

Simulação e *lean thinking* como ferramentas para gestão de processos: uma avaliação de diferentes alternativas ao aumento da capacidade em uma empresa de cabos elétricos de alumínio

Computational simulation and lean thinking as tools of process management: an assessment of different alternatives to increase capacity in a manufacturing company of aluminum electrical cables

Tiago Augusto Amarante de Souza (UEPA – PA/Brasil) - tiago2605@hotmail.com
• Enéas Pinheiro, 2626, Bairro Marco, 66095-10, Belém-PA
Edra Resende de Carvalho (UEPA – PA/Brasil) - edraresende@hotmail.com
André Cristiano Silva Melo (UEPA – PA/Brasil) - acsmelo@yahoo.com.br
Denilson Ricardo de Lucena Nunes (UEPA – PA/Brasil) - denilson.lucena@ibest.com.br

RESUMO Neste trabalho, a cadeia produtiva de uma empresa manufatureira de condutores elétricos de alumínio é analisada com o propósito de selecionar a melhor estratégia de aumento de sua capacidade produtiva. A empresa apresenta grande complexidade e variabilidade em seus fluxos de produção e, para tratar esse problema, foi proposta uma metodologia de construção de um modelo de simulação que representasse esse sistema. Nesse modelo, foram consideradas duas estratégias distintas para avaliar o aumento de capacidade produtiva, a partir da configuração de dois cenários: um considerando melhorias contínuas obtidas por meio do *Lean Thinking* ou Produção Enxuta; e outro considerando investimentos em aquisição de maquinário. Os resultados encontrados pelo estudo apontam que a melhor estratégia de aumento da capacidade produtiva foi obtida com a utilização da filosofia da produção enxuta em seus processos críticos, visto que os ganhos em capacidade foram maiores que os observados na outra estratégia e os custos de implantação menores.

Palavras-chave Gestão de processos. Produção Enxuta. Modelagem e Simulação.

ABSTRACT *In this study, the production chain of a manufacturing company of aluminum electrical conductors is analyzed, in order to select the best strategy for increasing its production capacity. The company's production systems and flows are highly complex and have high variability in their production flows. A quantitative modeling methodology was proposed to simulate those systems, and to analyze them in a simpler manner. The simulation model considered two different strategies related to production increase: "Lean Thinking" and Machinery/Equipment Purchase. From the current context and the results obtained from the simulation study, it was possible to conclude that the best scenario for increasing production capacity for the company was using the Lean Thinking strategy on the critical processes. The gains in capacity are higher and the implementing costs involved are lower than the ones observed in the other strategy considered.*

Keywords *Process Management. Lean Thinking. Modeling and Simulation.*

1. INTRODUÇÃO

As empresas buscam cada vez mais vantagens competitivas por meio de estratégias lucrativas e sustentáveis. Segundo Haubmann (2008), as organizações estão investindo cada vez mais na flexibilidade da produção, na inovação, na redução de custos e na melhoria de qualidade, sempre atentando para que todas as partes participem do processo.

Os setores da economia considerados de base são diretamente afetados pela mudança econômica e populacional, a exemplo do setor de energia que, de acordo com o Plano Decenal de Expansão Energética de 2011, deverá aumentar sua capacidade para suprir o consumo decorrente do crescimento populacional. Para tanto, é previsto que os parques geradores de energia elétrica sejam aumentados em 56%, representando um crescimento de 6 mil megawatts anuais até 2020. Como consequência, o Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pela transmissão de energia, deverá crescer 43%, o que significa 40 mil quilômetros de novas linhas de transmissão (EPE, 2011).

A capacidade instalada no país atualmente é de 190 mil toneladas ano e, em 2011, foram utilizados 88% de tal capacidade e o setor ainda se encontra em crescimento, o que levanta a possibilidade de insuficiência de capacidade em curto prazo (DEZEM, 2013). Assim, empresas vêm considerando melhorias na qualidade, no redimensionamento da capacidade produtiva e na análise dos processos que agregam valor, proporcionando mais potencial produtivo e vantagem competitiva (HARRINGTON, 1997).

Nesse contexto de aumento de eficiência, para que ocorra o aumento do fluxo de produção, existem basicamente duas maneiras: aumentar a efetividade dos seus processos produtivos ou aumentar a capacidade física do maquinário e equipamentos secundários.

Assim como o aumento de recursos, a filosofia de produção ou manufatura enxuta se encaixa no contexto de necessidade de melhorias e aumento de eficiência. A aplicação de suas técnicas no contexto produtivo das operações que agregam valor contribui para minimizar ou, até mesmo, eliminar os processos críticos. Para realizar projetos de manufatura enxuta, faz-se o mapeamento do fluxo de valor, a fim de obter o mapa do estado atual que, ao ser analisado pela equipe de projetos, será redesenhado, gerando o mapa do estado futuro. Entretanto, essa forma de implementação comumente gera um ciclo de tentativa e erro, o que é um aspecto negativo do ponto de vista de desperdício de tempo, recursos e dinheiro (OLIVEIRA, 2008b).

A simulação computacional, por sua vez, se propõe a ser uma ferramenta usada para compreender os fenômenos comuns aos sistemas produtivos, capaz de tratar variáveis aleatórias, representando o sistema e possibilitando a experimentação de mudanças no processo visando melhorias (BANKS, 2005; OLIVEIRA, 2008a). A simulação computacional, então, pode ser útil para testar projetos de manufatura enxuta, uma vez que é capaz de proporcionar uma base para a tomada de decisão consciente e consistente, eliminando as insatisfações e os altos custos, bem como os riscos dos projetos implementados através experimentação direta (OLIVEIRA, 2008b).

