustodeManutenção = \sum_{k=A}^J (CustoUnitário|k|.EstoqueMédio|k|.t_r.(CMPC+1)|5)$$

O custo da falta foi estimado considerando-se a ociosidade de mão de obra causada pelas manutenções interrompidas por falta de sobressalentes, conforme equação (6), na qual se multiplica o custo unitário de HH pelo total de HH perdido do equipamento m , para todos os n equipamentos mantidos durante o período tt .

$$CustodaFalta = CustoUnitHH . \sum_{m=1}^n HHperdido_m (6)$$

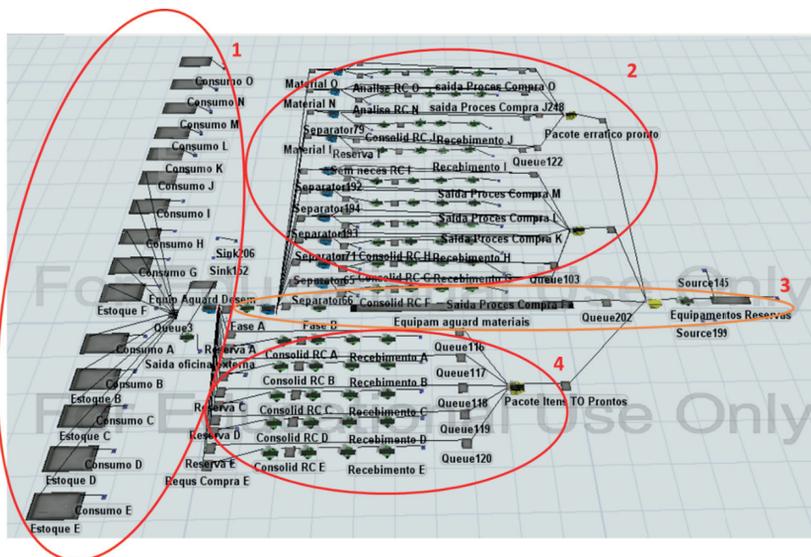
Não foi possível estimar o custo da perda de produção devido ao grande número de unidades de produção, às diferentes funções que o mesmo equipamento pode desempenhar e às diversas variáveis externas envolvidas. Foi acompanhado, no entanto, o número médio de dias de perda de produção para cada solução analisada.

3.5. Implementação Computacional

O modelo conceitual foi implementado utilizando a versão acadêmica do software FlexSim 7.3, os blocos disponíveis no software e as “global tables” disponíveis no software para cálculo e armazenamento dos dados referentes ao saldo de estoque, quantidade em compra e valor dos estoques. Foi empregada, também, a programação direta dentro dos objetos do modelo em linguagem própria do programa, a saber, o Flexscript, para lógicas específicas. A figura 5 apresenta o modelo implementado no Software FlexSim, dividido

em grandes blocos, os quais são representados por círculos, assim, o bloco 1 é a lógica de programação dos estoques armazenados, os blocos 2, 3 e 4 simulam, respectivamente, a aquisição dos itens passíveis de inspeção, as atividades de manutenção e a aquisição dos sobressalentes de troca obrigatória.

Figura 5 - Modelo construído no software FlexSim.



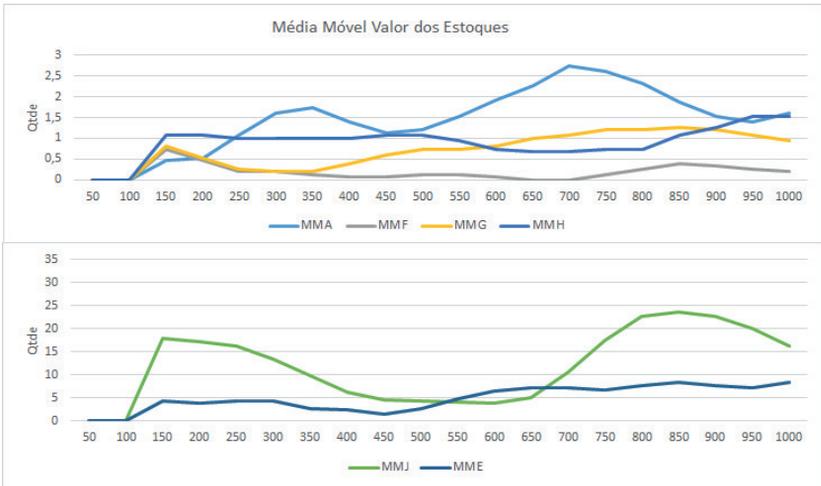
Fonte: Próprio Autor

Foram realizadas 5 replicações para determinar o tempo de aquecimento do modelo, nas quais coletou-se os status das principais variáveis do sistema a cada 50 dias, e calculou-se a média e, depois, a média móvel dos três últimos instantes, elaborando-se o gráfico da figura 6. Sendo assim, foi estipulado o tempo de aquecimento em 400 dias.

Para encontrar o número ideal desse procedimento, foram realizadas 20 replicações e avaliados os resultados dos principais parâmetros de saída com confiança de 95%. Segundo Schwif e Medina (2010), o número ideal de replicações é dado pela equação (7), em que n^* é o número de replicações necessárias, n é o número de repli-

cações da amostra piloto, h é a precisão da amostra piloto e h^* é a precisão desejada.

Figura 6 – Médias Móveis para Determinação de Tempo de Aquecimento.



Fonte: Próprio Autor

$$n^* = n \cdot \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad (7)$$

A Tabela 3 apresenta os valores calculados de replicações mínimas para o nível de precisão desejado, verificando-se que devem ser feitas 222 replicações. Nela também são apresentados os resultados médios dessas replicações. Sendo assim, apesar de algumas das medidas de desempenho ficarem com precisão um pouco acima da desejada, todas as replicações efetuadas foram consideradas satisfatórias, além disso, os desvios em relação à precisão desejada não foram muito significativos. Foi estipulado um período de simulação de 4 anos para aumentar a precisão do modelo, devido aos longos prazos de ressurgimento e de manutenção.

A oficina, atualmente, utiliza-se da política de revisão contínua de estoques, com parâmetros de ressurgimento (ponto de pedido)

R e quantidade de pedido Q^* calculada a partir do lote econômico de compra, conforme citado no item 2.1. Cabe elucidar que a simulação do cenário atual utilizou os parâmetros de ressurgimento R e $R+Q^*$ listados na Tabela 4, os quais foram calculados de acordo com a demanda anual para cada item e média histórica dos tempos de ressurgimento e ajustados de acordo com tamanho de lote aplicado em cada equipamento. Ademais, o estoque de segurança foi dimensionado para cobertura de 45 dias.

Os resultados para o cenário atual encontram-se na Tabela 5. 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 3 – Número mínimo de replicações.

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

Tabela 4 – Parâmetros de Ressuprimento de Estoque.

Material	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Qs	210	114	91	62	8	29	22	0	1	2
R ajustado	1392	696	588	378	51	176	82	3	6	13
Q*	360	474	714	652	5	5	5	1	1	2
R+Q* ajustado	1856	1160	1176	1008	68	264	164	4	7	15

Tabela 5 – Medidas de Desempenho Cenário Atual.

Medida de Desempenho	Valor
Custo de Manutenção de Estoques	R\$ 1.322.592,79
Custo Total de Pedidos	R\$ 56.270,44
Custo da Falta de Sobressalentes	R\$36.633.146,02
Número Médio de Ocorrência de Faltas de Itens	63,84
Dias de Perda de Produção Médio	64 dias

3.6 Otimização dos Parâmetros de Ressuprimento

Com o objetivo de otimizar os parâmetros da atual política de estoques, reduzindo os custos de estoque e aumentando o nível de serviço, foi utilizado o módulo Optimizer do Software FlexSim. O uso dessa ferramenta se justifica, pois o Optimizer é uma ferramenta adicional que permite otimizar ou melhorar o resultado de uma determinada medida de performance através da busca de várias soluções alternativas. Segundo Chwif e Medina (2010), um problema de otimização é formulado através de uma função objetivo que se deseja maximizar ou minimizar, a qual é sujeitada à um conjunto de restrições e indicada para sistemas complexos devido à limitação de modelagem matemática. A otimização é executada pelo aplicativo OptQuest, otimizador que combina busca tabu, programação inteira e redes neurais para identificar cenários ótimos. As variáveis de decisão selecionadas para realizar a otimização foram R e Q de cada material, conforme a Tabela 7. A função objetivo para minimização está descrita na equação (8).

$$\text{MinCusto} = \text{CustodeManutenção} + \text{CustoTotalPedidos} + \text{CustodaFalta} \quad (8)$$

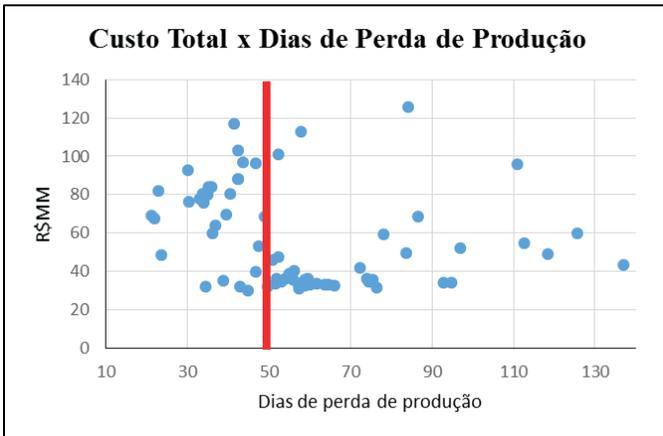
Tabela 7 – Variáveis de Decisão.

Variável	Tipo de Variável	Limite Inferior	Limite Superior	Solução 1	Solução 2
RA	Discreta	464	10000	1856	1392
RB	Discreta	232	10000	928	928
RC	Discreta	196	5000	784	588
RD	Discreta	126	5000	378	378
RE	Discreta	17	1000	51	51
QA	Discreta	0	10000	0	464
QB	Discreta	0	10000	232	232
QC	Discreta	0	5000	784	784
QD	Discreta	0	5000	730	730
QE	Discreta	0	1000	17	17
RF	Discreta	88	5000	176	176
RG	Discreta	82	5000	82	82
RH	Inteira	1	50	4	3
RI	Inteira	1	500	6	6
RJ	Inteira	1	500	17	13
QF	Discreta	0	5000	88	88
QG	Discreta	0	5000	82	82
QH	Inteira	0	50	1	1
QI	Inteira	0	500	1	0
QJ	Inteira	0	500	5	5

Foram analisadas 70 soluções, com 222 replicações cada, verificando-se o desempenho das melhores em relação às medidas de desempenho, cujo resultado não está relacionado com a função objetivo, que são o número de dias de perda de produção e o número de ocorrência de faltas. Verificou-se que soluções com baixo custo total possuíam elevado número de dias de perda de produção, como mostra a figura 7, que apresenta a relação entre o custo total e os dias de perda de produção para cada solução proposta. Foram selecionadas, então, as duas soluções com menor custo total, limitando-se os dias de perda de produção até 50 dias.

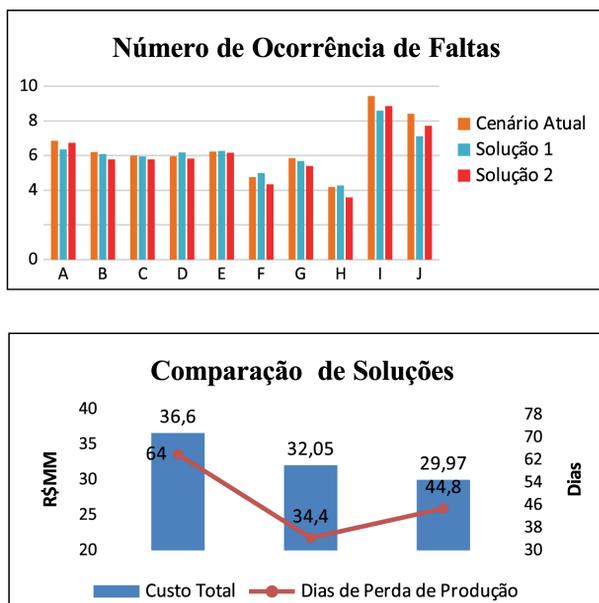
Os resultados das soluções 1 e 2 estão na Tabela 7 e figura 8. Verificou-se que os custos encontrados para essas soluções são bem menores do que os custos do cenário atual. A Figura 8 também demonstra que os melhores resultados alcançados com as soluções otimizadas se devem à redução do nível de ocorrência de faltas dos itens I e J, de demanda errática, demonstrando que as soluções otimizadas ajustaram exatamente os itens que possuíam maior índice de faltas. Como foi determinado, o limite inferior de zero para as variáveis de decisão QA até QJ, algumas das soluções apresentaram quantidade $Q=0$, o que significa que para estes itens a política de estoque base é mais satisfatória do que a de revisão contínua.

Figura 7 – Relação entre custo total e dias de perda de produção.



Fonte: Próprio Autor

Figura 8 - Comparação de resultados do cenário atual e das soluções propostas.



