

A Simulação Computacional como Ferramenta de Aplicação da Teoria das Restrições para Estudo de Capacidade numa Indústria de Propriedade em Bateladas

Andrei Bieger (UFRGS) – andreibieger@gmail.com

Michel José Anzanello (UFRGS) – anzanello@producao.ufrgs.br

Resumo: O presente artigo utiliza a simulação computacional como ferramenta de aplicação da Teoria das Restrições (TOC) e conceitos da classificação de indústrias de forma e propriedade para desenvolver um plano de aumento de capacidade numa indústria do ramo tabagista localizada no Rio Grande do Sul.

Palavras-chave: Simulação computacional, Teoria das Restrições, indústria de propriedade, estudo de capacidade.

***Abstract:** The present paper uses computing simulation as a tool for applying the Theory of Constraints (TOC) and concepts of “process classification in form and property” to develop a capacity increase plan in a tobacco industry located in Rio Grande do Sul, Brazil.*

Keywords: Computing simulation, Theory of Constraints, property industry, capacity study.

1. Introdução

Nas últimas décadas acompanhou-se o desenvolvimento de um cenário de quebra de barreiras no mundo dos negócios. Nesse sentido, até mesmo grandes *players* do mercado veem a necessidade de mudança para adaptação ao novo cenário. Dessa forma, ao operar em mercados altamente dinâmicos, muitas empresas ficam expostas a flutuações de demanda. Essas flutuações nem sempre são contempladas no projeto inicial de capacidade da fábrica. Lee (1998) aponta as instalações como o ativo mais caro da maioria dos balanços de empresas, e daí a necessidade de um planejamento detalhado para as instalações industriais. Ao se deparar com variações não planejadas da demanda, surge a necessidade de reavaliações do projeto original no sentido de ajustar a capacidade instalada.

Porém, segundo Hansen (1996), grande parte das técnicas, metodologias e ferramentas desenvolvidas para planejamento, gestão e melhoria de processos produtivos estão focadas nas chamadas indústrias de forma. A indústria de forma, conforme definido por Salerno *apud* Hansen (1996), é aquela na qual as especificações do produto traduzem-se por uma forma material, diferentemente da indústria de propriedade, na qual tais especificações do produto se encontram em uma série de propriedades físico-químicas.

O objetivo desse artigo é realizar um estudo de aumento de capacidade produtiva em uma indústria de propriedade através da aplicação da simulação computacional e da Teoria das Restrições (TOC). Para tal, foram levantados dados e informações sobre o processo, foi desenvolvido e implementado um modelo de simulação e foram analisadas as etapas para o plano de aumento de capacidade do setor. A empresa estudada é do ramo de produção de cigarros e o setor é o de produção do fumo desfiado, uma típica indústria de propriedade que opera em bateladas.

A produção em bateladas, segundo Hansen (1996), se caracteriza como o ramo da indústria de propriedade no qual é produzida uma família de produtos, diferentemente da produção contínua, na qual apenas um tipo de produto é manufaturado. No caso da empresa em estudo, a interdependência entre linhas que se encontram ao longo do processo em bateladas gera paradas por desnivelamento de produção. Essa interdependência pode gerar equívocos na identificação de gargalos de produção. Através da simulação computacional, operacionalizada pelo software de simulação comercial Arena, busca-se um meio de identificar o novo gargalo a cada aumento de capacidade nos equipamentos.

Este artigo está dividido em cinco seções, além desta introdução. Na seção 2 é apresentado o referencial teórico utilizado para sustentar a metodologia, a qual é apresentada e detalhada na seção 3. Os resultados são apresentados na seção 4 e discutidos nas seções 5 e 6.

2. Referencial Teórico

A revisão da literatura acerca do assunto abordado no presente estudo é aqui explorada. Primeiramente é apresentado o conceito de indústrias de propriedade em batelada, suas características e principais diferenças em relação a indústrias de forma. A

parte seguinte apresenta a teoria das restrições, suas características e sua aplicação em estudos de aumento de capacidade de processos produtivos. Por fim, têm-se os conceitos de simulação computacional e algumas aplicações em estudos de capacidade.

2.1 Indústrias de Propriedade em Batelada

Muitas são as classificações encontradas na literatura para caracterização dos processos produtivos. Algumas dessas classificações são relacionadas às características produtivas que a empresa escolhe. Chase *et al.* (2006) propõem uma classificação baseada no volume e no nível de padronização que a empresa deseja para a produção, a qual classifica os processos em conversão, fabricação, montagem e testes. Da mesma forma, Slack *et al.* (2007) propõem uma classificação baseada em volume e variedade (similarmente à padronização) onde os tipos de processos encontrados são projeto, *job*, lotes ou bateladas, em massa e contínuo. Vale lembrar que o conceito de batelada proposto por Slack *et al.* (2007) difere do conceito utilizado neste artigo, pois o autor utiliza batelada para classificar o processamento de pequenos lotes de produção com diferenciação relativamente alta entre si.

Por outro lado, as características dos tipos de transformação que ocorrem nos produtos a ser transformados também podem ser utilizadas para classificar o processo de transformação. Um exemplo dessa classificação é apresentado por Salerno (1991), o qual diferencia os processos produtivos em processos de forma e de propriedade, sendo a indústria de forma aquela na qual os aspectos formais do produto, como dimensão, cor e acabamento, são de grande importância. Uma tradicional característica dos processos de forma é que o ritmo do processo de trabalho, aqui entendido como “o processo pelo qual matérias-primas, ou outros insumos, são transformados em produtos com valor de uso” (Palloix, 1982 *apud* Salerno, 1991), reflete diretamente no volume de produção. Isso ocorre por serem os processos de forma um somatório de atividades discretas independentes onde o trabalho é realizado tanto pelo homem quanto pelos equipamentos que ele opera (HANSEN, 1996).

Já os processos de propriedade, segundo Salerno (1991), são aqueles onde as propriedades físico-químicas são as características a serem almejadas. Nesse tipo de processo, os equipamentos encontram-se dispostos em um complexo arranjo e agem de forma interdependente. Sellito (1999) complementa a definição afirmando que nesse tipo de indústria a produção é medida em unidades contínuas, como massa ou volume.

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre as principais diferenças entre a indústria de forma e a de propriedade.