Assim, este artigo propõe um modelo de simulação do sistema produtivo em uma manufatura de condutores elétricos de alumínio, localizada no município de Barcarena, região metropolitana da cidade de Belém, Pará, analisando correlações e padrões de elementos que influenciam diretamente os fluxos produtivos, de modo a identificar a melhor alternativa de investimento para o aumento da sua capacidade produtiva, entre as propostas de aumento da efetividade dos seus processos produtivos (manufatura enxuta) ou aumento da capacidade física do maquinário e equi-

pamentos secundários. O modelo foi criado a partir do *software ProModel* por permitir o desenvolvimento das análises propostas e por ser adequado para simular situações específicas dentro da manufatura. Como resultado, foi criada uma estrutura de apoio à decisão relacionada ao aumento da capacidade produtiva de uma manufatura de condutores elétricos de alumínio, aliando os conhecimentos de padrões de simulação computacional à filosofia de manufatura enxuta.

De forma a promover o correto atendimento aos seus objetivos, este estudo foi organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta as principais correntes teóricas, percorrendo sobre ferramentas e métodos que embasaram todo o conhecimento necessário para o desenvolvimento desta pesquisa. Assim, esta seção contém informações acerca da simulação na gestão de processos e *lean thinking*, distribuídas nos tópicos 2.1 e 2.2. Na Seção 3, são apresentados os procedimentos metodológicos aplicados para o desenvolvimento do estudo de caso. Nos tópicos intermediários, são descritas as etapas do desenvolvimento da metodologia de concepção, implantação e análise do modelo computacional e apresentam-se alguns resultados, adquiridos da análise preliminar do modelo de simulação e de estudos sobre o histórico dos processos gargalos. A Seção 4 segue com a apresentação dos resultados obtidos da análise do estudo, desenvolvidas com base na proposição de dois cenários futuros que se baseiam no aumento da capacidade produtiva, seguido pela Seção 5, que apresenta as considerações finais sobre os resultados obtidos pelo estudo, de acordo com os objetivos da pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Simulação na Gestão de Processos

Processo pode ser entendido como toda atividade que manuseia um determinado *input* ou reunião destes, agrega-lhes valor e fornece um *output* aos clientes diretos (SALDANHA, 2008). Garvin (1998 *apud* SENTANIN, 2004) e Gonçalves (2000) alocam os processos em três categorias: Processos de Negócios, perceptíveis aos clientes externos e responsáveis por fazer a interface com estes; Processos Organizacionais, que dão suporte aos processos de negócios; e Processos Gerenciais, que estão relacionados ao monitoramento e a ajustes de desempenho. Existe certa hierarquia de processos (CORREA, 2005): Macroprocessos, que envolvem mais de uma função da estrutura organizacional; Processos, que são atividades sequenciadas logicamente; Subprocessos, responsáveis pelo cumprimento de um objetivo específico; Atividades, que constituem ações desempenhadas por unidades dentro dos processos e subprocessos; e Tarefas que são a parte específica do trabalho, detentoras do menor enfoque do processo.

Para auxiliar na escolha de uma dessas vertentes, foi proposta uma estrutura capaz de analisar e apoiar decisões, para que a empresa estudada pudesse efetuar os devidos investimentos.

Quando se tem o objetivo de melhoria do desenvolvimento dos processos, é comum utilizar o mapeamento que identifica, documenta, analisa e desenvolve um projeto de melhoria. A partir do entendimento do estado atual do sistema e destacando seus elementos fundamentais, torna-se possível analisar os pontos cruciais das áreas cujas mudanças terão impactos significativos à melhoria (CORREA, 2005). A tarefa de compreender o sistema é tão árdua quanto maior o grau de complexidade desse sistema, nesse ponto, tornando-se razoável utilizar a simulação como ferramenta de apoio.

A simulação computacional é definida como um processo que objetiva expressar o comportamento de um sistema, quando submetido a mudanças em seus fatores estruturais ou em suas condições de contorno, por meio da experimentação de um modelo do sistema real estudado, feita por meio de *softwares* (HARREL *et al.*, 2004 *apud* BRITO, 2011). Essa técnica funciona em ambientes mais complexos, representados por diversas variáveis, muitas vezes estocásticas, sem que haja interferência no sistema real (PIDD, 1998; BADWIN *et al.*, 2000; HARREL *et al.*, 2002; BANKS *et al.*, 2005; OLIVEIRA, 2008a; CECILIANO, 2007).

Modelos de simulação aliam métodos matemáticos com distribuições de probabilidade, conseguindo refletir com fidelidade as respostas do sistema. De acordo com o tipo de modelo utilizado no desenvolvimento, os tipos de simulação podem ser (CHWIF; MEDINA, 2007; BANKS *et al.*, 2005; BRITO, 2011): Estática, que não utiliza o tempo como uma variável explícita; Contínua ou Dinâmica, que possui como característica principal a percepção do comportamento de *feedbacks* entre processos do sistema analisado (HELAL, 2008); e Simulação de Eventos Discretos, utilizada na modelagem de sistemas que mudam de estado de acordo com a ocorrência de eventos, em momentos discretos no tempo, sendo orientada por estes (CHWIF; MEDINA, 2007). Este último é caracterizado pelo fluxo de entidades que formam o sistema estudado (LAW; KELTON, 2000), funcionando com uma estrutura de rede de atividades, filas, recursos, por meio da qual as entidades se movimentam, (HELAL, 2008) sendo esses integrados por um calendário de eventos (BRITO, 2011).