Fonte: Próprio Autor

4. Conclusões

Observou-se que a otimização realizada para os parâmetros R e Q levou aos melhores resultados de custo e de perda de produção. A quantificação dos custos com estoque e do custo da falta de sobresalentes possibilitou analisar diferentes soluções e se chegar a um custo total menor com redução de até 18% das perdas de produção. Percebeu-se, ainda, que a ferramenta de otimização, apesar de não garantir a solução ótima, mostrou-se eficiente para encontrar soluções alternativas mais próximas da solução ótima. A partir dos dados de todas as soluções apresentadas, foi possível, também, analisar a tendência e o comportamento das variáveis e das medidas de performance, auxiliando no entendimento do desempenho do modelo e

na tomada de decisão. Ademais, o modelo possibilitou equilibrar melhor o *trade-off* entre custos de estoque e nível de serviço.

Outros estudos podem ser realizados, visando a melhorar a gestão de estoques dos itens de demanda errática, que possuem difícil previsão de demanda. Sugere-se estudar a abordagem de modos e probabilidade de falha para cálculo de parâmetros de ressurgimento dos sobressalentes com esta característica.

Referências

ALTAY, Nezi, LITERAL, Lewis. **Services Parts Management: Demand Forecasting and Inventory Control**, Springer Science & Business Media. London, 2011.

BASTEN, R. J. I.; VAN HOUTUM, G. J. System-oriented inventory models for spare parts. **Surveys in Operations Research and Management Science**, v. 19, n. 1, p. 34–55, 2014.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Supply chain management: Strategy, Planning and Operation**. New Jersey: Prentice Hall, 2007.

CHWIF, Leonardo., MEDINA, Afonso. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

FREITAS, Filho. Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas com Aplicações em Arena, 2ª **VisualBook**. São Paulo, 2008.

GARCIA, Eduardo, et al. Gestão de estoques: otimizando a logística e a cadeia de suprimentos. **E-papers**. Rio de Janeiro, 2006.

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**, João Pessoa, 2008.

ROSA, Hobed, MAYERLE, Sérgio., GONÇALVES, Mirian. Controle de estoque por revisão contínua e revisão periódica. **Revista Produção**. 20(4), p. 626-638, 2010.

SANTORO, Miguel Cezar, FREIRE, Gilberto. Análise comparativa entre modelos de estoque. **Revista Produção**, 18(1), 89-98, 2008.

SARKER, Ruhul., & HAQUE, Amanul. Optimization of maintenance and spare provisioning policy using simulation. **Applied Mathematical Modelling**, 24(10), p. 751-760, 2000.

CAPÍTULO 6

ANÁLISE SOBRE O CARREGAMENTO DE CAMINHÕES DE UM CENTRO DE DISTRIBUIÇÃO: UM ESTUDO SOBRE MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE SISTEMAS DE FILAS M/M/1⁶

Paulo Henrique dos Santos
Solange da Silva
Thiago Moura de Moraes

1. Introdução

Como o *Business to Consumer* (B2C) e o *Business to Business* (B2B) estão se desenvolvendo rapidamente nos últimos anos, a indústria de entrega expressa inaugurou oportunidades sem precedentes para este desenvolvimento. Isto também resultou em uma competição feroz nesse ramo industrial, desse modo, reduzir custos de logística e melhor servir ao cliente se tornou o foco de muitas empresas. A importância do Centro de Distribuição (CD) tem despertado a atenção de estudiosos nacionais e estrangeiros (JI *et al.*, 2013), pois seu papel de armazenagem temporária e distribuição de bens para

6 Este capítulo foi produzido com base na exposição feita pelos autores nas sessões intituladas SIM - Simulação / AD&GP - PO na Administração e Gestão da Produção do XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, realizado em Blumenau/SC no período de 27 a 30 de Agosto de 2017.

clientes traz benefícios significativos. Em primeiro lugar, tem-se que os custos de investimento são reduzidos; e, em segundo lugar, observa-se que a qualidade do serviço é aumentada. Cabe citar também que o controle de qualidade pode ser reforçado e a visibilidade das existências dentro do sistema pode ser assegurada em um CD moderno. Além disso, mais valores agregados aos serviços podem ser prestados a um custo menor (ZHANG *et al.*, 2014).

Ao analisar a eficiência do transporte de mercadorias na área de carregamento, sendo a eficiência importante a nível econômico, cinco perdas ou desperdícios são demonstrados: quebras de motorista, excesso de tempo de carregamento, perda de velocidade, atraso e perda de qualidade (Andrejic' *et al.*, 2013). Um CD geralmente tem as funções de recolha e de distribuição, as quais estão ligadas ao transporte, ao armazenamento, à ordenação, à carga e descarga, ao processamento e à informação de logística de entrega. O processo de funcionamento interno do centro de distribuição tem etapas básicas, incluindo pedidos, recebimento de mercadorias, processamento, armazenagem, triagem, carregamento e distribuição. Vários problemas podem ocorrer durante esses processos (ZHU *et al.*, 2014). Contudo, para este estudo, selecionou-se a formação de filas de espera para carregamento em um CD, para isso utilizou-se o método de pesquisa empírica descritiva de caráter quantitativo.

Esta pesquisa tem como objetivo demonstrar a aplicação de um modelo de filas M/M/1 em um CD. Para tal, analisa-se o tempo de espera, a taxa de ocupação dos servidores e o comportamento da fila, argumentando sobre o contraste entre o valor analítico e o simulado. A fila gerada provoca conflitos entre os caminhoneiros, cobrança de diárias e uma impressão ruim para os clientes. Desse modo, a teoria das filas se mostra bastante eficaz para análise de tal fenômeno, a qual, ao ser aplicada no canal de carga, verificou-se a situação atual do CD.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2, apresenta os materiais e os métodos utilizados no estudo, sendo mostrado o norte da pesquisa, como os detalhes da coleta de dados

e do processo estudado; na Seção 3, oferece os resultados, a experimentação e as discussões; e, por fim, na Seção 4, traz as conclusões.

2. Materiais e Método

O estudo realiza uma pesquisa empírica descritiva de caráter quantitativo, a qual está principalmente interessada em criar um modelo que descreva de forma adequada as relações causais que podem existir na realidade, o que leva a uma compreensão dos processos reais. O caráter quantitativo mostra que a preocupação principal do pesquisador é assegurar que exista adesão entre as observações e ações na realidade e o modelo elaborado daquela realidade (FLEURY, 2012).

Além disso, foi desenvolvido de acordo com a metodologia de Chwif e Medina (2014) e está estruturado em três grandes etapas, conforme estão descritas abaixo:

- *Concepção ou formulação do modelo*: nesta etapa do estudo, foi realizado um entendimento dos sistemas de filas M/M/1 e da simulação. Também foram definidas as fórmulas conceituais que iriam ser utilizadas e os processos dos dados de entrada do sistema (processo de Poisson para o processo de chegada e a distribuição exponencial para os tempos de atendimento);
- *Implementação do modelo*: na segunda etapa, todas as fórmulas conceituais para modelar o comportamento dinâmico do sistema foram adaptadas para o *software Excel*;
- *Análise dos resultados do modelo*: na última etapa, após a validação do modelo considerando alguns valores para tempo de aquecimento, foram realizadas replicações e a média destes resultados foi comparada, novamente, ao modelo teórico, além disso, foram extraídas conclusões a respeito do sistema.

Com base no estudo de Bertrand e Fransoo (2002), este trabalho seguiu modelos de investigação contidos nas seções que tratam dos

problemas descritos, tais como: o modelo conceitual e científico do processo, na seção 2; a solução e a prova da solução na seção 3; e as percepções relativas à solução para o modelo, na seção 4.

2.1. Teoria de filas

O campo da teoria de filas originou-se no início de 1900 e está bem estabelecido com aplicações em diversas áreas, incluindo manufatura, transportes, computação, telecomunicações e saúde (KOMASHIE *et al.*, 2015).

Para Manuel e Offiong (2014) a teoria de filas é o estudo matemático de linhas ou filas de espera. A teoria permite a análise matemática de vários processos relacionados, incluindo a chegada, a espera e o atendimento; e a derivação e o cálculo de várias medidas de desempenho, incluindo o tempo médio de espera na fila ou no sistema, ao estimativa do número do tempo de espera ou de cumprimento do serviço e, por fim, a probabilidade de ter um servidor disponível ou de ter que esperar um certo tempo para ser servido. Esse princípio também se mostra importante na melhora do nível de serviço prestado pelos CDs nas áreas de carga e descarga, por conseguir criar modelos e conseqüente percepções úteis para prever o comportamento de sistemas. Além disso, considera as distribuições estatísticas para as operações de produção de serviços que permitem a descrição de ambientes complexos.

A principal vantagem da teoria de filas é representada por sua eficácia e eficiência em oferecer uma técnica que facilmente descreve e caracteriza os sistemas por indicadores de desempenho ajustados, tais como: tempo médio no sistema, tempo médio de serviço, número médio de clientes no sistema, probabilidade de ter um certo número de clientes no sistema e assim por diante. De acordo com esta perspectiva, a teoria permite a rápida modelagem de um sistema de carga, mesmo quando o ambiente é sujeito a um certo grau de incerteza (Zavanella *et al.*, 2015).

Existe limitação quando aplicada ao congestionamento no servidor, devido às distribuições de Poisson e Exponencial não serem apropriadas para descrever esse comportamento. O princípio também pode ter problemas para “encontrar o *trade-off* entre o nível de serviço a ser ofertado e o custo que a empresa está disposta a incorrer na prestação deste serviço. Por este motivo, em determinadas situações, podem aparecer filas mesmo onde existem servidores mais que suficientes para atendê-las” (COSTA *et al.*, 2015).

2.2. Simulação

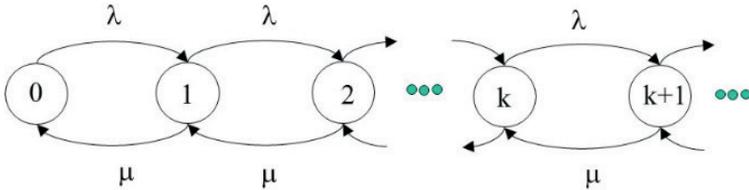
Simulação é o tratamento de problemas reais por meio de reproduções em ambientes controlados pelos pesquisadores. A simulação estocástica gera amostras das distribuições de probabilidade de cada parâmetro de interesse e, a partir desta, são obtidas inferências sobre as quantidades de interesse (MATTOS; SILVA, 2002).

Os modelos de enfileiramentos estocásticos mais comuns que assumem os tempos entre serviços obedecem à distribuição exponencial, ou equivalentemente. A taxa de chegada e de serviços seguem uma distribuição de Poisson. Em outras palavras, se a taxa de chegada é λ , a probabilidade de ter n chegadas num intervalo t são dadas como a distribuição Markoviana, ou sem memória. Há a probabilidade de que um cliente, atualmente em serviço, tem unidades t de serviços remanescentes, independente do tempo que já está em serviço (SAVO, 2006).

As chegadas e as taxas de serviço são independentes do número de clientes na fila de espera. Tratados da seguinte forma: primeiro que entra, primeiro que sai ou *First In First Out* (FIFO). Além disso, a taxa de chegada λ é menor do que a taxa de serviço μ (Singh, 2014). O processo de nascimento e de morte em fila é caracterizado por Markov e o processo de chegadas obedece à distribuição de Poisson (Boucher; Couture-Piché, 2015), ilustrado na Figura 1, o qual pôde ser usado no estudo deste capítulo. Cabe citar, ainda, que o número

de clientes potenciais é suficientemente grande para que a população possa ser considerada infinita (Florenco; Dantas, 2014).

Figura 1: Nascimento e morte das filas.



Fonte: Boucher; Couture-Piché, 2015.

2.3. Coleta de dados

Acerca das informações relevantes sobre a coleta dos dados, cabe citar que a) foi realizada em um CD na cidade de Anápolis/GO, cuja divulgação das informações – tais como, nome, endereço, segmento, dentre outras – não foi autorizada, mas houve a abertura para coleta real dos dados em tempo integral de funcionamento da empresa; b) os pesquisadores assumiram o compromisso de discrição que vinculam os dados estudados às particularidades da empresa, sendo autorizados apenas os dados relevantes ao processo estudado; c) estendeu-se pelos meses de Agosto e Setembro de 2016; d) desenvolveu-se a partir da consulta de mídias armazenadas no banco de dados de segurança da empresa, para coleta exata de tempos de chegadas, de carregamento e de saídas dos caminhões no setor de carga; e) utilizou-se, também, da coleta em tempo real, na qual foram realizadas observações específicas do processo.

As Tabela 1 e 2 revelam, respectivamente, os tempos de chegada dos caminhões na fila e os intervalos de tempos de carregamento de cada caminhão.

Tabela 1: Chegada dos caminhões na fila em minutos.