Característica	Indústria de Forma	Indústria de Propriedade
Característica básica do produto	Forma (aspecto, dimensão, etc...)	Propriedades para o uso
Composição da produção	Somatório de atividades discretas independentes	Atividade contínua e única sem divisibilidade
Controle da produção	Individualizado das atividades e do resultado	Controle global do resultado e supervisão do processo como um todo
Custos mais relevantes	Mão-de-obra e matéria-prima	Matéria-prima e energéticos
Disposição dos equipamentos de produção	Por funções ou por produto	Somente por produto (característica produtiva)
Entrada em regime produtivo	Imediato (sem retardo) dos componentes	Com retardo - dependente dos parâmetros de processo de transformação
Execução da produção	Homem e máquina realizam a produção	Máquina realiza a produção e homem controla e supervisiona
Investimento	Baixo ou médio	Alto
Lead Time	Dependente do ritmo de trabalho e da gestão da produção	Independente do ritmo de trabalho - inerente à concepção do processo
Mão-de-obra/Treinamento	Intensiva (quantidade)/operacional	Extensiva (qualidade)/tecnológico
Medição da produção	Unidade discreta	Em volume (não unitária)
Set-up	Muito relevante	Pouco relevante
Sincronização da produção	Existente ou não - dependente da gestão da produção	Inerente à concepção do processo
Valor agregado por	Mão-de-obra	Tecnologia
Valor de Uso	Dimensional	Propriedades
Variedade/Volume de lote de produção	Alta/baixo	Baixa/alto
Volume de produção	Depende do ritmo de trabalho físico direto na produção	Independe do ritmo de trabalho físico direto na produção

Tabela 1: Principais diferenças entre indústrias de forma e indústrias de propriedade. Fonte: adaptado de Hansen (1996) e Sellito (1999).

Sellito (1999) ressalta a escassez de aplicação de ferramentas para sincronização da produção em indústrias de propriedade na literatura, uma vez que, segundo Salerno (1991), existem diferentes questões ligadas à operação, intervenção do trabalho, enfoques, práticas e critérios associados aos dois tipos de produção. Sellito (1991) evidencia ainda a possibilidade de serem atingidos bons resultados de melhoria na

indústria de propriedade ao serem aplicados conceitos da indústria de forma, através da aplicação fundamentada na TOC.

A indústria de propriedade permite ainda uma subclassificação quanto ao número de produtos que são manufaturados pelo processo. Segundo Hansen (1996), nos processos monoprodutores, o conceito utilizado é o de indústria de propriedade contínua. Já nos processos em que, após um período de operação, o processo é parado, são realizados ajustes e o processo é reiniciado com um novo produto, o conceito utilizado é o de indústria de propriedade em bateladas. A classificação dos tipos de indústria pode ser encontrada na Figura 1.

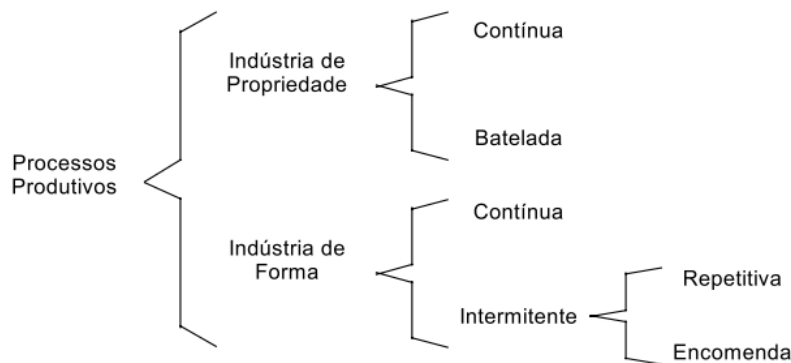


Figura 1: Classificação dos processos produtivos. Fonte: Hansen (1996).

2.2 Teoria das Restrições em Estudos de Capacidade

Em sua primeira obra, chamada “A Meta”, Goldratt e Cox (2002) introduziram o conceito de Teoria das Restrições (TOC), desenvolvendo um método lógico de utilização e aumento da capacidade produtiva de uma indústria. Cox e Spencer (1998) demonstram que, além de um método de utilização de recursos com capacidade finita, a TOC compreende também conceitos ligados à solução lógica de problemas e métodos de avaliação de desempenho de empresas.

A respeito da aplicação da TOC no grupo de soluções logísticas, diferentes abordagens do assunto são encontradas na literatura. A abordagem básica da TOC, apresentada por Goldratt e Cox (2002), compreende cinco passos lógicos para utilização e aumento de capacidade de processos produtivos: (i) identificar o gargalo do processo;

(ii) explorar o gargalo; (iii) submeter os demais recursos ao gargalo; (iv) elevar a capacidade do gargalo e; (v) voltar ao primeiro passo. Essa abordagem ficou conhecida, posteriormente, como o Processo de Focalização dos Cinco Passos.

Martins Jr. (2009) utilizou o processo dos cinco passos de modo a elevar a capacidade produtiva de uma linha de montagem de autopeças, processo característico da indústria de forma. Para tal, o autor utilizou mapas de fluxo de valor, conceituados pela produção enxuta, em conjunto com o Índice de Eficiência Global de Equipamentos (OEE), índice que avalia a eficiência de uma máquina baseada em notas de disponibilidade, qualidade e performance (HANSEN, 2006).

Antunes Jr. e Rodrigues (1993) utilizam o processo dos cinco passos proposto por Goldratt e Cox (2002) como ferramenta de priorização na redução de tempos de setup visando maior utilização da capacidade instalada. De forma similar, Moelmann *et al.* (2006) aplicaram o processo de focalização dos cinco passos da TOC utilizando o OEE como ferramenta para selecionar os gargalos de uma linha de produção. Dessa forma foi possível focalizar as atividades de manutenção nos recursos que restringiam o processo, aumentando assim a produtividade global do processo.

Por fim, Reid (2007) utilizou o processo de focalização dos cinco passos para sincronização e aumento de capacidade de uma empresa de serviços, demonstrando a flexibilidade da ferramenta para diferentes tipos de processo. Souza e Baptista (2010) discutem o conceito de tambor-pulmão-corda simplificado (s-DBR), um avanço dos cinco passos da TOC, onde um excesso de capacidade em cada possível gargalo em relação à demanda do processo garante o atendimento a todos os pedidos do mercado.