A Metodologia de Simulação é composta por três etapas: Concepção, Implementação e Análise (CHWIF; MEDINA, 2007). Na etapa de Concepção, define-se o sistema estudado e os objetivos de todo o projeto de simulação. Em seguida, as variáveis de interesse são definidas e a coleta dos dados de entrada é realizada. Os dados das variáveis devem ser submetidos a testes de aderência para verificar se seguem distribuições teóricas de probabilidade.

A etapa de Implementação tem como principal atividade converter o modelo conceitual para computacional. Por isso, é importante que, ao final da concepção, o analista tenha mapeado um modelo abstrato do sistema que se deseja modelar para, posteriormente, compará-lo ao modelo implementado, avaliando, assim, se a estrutura das operações é fiel ao estabelecido na concepção. Alguns resultados são utilizados para a validação que está diretamente relacionada ao modelo conceitual e tem o objetivo de indagar se os parâmetros, relacionamentos, escopo e nível de detalhamento do modelo conceitual representarão adequadamente o sistema modelado. O processo de verificação está relacionado diretamente ao modelo computacional e analisa se o seu desenvolvimento está sendo feito de forma adequada. Essa etapa deve ocorrer quando o modelo computacional está em desenvolvimento, para que, caso seja necessário, possa-se mudar sua lógica de funcionamento. Já o processo de validação operacional ocorre após o processo de experimentação do modelo, relacionando os resultados obtidos aos valores observados no sistema real (CHWIF; MEDINA, 2007). Para Freitas Filho (2008, *apud* PANCIERI; SILVA, 2008), este processo passa por 3 etapas: Seleção de variáveis que demonstrarão o comportamento do modelo analisado; Cálculo do Intervalo de Confiança que é uma extensão de valores, construída a partir da estimativa de um ponto, de modo que a probabilidade do parâmetro estudado, localizada dentro desse intervalo, seja conhecida (LEVINE, 2011); e Definição do tamanho da amostra que é número de replicações que a simulação deve realizar para que a amostra dos resultados seja significativa.

Na última etapa, a de Análise, o modelo computacional está pronto para experimentos relevantes ao sistema, dando origem ao modelo experimental. O modelo sofre diversas rodadas de simulações e os resultados são analisados e documentados para que sirvam de base na definição de estratégias, recomendações, decisões e ações voltadas a melhorias na eficiência do sistema representado.

2.2. Lean thinking como base para a melhoria contínua

Lean Thinking é o nome dado à filosofia da Manufatura ou Produção Enxuta (*Lean Manufacturing*). Essa filosofia é indicada para sistemas de produção de produtos que têm o preço fixo ou pouco variável onde, para aumentar o lucro, é necessário diminuir custos (DENNIS, 2008). Para uma Produção Enxuta efetiva, deve-se identificar o que agrega valor ao produto e os desperdícios na produção, buscando sempre eliminar este último em benefício do primeiro, a partir da ótica dos clientes, utilizando, para tanto, ferramentas que visem a aumentar a efetividade do sistema, ou seja, produzir mais utilizando cada vez menos (OHNO, 1996; WOMACK; JONES, 2004).

Os princípios de Produção Enxuta não necessitam de grandes investimentos para implantação e oferecem poderosas vantagens competitivas (DENNIS, 2008; ANTUNES *et al.*, 2008). Tais princípios são: determinar o que é valor para o cliente final; determinar as ações, atividades e processos, que agregam valor ao produto final; estabelecer um fluxo contínuo, organizando proximamente os recursos necessários ao processamento de um produto, em sequência, tempos sincronizados e sem estoque de processo; puxar a produção, ou seja, fazer com que o ritmo de produção esteja de acordo com a demanda do cliente, na quantidade e no momento certo (SMALLEY, 2004, *apud* ALMEIDA, 2009); buscar a perfeição, ou seja, estoques zero, flexibilidade de atendimento de demanda infinita, defeitos zero, falhas zero e *Lead Time* (prazo de produção/entrega) zero.

Assim, a filosofia da Produção Enxuta, por sua própria natureza, pode servir como base para ações estratégicas de melhoria nos processos, pois permite que os elementos que podem comprometer a eficiência dos sistemas de produção sejam continuamente monitorados.

3. MATERIAL E MÉTODO DA PESQUISA

Tendo como base as quatro classificações possíveis para uma pesquisa científica, definidas por Silva e Menezes (2005), é possível classificar esta, quanto à sua natureza, como Pesquisa Aplicada; do ponto de vista de sua abordagem, é vista como Quantitativa; quanto aos seus objetivos, é classificada como Exploratória; e, por fim, do ponto de vista dos seus procedimentos técnicos, como um Estudo de Caso.

A primeira etapa do estudo consistiu na realização da pesquisa bibliográfica, utilizando monografias, teses, dissertações e artigos científicos. Paralelamente, foram definidas as limitações do modelo computacional e feita a coleta de dados das primeiras informações, iniciando a fase de concepção do modelo. Na segunda etapa, realizou-se o mapeamento preliminar do sistema e o desenvolvimento e validação de dados referentes ao modelo conceitual da situação atual. Na terceira etapa, iniciou-se a construção do modelo computacional com base nos parâmetros testados no modelo conceitual, no qual foram feitas a estruturação e validação deste modelo, e identificados os processos críticos. Por fim, foram desenvolvidos e analisados os dois cenários propostos ao aumento de capacidade do sistema. Ao fim desta etapa, foi possível identificar a melhor alternativa de aumento de capacidade.