43,06	26,51	39,59	236,51	47,35	118,04	3,14	7,49	72,28	50,24
15,47	38,01	81,56	21,58	0,01	45,42	90,31	93,41	18,2	139,35
66,43	4,12	0	8,31	0,24	399,1	79,27	28,52	1,56	44,19
42,41	10,04	0,08	29,48	4,11	20,26	10,13	40,01	138,54	124,58
25,3	61,12	134,37	6	88,4	70,45	6,32	11,16	8,03	14,05
138,38	7,46	201,08	41,45	63,57	2,27	44,21	19,51	47,57	3,18
130,29	57,53	3,47	3,23	248,28	38,53	125,48	1,27	20,57	15,45
61,45	21,43	13,02	0,12	5,56	0,03	31,43	147,23	29,17	27,43
42,39	26,47	11,05	113,42	17,52	0,5	0,29	96,51	34,29	108,04
302,02	68,46	5,32	37	41,44	6,25	56,34	21,56	44,41	29,58
41,32	59,38	19,56	4,05	46,54	57,35	393,16	75,53	79,12	0,05
11,42	72,33	19,01	46,17	1,19	44,35	5,41	54,03	1,24	116,32
17,55	34,1	0,03	6,03	18,49	39,12	57,57	16,29	23,05	25,52
29,24	18,06	41,56	29,56	0,29	165,43	15,19	142,33	328,33	191,32
7,09	93,54	1,38	37,37	49,16	57,55	115,47	222,41	6,46	38,49
50,2	0,14	10,59	47,24	20,39	32,3	69,49	1,28	13,14	1,25
48,36	2,14	70,25	35,32	35,23	0,49	91,5	15,1	58,27	96,26
15,56	203,5	443,55	21,07	32,27	50,5	43,52	22,43	15,43	
107,51	111,37	7,26	37,5	18,25	23,58	18,24	16,36	49,38	
44,28	3,12	0,18	17,1	59,39	8,19	18,49	14,19	312,46	
22,01	58,11	105,04	22,48	88,3	50,08	5,31	64,31	115,42	

Intervalo médio de chegada dos caminhões na fila em minutos: 54,3534466

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Todos os dados coletados foram tabulados em uma planilha de *Excel*, inseridos na forma de *hh:mm:ss* e transformados, posteriormente, em decimal, sendo inicialmente contados em minutos, a título de exemplo, tem-se a inserção 00:43:16 transformada em 43,16 minutos. A empresa tem o início de suas atividades de carregamento às 08:00:00 e o encerramento às 17:48:00, com uma folga de 1 hora, das 12:00:00 às 13:00:00, para o almoço. São 08:48:00 de tempo disponível para a atividade de carga por dia e 44:00:00 horas semanais, de segunda-feira à sexta-feira. Ademais é utilizado apenas um canal de carga para cada caminhão.

O processo de carregamento da empresa segue o seguinte sistema: primeiro que entra, primeiro que sai ou *First In First Out* (FIFO). Esse procedimento recebe veículos que variam de *Pick-up* (capacidade de 0,6 toneladas) até Rodo-trem (capacidade de 52 toneladas), as cargas não são estipuladas com um peso padrão ou com um peso mínimo, podendo existir cargas de diversos volumes.

Assim, tal processo ocorre da seguinte maneira: a carga é conferida e separada,, posteriormente, o carregamento é realizado por uma empilhadeira e seu operador, para isso, é elevado um *pallet* com os produtos até a altura da carroceria do caminhão, em seguida, dois auxiliares de carga e descarga pegam os sacos (que variam de 10,1 kg até 40 kg) e iniciam o empilhamento na carroceria do caminhão.

Tabela 2: Tempo de carregamento dos caminhões em minutos.

15,00	24,59	4,49	40,30	5,50	5,19	8,49	10,17	46,59	5,52
15,23	115,00	10,53	18,31	21,05	9,31	14,18	56,34	26,28	54,31
98,30	18,47	36,08	110,00	43,41	36,57	24,51	17,43	4,34	2,12
11,51	8,43	183,58	6,16	51,30	16,32	14,37	38,07	23,37	49,14
47,01	14,58	49,21	8,09	2,50	27,47	6,06	26,51	13,36	9,10
21,41	7,12	34,19	32,27	4,54	37,20	73,44	7,00	17,40	121,52
17,14	41,15	30,33	27,06	70,25	2,26	21,56	5,33	24,42	4,07
93,30	19,32	17,31	99,54	64,29	22,05	52,13	28,13	5,24	16,26
11,31	52,47	8,26	16,14	30,39	59,15	1,43	127,17	56,56	18,20
37,36	108,00	4,48	3,13	4,53	52,49	29,04	5,23	12,15	52,24
17,53	24,20	0,54	1,07	12,01	19,13	27,52	25,30	12,53	114,20
0,11	7,52	47,53	6,50	10,43	50,51	22,11	19,24	31,30	17,28
46,17	25,38	41,52	26,46	11,53	19,28	102,09	9,49	76,25	33,37
16,53	7,32	5,54	14,51	57,40	57,52	6,51	19,06	17,52	16,06
7,46	31,39	28,16	69,18	8,25	53,49	32,19	30,23	21,05	53,16
11,23	169,54	53,17	41,50	61,47	21,19	48,36	75,06	7,51	17,51
16,47	11,39	18,58	8,19	6,18	43,19	62,43	59,46	3,25	5,25
106,12	1,47	26,14	5,12	21,54	8,33	18,52	53,06	1,23	
0,20	26,11	40,41	53,24	5,28	70,30	0,27	20,37	4,47	
35,53	22,58	1,23	26,14	19,48	6,12	23,36	71,57	3,59	
37,55	20,50	31,18	15,23	31,19	12,03	18,05	43,16	54,16	

Intervalo médio do tempo de carregamento do caminhão em minutos: 30,57

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Para as tomadas de decisões, serão observadas neste capítulo as capacidades relacionadas à unidade em tonelagem.

3. Experimentação

3.1. Determinação do erro da amostra

Para determinar o tamanho da amostra segundo Levine *et al.*, (2005), devem-se conhecer três fatores: o nível de confiança dese-

jado, que determina o valor de (Z), o qual representa o valor crítico a partir da distribuição normal padronizada, o erro de amostragem aceitável (e) e o desvio padrão (σ). A fórmula é representada por:

$$n = \frac{Z^2 * \sigma^2}{e^2} \quad (1)$$

Para as 206 amostras coletadas, obteve-se um erro de 6,15 minutos no tempo de atendimento dos caminhões e 12,33 minutos para o tempo de chegada dos caminhões.

3.2. Verificação de distribuição exponencial

A distribuição Exponencial está ligada à de Poisson, analisando inversamente o experimento em um intervalo ou espaço para a ocorrência de um evento. Além disso, depende da suposição de que o evento ocorra seguindo o processo de Poisson (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Foram realizados dois testes, o teste de aderência qui-quadrado e o teste de aderência Kolmogorov-Smirnof, ambos os testes tiveram como apoio teórico para sua realização, os autores Chwif e Medina (2014). Os resultados são expressos na Tabela 3.

Tabela 3: Testes de aderência.

Teste Qui-quadrado				
-	Valor teórico	Erro	Grau de liberdade	p-value
Tempo de chegada	12,59	4,61	6	0,59
Tempo de atendimento	14,07	5,24	7	0,63
Teste Kolmogorov-Smirnof				
-	Maior distância	D-crítico	-	-
Tempo de chegada	0,086	0,095	-	-
Tempo de atendimento	0,055	0,095	-	-

Observando a Tabela 3, no teste Qui-quadrado, quando o valor teórico é maior que o erro, não rejeitamos a amostra. Seguindo as instruções de Chwif e Medina (2014), inicia-se o teste Kolmogorov-Smirnof, conhecido como teste de aderência KS. Observa-se a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição acumulada assumida para os dados e a função de distribuição empírica. Como a maior distância foi menor que o d-crítico, não rejeitamos a hipótese de que os dados aderem ao modelo exponencial. Desta forma prossegue-se com a aplicação da fila M/M/1 aos dados coletados.

3.3. Modelo analítico

Seguindo os parâmetros de Moreira (2007), na Tabela 4 serão mostradas as fórmulas utilizadas no modelo analítico de teoria de filas. Nesta subseção serão demonstrados os resultados na Tabela 4, aplicando o modelo analítico.

Tabela 4: Fórmulas para cálculo de fila M/M/1 em teoria de filas.

Parâmetro	Fórmula de fila M/M/1	Resultado	
Utilização do sistema (taxa de ocupação)	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	56,09%	(2)
Probabilidade que o sistema esteja ocioso {P(0)}	$P(0) = 1 - \rho = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$	43,91%	(3)
Probabilidade de que haja n clientes esperando ou sendo atendidos no sistema {P(n)}	$P(n) = \rho^n P(0)$	8,05	(4)
Probabilidade que a fila não tenha mais que 10 clientes {P(n - K)}	$P(n - K) = 1 - \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^{10+1}$	99,83%	(5)
Número médio de clientes na fila (Lf)	$Lf = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$	0,7163	(6)
Número médio de clientes no sistema (L)	$L = Lf + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)$	1,277	(7)
Tempo médio que o cliente espera na fila (Wf)	$Wf = \frac{Lf}{\lambda}$	39,06	(8)
Tempo médio que o cliente espera no sistema (W)	$W = \frac{L}{\lambda}$	69,63	(9)

Fonte: Adaptado de Moreira (2007).

Para a construção dos parâmetros e da fórmula M/M/1, serão tratados os seguintes dados: taxa de chegada (λ); taxa de atendimento (μ); probabilidade que o sistema esteja ocioso $\{P(0)\}$; probabilidade que haja n clientes no sistema $\{P(n)\}$; probabilidade que a fila não tenha mais que K clientes $\{P(n - K)\}$; número médio de clientes na fila (L_f); número médio de clientes no sistema (L); tempo médio que o cliente espera na fila (W_f); tempo médio que o cliente espera no sistema (W).

No sistema pesquisado, existe apenas um canal disponível para o carregamento dos caminhões. Além disso, a taxa de chegada é dada pela média aritmética da população de números de chegada por unidade e a taxa de atendimento é dada pela média aritmética da população de números de atendimento por unidade.

3.4. Modelo simulado

Segundo Perin (1995), a modelagem de uma simulação como modelo matemático, em que $i = 1 \dots n$, tem os cálculos para fila M/M/1 expressos na Tabela 5.

Tabela 5: Fórmulas para cálculo de fila M/M/1 em modelagem.

Parâmetro	Fórmula de fila M/M/1	
Intervalo entre as chegadas (R_i)	R_i	(10)
Tempo de atendimento (S_i)	S_i	(11)
Momento da chegada (A_i)	$A_{i-1} + R_i$	(12)
Início do atendimento (B_i)	$Max(C_{i-1}; A_i)$	(13)
Término do atendimento (C_i)	$B_i + S_i$	(14)
Tempo de fila (W_i)	$B_i - A_i$	(15)
Tempo de sistema (U_i)	$C_i - A_i$	(16)
Tempo ocioso do servidor (O_i)	$B_i - C_{i-1}$	(17)
Média de tempo de fila (\bar{W})	$\frac{\sum w_i}{n}$	(18)
Taxa de ocupação do sistema ($R\delta$)	$1 - \left(\frac{\sum O_i}{C_{10000}} \right)$	(19)

Utilizou-se o *software Excel* para dar prosseguimento à simulação. Assim, adotou-se o método da transformada inversa para os intervalos de chegada e o tempo de atendimento, em seguida, gerou-se um número aleatório e o transformou no valor da variável com distribuição exponencial de interesse, utilizando as seguintes fórmulas, no *Excel*:

– Gerador aleatório para as chegadas:
 $(-\text{LN}(1-(\text{ALEATÓRIO}())))/\lambda$ (20);

– Gerador aleatório para os atendimentos:
 $(-\text{LN}(1-(\text{ALEATÓRIO}())))/\mu$ (21).

Tabela 6: Fórmulas utilizadas no *Excel* – Fila M/M/1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
1	i	Ri	Si	Ai	Bi	Ci	Wi	Ui	Oi	Ŵ	Rš
	Ocorrência	Intervalo entre as chegadas	Tempo de Atendimento	Momento da chegada	Início do atendimento	Término do atendimento	Tempo de fila	Tempo de sistema	Tempo ocioso do servidor	Média de tempo de fila	Taxa de ocupação do sistema
2				0		0					
3											
4	1	=LN(1-ALEATORIO())/SQ23	=LN(1-ALEATORIO())/SQ24	=D3+B4	=MAXIMO(F3:D4)	=E4-C4	=E4-D4	=F4-D4	=E4-F3	=SOMA(GG3+G4)/A4	=1-(SOMA(I4-I10003))/F10003
5	2	=LN(1-ALEATORIO())/SQ23	=LN(1-ALEATORIO())/SQ24	=D4+B5	=MAXIMO(F4:D5)	=E5-C5	=E5-D5	=F5-D5	=E5-F4	=SOMA(GG4+G5)/A5	
6	3	=LN(1-ALEATORIO())/SQ23	=LN(1-ALEATORIO())/SQ24	=D5+B6	=MAXIMO(F5:D6)	=E6-C6	=E6-D6	=F6-D6	=E6-F5	=SOMA(GG5+G6)/A6	
7	4	=LN(1-ALEATORIO())/SQ23	=LN(1-ALEATORIO())/SQ24	=D6+B7	=MAXIMO(F6:D7)	=E7-C7	=E7-D7	=F7-D7	=E7-F6	=SOMA(GG6+G7)/A7	
8	5	=LN(1-ALEATORIO())/SQ23	=LN(1-ALEATORIO())/SQ24	=D7+B8	=MAXIMO(F7:D8)	=E8-C8	=E8-D8	=F8-D8	=E8-F7	=SOMA(GG7+G8)/A8	

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Na Tabela 6 apresentam-se as fórmulas utilizadas na simulação, além disso, nela foi apresentado somente até a quinta ocorrência, mas a simulação completa baseou-se em 10000 ocorrências. Logo a seguir, na Tabela 7, são apresentados alguns resultados obtidos com a simulação.