2.3 Simulação Computacional em Estudos de Capacidade

Um sistema é um conjunto de entidades que agem e interagem de forma a conquistar um objetivo lógico (SCMIDT e TAYLOR, 1970 *apud* LAW e KELTON, 1991). Segundo Rolstadas (1988), a representação de um sistema de objetos ou idéias em um formato que não seja o próprio sistema é chamada de modelo. Law e Kelton (1991) afirmam que experimentos de sistemas reais, sejam eles físicos ou matemáticos, podem ser realizados no próprio sistema ou em um modelo que se comporta de maneira suficientemente similar ao sistema. Os autores acrescentam ainda que, ao serem realizados experimentos matemáticos, duas abordagens podem ser utilizadas: soluções

analíticas e simulação, sendo a última designada para situações onde soluções analíticas são difíceis de ser atingidas devido a sua complexidade. Tais relações são apresentadas na Figura 2.

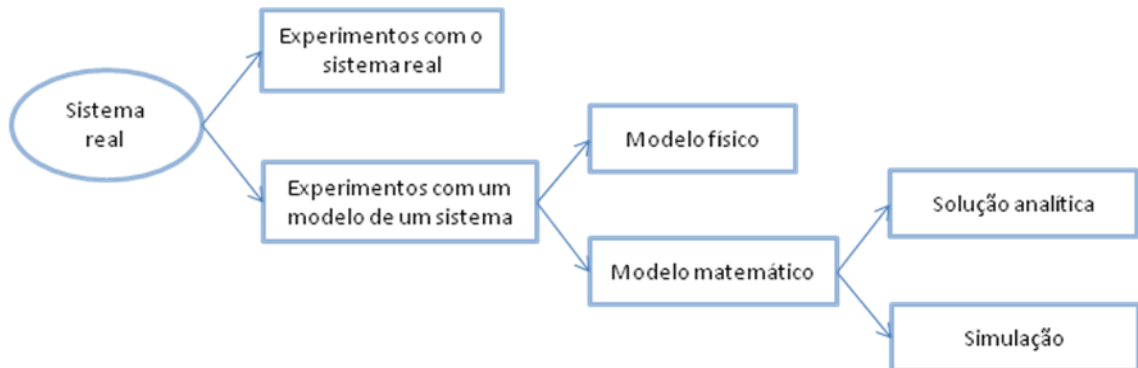


Figura 2: Meios de estudar um sistema real. Fonte: adaptado de Law e Kelton (1991).

Pidd (1992) simplifica os princípios básicos de simulação de sistemas da seguinte forma: (i) construir um modelo do sistema em estudo; (ii) escrever programas de computador adaptados ao sistema; (iii) utilizar o computador para imitar o comportamento do sistema quando sujeito a uma variedade de políticas, e (iv) selecionar a política mais desejável. Law e Kelton (1991) apontam que o nível de detalhamento de um modelo a ser simulado deve conter apenas o nível necessário para que sejam satisfeitas as demandas da proposta, de modo a não encarecer a criação e a utilização da simulação.

Várias são as utilizações da simulação computacional na gestão de sistemas. Schmeal e Parikh (1994) utilizaram a simulação através dos softwares ProModelPC e WITNESS para avaliação de políticas de programação na fabricação de invólucros de pneus e avessos de assentos para automóveis, propondo recomendações com relação à filosofia de operação da empresa. Já Sellito e Walter (2008) utilizaram a simulação computacional como alternativa para cálculo do tempo de atravessamento em uma indústria calçadista.

Com propósitos semelhantes, Borenstein (1998) combinou sistemas baseados em conhecimento à simulação para avaliar diferentes projetos de capacidade de sistemas avançados de manufatura, enquanto Souza *et al.* (2003) utilizaram a simulação para analisar a realocação da capacidade de mão-de-obra de uma linha de montagem de motores com demanda variável. Já Niewegloski *et al.* (2010) propõem um processo de

análise de investimento de projetos de expansão de capacidade em pequenas empresas, utilizando simulação de *frameworks* teórico-conceituais refinados por entrevistas com especialistas.

De forma similar, Santoro e Moraes (2000) utilizaram o software Arena para analisar a capacidade do projeto de uma linha de montagem de motores e otimizar a utilização de paletes. O Arena utiliza blocos gráficos que representam comandos de linguagem de programação, facilitando a construção de modelos (PRADO, 2008). Bieger *et al.* (2009) utilizaram o Arena para simular cenários de capacidade de atendentes e médicos no *call center* do SAMU da região metropolitana de Porto Alegre, evidenciando a larga possibilidade de aplicação do software e da simulação.

Por fim, a simulação computacional pode ser utilizada também em conjunto com a TOC para sincronização da produção na utilização da capacidade através do software de administração da produção *Optimized Production Technology* (OPT). O OPT é apresentado por Corrêa e Gianesi (1993), numa comparação com outros dois SAPs, o Just-in-Time (JIT) e o Materials Requirement Planning (MRP). Gunn e Nahavandi (2000) utilizaram a simulação computacional para encontrar gargalos na aplicação da teoria das restrições em uma indústria de bateladas, visando encontrar níveis ótimos de estoque intermediário.

3. Procedimentos Metodológicos

O presente estudo é desenvolvido em uma empresa do ramo tabagista, no processo primário de produção de cigarros. O processo primário compreende todos os processos produtivos de recebimento e transformação do tabaco curado e classificado das usinas de fumo até a entrega do fumo desfiado, pronto pra ser inserido no cigarro, no processo secundário. Assim, conforme a classificação apresentada por Yin (2003), foi realizada uma pesquisa de natureza aplicada, de abordagem quantitativa e de objetivo exploratório.

O processo secundário (SMD – *Secondary Manufacturing Department*) é uma típica indústria de forma. Desde o recebimento das suas principais matérias-primas (papel, cabo acetato e fumo desfiado), até a entrega do produto acabado (caixas de embalagens de cigarro), as únicas transformações que acontecem no processo são na forma do produto. Características físico-químicas não são alteradas, uma vez que

compreende apenas os processos de inserção do fumo nos cigarros, encarteiramento do cigarro, empacotamento das carteiras, encaixotamento dos pacotes e embalagem das caixas de cigarros nos paletes.