Os dados do trabalho foram coletados com o auxílio de cronômetros digitais e formulários. Esses dados foram dispostos em gráficos, tabelas, fluxogramas e no próprio *software* de simulação, no qual foi desenvolvido o modelo computacional, de forma a promover a análise dos processos críticos dentro do sistema industrial estudado e facilitar o desenvolvimento de estratégias relacionadas com capacidade produtiva.

3.1. Metodologia de construção do modelo de simulação

A empresa estudada localiza-se no distrito industrial de Barcarena, Estado do Pará, figurando entre as três maiores fabricantes nacionais entre as que atuam no mercado nacional e internacional de vergalhões de alumínio para uso elétrico e siderúrgico. A empresa fabrica também ligas de alumínio e condutores de alumínio nus e isolados para fins elétricos.

Os fluxos e processos observados na empresa possuem considerável complexidade: em sua instalação existem nove processos produtivos principais, acerca dos quais os fluxos de produção e movimentação de recursos estão organizados. Pelo fato de haver elevada flexibilidade da linha de produção, esses fluxos podem ser variáveis. Somado a isso o vasto *mix* de produtos, as variações exigidas pelos clientes e ao lançamento de novos produtos, intensificam a variedade de fluxos, aumentando ainda mais a complexidade do sistema. A linha de produção possui duas frentes, Metais e Cabos. Dentro do macroprocesso da linha de Cabos foram identificados cinco processos principais: Trefilação, que se constitui em diminuir o diâmetro dos vergalhões de alumínio, para que estes sejam transformados em fios com diâmetros variando de acordo com a necessidade do cliente; Encordoamento, que reúne os fios em uma disposição pré-determinada, de forma a criar cabos nus; Extrusão, responsável por conferir, às cordas de alumínio, capa de resina, para isolamento elétrico e/ou mecânico; Reunião, que reúne somente cabos isolados ou cabos isolados com cordas de alumínio, criando assim cabos multiplexados duplex, triplex, ou quadriplex; e Embalagem, que promove o acomodamento final dos produtos. A empresa opera próximo de sua capacidade máxima em suas principais linhas (cabos: nus, cobertos e multiplexados), e estudos realizados pela própria empresa estimam que, para atingir os objetivos desejados, seria necessário um aumento de 20% da sua capacidade. A organização possui um sistema de controle de produção, o Sistema Integrado de Manufatura (SIM), que não dá suporte para a análise de decisões de aumento de capacidade.

Para a construção dos modelos conceitual e computacional é necessário identificar a medida de capacidade de produção que, no caso da empresa estudada, foi considerada a quantidade de itens produzidos em um determinado período. Estabeleceu-se que a variável que indicaria a fidelidade do modelo à realidade seria o *lead time* dos produtos, utilizado também para medir a eficiência do sistema em relação a outros cenários. Foram, então, avaliadas as duas possíveis situações de aumento da capacidade produtiva: a primeira por meio do aumento do número de máquinas relacionadas ao processo crítico e a segunda pelo aumento da eficiência dos processos, utilizando *Lean Manufacturing*.

3.2. Nível de detalhamento do modelo de simulação

A determinação do nível de detalhamento do modelo ocorreu a partir da análise de um mapa geral dos macroprocessos da empresa, o que evidenciou a complexidade do sistema nos processos de produção de cabos, pois estes apresentam muitas máquinas, fazendo interface entre si, com uma grande variedade de fluxos produtivos possíveis e um grande *mix* de produtos. Portanto, a abrangência do modelo seria os principais macroprocessos do departamento Produção de Cabos.

Quanto ao nível de detalhamento, o modelo abordou o relacionamento entre as máquinas dentro dos macroprocessos principais, tendo como base os tempos de processamento, de movimentação entre máquinas e de eventuais esperas. Os tempos de parada e de *setup* de máquina foram agrupados ao de processamento.

A escolha do *mix* de produtos que representa, de forma geral, o sistema industrial é importante para que a simulação reproduza o comportamento dos fluxos produtivos. Dessa forma, foram escolhidos os produtos mais frequentes para que gargalos produtivos sistêmicos pudessem ser evidenciados e analisados. A escolha do *mix*, partiu de relatórios de produção de 2011 a junho de 2012, nos quais foram observados os produtos mais produzidos em cada linha de produção. A linha de produção de cabos nus foi subdividida em duas classes menores: Cabos de distribuição e Cabos de transmissão. Para o *mix*, optou-se por escolher um produto de cada classe.

O cabo distribuição mais produzido foi o Linnet, com cerca de 4.000 quilômetros, e o cabo de transmissão mais produzido foi o 1055 MCM, com 6.700 quilômetros. Para a linha de cabos cobertos, o mais frequente foi o 50 mm² de 15 KV com 1.500 quilômetros produzidos. Já para a linha de cabos multiplexados escolheu-se o Quadruplex 35 mm². Portanto, o *mix* considerado foi formado pelos produtos: Cabo Linnet, Cabo Quadruplex 35 mm², Cabo coberto 50 mm² e Cabo 1055 MCM.