Tabela 7: Exemplo dos resultados obtidos em Excel com a simulação de uma fila M/M/1.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L
1	i	Ri	Si	Ai	Bi	Ci	Wi	Ui	Oi	W̄	R̄o
2	Ocorrência	Intervalo entre as chegadas	Tempos de Atendimento	Momento da chegada	Início do atendimento	Término do atendimento	Tempo de fila	Tempo de sistema	Tempo ocioso do servidor	Média de tempo de fila	Taxa de ocupação do sistema
3	0			0		0					
4	1	21,733	59,316	21,733	21,733	81,049	0,000	59,316	21,733	0,000	56,47%
5	2	170,198	61,854	191,931	191,931	253,785	0,000	61,854	110,882	0,000	
6	3	17,893	87,935	209,824	253,785	341,720	43,962	131,897	0,000	14,654	
7	4	76,286	12,081	286,110	341,720	353,802	55,611	67,692	0,000	24,893	
8	5	137,912	27,471	424,022	424,022	451,493	0,000	27,471	70,221	19,914	

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Já com os resultados do modelo analítico e os resultados do modelo de simulação, na Tabela 8, é realizada uma comparação entre eles.

Tabela 8: Comparação resultados analítico x resultados simulados.

	Intervalo entre as chegadas	Tempos de Atendimento	Média de tempo de fila	Utilização do sistema
Análítico	54,353447	30,57	39,06	56,09%
Simulação	53,421	30,532	39,679	56,47%

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Como dito na subseção 2.3, a simulação é de grande valia para o auxílio de gestores em suas tomadas de decisões. A Tabela 8 é um exemplo claro desta afirmação, pois os resultados simulados chegam em uma das análises à 99,8% de semelhança ao valor analítico. Desse modo, é mostrado que a simulação é uma ferramenta que pode ser o único recurso útil e eficiente para ser usado na solução de problemas muito complexos, os quais não podem ser resolvidos analiticamente, ou demandam muito trabalho para serem solucionados nessa modalidade.

Tabela 9: Média de replicações da simulação.

Replicações	Total de simulações	Média de tempo de sistema (simulação)	Média de tempo de sistema (analítico)	Média de tempo de fila (simulação)	Média de tempo de fila (analítico)	Média de utilização do servidor (simulação)	Média de utilização do servidor (analítico)
1	10000	91,23	69,63	46,94	39,06	56,78%	56,09%
2	10000	62,77	69,63	33,71	39,06	56,56%	56,09%
3	10000	83,75	69,63	51,22	39,06	55,79%	56,09%
4	10000	48,14	69,63	37,44	39,06	55,10%	56,09%
5	10000	59,86	69,63	30,33	39,06	55,60%	56,09%
6	10000	56,4	69,63	26,48	39,06	56,05%	56,09%
7	10000	59,83	69,63	29,66	39,06	54,72%	56,09%
8	10000	71,1	69,63	41,72	39,06	56,43%	56,09%
9	10000	81,68	69,63	51,92	39,06	56,71%	56,09%
10	10000	76,98	69,63	44,24	39,06	55,85%	56,09%
Médias >>>		69,17	69,63	39,37	39,06	55,96%	56,09%

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

Pode-se verificar, na Tabela 9, uma grande aproximação dos valores de médias de tempo de sistema, de tempo de fila e de utilização do servidor, comprovando, mais uma vez, a eficiência da simulação para análise de sistemas de filas.

3.4.1. Alternância de cenários no modelo simulado

Define-se o cenário para descrever um sistema em um determinado momento, em relação aos objetivos de um estudo. Tal tese surge do fato de que, em algum momento, há uma necessidade de estudar os sistemas para tentar ganhar alguma introspecção nas relações entre seus vários componentes, ou para prever o desempenho em algumas novas condições que estão sendo consideradas (LAW, 2007).

Foram simulados alguns cenários, tais como, a aceleração e a desaceleração do sistema apenas alterando o λ e o μ . Na Figura 2, é mostrado alguns exemplos que podem acontecer com os dados acelerados e desacelerados, assim, são demonstrados quatro cenários e descritos a seguir:

Cenário I: há uma desaceleração do tempo de carregamento (média de tempo de carregamento elevada para 38 minutos) elevando a utilização do sistema. Neste cenário, pode ocorrer as seguintes

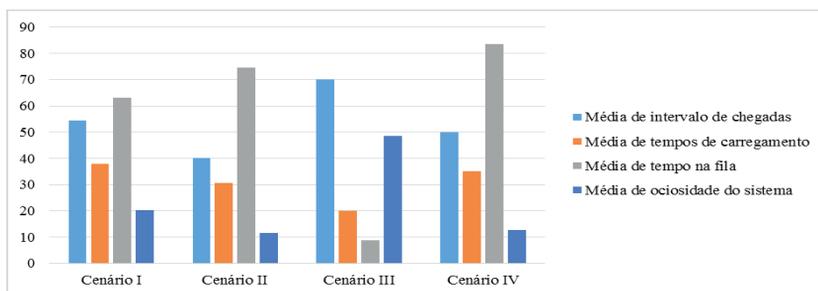
variáveis, tais como: ausência de algum funcionário da operação de carregamento, problemas com o maquinário da operação de carregamento, indisposição da equipe de carregamento e a prevalência dos pedidos com uma grande variedade de produtos.

Cenário II: é simulada a aceleração do intervalo de chegada (média do intervalo de chegada reduzida para 40 minutos), elevando a utilização do sistema. Pode ocorrer, neste cenário, um aumento no número de caminhões para serem carregados, ou seja, são mais pedidos com menores quantidades, gerando, assim, a necessidade de maior número de caminhões para carregamento.

Cenário III: ocorre a desaceleração do intervalo de chegada e a aceleração do tempo de carregamento (média de tempo de carregamento elevada para 70 minutos e média do intervalo de chegada reduzida para 20 minutos). A desaceleração do intervalo de chegada pode representar uma diminuição nas vendas; e a aceleração do tempo de carregamento pode caracterizar uma boa gestão da movimentação de materiais na expedição.

Cenário IV: dá-se a aceleração do sistema (média de tempo de carregamento reduzida para 50 minutos e média do intervalo de chegada elevada para 35 minutos). Nesse caso, há a condição de ascensão na utilização do sistema. Ocorre o contrário do Cenário III.

Figura 2: Teste de cenários utilizando a simulação de fila M/M/1.



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2016.

3.5. Discussão

Neste capítulo foi realizada a aproximação do resultado analítico com o resultado simulado, ambos mostrados na Tabela 8, na qual se verifica que o valor simulado chegou a semelhança de 98,28% do valor analítico na medição do intervalo entre as chegadas, de 99,88% do valor de tempos de atendimento, de 98,44% do valor de média de tempo de fila e de 98,15% da porcentagem de utilização do sistema.

Demonstra-se, portanto, que a simulação é uma boa ferramenta para a tomada de decisões em desenvolvimento de sistemas de fato eficientes. A resposta para uma pergunta do tipo “o que irá acontecer se eu fizer isso?”, pode ser dada pela simulação em uma técnica preditiva e preventiva (OLIVEIRA, 2007).

Na simulação a variabilidade pode gerar incoerências nas análises. Além disso, para fins de alcance de uma maior acurácia do processo, é sugerida uma grande repetição do sistema para uma representação confiável da simulação.

Observando somente os resultados obtidos na forma analítica, podem-se analisar alguns valores, sendo eles, a utilização do sistema, que é de 56,09%, sobrando um tempo ocioso de sistema de 43,91%, no qual pode ser empregados esforços para outras atividades com intuito melhorar o nível de serviço do Centro de Distribuição, ou até diminuir gastos com equipamentos e funcionários. Há uma probabilidade de que haja 8,05 caminhões em fila ou sendo atendidos, mostrando que, mesmo com o tempo ocioso de 43,91%, existem caminhões sendo preparados para carregar e outros preparados para seguirem viagem após o carregamento. Existe uma probabilidade equivalente à 99,83% de que não haja mais que 10 caminhões em fila para serem atendidos, fato que proporciona uma dimensão de espaço de espera e preparação de caminhões. O número médio de caminhões em fila é de 0,7163 sendo inferior a 1, mostrando um número baixo de formação de fila, chegando próximo do número médio de caminhões no sistema, que é de 1,277. O tempo médio que o caminhão espera na fila é de 39,06 minutos e o tempo médio de

espera no sistema é de 69,63 minutos, sendo possível esses números serem disponibilizados aos próprios caminhoneiros que carregam seus caminhões no CD. Cabe citar, ainda, que esse tempo também serve para tomada de decisões a respeito da área de carregamento da empresa.

4. Conclusão

Neste estudo, objetivou-se demonstrar a aplicação de um modelo de filas M/M/1 em um Centro de Distribuição de mercadorias responsável pelo carregamento de caminhões, utilizando os cálculos analíticos e a plataforma do *Excel* para a simulação de eventos. Intentou-se, também, revelar a eficiência da simulação, como explanado por Law (2007) ao discorrer sobre a necessidade de construir um modelo como uma representação do sistema e estudá-lo como um substituto para o sistema real. Contudo, ao se utilizar um modelo, há sempre a questão de saber se reflete com precisão o sistema real para efeitos das decisões a serem tomadas, pois em algumas situações não é possível a obtenção de todos os dados necessários para aplicação do modelo analítico.

Nos resultados obtidos a partir da forma analítica e da simulação e baseando-se no referencial teórico selecionado, verificou-se a importância da simulação ao se trabalhar com teoria de filas, a qual se comprovou ser uma ferramenta eficaz para análise de processos de filas em áreas de carga. Tal evidência se deve ao fato dessa teoria permitir a obtenção de resultados aproximados aos ocorridos na prática, analisando cenários e propondo melhores decisões sobre o fluxo de processos.

Os resultados analíticos e simulados são semelhantes para os dois métodos utilizados. Nos dois métodos devem ser encontradas as distribuições de frequência das chegadas e do atendimento dos caminhões. Quando as distribuições de frequência não são comuns, a teoria de filas por meio do equacionamento do modelo, pode ser uma referência difícil de ser solucionada na forma analítica. A simu-

lação, por sua vez, resolve materialmente o problema, mesmo se deparando com as mesmas distribuições de frequência.

Para uma análise e discussão eficaz dos resultados obtidos neste estudo, foram encontrados o erro e a forma de distribuição dos dados, a fim de não correr o risco de gerar informações incorretas. Sendo possível a compreensão passo a passo da elaboração de um modelo de simulação, a partir da obtenção da variabilidade e da aleatoriedade dos dados.

Fica nítido, portanto, que a abertura para novos empregos dos resultados de saída deste capítulo deve ter seus ajustes estatisticamente feitos com o apoio integrado de *softwares* de simulação e de ferramentas estatísticas. Assim requerem-se conhecimentos avançados em estatística, que ultrapassam o que foi utilizado no capítulo, podendo contar com modelos de análise de dados encontrados em livros, como o de Law (2007).

Este capítulo mostra detalhadamente o método utilizado e o alcance dos resultados, podendo ser aplicado em outros estudos, mesmo que em empresas diferentes de um CD, sendo utilizado para diversas análises de uma fila M/M/1. No que tange a esta pesquisa, conclui-se seu potencial para contribuir com a melhoria da planta, em termos de tempo de trabalho e de melhor gestão da área de carregamento do CD, servindo para remediar gargalos encontrados na área em que foi aplicado o estudo.

Referências

ANDREJIĆ, M.; BOJOVIĆ, N.; KILIBARDA, M. Benchmarking distribution centres using principal component analysis and data envelopment analysis: a case study of Serbia. **Expert Systems with applications**, v. 40, n. 10, p. 3926-3933, 2013.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and Simulation: operations management research methodologies using quantitative

modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v.22, n.2, p.241-264, 2002.

BOUCHER, J. P.; COUTURE-PICHÉ, G. Modeling the number of insureds' cars using queuing theory. **Insurance: Mathematics and Economics**, v. 64, p. 67-76, 2015.

CHWIF, L.; MEDINA, A. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos, 4ª Edição: Teoria e Aplicações**. : Elsevier, 2014.

COSTA, P. H. S.; VIEIRA, M. C.; Gois T. C.; Ortolani G. A. A pesquisa operacional e o problema das médias. **XXXV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO – ENEGEP**, Fortaleza, 2015.

FLEURY, A. C. C. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2012.

FLORENCIO, P. H. B.; DANTAS, M. J. P. Estudos sobre modelagem e simulação de sistemas de filas M/M/1 e M/M/2. **IX SAEPRO**, 2014.

Ji, Y.; Yang, H.; Zhang, Y.; Zhong, W. Location optimization model of regional express distribution center. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 96, p. 1008-1013, 2013.

Komashie, A.; Mousavi, A.; Clarkson, P. J.; Young, T. An Integrated Model of Patient and Staff Satisfaction Using Queuing Theory. **IEEE journal of translational engineering in health and medicine**, v. 3, p. 1-10, 2015.

LAW, A. M. **Simulation Modeling & Analysis**. 4. ed. Boston: Ed. McGraw-Hill, 2007.

LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. **Estatística: teoria e aplicações -usando Microsoft Excel português**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MANUEL, U. R.; OFFIONG, A. Application of queuing theory to automated teller machine (ATM) facilities using monte carlo simulation. **International Journal of Engineering Science and Technology**, v. 6, n. 4, p. 162, 2014.