Já no processo primário (PMD – *Primary Manufacturing Department*), ocorrem transformações no produto que vão além de mudanças em sua forma. Centenas de operações como aplicação de vapor d'água, cortes, peneiramentos, desfibramentos, secagens e outros processos caracterizam o processo primário como uma indústria de propriedade. O processo tem capacidade de entregar um produto por vez, enquanto o processo secundário processa todas as misturas ao mesmo tempo. Em função de tal distinção foi projetado um estoque intermediário entre o PMD e o SMD.

Por produzir um tipo de produto por vez, o processo deve operar em bateladas de fluxo contínuo. Cada batelada possui um tempo de operação com um tipo de mistura, das cinco produzidas atualmente na unidade. Para que a capacidade atenda a um possível crescimento de mercado, é proposto um método para o planejamento do aumento da capacidade da fábrica, baseado no processo de focalização dos cinco passos proposto por Goldratt e Cox (2002), nos passos de simulação de sistemas de Pidd (1992) e nas características específicas de processos de propriedade apresentadas por Hansen (1996) e Sellito (1999). O método encontra-se dividido em seis passos, apresentados a seguir:

Passo 1 - Definição do sistema a ser modelado

Nessa etapa é definido o sistema foco para criação do modelo. É importante delimitar todas as fronteiras do sistema, bem como suas interfaces com outros sistemas. Isso auxilia na etapa de criação do modelo, evitando confusões. A definição do sistema prioritário a ser analisado pode valer-se da opinião de especialistas.

Passo 2 - Levantamento de informações do processo

Aqui são levantadas as informações importantes do sistema: processos compreendidos, produtos, tempos de produção, interdependências, recursos, programação de produção, tempos de parada e eficiências, além de informações secundárias. Tais informações podem ser obtidas através de observação, busca de históricos em sistemas informacionais de produção, conversa com operadores e técnicos das linhas e medições no processo. Análises estatísticas acerca dos dados coletados,

como identificação da melhor distribuição de probabilidade para cada variável coletada, também são endereçadas nesta etapa.

Passo 3 - Criação do modelo de simulação do sistema atual

Nesta etapa, as informações são processadas de modo a formular um modelo simplificado do sistema para, a seguir, ser transcrito em uma simulação computacional. Esse estudo utiliza o software ARENA para tal simulação. Após concepção do sistema, avaliações acerca dos resultados obtidos devem ser realizadas, comparando seus *outputs* com as informações que o sistema real apresenta, para que as simulações tenham credibilidade e representem de forma verossímil o processo.

Passo 4 - Levantamento do gargalo do processo através do modelo simulado do sistema e detalhamento dos componentes do gargalo

Através da simulação do processo é possível identificar o gargalo do processo e suas consequências sobre a produtividade do mesmo. Esse gargalo é encontrado através da soma do tempo de paradas exógenas (aquelas causadas por atrasos de outras linhas). De tal forma, quanto mais uma linha parar por não possuir matéria-prima para seu processamento, mais a linha que causou a parada será considerada um gargalo de produção.

A seguir, são avaliados os motivos que levam a linha identificada como gargalo a gerar atrasos. Como não há necessidade de levantar tais informações no início do estudo, nesse ponto são avaliados os equipamentos da linha e suas capacidades de processamento. Tais informações são buscadas junto aos responsáveis pela operação, manutenção e melhorias na linha, além de testes junto ao processo. A partir dessas informações, o gargalo da linha pode ser identificado.

Passo 5 – Simulação de novo cenário com a capacidade do gargalo elevada

Nessa etapa são operacionalizados os passos da TOC de explorar o gargalo, submeter o processo ao gargalo e elevar a capacidade do gargalo. Tais passos podem compreender aumentos da capacidade dos equipamentos, disponibilidade mais eficiente de matéria-prima ao processo e substituições de equipamentos. Devido ao volume de produção estar ligado diretamente ao projeto dos equipamentos e não ao ritmo de trabalho da mão-de-obra (característica da indústria de propriedade), ações como o

aumento do número de operadores ou a redução da variabilidade nos tempos de execução de tarefas não geram aumento de capacidade ao processo e, portanto, não são aplicadas ao modelo.

Assim, define-se uma nova capacidade para o gargalo da linha, a qual deve ser superior à capacidade atual do equipamento, trazendo uma folga para que esse equipamento não volte a ser o gargalo nas próximas simulações. Dessa forma, a linha deixa de ser o gargalo do sistema, abrindo espaço para a simulação de um novo cenário e a definição do novo gargalo do processo.

Passo 6 – Retornar ao passo 4

Ao final do Passo 6, retorna-se ao passo 4, de forma a definir o novo gargalo do sistema. A sequência dos passos é seguida até que a meta de capacidade do sistema seja atingida. Ao final, é obtida uma lista com passos de aumento de capacidade produtiva dos equipamentos. Dessa forma, a cada aumento de capacidade em equipamentos, estará associada uma nova capacidade para o processo.

4. Resultados

Ao ser aplicada a primeira etapa do método proposto, foi definido o PMD como o sistema utilizado para o estudo. Por ser uma decisão que envolve interesses internamente estratégicos, a consulta foi realizada diretamente com a gerência do setor. Também foram definidas as linhas e interfaces do sistema que seriam estudadas. Algumas linhas de produção auxiliares não foram consideradas, focando no processo principal. Tal escolha foi discutida junto a especialistas do setor e baseada em uma relação de complexidade *versus* benefício.

No segundo passo, foram listados os produtos, operações, fluxos das linhas (em kg/h), pesos de cada batelada, e tempos referentes ao processo estudado. Informações sobre paradas foram utilizadas para criar modelos estocásticos de quebra de equipamento através dos tempos médios de funcionamento entre falhas (*uptime* ou *mean time between failure* - MTBF) e tempo médio de reparo (*downtime* ou *mean time to repair* – MTTR). Além disso, um histórico das programações diárias de produção foi levantado, permitindo a criação de uma programação que representasse a realidade do setor em relação a sua operação usual. As fontes de informação utilizadas incluíram

conhecimento de especialistas do processo e bases de dados dos sistemas de informação.

O PMD está dividido em linhas de produção, cada linha contendo uma série de operações de transformação. A movimentação e estocagem intermediária do produto são integralmente realizadas através de correias transportadoras e silos. A Figura 3 apresenta o diagrama de processo operacional, ferramenta apresentada por Lee (1998), sendo possível visualizar as interdependências e estoques intermediários das linhas de produção do PMD.