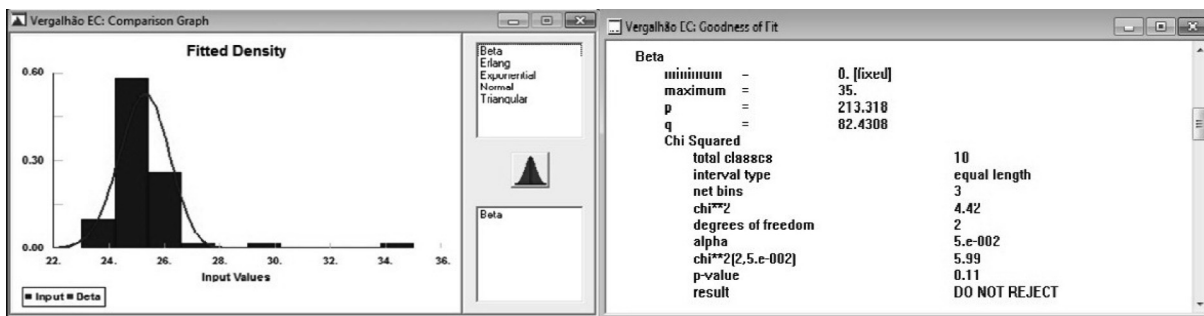
3.3. Coleta e tratamento dos dados

Os dados coletados corresponderam a subprodutos do *mix* definido anteriormente e abrangem todos os turnos e turmas de trabalho, considerando desprezível a variação de produtividade entre turnos e a eficiência entre turmas. A coleta de dados foi realizada em três fontes: o sistema de registro de manufatura; fichas de análise de processo da própria empresa; e dados coletados com cronômetro de precisão. Os dados foram coletados de máquinas definidas como padrão pelo SIM, para eliminar possíveis variabilidades de eficiência de produção, em virtude de um único subproduto poder ser fabricado em várias máquinas diferentes. A quantidade de dados coletados variou entre 60 e 130 amostras por processo.

A etapa de tratamento de dados consistiu na comparação das amostras coletadas, tanto manualmente quanto do SIM, com os tempos mínimos de processamento possíveis para cada processo, considerando parâmetros da empresa, a fim de eliminar amostras registradas ou coletadas de maneira inadequada. Em seguida, foram feitos os testes de ajuste de curva. As amostras que não se ajustaram a uma distribuição teórica de probabilidade, ou seja, possuíam um Qui-quadrado elevado, foram submetidas ao teste dos *outliers*. Os processos submetidos a este teste foram: Trefilação e Encordoamento 2^a passada (cabo 1055 MCM); Trefilação (Cabo coberto 50 mm²). Houve a necessidade de coletar mais dados do processo de Trefilação (Cabo Linnet), pois após o teste dos *outliers* esse processo ainda possuía um Qui-quadrado elevado. A Figura 1 contém o relatório do teste de ajuste de curva dos processos de chegadas do vergalhão EC. Conforme esse relatório observou-se que a distribuição que melhor representava este evento era a Beta. Ainda segundo a Figura 1, essa distribuição apresentou um Qui-quadrado de 4,42, nesse caso, o valor crítico seria 5,99, considerando dois graus de liberdade. Portanto, para um p-valor de 11%, a hipótese de distribuição Beta não foi rejeitada.

Testes de ajuste também foram realizados para os cabos cobertos de 50 mm². Para o processo de Trefilação, a distribuição que melhor representou o tempo de processamento foi a Erlang, pois apresentou um Qui-quadrado de 2,12, quando o limite seria 5,99, considerando-se dois graus de liberdade. Para o Encordoamento, a distribuição foi também a Erlang, pois apresentou um Qui-quadrado de 4,38, quando o limite seria 9,49, considerando-se quatro graus de liberdade. No processo de Extrusão, notou-se que a distribuição que melhor representou o tempo de processamento foi a Exponencial, visto que se apresentou um Qui-quadrado de 6,09, quando o limite seria 11,1, considerando-se cinco graus de liberdade. Para os dados de Embalagem, a distribuição foi a Erlang, pois apresentou um Qui-quadrado de 1,89, quando o limite seria 9,49, considerando-se quatro graus de liberdade. Esse mesmo processo de análise dos dados coletados de tempo de processamento foi realizado para as outras linhas de produção, ou seja, para a linha de Cabos nus e Cabos multiplexados. Ao todo foram analisados 20 processos.

Figura 1 – Distribuição de probabilidade que melhor representa as chegadas de vergalhão EC e resultado do deste Qui-quadrado para chegadas de vergalhão EC no sistema.



Fonte: Os autores (2014).

3.4. Mapeamento dos fluxos

Simultaneamente à coleta de dados, foi sendo realizado o mapeamento dos fluxos pertinentes das linhas de produção. Para a modelagem conceitual, foram criados fluxogramas, referentes a cada linha, considerando suas movimentações intermediárias, macroprocessos e processos. Em seguida, a validação do modelo conceitual foi feita por meio de reuniões realizadas com os departamentos de Engenharia de Processos e PCP (Planejamento e Controle da Produção), seguindo concessões dos dois departamentos e do modelador. Nesta etapa, foram definidas as quantidades que o modelo produziria nas simulações, com base em quatro ordens de produção recorrentes na Empresa.

Devido à complexidade do modelo, optou-se por dividi-lo em cinco partes, uma por linha de produção, com as duas últimas representando cada um dos ramos da linha do cabo Quadruplex 35 mm². A verificação do modelo aconteceu paralelamente ao seu desenvolvimento, pois o

ProModel, ao se criar a lógica de processamento e movimentação do sistema produtivo, permite o teste de toda a lógica envolvida, ou na movimentação analisada, e, até mesmo, a comparação dos esquemas de movimentação com os apresentados pelo modelo conceitual. Ao final, para que os cinco submodelos se integrassem e formassem apenas um, foi necessário fazer ajustes nos códigos de programação, de modo que não houvesse conflitos entre produtos diferentes.