Mattos, N. M. C. SILVA, R. R. INFERÊNCIA BAYESIANA VIA SIMULAÇÃO ESTOCÁSTICA COM IMPLEMENTAÇÃO NO PROGRAMA WINBUGS. Inferência Bayesiana Via Simulação Estocástica Com Implementação No Programa Winbugs. Rio de Janeiro: **XXXIV SBPO**, 2002.

Montgomery, D. C. Runger, G. C. **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 5ª Ed., Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2012.

MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional – Curso Introdutório**. 2. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

Oliveira, J. B. **Simulação computacional: análise de um sistema de manufatura em fase de desenvolvimento**. (Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Engenharia de Itajubá), UNIFEI, Itajubá, 154p, 2007.

PERIN, C. F. **Introdução à simulação de sistemas**. Campinas, Ed. da Unicamp, 1995.

SAVO, G. **Advanced Wireless Networks 4G Technologies**. University of Oulu, 2006.

SINGH, V. To Minimize the Waiting Time and Waiting Time Cost of Dumpers, Waiting in a Queue for Loader at Stone Crusher Plant Mine by Using the Single and Multi-Channel Queuing Theory. **International Journal of engineering Research and Applications**, v. 1, n. 4, p. 150-156, 2014.

Zavanella, L.; Zaroni, S.; Ferretti, I.; Mazzoldi, L. Energy demand in production systems: A Queuing Theory perspective. **International Journal of Production Economics**, v. 170, p. 393-400, 2015.

Zhang, T.; Huang, G. Q.; Luo, H.; Zhong, R. Storage pricing and allocation in a headquarter-managed centralized distribution center. **Procedia CIRP**, v. 25, p. 33-38, 2014.

Zhu, F.; Yao, Y.; Tang, W.; Chen, D. A high performance framework for modeling and simulation of large-scale complex systems. **Future Generation Computer Systems**, v. 51, p. 132-141, 2015.

CAPÍTULO 7

MODELAGEM E SIMULAÇÃO UTILIZANDO O SOFTWARE FLEXSIM: ESTUDO NA BUSCA POR MELHORIAS NO PROCESSO PRODUTIVO ⁷

Thiago Moura de Moraes

José Elmo de Menezes

Felipe Correa Veloso dos Santos

Paulo Henrique dos Santos

Marcos Alexandre Guimarães da Silva

1. Introdução

A rápida evolução do mercado competitivo atual é consequência do surgimento de novas tecnologias facilitadoras para análise de seus processos, esse cenário, diante das empresas, exige cada vez mais excelência na realização de suas atividades. Desse modo, a simulação e a modelagem vêm sendo utilizada amplamente em diversas áreas, já que são ferramentas poderosas que permitem a criação de um sistema computacional sem a necessidade de alteração do sistema físico real, possibilitando, assim, analisar o sistema como um todo, o que implica no desenvolvimento de sistemas produtivos cada vez

⁷ Este capítulo foi originalmente publicado em forma de artigo nos anais do XXXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, realizado em Joiville/SC de 10 a 13 de Outubro de 2017.

mais eficientes (CHWIF; MEDINA, 2010; SAMPAIO; OLIVEIRA, 2013). Ao utilizar a simulação, o esperado é que seja gerado situações favoráveis ou desfavoráveis que sirvam de apoio a tomada de decisões, buscando sempre a organização do sistema em análise.

O modelo de simulação busca a representação do comportamento próximo do real no sistema, porém deve haver a preocupação em evitar uma complexidade maior que a do próprio sistema analisado, o que geraria um problema maior a ser resolvido (BANKS; CHWIF, 2010). Ademais, por meio da modelagem e da simulação de sistemas, é possível identificar as possíveis falhas na produção, desta forma, medidas corretivas podem ser tomadas para melhor efetividade do sistema, além de fornecer uma visão sistêmica de todo o processo envolvido (CARNEIRO; PINTO, 2010).

O *software* Flexsim, é uma poderosa ferramenta de modelagem e de simulação, sendo utilizada para elaboração desse capítulo. O *software* tem sua principal utilização em áreas de projetos de otimização de armazéns, em logísticas e em melhorias na linha de produção (CHEN *et al.*, 2013). O objetivo deste capítulo é a identificação dos recursos de estrangulamento e de ociosidade de duas linhas de produção em uma empresa de alimentos localizada na cidade de Anápolis/Go, para posteriormente detectar possibilidades de melhorias. Desse modo, após o entendimento do problema real do estudo, é realizada a modelagem conceitual utilizando o *software* DIA e, em seguida, a modelagem computacional usando o *software* Flexsim. A pesquisa trata de um estudo de caso empírico, de caráter quantitativo descritivo.

2. Materiais e métodos

2.1. Modelagem e Simulação

Para Sarli e Benedetto (2015), a modelagem e a simulação são os processos de criação e de experimentação de um modelo matemático computadorizado de um sistema físico, sendo o sistema defi-

nido como a interação de componentes ou de processos que recebem uma entrada e que oferecem resultados para algum fim determinado. Com o auxílio da simulação é possível observar o passo a passo das operações, permitindo a melhor operacionalização na solução de problemas que possam ocorrer (PEREIRA, 2000).

A modelagem se revela como o processo de encontrar uma função que melhor descreve o sistema real, e pode possibilitar a verificação e testes de uma situação sem alterar o sistema físico ou, até mesmo, sem construí-lo, além de permitir a análise de suas implicações (LIN; LIU, 2006; LAW, 2014). Para Chwif e Medina (2010), é de fundamental importância a escolha de um *software* para aplicar as simulações de um estudo e ela deve levar em consideração alguns critérios, tais como:

- Critérios de entrada: análise dos dados de entrada; flexibilidade e modelagem; interface com outros *softwares*; testes de probabilidade; e verificação da consistência dos dados.
- Critérios de processamento: tamanho do modelo e velocidade de execução; período de aquecimento; capacidade de manuseio de itens; e capacidade de integração de modelos.
- Critérios de saída: relatórios com medidas de desempenho e de personalizados; possibilidade de exportação dos dados; análise estatística dos resultados; e geração de gráficos estatísticos.
- Critérios de suporte: facilidade de uso; facilidade de aprendizagem; qualidade da documentação; capacidade de animação; ajuda e tutoriais *on-line*; e suporte ao cliente.
- Critérios de custo: aquisição da licença; requisitos de *hardware*; tempo gasto com a aprendizagem; e tempo necessário para construção de modelos.

2.2. Modelagem e simulação utilizando o software Flexsim

O Flexsim é um *software* comercial de simulação e de modelagem de sistemas de eventos discretos, desenvolvido pela *FlexSim Software Production*, que combina imagem de computador tridimensional,

tecnologia de processamento, simulação de sistemas discretos, inteligência e tecnologia de processamento como um todo (Linwei; Li, 2012).

Os autores Ladier e Alpan (2016), propõem uma metodologia para avaliar a robustez de um cronograma de caminhões, na qual representa-se o comportamento do sistema sujeito a interrupções, desenvolvendo um modelo de simulação de um evento discreto com o *software* Flexsim. Esse modelo é construído para representar o funcionamento normal de acordo com um determinado horário, e também inclui regras de decisão que ajudam a lidar com as operações em casos de rupturas.

Tal *software* modela dados de entrada e realiza experimentos de simulação para otimizar o sistema, o que auxilia a identificar os gargalos e os recursos ociosos (QINGTIAN, 2014; ZHU *et al.*, 2014). Com o Flexsim, a distribuição pode ser ajustada pelo *ExpertFit* e, ainda, existe a possibilidade de avaliar cenários, o que possibilita sua otimização pelo *Experimenter*. A decisão de escolher essa ferramenta para simulação, neste estudo em particular, baseou-se em seus recursos de fácil utilização, como arquitetura aberta, conceito fácil de modelagem e escalabilidade total, além das possibilidades de apresentação, de animação e de introdução de mudanças diretamente em 3D, que têm sido de importância crucial para estudos mais complexos.

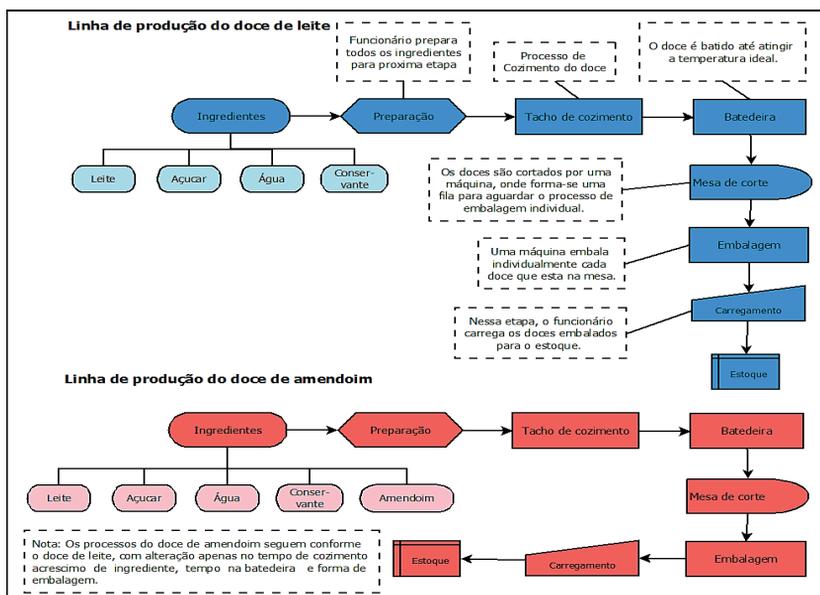
2.3. Objeto de estudo e objetivos

A Doçaria Dois Irmãos LTDA, uma empresa alimentícia e objeto deste estudo, iniciou suas atividades ano de 1983. No início a empresa tinha uma quantidade de produtos bastante restrita, apenas 21 itens, e contava somente com 6 colaboradores. Na atualidade, devido à expansão dos seus produtos, a empresa passou a contar com um *mix* contendo 45 produtos e a organização conta, hoje, com apoio de 18 colaboradores.

Foram escolhidos dois setores, dessa empresa, para serem analisados como objetivo geral da pesquisa, a saber, a linha de produção

do doce de leite, e a linha de produção do doce de amendoim, sendo estas, as linhas que geram maior custo de produção para empresa e envolvem maior número de processos para sua fabricação, compreendidas desde a entrada da matéria-prima no processo, até o armazenamento do produto final. Com a análise, foi traçado os objetivos específicos da pesquisa, sendo eles: identificação de recursos que restringem a capacidade do sistema; verificação da capacidade produtiva, fluxo de atividades, e utilização dos recursos disponíveis como operadores e máquinas; e elaboração de cenários que melhorem o desempenho do sistema, uma vez identificados os problemas. A seguir, na Figura 1, é apresentado um fluxograma contendo as duas linhas de produção, utilizando a técnica de modelagem do *software* DIA, para melhor entendimento do processo.

Figura 1 - Fluxograma das linhas de produção de doce de leite e doce de amendoim.

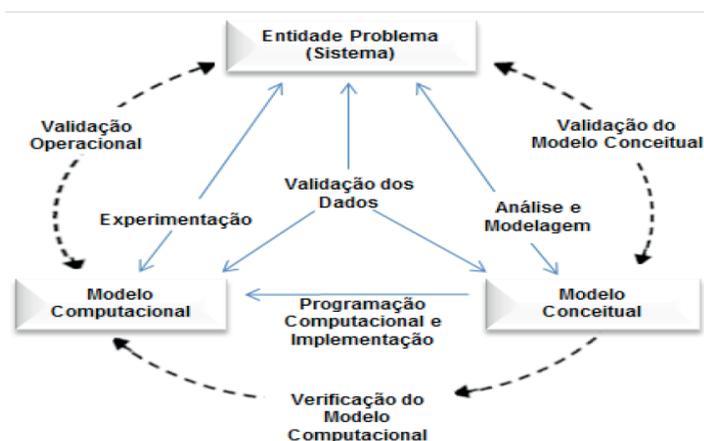


Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

2.4. Procedimentos metodológicos

O autor Sargent (2011) apresenta uma abordagem de modelos de simulação e modelagem que revela a existência de fases para que uma simulação seja bem-sucedida como apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Etapas da modelagem e simulação



Fonte: Sargent (2011).

O objetivo real do estudo é representado pela entidade problema, na qual a representação figurada do sistema é feita pelo modelo conceitual e a experimentação é realizada, no modelo computacional, por meio do *software* escolhido. Neste ocorre a validação do modelo conceitual para confirmar se as hipóteses subjacentes, representantes da entidade problema, estão corretas. Para verificar se a programação realizada está em concordância com o modelo conceitual é realizada a verificação do modelo computacional e, no modelo operacional, é acompanhada a precisão dos dados de saída referente ao esperado.

Foram escolhidas duas linhas de produção para análise neste estudo, onde foram seguidos as seguintes etapas: elaboração de um fluxograma das linhas de produção em análise; formulação de um modelo conceitual após a definição dos objetivos por meio do *soft-*

ware DIA v 0.97.1, no qual foi utilizada a técnica *IDEF-SIM*; criação do modelo computacional; análise do modelo computacional, verificando as possíveis adequações; e apresentação dos resultados na busca por melhorias do modelo real. A seguir, na Figura 3, é apresentada a simbologia utilizada para criação do modelo conceitual pelo *software* DIA.