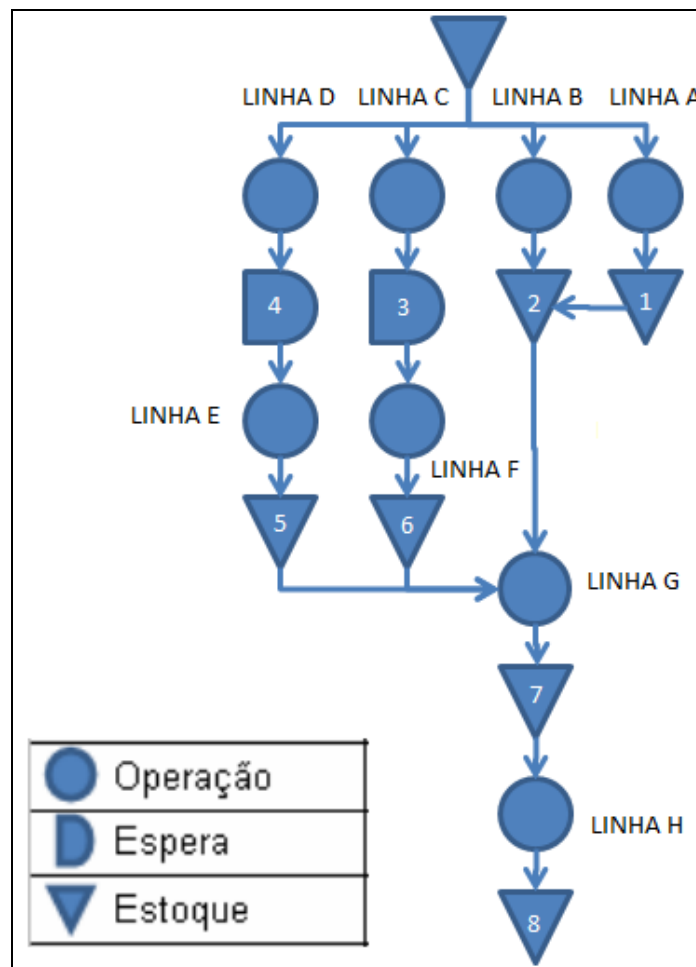


Figura 3: Diagrama de Processo Operacional do PMD

As linhas foram classificadas da letra A até a letra H e os estoques numerados de 1 a 8. As esperas referem-se a estoques intermediários que possuem um tempo mínimo de permanência devido a características do produto. Cada uma das linhas processa um tipo diferente de fumo. Na linha G ocorre a mistura dos tabacos processados pelas linhas A, B, C, D, E e F. Para cada um dos cinco tipos de tabaco desfiado produzidos na unidade,

diferentes quantidades são misturadas para que a receita correta seja entregue pela linha H ao estoque 8.

Dessa forma, bateladas de tabaco são processadas e misturadas. Cada batelada é caracterizada por quantidades, operações e, principalmente, tempos de processamento diferentes. Essas diferenças causam problemas de sincronia nas linhas, gerando paradas por indisponibilidade de matéria-prima nos estoques anteriores ou de silos vazios nos estoques posteriores à linha. No presente artigo, às paradas por sincronismo entre as linhas foi atribuído o termo “paradas exógenas”, causadas por fatores externos à linha.

Outro fator analisado foi a duração dos tempos de setup entre uma batelada e outra. Um tempo de intervalo entre bateladas é necessário para que não sejam misturados diferentes produtos, permitindo o esvaziamento das linhas. Alguns cenários alternativos avaliaram, ainda, o impacto da redução dos tempos de setup nos tempos totais de produção do processo.

O modelo foi criado com as informações alimentadas pelas etapas um e dois. Após a geração de um modelo simplificado do processo, uma transcrição para o software de simulação Arena foi realizado. A escolha foi baseada na larga disponibilidade e aplicabilidade do software. A Figura 4 apresenta uma imagem do modelo com gráficos de representação de variáveis do processo.