3.5. Construção e Validação do modelo final

O modelo computacional final apresentou: 56 locais, sendo muitas máquinas modeladas com mais de um local, devido à complexidade; 3 unidades de recursos, sendo todos empilhadeiras; 5 entidades, pois o *mix* de produtos foi formado por 4 itens, com o cabo Quadruplex formado por 2 produtos diferentes; 5 chegadas; 2 caminhos de redes, um atendendo aos macroprocessos de Trefilação e Encordoamento e outro atendendo aos de Extrusão e Reunião; 69 processos e; 29 variáveis responsáveis por sustentar as lógicas utilizadas pelos processos.

Após a verificação, aconteceu a validação operacional. Foram coletados dados históricos relativos ao *lead time* do *mix* selecionado, totalizando uma amostra de 50 itens. Calculou-se o intervalo de confiança dessa amostra a partir do cálculo do semi-intervalo de confiança, considerando-se um nível de confiança de 95%. Em seguida, utilizou-se o módulo de modelagem de dados Stat::Fit, para calcular a quantidade de replicações necessárias à comparação com o intervalo de confiança. Chegou-se a 10 replicações para que os valores médios pudessem ser analisados.

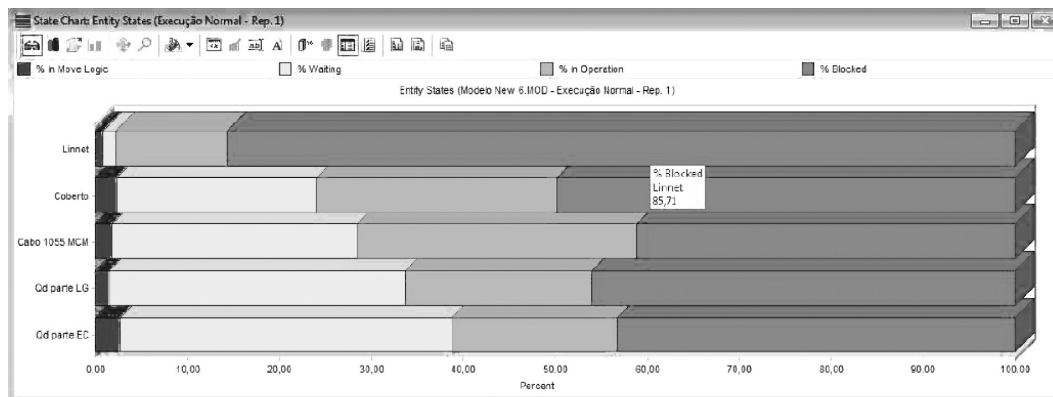
Ao final, obteve-se um valor médio de 70,53 horas para o *lead time* do modelo computacional, valor que está compreendido no intervalo de confiança, calculado com base em *lead times* reais. Assim, foi possível validar o modelo testado.

4. ANÁLISES DE DADOS E RESULTADOS OBTIDOS

Como resultado do estudo obteve-se o próprio modelo de simulação validado. A partir das análises dos relatórios gerados e pela própria dinâmica do modelo, foi possível observar que a linha de produção do cabo Quadruplex 35 mm² apresentava os maiores percentuais de espera. O relatório de estado das entidades, gerado pela simulação (Figura 2), torna evidente que, de todo o *mix*, o produto Quadruplex 35 mm² (composto por Qd parte LG e Qd parte EC) possui a maior espera, o que simboliza o processamento. Portanto, essa linha foi considerada crítica para o estudo de capacidade produtiva, por apresentar grande impacto no *lead time* do sistema.

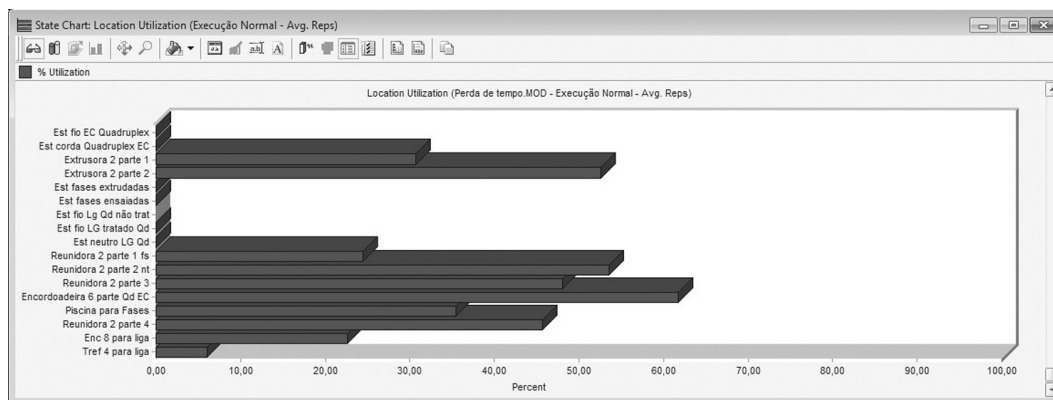
Uma vez que a produção do Quadruplex 35 mm² foi considerada crítica, realizou-se nova simulação, para que fossem identificados os gargalos nessa linha. A Figura 3 contém o relatório sobre a taxa de utilização extraída da simulação. A partir da análise desse relatório, percebe-se que os processos críticos eram aqueles realizados na etapa dos macroprocessos de Encordoamento e Reunião. A extrusora 02 apresentou utilização alta também, porém sem formação de estoques, enquanto que nos processos de Reunião e Encordoamento houve a formação de estoques, caracterizando-os como gargalos. A partir dessas conclusões, foram elaborados cenários futuros, visando níveis superiores de capacidade produtiva.

Figura 2 – Relatório de estados das entidades gerado pela simulação.