Figura 3 - Simbologia do implemento *IDEF-SIM*

Elementos	Simbologia	Elementos	Simbologia
Entidade		Regras para fluxos	 Regra E  Regra Ou  Regra E/Ou
Funções		Informação explicativa	
Fluxo da entidade		Fluxo de entrada no sistema	
Recursos		Ponto final do sistema	
Controles		Movimentação	
		Conexão com outra figura	

Fonte: Bateman *et al.*, (2013).

O modelo computacional foi construído utilizando o *software* Flexsim versão 16.2.2 e os dados de entrada, fornecidos pela empresa em estudo. O modelo foi aos poucos sendo incrementado, possibilitando a representação computacional fiel do sistema real. Para a análise do desempenho do sistema de produção foram realizados testes de cenários com auxílio do *Experimenter*, um dos pacotes estatísticos do *software* Flexsim, configurado para realizar, inicialmente, 10 replicações por cenário, com tempo de execução de 480 minutos e com *warmup time*, período de aquecimento, de 60 minutos. O número de replicações foi calculado pela Equação 1, conforme Chwif e Medina (2010), considerando um grau de confiança de 95%.

$$n^* = n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \quad \text{Eq. (1)}$$

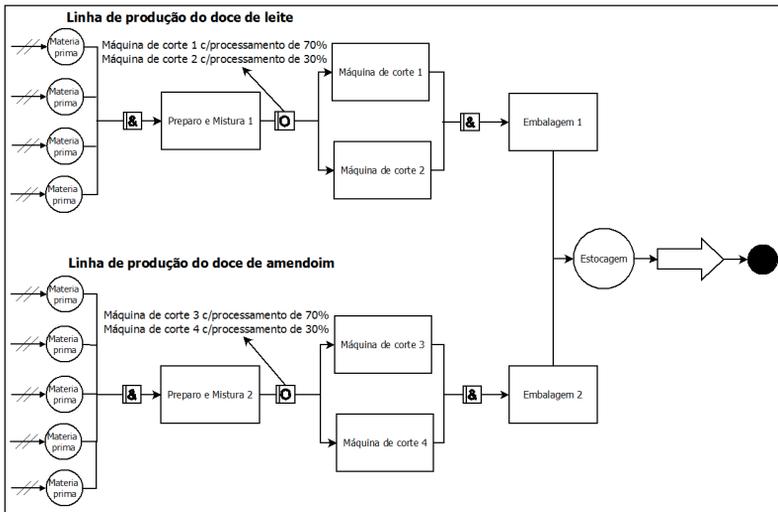
Em que: n^* é o número de replicações necessárias; n é o número de replicações da amostra piloto; h é a precisão da amostra piloto; h^* é a precisão desejada.

Após a experimentação, foram definidas as configurações que auxiliam a melhor eficiência do sistema.

2.4.1. Modelo Conceitual

A partir da técnica de modelagem do *software* DIA, combinado com o suplemento *IDEF-SIM*, foi possível a elaboração do modelo conceitual, a qual é de fundamental importância e se vê necessária uma vez que a maioria das informações utilizadas para sua concepção são essenciais para a modelagem do sistema computacional (MONTEVECHI *et al.*, 2010). A Figura 4 apresenta o modelo conceitual do sistema.

Figura 4 - Produção do doce de leite e do doce de amendoim



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

As duas linhas de produção são similares, porém existem algumas particularidades. Na produção de doce de leite, os dados de entrada são

quatro ingredientes, os quais são colocados à disposição da máquina de preparo e mistura, que, nesse caso, também contempla o processo de cozimento do doce. Após o preparo e mistura, o produto segue para o estoque em processo e, em seguida, para a máquina de corte dos doces, posteriormente a essas etapas, o produto vai para a fase de embalagem, nesta os doces são embalados e enviados à armazenagem, para posterior carregamento. Na produção do doce de amendoim há a entrada de cinco ingredientes, após essa diferença, o processo segue a mesma linha, com variações nos tempos de processamentos. Ademais, a operação Máquina de corte, em ambas as linhas de produção, compreende as etapas da bateadeira e corte dos doces nas mesas.

Foi utilizado o ajustamento da distribuição dos dados por meio do *ExpertFit*, que possibilita a integração com o *software* Microsoft Excel. Além disso, o *software* Flexsim possibilitou-se a identificação estatística das probabilidades a serem aplicadas aos processamentos das máquinas, embasados nos dados reais de processos coletados na empresa. Os dados foram expostos na Tabela 1, na qual consta a coluna de cada operação e os dados a respeito do processamento.

Tabela 1 - Tempos e capacidade de processamento de máquinas e filas

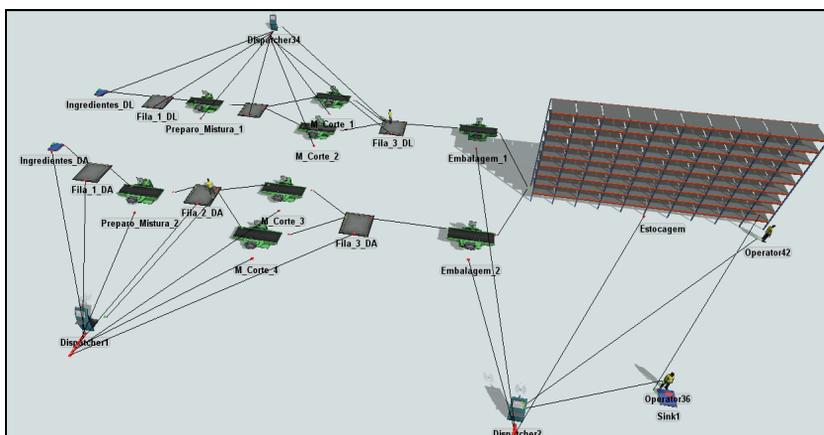
Operação	Processamento	Capacidade (kg)
Fila 1 (DL)	-	200
Preparo e Mistura 1	Normal (14.89, 0.6466)	200
Fila 2 (DL)	-	200
Máquina de corte 1	Normal (15.701, 1.1960)	140
Máquina de corte 2	Normal (15.701, 1.1960)	140
Fila 3 (DL)	-	200
Embalagem 1	Normal (32.357, 1.7522)	200
Fila 1 (DA)	-	200
Preparo e Mistura 2	Normal (17.5114, 0.67885)	200
Fila 2 (DA)	-	200
Máquina de corte 3	Normal (16.701, 1.2410)	140
Máquina de corte 4	Normal (16.701, 1.2410)	140
Fila 3 (DA)	-	200
Embalagem 2	Normal (34.669, 1.79541)	200
Estocagem	-	10000
Operadores descarregados	Uniforme (0.12, 0.06)	-
Operadores carregados	Uniforme (0.20, 0.14)	24

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

2.4.2. Modelo Computacional

Com o suporte da entidade problema, que por sua vez representa o objeto real do estudo, e o modelo conceitual, realizou-se a modelagem de entrada de dados para se prosseguir nas fases seguintes da simulação. O modelo computacional refere-se à implementação do experimento com auxílio do *software* Flexsim, contando com sua verificação e validação. Nesta parte, houve a inserção dos recursos fixos (máquinas e filas), dos executores de tarefas (operadores) e da lógica das linhas de produção de doces envolvidas neste estudo. O tempo de simulação adotado para os modelos foi de 1800 minutos. Na Figura 5 é apresentada a configuração geral do *layout* do processo.

Figura 5 - Configuração do processo das duas linhas de produção no Flexsim



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

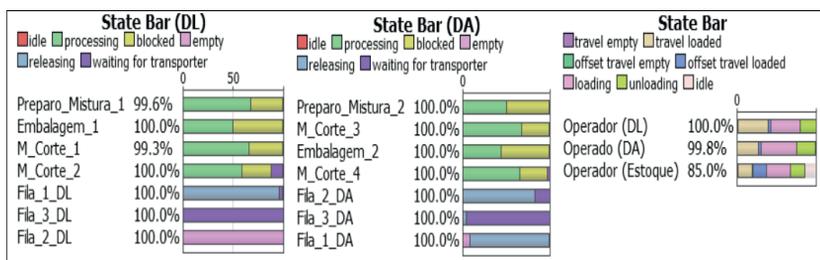
Após o processo de verificação, corrigiu-se todas as falhas existentes no modelo e prosseguiu com a execução do modelo. A parte gráfica oferecida pelo Flexsim permitiu o acompanhamento do comportamento do sistema em fase de simulação, o que possibilita alguns ajustes durante este processo. Além disso, a partir de uma validação face a face foi possível comparar e verificar se o modelo

conceitual oferece uma adequada representação do processo em estudo.

3. Análise dos resultados

No cenário inicial dos processos do doce de leite (DL) e do doce de amendoim (DA) há uma produção média diária de 288 kg daquele e 54 kg deste. Sob a perspectiva do cenário inicial, é apresentado, na Figura 6, o comportamento real do sistema, informando os dados extraídos do processo inicial sem nenhuma intervenção de melhoria.

Figura 6 - Dados do processo inicial das linhas de produção (DL e DA)



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

Para o gráfico de barra com estado do processo de produção de doce de leite (*State Bar* DL) são mostradas as seguintes estatísticas acerca da utilização do tempo de fabricação: a máquina de preparo e mistura está em atividade durante um período que abrange 67,8% do tempo e bloqueada durante 31,8% do seu tempo; a máquina de corte 1 permanece em atividade durante 66,1% do tempo e se encontra bloqueada durante 33,1% do tempo; a máquina de corte 2 tem 59,1% do tempo em processo, 29,2% bloqueada e 11,5 % esperando por transportador; e a máquina de embalagem tem 49,8% do tempo em processo e 49,7 % do tempo bloqueada. Já o

comportamento das filas da linha de produção de doce de leite são os seguintes: a fila 1 (DL) tem 96,1% do seu tempo gasto com a liberação de produtos e 3,7% esperando pelo transportador; a fila 2 (DL) permanece 100% do seu tempo vazia; e a fila 3 (DL) com 99,6% do seu tempo esperando pelo transportador.

Sobre a exibição do processo de produção de doce de amendoim (*State Bar DA*). são revelados os seguintes dados em relação ao tempo de preparo: a máquina de preparo e mistura 2 tem 50,8% do seu tempo destinado ao processo de produção e 49,2% do seu tempo bloqueada, a máquina de corte 3 tem 68,0% do seu tempo gasto em atividade e 31,8% do seu tempo bloqueada; a máquina de corte 4 permanece em processo 66,1% do seu tempo, bloqueada 30,7% e esperando transportador 3% do seu tempo; e a máquina de embalagem permanece em processo 44,3% do seu tempo e bloqueada 55,2% do seu tempo. Os comportamentos das filas da linha de produção de doce de amendoim se apresentam da seguinte forma: a fila 1 (DA) passa 9% do seu tempo vazia e 91% do seu tempo liberando produtos; a fila 2 (DA) opera em 82,4% do seu tempo a liberação de produtos e utiliza 17,2% do seu tempo na espera do transportador; e a fila 3 (DA) gasta 3,7% do seu tempo liberando produtos e 95,8% do seu tempo esperando pelo transportador.

No processo inicial da empresa as duas linhas de produção e a parte de expedição, contam com 3 operadores. Para esse processo, gerou-se dados para a análise do desempenho que também pode ser observado na Figura 6. O operador DL, que fica responsável por toda linha de produção de doce de leite permanece 38,9% do seu tempo transportando os produtos, 2,8% em deslocamento para carregar, 37,1% carregando os produtos e 19,6% descarregando os produtos. O operador DA, que fica atribuído por toda linha de produção de doce de amendoim permanece 26,8% do seu tempo transportando os produtos, 3,4% do seu tempo em deslocamento para carregar, 44,8% carregando os produtos e 23,8% descarregando os produtos. O operador responsável por guardar os produtos no estoque e, também, por disponibilizar os produtos para a área de expedição,

permanece 18,0% do seu tempo transportando os produtos, 16,4% do seu tempo em deslocamento para carregar, 31,3% carregando os produtos, 16,5% descarregando os produtos e 15% do seu tempo em ociosidade.

Os dados do cenário inicial mostram que existe uma porcentagem de bloqueio em todas as máquinas e uma necessidade de mais transportadores nas filas. Esses dados validam a detecção dos pontos de gargalos no sistema e mostram que o sistema inicial não possui pontos relevantes de ociosidade. Portanto, será realizado uma análise de cenários envolvendo a adição estratégica de mais operadores e a intervenção nas máquinas, verificando, assim, a possibilidade de aumento de capacidade e da atualização no processo.

Foram criados 23 cenários distintos, variando de 1 a 3 operadores por área para a experimentação do sistema, visando sempre melhorar o fluxo e aumentar a produção diária. Nos processos da empresa, o operador pode operar mais de uma máquina e transportar os produtos entre máquinas diferentes de cada linha e estoque. Contudo, os operadores somente poderão realizar as atividades em sua área, por exemplo, eles não podem operar a linha de doce de leite e, também, a linha de doce de amendoim, da mesma forma com o operador do estoque.

A simulação utilizando o *Experimenter* retornou 15 cenários com produção média acima do que já estava sendo realizado pelos processos iniciais, como apresentado na Tabela 2. Verifica-se que os cenários são decrescentes, ou seja, do melhor para o pior, sendo que o cenário 8 obteve o melhor resultado. Nesta etapa, procurou-se identificar a melhor configuração de operadores, portanto, houve mudanças apenas na quantidade desses artefatos.