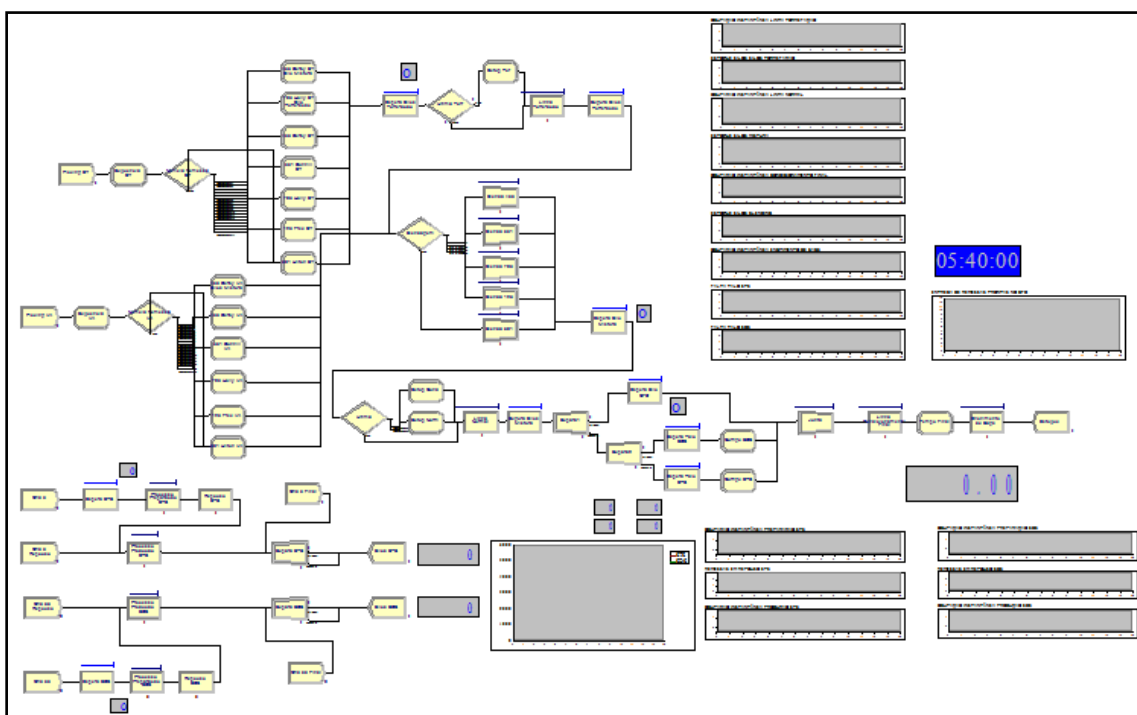


Figura 4: Modelo de simulação do PMD no software ARENA

Além do modelo do processo físico, existem outras informações importantes que devem ser inseridas para aproximar o modelo da realidade (por exemplo, o tempo a ser simulado foi definido como tendo um dia por rodada). Essa escolha se baseia no fato da programação do setor ser diária e sua produção corresponder a aproximadamente 10 horas do dia, ficando o resto do tempo disponível para manutenção e limpezas. Outras informações inseridas no modelo incluíram programação diária, estoques intermediários iniciais e módulos de falha baseados nas distribuições estocásticas de MTBF e MTTR.

Juntamente com a definição do modelo, foi definido um parâmetro de avaliação da capacidade e uma meta para o estudo. Um indicador bastante comum na indústria compreende as variáveis volume de produção, tempo e força de trabalho. No presente estudo, tal quantificação seria representada em toneladas por homem-hora. Porém, como característica da indústria de propriedade, a produção é pouco relacionada à presença humana, permitindo um aumento de capacidade através da modificação de processos ou máquinas. Assim, o indicador aqui usado foi o de toneladas por hora e uma meta de 9,21 ton/h foi determinada pelos gestores do processo. Outra definição tomada em conjunto com especialistas do setor é que a variável de saída do modelo contemplaria o tempo e a produção da linha G uma vez que a linha H é simples e não representa gastos representativos ao setor.

A etapa seguinte à criação do modelo de simulação é a sua validação como representante do sistema real. Para tal, dados gerados em rodadas de simulação foram comparados com dados reais do processo. É nesta etapa em que não apenas a montagem lógica do modelo deve ser testada, mas também as aproximações criadas para simplificar o modelo e a veracidade dos dados utilizados. Para tal, foram simulados cenários que representassem programações reais. Os tempos de início e fim de cada batelada em cada linha da simulação foram comparados com os tempos reais do processo, garantindo a aproximação das variáveis de saída do modelo com a realidade.

A partir da validação do modelo, foi buscada uma ferramenta para a definição do gargalo do processo. Para tal, foram criados dois tipos de gráfico de acompanhamento do processo. Um deles indica o número de bateladas armazenadas nos silos de um estoque específico. Outro indica a ocupação instantânea de uma linha, sendo a representação 0

para equipamento parado ou em falha e 1 para equipamento em funcionamento. A Figura 5 apresenta exemplos de tais gráficos.

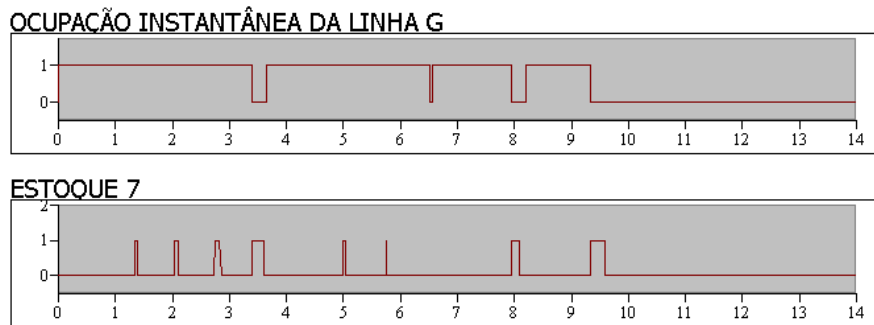


Figura 5: Gráficos de acompanhamento do processo após uma rodada de simulação.

A partir dos gráficos de acompanhamento e de avaliação da movimentação de bateladas na representação gráfica do processo, foi possível determinar o gargalo do processo. Cada cenário foi replicado 200 vezes para obter uma amostra significativa dos tempos. O cenário 1 avaliou a capacidade atual do processo, cuja média foi de 8,89 e erro padrão da média de 0,16 ton/h. Como a linha G mistura os produtos das linhas A, B, C, D, E e F, o cenário 2 avaliou o aumento de capacidade necessário na linha G para que esta pudesse entregar, considerando não haverem paradas exógenas, a meta de capacidade proposta pelo presente estudo. Foi determinado um aumento necessário de 14% nos fluxos da linha G, os quais, depois de simulados no modelo do PMD, retornaram uma capacidade de $8,92 \pm 0,17$ ton/h.

Garantida a capacidade de produção da linha G, uma análise dos tempos de paradas exógenas do cenário 2 foi realizada para que o atual gargalo do processo fosse identificado. O gargalo do processo foi definido como aquele que gera mais tempo de paradas exógenas na linha G, considerando cenários nos quais não ocorreram falhas. No cenário 2 ocorreram três paradas por falta de produto da linha F. De forma clara, a linha F se mostrou o gargalo do processo.

Um aumento de fluxo de 100% na linha F foi simulado, gerando o cenário 3. Este aumento está baseado numa troca de equipamento que já está planejada para o setor. No cenário 3, uma capacidade de $9,31 \pm 0,24$ ton/h foi atingida. As ocorrências de parada de equipamento na linha F são geradas por falta de produto na linha B.

Um aumento de capacidade da linha B foi proposto, de modo que o fluxo aumentasse em 8%. Após a simulação do cenário 4, a capacidade de $9,34 \pm 0,23$ ton/h foi atingida e um novo gargalo surgiu. Este novo gargalo foi a linha H, a qual teve seus tempos de operação reduzidos em 7%, gerando uma nova capacidade planejada de $9,48 \pm 0,25$ ton/h no cenário 5. A Tabela 2 mostra um resumo das ações tomadas em cada um dos gargalos do processo e a Figura 6 apresenta a evolução da capacidade do sistema em cada cenário simulado.

CENÁRIO	GARGALO	TONELADAS/HORA	MELHORIA
1	G	$8,89 \pm 0,16$	Aumento de 14% no fluxo da linha
2	F	$8,92 \pm 0,17$	Aumento de 100% no fluxo da linha
3	B	$9,31 \pm 0,24$	Aumento de 8% no fluxo da linha
4	H	$9,34 \pm 0,23$	Redução em 7% dos tempos da linha
5	G	$9,48 \pm 0,25$	-

Tabela 2: Resumo dos cenários simulados e os respectivos aumentos de capacidade nas linhas.