Fonte: Os autores (2014).

Figura 3 – Relatório de estados das entidades gerado pela simulação.



Fonte: Os autores (2014).

A meta de aumento da capacidade desejada pela Empresa era de 20%. Como o modelo computacional se baseou no *lead time* de processo para realizar a análise de variação de capacidade, mantendo-se constante a quantidade produzida, a linha de produção dos cenários gerados na simulação teve como objetivo reduzir em 17% o *lead time* atual, para que o aumento esperado fosse alcançado. Assim, foram propostos dois cenários, sendo que, no primeiro, foi testado o aumento da capacidade produtiva por meio da aquisição de mais recursos de transformação (maquinário/equipamentos). Para analisá-lo, inicialmente, a linha de produção crítica foi avaliada, efetuando-se rodadas de simulação, onde se percebeu que os macroprocessos de Reunião e Encordoamento eram realmente os principais gargalos, ao contrário do subprocesso de ensaio de tensão aplicada, considerado um “gargalo dependente”, devido ao fato da variação de sua capacidade influenciar o aumento da capacidade produtiva do sistema, apenas quando a capacidade do macroprocesso de

Reunião fosse previamente aumentada. Com os gargalos definidos, variaram-se suas capacidades e mediu-se o impacto dessa alteração no *lead time* do sistema (Tabela 1).

Tabela 1 – Resultados de capacidade produtiva para o primeiro cenário proposto.

Resultados de aumento de capacidade produtiva		
Macroprocesso	Encordoamento	Reunião
<i>Lead Time</i> (LT) – Normal	70,53	70,53
<i>Lead Time</i> (LT) – Cenário 1	59,48	62
% LT alterado em relação ao LT normal	84,33%	87,91%
Redução de <i>Lead Time</i>	15,67%	12,09%
Nova Capacidade do sistema	118,58%	113,76%
Ganho de Capacidade	18,58%	13,76%

Fonte: Os autores (2014).

Assim, concluiu-se que, com o aumento marginal de uma máquina igual à Encordoadeira, seria possível atingir 18,58% de aumento de capacidade produtiva. Além disso, testou-se a possibilidade de aumento marginal nos dois macroprocessos simultaneamente, porém, tal ação acabou gerando novos gargalos, fazendo com que o ganho de capacidade produtiva não fosse significativo. Desta forma, o cenário de aumento de capacidade de encordoamento, por meio de aquisição de uma Encordoadeira, foi o cenário aqui definido para representar o cenário de aumento de capacidade produtiva via aquisição de mais recursos de transformação na avaliação comparativa de cenários, proposto nesta pesquisa.

No segundo cenário proposto, foi necessário avaliar a eficiência dos principais processos do sistema para, assim, propor o aumento da capacidade produtiva a partir da melhora da eficiência dos processos com base no *Lean Thinking*. O macroprocesso de Reunião apresentou um baixo percentual de produção em relação aos outros processos da linha de Multiplexados, fato que se deve ao seu elevado tempo de *setup*. Como no *Lean Thinking* as melhorias consistem na eliminação de todas as atividades que não agregam valor ao produto, foi necessário reduzir o *setup*, utilizando-se para isso a técnica de observação SMED (*Single Minute Exchanged of Die*), que tem por objetivo possibilitar a produção em fluxo contínuo de fabricação através da diminuição de tempo de *setup* (OLIVEIRA, 2008a).

A aplicação da técnica SMED consistiu em mapear e cronometrar as atividades do *setup*, visando eliminar as atividades desnecessárias e reduzir o tempo das demais, o que resultaria na redução de *setup*. Como resultado, o tempo de processamento (tempo de processamento real + o tempo de redução de *setup*) passaria de 45% (atual) para 77% (estimado), apenas com a mudança de metodologia no *setup*.

No macroprocesso de Encordoamento, foi detectada uma discrepância entre os parâmetros de velocidade padrão e velocidade utilizada, que dependia do operador. Caso os operadores utilizassem a mesma velocidade, no caso, a máxima para a máquina, haveria um aumento de 17% na velocidade média da máquina usada na produção da corda de 35mm².

O subprocesso de Ensaio de tensão aplicada foi analisado com base no mapeamento preliminar de suas atividades e na técnica SMED, o que evidenciou problemas na movimentação de entrada e saída, no preparo do ensaio e no ensaio de tensão. Partindo do princípio que se deve eliminar atividades que não agregam valor ao produto, propôs-se algumas melhorias: realizar a etapa de preparo de ensaio em paralelo com a atividade de espera; sincronizar atividades do operador responsável; e criar uma metodologia de ensaio. Aplicadas tais melhorias, estimou-se que o subprocesso de ensaio de tensão aplicada poderia ser realizado em um tempo 35% inferior ao atual. Considerando tal estimativa, foram feitas novas simulações, os resultados gerados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados de capacidade produtiva para o segundo cenário proposto.

Resultados de aumento de capacidade produtiva				
Macroprocesso	Encordoamento	Ensaio de tensão	Reunião	Todos
Lead Time (LT) – Normal	70,53	70,53	70,53	70,53
Lead Time (LT) – Cenário 2	59,78	64,07	61,14	59,24
% LT alterado em relação ao LT normal	84,76%	90,84%	86,69%	83,99%
Redução de Lead Time	15,24%	9,16%	13,31%	16,01%
Nova Capacidade do sistema	117,98%	110,08%	115,36%	119,06%
Ganho de Capacidade	17,98%	10,08%	15,36%	19,06%

Fonte: Os autores (2014).