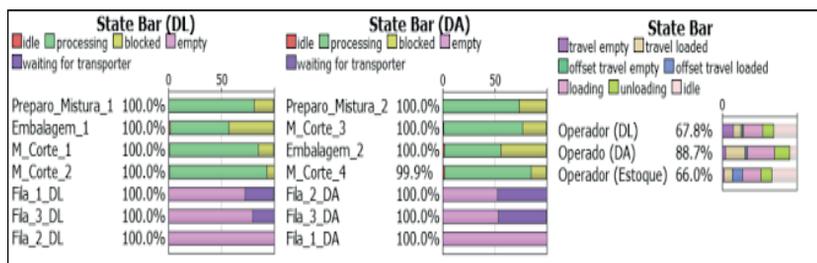
Tabela 2 - Distribuição dos 15 cenários e da produção diária total

Cenário	Linha (DL)	Linha (DA)	Estoque	Total de funcionários	Média de Produção Total/dia	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95%)	
							Min.	Máx
Cenário 8	2	2	1	5	420,18	5,15	421,37	424
Cenário 4	1	2	3	6	419,52	4,56	423,12	423,9
Cenário 12	2	1	1	4	419,33	4,84	422,73	423,9
Cenário 9	2	2	3	7	419,13	4,72	422,61	423,6
Cenário 14	1	2	2	5	418,85	4,8	422,28	423,4
Cenário 10	3	3	1	7	418,83	5,29	421,91	423,7
Cenário 19	1	3	1	5	418,8	4,96	422,11	423,4
Cenário 18	1	2	1	4	418,77	4,67	422,29	423,4
Cenário 13	2	1	1	4	418,7	4,72	422,18	423,4
Cenário 15	3	2	2	7	418,65	4,93	421,98	423,3
Cenário 20	2	1	2	5	418,63	5,12	421,83	423,4
Cenário 7	1	1	3	5	418,57	5,4	421,57	423,4
Cenário 2	2	2	2	6	418,49	4,77	421,94	423,6
Cenário 6	1	1	2	4	418,25	5	421,53	422,9
Cenário 5	2	2	1	6	417,99	4,86	421,37	423,4

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

Após a detecção do melhor cenário envolvendo a quantidade e o local de ocupação dos operadores, foi realizada uma intervenção nas máquinas a fim de diminuir a porcentagem de bloqueio e aumentar a produtividade. Primeiramente aumentou em 50% a capacidade de processamento das máquinas de preparo e mistura das duas linhas, pois se abre a possibilidade de trabalhar com essa capacidade se houver outro operador, com isso as máquinas de corte duplicaram sua capacidade. Com um operador a mais nas linhas, houve a alternativa de juntar duas mesas de corte em cada máquina de corte. Também se duplicou os espaços em fila entre as máquinas de cada linha de produção, conforme a Figura 7.

Figura 7 - Dados do processo após ajustes (melhorias)



Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

Foram extraídos os dados da Figura 7 e comparados aos dados da Figura 6, tendo como resultado as informações da Tabela 3, a qual mostra as diferenças existentes entre o cenário ajustado e o cenário inicial.

Tabela 3 - Contraste entre o modelo inicial e o modelo ajustado

	Processando	Bloqueada	Ociosas	Espera por transportado
Preparo e Mistura 1	13,80%	-13,50%	0,00%	0,00%
M. Corte 1	18,50%	-18,60%	0,00%	0,00%
M. Corte 2	32,30%	-22,20%	0,00%	-11,50%
Embalagem 1	6,00%	-7,30%	1,80%	0,00%
Fila 1 DL	-	-	-	23,40%
Fila 2 DL	-	-	-	0,00%
Fila 3 DL	-	-	-	-79,40%
Preparo e Mistura 2	23,00%	-23,00%	0,00%	0,00%
M. Corte 3	7,90%	-8,90%	0,00%	0,00%
M. Corte 4	17,30%	-16,30%	2,00%	-3,00%
Embalagem 2	9,80%	-11,40%	2,10%	0,00%
Fila 1 DA	-	-	-	0,00%
Fila 2 DA	-	-	-	30,30%
Fila 3 DA	-	-	-	10,70%

Fonte: Acervo pessoal dos pesquisadores, 2017.

Analisando a Tabela 3, nota-se uma melhoria significativa na comparação do modelo ajustado com o modelo inicial. Na linha de produção do DL, por exemplo, nota-se as seguintes mudanças: melhoria de 13,80% no tempo de processamento da máquina de preparo e mistura 1 e diminuição de 13,50% no tempo que essa mesma máquina se encontrava em bloqueio; ganho em processo de 18,50% e diminuição no tempo de bloqueio em 18,60% da máquina de corte 1; em relação à máquina de corte 2, valorização real de 32,30% no tempo de processamento, diminuição de 22,20% do seu tempo de bloqueio e minimização de 11,50% do seu tempo de espera por transportador; sobre a máquina de embalagem, aumento de 6% em seu tempo de processo e diminuição de 7,30% em seu tempo de bloqueio, mas um aumento de 1,80% de ociosidade; na Fila 1, aumento de 23,40% no tempo de espera por transportador; na fila 2, não houve alteração; e na fila 3, diminuição de 79,40% no tempo de espera por transportador. Analisando o contraste da linha de produção de doce de amendoim, percebe-se o seguimento da mesma dinâmica que ocorre na linha de produção de doce de leite, com variações nos respectivos resultados.

De modo geral fica claro que o processo realmente melhorou com a descoberta do cenário ideal para emprego dos operadores e intervenção nas máquinas, o que comprova esta afirmação além dos resultados expressos na Tabela 3, é o aumento na média da produção diária total das duas linhas, que passa de 342kg/dia, com desvio padrão de 1,881kg, para 438kg/dia, sendo a produção do doce de leite equivalente à 368,8kg/dia e a produção do doce de amendoim igual a 69,2kg/dia, com desvio padrão de 2,628kg. Desse modo, constata-se um aumento de 28,05% na produção diária total com um intervalo de confiança de 95%, apenas com o aumento de dois operadores e com as intervenções nos processos otimizando as máquinas.

4. Considerações finais

Neste capítulo, apresentou-se o emprego da modelagem e da simulação em duas linhas de produção de doces de uma empresa alimentícia com o auxílio do *software* Flexsim. Com o objetivo de analisar os dados de saída preliminares e de descobrir os recursos de estrangulamento e de ociosidade, verificou-se o processo inicial das produções, sobre o qual, posteriormente, foi gerado e analisado o melhor cenário envolvendo a quantidade de operadores, além de ter sido realizadas intervenções nas máquinas a fim de melhorar o fluxo e de aumentar a produtividade. No cenário inicial, não foram visualizados pontos de ociosidade ou, quando existentes, foram mínimos, mas se identificaram pontos de estrangulamento. Os dados de entrada e de pós análise foram essenciais para as intervenções em máquinas e para a construção de um modelo melhorado.

Como desfecho, verifica-se que o modelo ajustado, identificado com o auxílio dos experimentos, obteve um ganho de 28,05% na produção diária total e uma maior eficiência no fluxo dos produtos durante os processos de fabricação; e as máquinas aumentaram seu tempo gasto com o processamento e diminuíram seu tempo de bloqueio, desse modo, pode ser observada a minimização do estrangulamento durante o processo dos produtos. Cabe citar, também, que as filas passaram a ficar a maior parte do seu tempo vazias, refletindo a melhoria neste fluxo de produtos. Em algumas etapas, viu-se a necessidade de adição de operários, por isso, foram adicionados 2 operadores nas linhas de produção, diminuindo, assim, o tempo de espera por transportador nos processos, porém, foi notado que houve um aumento da percentagem de tempo ocioso dos 3 primeiros operadores analisados.

Referências

BANKS, J.; CHWIF, L. Warnings about simulation, **Journal of Simulation**. Tecnológico de Monterrey, Monterrey, NL, México

and Escola de Engenharia Maua, São Caetano do Sul, São Paulo, Brazil, 2010.

BATEMAN, R. E.; et al. **Sistemas de simulação: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CARNEIRO, W. M.; PINTO, L. R. Comparação entre o desempenho dos modelos de teoria das filas e simulação computacional para estimar o atraso de linhas ferroviárias singelas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA, 2010, Rio de Janeiro. **Anais do SPOLM 2010**. Rio de Janeiro: SPOLM, 2010. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/spolm/sites/www.marinha.mil.br/spolm/files/73768.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2016.

CHEN, L., HU, D.; XU, T. Highway freight terminal facilities allocation based on Flexsim. **Procedia – Social and Behavioral Sciences**. 2013. Vol. 96, pp 368-381.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. 3. Ed. rev. São Paulo: Ed. do Autor, 2010.

LADIER, A-L.; ALPAN, G. Robust cross-dock scheduling with time Windows. **Computers & Industrial Engineering**. Elsevier: BV. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.07.003>>. Acesso em:

LAW, A. **Simulation Modeling and Analysis**. 5. Ed. Estados Unidos da América: McGraw Hill, 2014.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis**. Third Edition. McGraw Hill, 2000.

LIN, Y.; LIU, S. Solving problems with incomplete information: a grey systems approach. **Advances in Imaging and Electron Physics**. Vol. 141, Elsevier: Oxford, 2006, pp. 77-174.

LINWEI, X.; LI, Z. X. Simulation and Optimization of Logistics Collaborative Operation Based on Flexsim. **Mechanical Engineering and Technology**, 2012. Vol. 125, p. 543-457.

MONTEVECHI, J. A. B.; et al. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a brazilian tech company. **Proceeding of the 2010 Winter Simulation Conference**. 2010, p. 1624-1635.

PEREIRA, I. C. **Proposta de sistematização da simulação para fabricação em lotes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá/MG, 2000.

QINGTIAN, H. Research on Simulation of Modern Storage System with Flexsim. **Advanced Materials Research**. 2014, Vol. 989-994, p. 1477-1480.

SAMPAIO, P. G. V.; OLIVEIRA, S. D. Estudo de modelagem e simulação de filas num supermercado associado à análise de cenários. In: **XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. 2013. Salvador, BA, 2013.

SARGENT, R.G. Verification and validation of simulation models. **Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference**, 2011, p. 183-198.

SARLI, V. D.; BENEDETTO, A. D. Modeling and simulation of soot combustion dynamics in a catalytic diesel particulate filter. **Chemical Engineering Science**. vol. 137, p. 69-78. 2015.

ZHU, X.; et al. A Flexsim-based optimization for the operation process of cold-chain logistics distribution centre. **Journal of Applied Research and Technology**, 12:270-278, 2014.

CAPÍTULO 8

DESENVOLVIMENTO DE UM PLANO DE COMPRAS EM UMA PIZZARIA UTILIZANDO A PROGRAMAÇÃO LINEAR⁸

**Fabiano Pereira Corrêa
Luiz Thiago Monteiro de Oliveira
Walter Filizola da Silva Neto
Yvelyne Bianca Iunes Santos**

1. Introdução

No Brasil o ramo alimentício vem sendo fortemente explorado tanto por grandes empresários como, também, por pequenos empreendedores. Acredita-se que esse fato é decorrente do aumento populacional do país. De acordo com RAIS/MTE, citado por SEBRAE (2012), o ramo alimentício representa 21% dos estabelecimentos formais no Estado do Pará e que é constituído por uma grande variedade de bares e restaurantes, dentre eles estão às pizzarias que serão o principal foco deste trabalho.

Atualmente as pizzarias apresentam um crescimento notável, conseqüentemente a concorrência entre esses estabelecimentos também aumenta. Dessa forma, para enfrentar um mercado mais

⁸ Este capítulo foi originalmente publicado em forma de artigo nos anais do XXXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, realizado em Fortaleza de 13 a 16 de outubro de 2015.

competitivo, empresários do ramo buscam inovações e aperfeiçoamentos de técnicas administrativas e gerenciais.

No presente trabalho, utilizamos a pesquisa operacional para minimizar os custos com compra de material em uma pizzaria localizada no centro de Belém, no Pará. A compra dos materiais necessários para a produção das pizzas é feita de acordo com a necessidade, não havendo um planejamento de compras e nem um controle financeiro. O estudo foi aplicado visando ao desenvolvimento de um plano de compras otimizado que minimize o custo da empresa, atendendo suas limitações e mantendo a qualidade dos produtos.

Para a formulação de um planejamento adequado para a pizzaria, foram utilizados métodos de programação linear, modelagens matemáticas e *software LINDO*. Posteriormente, foram feitas comparações entre os dados reais e os resultados obtidos.

2. Referencial teórico

2.1. Pesquisa operacional

Segundo Andrade (2009), a Pesquisa Operacional (PO) é um método administrativo que engloba conceitos da economia, da matemática, da estatística e da informática. A partir da junção destes quatro conceitos, é possível analisar e tomar decisões com o intuito de otimizar uma gama diversificada de problemas.

Cabe elucidar que esse método se trata de uma estratégia de modelagem matemática de problemas estáticos ou dinâmicos para auxiliar em processos de tomadas de decisões, como planejar, projetar e operar situações em que requerem alocações eficientes de recursos escassos (ARENALES, 2015).

Além disso, de acordo com Hillier e Lieberman (2013), a Pesquisa Operacional tem sido amplamente aplicada em áreas muito distintas como manufatura, transportes, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, assistência médica, militar e serviços públicos, de maneira a tentar otimizar a produção de serviços/produtos.