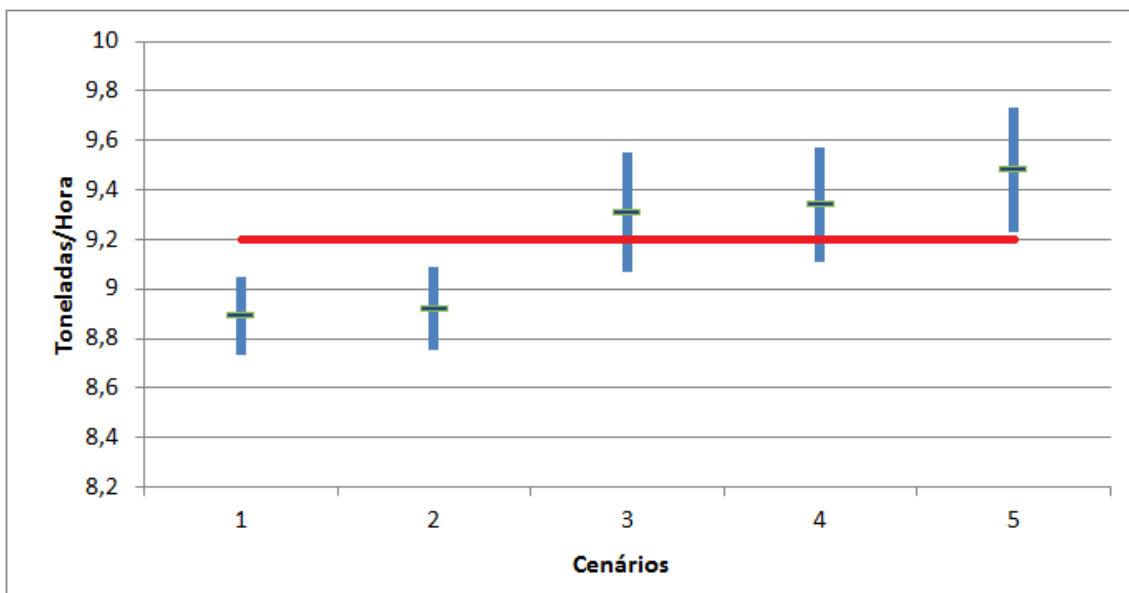


Figura 6: Evolução da capacidade do sistema para os diferentes cenários gerados.

Uma segunda avaliação do processo foi realizada com base nos aumentos de capacidade do processo decorrentes da redução dos tempos de setup das linhas. Os tempos de setup são importantes para eliminação de qualquer possibilidade de mistura de dois produtos diferentes. Porém, procedimentos de esvaziamento de linha mais apurados podem ser implementados. A Tabela 3 apresenta o plano de aumento de

capacidade para cada porcentagem de redução dos tempos de setup em cada cenário simulado anteriormente.

CENÁRIO	0%	30%	50%
1	8,89 ± 0,16	8,90 ± 0,17	8,99 ± 0,16
2	8,92 ± 0,17	8,94 ± 0,17	9,02 ± 0,18
3	9,31 ± 0,24	9,31 ± 0,24	9,34 ± 0,23
4	9,34 ± 0,23	9,32 ± 0,23	9,35 ± 0,22
5	9,48 ± 0,25	9,58 ± 0,26	9,53 ± 0,26

Tabela 3: Aumento de capacidade do setor por redução percentual nos tempos de setup em cada cenário simulado.

Apesar das médias apontarem para um aumento ao reduzirmos os tempos de setup, o erro padrão associado aos cenários não permite assumir que existem diferenças entre eles. Assim, o impacto da redução dos tempos de setup é pequeno comparado a outras ações para atingir a meta de capacidade

5. Implicações Gerenciais

De forma a atingir a meta proposta pela gerência do setor, algumas ações podem ser tomadas em conjunto com os aumentos de fluxo das linhas. Existe um *trade off* entre velocidade de operação e qualidade de produto, pois variáveis de verificação são alteradas ao longo de uma batelada. Velocidades altas podem acarretar atraso nos ajustes de variáveis do processo, comprometendo a qualidade do produto.

Para isso, é indicada a reavaliação do tempo de resposta do equipamento AD1, principal equipamento da linha G, que realiza a secagem do fumo. Tal reavaliação pode compreender tanto fatores eletromecânicos do equipamento, quanto a criação de malhas fechadas na automação para reduzir a carga de trabalho no operador e aumentar a eficácia das variáveis de verificação.

Outro fator que compromete o tempo de resposta é a troca do silo dos estoques 5 e 6 durante uma operação, o que geralmente acarreta em alteração nos parâmetros de qualidade do produto que entra na linha G. Para tal, são indicadas ações de redução da variabilidade dos produtos das linhas E e F e reavaliação dos regimes de utilização dos silos. Capacitações intensivas com os operadores de linhas onde o aumento de capacidade pode comprometer a qualidade do produto aparecem como uma alternativa adicional na busca do controle do processo em situações adversas.

Para a maioria das linhas para as quais foi proposto um aumento de fluxo, uma análise de atendimento das correias transportadoras deverá ser planejada, uma vez que parte delas não suporta a passagem de produto aqui proposta. O equipamento crítico da linha B, DC1, não possui sua curva de capacidade de produção x qualidade de produto bem definida. Uma avaliação de sua atual capacidade e, conseqüentemente, um projeto de aumento de capacidade produtiva do equipamento, podem ser necessários.

O regime de ocupação das duas máquinas JS3 e JS4, idênticas e dispostas em layout paralelo, deve ser revisto. Atualmente, uma máquina atende à demanda da linha, mas um regime alternado entre uma e duas máquinas em uso será necessário, assim que os fluxos forem aumentados.

6. Conclusão

Neste artigo foi desenvolvido um plano de aumento de capacidade produtiva em uma indústria de propriedade através da aplicação da simulação computacional e da TOC. Foi proposto um método de intervenção baseado em conceitos da TOC, simulação computacional e da classificação de indústrias de propriedade. Também foram simulados cenários de aumento da capacidade produtiva através da redução dos tempos mínimos de intervalo entre bateladas.