A partir da Tabela 2 percebe-se que a implantação de todas as melhorias propostas resultaria em um aumento de 19,06% da capacidade produtiva da Empresa, além de ser possível também identificar as prioridades a serem tomadas em relação à implantação destas melhorias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao final do estudo, que seguiu corretamente as etapas propostas na metodologia, é possível afirmar que o objetivo principal foi atingido, haja vista que a ferramenta de apoio à tomada de decisão para aumento de capacidade produtiva da empresa, o modelo de simulação computacional, foi desenvolvido com sucesso. A partir das análises dos cenários, conclui-se que o ganho de capacidade produtiva do cenário de melhorias de processo, usando *Lean Thinking*, seria de 19,06% contra 18,58% relacionado ao melhor cenário de aumento de capacidade física dos processos críticos, considerando a aquisição de novos equipamentos.

Mesmo que nenhum dos resultados tenha alcançado a meta de 20%, o estudo foi efetivo, pois ratificou a capacidade da simulação computacional para demonstrar qual a melhor decisão a ser tomada com relação à realização de investimentos ao aumento da capacidade produtiva da Empresa, além de ter aberto portas para estudos futuros de outros macroprocessos, fazendo com que o aumento de capacidade meta possa ser alcançado. É importante salientar que os resultados obtidos não devem ser interpretados como idênticos aos reais, pois mesmo tendo sido feito vários testes estatísticos, sempre existem erros esperados, já que o objetivo do estudo de simulação não é prever e sim entender o comportamento do sistema.

As questões de pesquisa propostas foram respondidas com eficácia, pois observou-se que a simulação computacional pode ser utilizada em conjunto com o *Lean Thinking* no sentido de servir de base para gerar cenários futuros, podendo ainda, em alguns casos, representar a melhor estratégia no aumento de capacidade produtiva.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. A. R. **Elaboração de um Método para Melhoria dos Fluxos de Informação usando Princípio da Mentalidade Enxuta e Reengenharia de Processos**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

ANTUNES, J. ALVAREZ, R. KLIPPEL, M. BORTOLOTTI, P. PELLEGRIN, I. **Sistemas de Produção: conceitos e práticas para projeto e gestão da produção enxuta**. Editora Bookman. Porto Alegre, 2008.

BANKS, J. CARSON II, J. S. NELSON, B. L. NICOL, D. M. **Discrete Event System Simulation**. Prentice Hall. NJ. USA, 2005.

BRITO, T. B. **Aplicabilidade da Simulação Híbrida em Sistemas Logísticos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CECILIANO, W. R. A. **Aplicação de um método de simulação-otimização na cadeia produtiva de minério de ferro**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CHWIF, L; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de eventos discretos: Teoria e Aplicações**. Editora do Autor, 2a Edição, 2007.

CORREA, K. E. S. **Análise Comparativa das técnicas de mapeamento de processos: Fluxograma e IDEF3 aplicadas a uma célula de manufatura**, Universidade Federal de Itajubá, 2005.

DENNIS, P. **Produção Lean Simplificada**. 2 ed. Porto Alegre; Bookman, 2008.

HAUBMANN, P. R. M. **Gestão estratégica de operações: desenvolvimento de uma metodologia para diagnóstico de processos em sistemas de produção**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

HARRINGTON, H. J. **Gerenciamento Total da Melhoria Continua: A Nova Geração da Melhoria de Desempenho**. São Paulo: MAKRON Books, 1997.

HELAL, N. **A hybrid system dynamics-discrete event simulation approach to simulating the manufacturing enterprise**. 2008. Thesis. (Doctorate in Industrial Engineering and Management Systems) – College of Engineering and Computer Science, University of Central Califórnia, Califórnia, 2008.

LAW, A; KELTON, W. **Simulation Modeling and analysis**. McGraw Hill. USA, 2000.

LEVINE, D. M. STEPHAN, D. F. KREHBIEL, T. C. BERENSON, M. L. **Estatística: Teoria e aplicações**. 5ª ed. Editora LTC. Rio de Janeiro, 2011

OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da produção em larga escala.** Editora Artes Médicas. Porto Alegre, 1997.

OLIVEIRA, C. S. **Metodologia para utilização de Simulação em Projetos de Manufatura Enxuta.** 2008a. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2008a.

OLIVEIRA, C. S. Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta. **Estudos Tecnológicos** - V. 4, n. 3: 204-217 (set/dez. 2008b).

PANCIERI, B. M.; SILVA, A. C. P. **Proposta de reformulação de Layout produtivo de uma pequena empresa de estofados com a utilização de técnicas de simulação.** 2008. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) - Universidade da Amazônia, Belém, 2008.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science.** 4th Edition. John Wiley & Sons LTD. New York, 1998.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2020.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2011.

SALDANHA, M. A. K. **Proposta de um modelo conceitual do funcionamento dos processos empresariais com base na teoria da complexidade.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, 2008.

SENTANIN, O. F. **Gestão de Processos em uma Empresa de Pesquisa e Desenvolvimento: Objetivo Estratégico de um Modelo de Gestão.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paul, São Carlos, 2004.

SILVA, E. L. MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação.** 4ª ed. rev. atual. Florianópolis, 2005.

DEZEM, V. **Cadeia do cobre ganha com preço, mas perde em volume.** Valor Econômico. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/empresas/2661094/cadeia-do-cobre-ganha-com-preco-mas-perde-em-volume>>. Acesso em: 19 de maio de 2013.

WOMACK, J. P.; JONES, D. T. **A Mentalidade Enxuta nas Empresas.** 3a Edição. Rio de Janeiro: Campus, 2004.