2.2. Programação linear

A programação linear consiste no planejamento de atividades com o objetivo de analisar todas as soluções possíveis de uma situação específica e, dentre elas, apontar aquela que é considerada ótima (HILLIER e LIEBERMAN, 2013). Marins (2013) cita que, na programação linear, a solução ótima é encontrada a partir de modelo matemático representado por funções lineares.

Ainda segundo os mesmos três autores, o modelo matemático criado deve possuir uma função que determinará a maximização ou minimização do objetivo (função objetivo), contendo variáveis quantificadas na situação em questão (variáveis de decisão) e respeitando as equações ou inequações que impõe os limites do problema (restrições).

2.3. Software LINDO

A ferramenta computacional escolhida para a resolução do modelo matemático, que representa o problema, foi o software *LINDO* (*Linear Interactive and Discrete Optimizer*), o qual se caracteriza por ser “um solucionador universal de programação linear, inteiro e estocástico que tem sido usado por milhares de empresas em todo o mundo para maximizar os lucros e minimizar custos nas decisões que envolvem o planejamento da produção, transporte, finanças, distribuição de portfólio, orçamento de capital, misturas, agendamento, inventário, alocação de recursos dentre outros” (LINDO, 2010).

3. Estudo de caso

3.1. A empresa

A empresa em estudo produz pizzas de vários sabores e as vende tanto no local de produção como por entregas em domicílio. Tal produção é feita de forma artesanal por dois pizzaiolos que são responsáveis pela produção da massa , montagem da

pizza e o cozimento da mesma. Faz-se importante esclarecer que a compra dos ingredientes se dá de maneira desordenada, ou seja, sem planejamento prévio do custo e da quantidade necessária para atender a demanda, prejudicando a gestão de recursos financeiros da empresa.

3.2. O produto

Para o desenvolvimento do modelo matemático, foram escolhidos sete ingredientes diferentes utilizados na produção das pizzas, são eles: sal, trigo, óleo, açúcar, fermento, mussarela e molho de pizza.

Esses itens foram selecionados por serem comuns a todas as pizzas ofertadas pelo estabelecimento. Além disso, a maioria dos materiais são utilizados na produção da massa, com exceção da mussarela e molho de pizza.

Segundo informações fornecidas pela gerência da empresa, com um quilo de trigo faz-se quatro pizzas, então, para facilitar os cálculos, os ingredientes foram postos em função do trigo, ou seja, para cada quilo de trigo será utilizada uma determinada quantidade de cada ingrediente.

3.3. Metodologia

A metodologia utilizada foi dividida em três etapas, são elas: definir os problemas de interesse e coletar os dados; formular um modelo matemático para representar o problema; e desenvolver um procedimento computacional a fim derivar soluções para o problema a partir do modelo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

3.3.1. Definição do problema e coleta dos dados

Inicialmente, deve-se identificar membros da gerência que decidirão sobre a aplicação do estudo e, posteriormente,

analisar o pensamento desses indivíduos a respeito dos objetivos pertinentes. Ademais, envolver o tomador de decisões é essencial para obter seu apoio à implementação do estudo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A finalidade deste trabalho é minimizar os custos da empresa através de um planejamento de compras otimizado. O principal ponto do estudo é determinar a quantidade ótima mensal a ser comprada de cada ingrediente para o período de Junho/14 a Novembro/14.

A partir das informações cedidas pela empresa, foram coletados os seguintes dados:

- Ingredientes em comum utilizados para a produção das pizzas;
- Custo da embalagem de cada ingrediente;
- Quantidade de ingrediente contida na embalagem;
- Demanda dos ingredientes nos meses em estudo;
- Mão de obra disponível;
- Tempo de preparo para 1 quilo de trigo;
- Recurso financeiro utilizado na compra dos materiais.

Os dados coletados são apresentados nas Tabelas 1 a 4 a seguir.

Tabela 1 - Demanda dos ingredientes em junho, julho e agosto

Produtos	Demanda por mês		
	Junho	Julho	Agosto
Sal (kg)	1,06	0,85	1,75
Trigo (kg)	151,25	122,5	250,87
Óleo (L)	9,075	7,35	15,05
Açúcar (kg)	0,53	0,43	0,88
Fermento (kg)	2,27	1,83	3,76
Mussarela (kg)	121	98	200,7
Molho de pizza (L)	90,75	73,5	150,52

Fonte: Gerência do estabelecimento

Tabela 2 - Demanda dos ingredientes em setembro, outubro e novembro

Produtos	Demanda por mês		
	Setembro	Outubro	Novembro
Sal (kg)	1,5	1,26	2,28
Trigo (kg)	213,40	181	326,50
Óleo (L)	12,80	10,86	19,59
Açúcar (kg)	0,74	0,63	1,14
Fermento (kg)	3,20	2,71	4,81
Mussarela (kg)	170,67	144,80	261,20
Molho de pizza (L)	128,00	108,60	196,00

Fonte: Gerência do estabelecimento

Tabela 3 - Dados complementares dos ingredientes necessários para a construção do modelo

Produtos para produção de pizza	Quantidade por embalagem	Preço por embalagem	Quantidade por kg de trigo
Sal	1 Kg	R\$1,05	0,007 Kg
Trigo	25 Kg	R\$53,90	1 Kg
Óleo	0,9 L	R\$3,08	0,06 L
Açúcar	1 Kg	R\$2,37	0,0035 Kg
Fermento	0,1 Kg	R\$2,23	0,015 Kg
Mussarela	4 Kg	R\$48,00	0,8 Kg
Molho de pizza	1,5 L	R\$7,90	0,6 L

Fonte: Gerência do estabelecimento

Tabela 4 - Recursos financeiros e tempo disponível

Recursos disponíveis mensalmente	
Financeiro	R\$ 7.000,00
Tempo	7680 minutos

Fonte: Gerência do estabelecimento

3.3.2. Formulação do modelo matemático

Os modelos desempenham importante papel nas ciências e no mundo dos negócios. Eles são inestimáveis na abstração da essência da matéria da investigação, mostrando inter-relacionamentos e facilitando a análise (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

3.3.2.1. Função objetivo

A função objetivo consiste na minimização dos custos da empresa na compra dos principais materiais necessários para a produção das pizzas, sendo assim relacionam-se o número de embalagens de determinados produtos (variáveis de decisão) e seus preços. A resposta do modelo matemático indicará o número mínimo de embalagens a serem compradas nos meses de Junho/14 a Novembro/14, atendendo às respectivas demandas. Portanto, a referida função pode ser descrita como o somatório dos números necessários de embalagens do material de cada mês multiplicado pelo custo dessa embalagem.

$$\text{MIN } Z = \Sigma (53,90\text{NTm} + 1,05\text{NSm} + 3,08\text{NOM} + 2,37\text{NAm} + 2,23\text{NFm} + 48\text{NMm} + 7,90\text{NMPm})$$

Tabela 5 - Legenda das variáveis

Variáveis de decisão	
NTm	Nº de embalagens de trigo no mês m
NSm	Nº de embalagens de sal no mês m
NOM	Nº de embalagens de óleo no mês m
NAm	Nº de embalagens de açúcar no mês m
NFm	Nº de embalagens de fermento no mês m
NMm	Nº de embalagens de mussarela no mês m
NMPm	Nº de embalagens de molho de pizza no mês m

Fonte: Autoria própria

3.3.2.2. Restrições

As restrições são limitações para os valores das variáveis de decisão e, de acordo com Hillier e Lieberman (2013), devem ser representadas matematicamente em desigualdades ou em equações.

3.3.2.2.1. Restrição de demanda dos produtos

$$N_{pm} * Q_p \geq D_{pm}$$

Sobre a formulação da restrição da demanda dos produtos, tem-se que o número de embalagens necessárias do produto “p” em um mês “m” (N_{pm}) multiplicado pela quantidade do produto “p” na embalagem (Q_p) deve ser maior ou igual à demanda do produto “p” em um mês “m” (D_{pm}).

3.3.2.2.2. Restrição de tempo disponível

$$N_{tm} * Q_t * T_t \leq T_d$$

Sobre a formulação da restrição do tempo disponível para o preparo tem-se que o número de embalagens de trigo necessárias em um mês “m” (N_{tm}) multiplicado pela quantidade de trigo na embalagem (Q_t) e pelo tempo de preparo de um quilo de trigo (T_t) deve ser menor ou igual ao tempo disponível mensal para a produção das pizzas (T_d).

Os dados foram coletados em função do tempo de preparo do trigo, pois os ingredientes não são preparados separadamente e, sim, misturados em um quilo de trigo, exceto a mussarela e o molho de pizza. Portanto é somente necessário usar o tempo de preparo do trigo como restrição. Segundo as informações da gerência, com um quilo de trigo faz-se quatro pizzas, assim, considerando que uma pizza é preparada em cinco minutos, um quilo de trigo são prepa-

rados em vinte minutos, então pode-se colocar a mussarela e o molho pizza em função de um quilo de trigo.

3.3.2.2.3. Restrição financeira

$$\Sigma (N * C) \leq Rd$$

Sobre a formulação da restrição financeira tem-se que o somatório do número total de embalagens compradas de todos materiais em todos meses multiplicado pelo somatório do custo das embalagens deve ser menor ou igual ao recurso financeiro disponível (Rd).

3.3.3. Derivar soluções a partir de um procedimento computacional

Após a formulação de um modelo matemático para o problema em questão, a próxima fase em um estudo de Pesquisa Operacional é desenvolver um procedimento (normalmente baseado em computador) a fim de derivar soluções para o problema desse modelo (HILLIER e LIEBERMAN, 2013).

Para a resolução do modelo, utilizou-se o *software* computacional para otimização de modelos chamado *LINDO*. Como resultados foram obtidos os valores das variáveis de decisão, o valor da função objetivo (custo total) e as folgas para um custo mínimo.

4. Resultados e discussões

A solução do modelo matemático apontou os seguintes resultados:

Tabela 6 - Resultados das variáveis de decisão

Embalagens do produto	Quantidades a serem compradas em cada mês					
	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.
Trigo (Kg)	7	5	11	9	8	14
Sal (Kg)	2	1	2	2	2	3
Óleo (L)	11	9	17	15	13	22
Açúcar (Kg)	1	1	1	1	1	2
Fermento (Kg)	23	19	38	32	28	49
Mussarela (Kg)	31	25	51	43	36	66
Molho de pizza (L)	61	49	101	86	83	131

Fonte: Autoria própria

É importante ressaltar que a compra da mussarela deve ser feita semanalmente por ser um produto perecível.

Tabela 7 - Comparação entre o tempo ótimo e o disponível

Mês	Tempo ótimo (min)	Tempo disponível (min)	Tempo ocioso (min)
Junho	3500	7680	4180
Julho	2500	7680	5180
Agosto	5500	7680	2180
Setembro	4500	7680	3180
Outubro	4000	7680	3680
Novembro	7000	7680	680

Fonte: Autoria própria

Notou-se que em todos os seis meses houve folga na mão-de-obra, o que demonstra ociosidade e a capacidade de absorver uma demanda de produção maior que atual.

Tabela 8 - Comparação de custos

Custo semestral da empresa com a compra dos materiais em estudo	Custo semestral ótimo com a compra dos materiais em estudo
R\$ 25.436,38	R\$ 19.762,12

Fonte: Autoria própria

Foi observado, também, que o custo ótimo (compra dos materiais selecionados), teve uma redução de R\$ 5.676,26 em relação ao custo praticado pela empresa, que representa uma diminuição de 22,32% nos gastos.

5. Conclusão

Após a comparação da solução ótima com a situação real, ficou evidente que a aplicação de conceitos da pesquisa operacional em empresas auxilia o administrador na tomada de decisão. Desse modo, os conceitos de programação linear e planejamento permitiram analisar e solucionar as complicações encontradas no processo estudado.

A partir da análise de sensibilidade fornecida pelo *software LINDO*, foi visto a existência de uma folga na mão-de-obra, ou seja, verificou-se que a capacidade produtiva não está sendo totalmente aproveitada. Sugere-se, portanto a redução no quadro de funcionários ou o desprendimento de investimentos para o aumento da demanda.

Em conclusão, os resultados apontaram que os custos com compras de material podem ser reduzidos em torno de 22% caso seja adotado um planejamento otimizado de compras. Além disso, com a redução dos custos é possível aplicar o capital no setor de

marketing e ampliar o serviço de *delivery*, visando a aumentar a demanda do produto.

Referências

ALMEIDA, F. S.; SAMPAIO, G. S.; SOUZA, R. L.; SANTOS, T. B. B.; SANTOS, Y. B. I. **Aplicação da programação linear para minimização de custos no processo produtivo de uma espetaria**. SIMPEP, Bauru-SP, 2014.

ANDRADE, Eduardo Leopoldino de. **Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos Para a Análise de Decisão**. 4 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional: para cursos de engenharia**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2015.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 9. ed. São Paulo: Mcgraw-hill, 2013.

LINDO Systems, Inc. **LINDO API 6.1 User Manual**. Chicago, 2010. Disponível em: <<http://www.lindo.com>> Acesso em: 12 dez. 2014.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011.

RIO DE JANEIRO. SEBRAE. **Nota conjuntural Setor de alimentos**. 2012. Disponível em: <http://www.sebrae.com.br/Sebrae/Portal%20Sebrae/UFs/RJ/Menu%20Institucional/Sebrae_SET_dez12_alim.pdf>. Acesso em: 12 dez. 2014.