Seguindo a aplicação do método, foi definido o sistema a ser estudado, foram levantadas informações relevantes ao processo e foi elaborado e testado um modelo de simulação utilizando o software ARENA. Utilizando o modelo, foram repetidas as etapas de definição e elevação da capacidade do gargalo, até que o objetivo do estudo fosse alcançado.

Foram necessários seis cenários do modelo para que a meta de 9,21 toneladas/hora fosse ultrapassada. A cada iteração foi apresentado um aumento de capacidade para cada linha medido em aumento percentual para o seu fluxo. Também foram medidos os resultados na capacidade final do sistema em cenários de redução de tempos de setup. Essa redução não permitiu que se assumissem diferenças entre as capacidades dos cenários.

Para estudos futuros, uma avaliação conjunta da TOC, redução de tempos de setup e regimes de criação e utilização de estoques intermediários pode ser realizada, de modo a atingir um aumento significativo na capacidade do sistema com um custo menor ao de

realizar apenas aumentos de capacidade das linhas. Também, para que haja maior influência dos módulos de parada sobre a capacidade do sistema, podem ser simulados cenários que contemplem mais dias de produção, respeitando as regras de turnos e de paradas.

7. Referências

ANTUNES JR., J. A. V.; RODRIGUES, L. H. **A Teoria das Restrições como Balizadora das Ações Visando a Troca Rápida de Ferramentas.** Revista Produção, v. 3, n. 2, p. 73-85, 1993.

BIEGER, A.; BORGES, G.; KRANZ, S.; MCGOWAN, C.; MEEHAN, K.; MANCUSO, L. G.; GUERLAIN, S.; GUIMARÃES, L. B. M. **Increasing the Efficiency of a Brazilian Emergency Response Call Center.** Proceedings of the 2009 IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium.

BORENSTEIN, D. **Combinando Simulação e Sistemas Baseados em Conhecimento para o Projeto de Sistemas Avançados de Manufatura.** Revista Gestão & Produção, v. 5, n. 2, p. 89-103, 1998.

CHASE, B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N. J. **Administração da Produção para a Vantagem Competitiva.** 10ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

CORRÊA, H. L.; GIANESI, I. G. N. **Just in Time, MRP II e OPT: Um enfoque estratégico.** São Paulo: Atlas, 1993.

COX, J.; SPENCER, M. S. **The Constraints Management Handbook.** Boca Raton: St. Lucie, 1998.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua.** 2ª ed. São Paulo: Nobel, 2002.

GUNN, B.; NAVAHANDI, S. **Determining the Optimum Level of Work in Progress Using Constraint Analysis and Computer Simulation.** Revista Assembly Automation, v. 20, n. 4, p. 305-312, 2000.

HANSEN, P. B. **Um Método Multicriterial de Avaliação e Gestão de Processos Produtivos da Indústria de Propriedade Contínua.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1996.

HANSEN, R. C. **Eficiência Global dos Equipamentos: uma ponderosa ferramenta de produção/manutenção para o aumento dos lucros.** 1ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation Modeling & Analysis.** 2ª ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LEE, Q. **Projeto de Instalações e do Local de Trabalho.** 1ª ed. São Paulo: IMAM, 1998.

MARTINS JR., J. C. **Método Estruturado para Aplicação das Técnicas de Aumento de Capacidade de Produção de Recursos Gargalo em Células de Manufatura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia). São Carlos: Universidade de São Paulo, 2009.

MOELLMANN, A. H.; ALBUQUERQUE, A. S.; CONTADOR, J. L.; MARINS, F. A. S. **Aplicação da Teoria das Restrições e do Indicador de Eficiência Global do Equipamento para Melhoria de Produtividade em uma Linha de Fabricação.** Revista Gestão Industrial, v. 2, n. 1, p. 89-105, 2006.

NIEWEGLOSKI, R.; LIMA, E. P.; COSTA, S. E. G. **Desenvolvendo um Processo de Análise de Investimentos Baseado em Competências.** Revista Produção, v. 17, n. 2, p. 317-337, 2010.

PIDD, M. **Computer Simulation in Management Science.** Vol. 3. Wiley: New York, 1992.

PRADO, D. **Usando o ARENA em Simulação.** 3ª edição. Belo Horizonte: INDG, 2008.

REID, R. A. **Applying the TOC five-step focusing process in the service sector: a banking subsystem.** Managing Service Quality, v. 17, n. 2, 2007.

ROLSTADAS, A. **Computer-Aided Production Management.** Geneva: Springer-Verlag: 1988.

SALERNO, M. S. **Flexibilidade, Organização e Trabalho: elementos para análise da produção na indústria.** Tese (Doutorado em Engenharia). São Paulo: Universidade de São Paulo, 1991.

SANTORO, C. M.; MORAES, L. H. **Simulação de uma Linha de Montagem de Motores**. Revista Gestão e Produção, v. 7, n. 3, pg 338-351, 2000.

SCHMEAL, W. R.; PARIKH, P. D. **Avaliação de Políticas de Programação na Fabricação de Compósitos por Meio de Simulação**. Revista Gestão & Produção, v. 1, n. 3, p. 239-249, 1994.

SELLITO, M. A. **Sistema de Produção Sincronizado: uma aplicação em processos produtivos de propriedade contínuos segundo a teoria das restrições**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1999.

SELLITO, M. A.; WALTER, C. **Medição e Controle do Tempo de Atravessamento em um sistema de manufatura**. Revista Gestão & Produção, v. 15, n. 1, p. 135-147, 2008.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção**. 2^a ed. São Paulo: Atlas, 2007.

SOUZA, F. B.; BAPTISTA, H. R. **Proposta de Avanço para o Método Tambor-Pulmão-Corda Simplificado aplicado em ambientes de produção sob encomenda**. Revista Gestão e Produção, v. 17, n. 4, p. 735-746, 2010.

SOUZA, M. C. F.; YAMADA, M. C.; PORTO, A. J. V.; GONÇALVES FILHO, E. V. **Análise da Alocação de Mão-de-Obra em Linhas de Multimodelos de Produtos com Demanda Variável Através do Uso da Simulação: um estudo de caso**. Revista Produção, v. 13, n. 3, p. 63-77, 2003.

YIN, R. K. **Estudos de Caso: Planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2003.