

## SIMULAÇÃO-OTIMIZAÇÃO APLICADA AO PROBLEMA INTEGRADO NA INDÚSTRIA DE MÓVEIS<sup>1</sup>

Pedro M. Oliveira, Washington A. Oliveira, Carla T. L. S. Ghidini \*

Faculdade de Ciências Aplicadas, Universidade Estadual de Campinas, R. Pedro Zaccaria, 1300, Limeira,  
13484-350, SP, Brasil

Recebido 25/01/2022, aceito 29/08/2022

### RESUMO

Em um mercado altamente competitivo como o de móveis brasileiro, otimizar custos de produção é uma fundamental vantagem competitiva. Com o objetivo de eliminar desperdícios de material e reduzir custos de produção e estoque, o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque presente no processo produtivo da indústria moveleira pode ser modelado e resolvido. Para isso, é utilizada uma abordagem híbrida Simulação-Otimização, que permite considerar de maneira mais realista a aleatoriedade e incerteza presente neste tipo de problema. Um modelo de otimização linear inteiro é resolvido por um método heurístico e o simulador FlexSim é utilizado para criar um modelo estocástico e dinâmico de simulação de eventos discretos para avaliar factibilidade e desempenho dos parâmetros de entrada obtidos a partir da solução do modelo de otimização. Experimentos computacionais são conduzidos utilizando dados reais de uma indústria moveleira de pequeno porte e os resultados são analisados e discutidos.

**Palavras-chave:** Problema de dimensionamento de lotes, Problema de corte de estoque, Problema integrado, Simulação-Otimização.

### ABSTRACT

In a highly competitive market like the Brazilian furniture market, optimizing production costs is essential to achieve competitive advantages. In order to eliminate raw material waste and reduce production and stock costs, the integrated lot sizing and cutting stock problem found in the furniture industry's production process can be modeled and solved. For that, this paper considers a hybrid Simulation-Optimization approach, which allows considering the randomness and uncertainty present in this type of problem in a more realistic way. An integer linear optimization mathematical model is solved using a heuristic method. Moreover, the FlexSim simulator is used to create a stochastic and dynamic discrete event simulation model to evaluate the feasibility and performance of the input parameters obtained from the optimization model solution. Results from a series of computational experiments based on actual data of the small furniture industry are analyzed and discussed.

**Keywords:** Lot sizing problem, Cutting stock problem, Integrated problem, Simulation-Optimization.

\* Autor para correspondência. E-mail: [cghidini@unicamp.br](mailto:cghidini@unicamp.br)

DOI: 10.4322/PODes.2022.008

<sup>1</sup>Todos os autores assumem a responsabilidade pelo conteúdo do artigo.

## 1. Introdução

Diante do cenário da Nova Economia Mundial, as indústrias buscam, para superar a crescente e acirrada concorrência, criar diferenciais únicos e capacitações próprias que lhes permitam obter uma vantagem competitiva no mercado. Dentro deste contexto, muitas indústrias vêm utilizando o conceito de Manufatura Enxuta, onde visa-se eliminar os desperdícios em todas as áreas da empresa para assim gerar riqueza (Hayes et al., 2004). Com o mesmo intuito de eliminar os desperdícios de matéria prima e reduzir os custos de produção e estoque, os problemas de dimensionamento de lotes e de corte de estoque presentes no processo produtivo de diversas indústrias de manufatura, como por exemplo, metalúrgica, papelreira, têxtil, moveleira, entre outras podem ser modelados e resolvidos de forma integrada.

O problema de dimensionamento de lotes (PDL) consiste no planejamento e na programação de quais e quantos produtos devem ser produzidos em cada período de um horizonte de planejamento, de forma a atender uma certa demanda, considerando limitações de capacidade de produção. Visa ainda otimizar uma função objetivo, consistindo, geralmente, da minimização dos custos (Araujo e Arenales, 2000). O problema de corte de estoque (PCE) consiste em cortar objetos de tamanhos grandes e padronizados (produzidos ou comprados) para obter peças menores (ítems) de tamanhos variados, considerando a demanda por ítems. Normalmente, o processo de corte gera perdas indesejáveis de material e, dessa forma, o objetivo principal nesse tipo de problema é minimizar a perda de matéria-prima ou a utilização de objetos atendendo completamente a demanda (Arenales et al., 2007).

Uma prática muito usual das indústrias é resolver esses dois problemas de forma independente, ou seja, primeiro é resolvido o problema de dimensionamento de lotes e, então, somente após a definição dos tamanhos dos lotes a serem produzidos em cada período do horizonte de planejamento, são definidos quais e quantas vezes cada padrão de corte será utilizado para cortar a matéria-prima estocada. Porém, a resolução destes problemas de forma separada pode gerar soluções não tão boas ou mesmo infactíveis na prática, com custos totais elevados devido ao aumento do desperdício de material, o que pode ser muito expressivo, principalmente, quando uma parcela significativa do custo do produto refere-se ao custo da matéria-prima. Assim, tratar e resolver conjuntamente os problemas de dimensionamento de lotes e corte de estoque tem sido visto como uma proposta promissora e desafiadora.

A literatura apresenta uma quantidade relevante de trabalhos que tratam o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque em diversos tipos de aplicações, considerando abordagens diferentes de resolução. Por exemplo, Nonas e Thorstenson (2000) consideraram o processo produtivo de uma companhia norueguesa que fabrica caminhão basculante. Arbib e Marinelli (2005) estudaram o processo de produção de correias de engrenagem. Suliman (2012) trabalhou com a produção de uma indústria de alumínio. Adicionalmente, Poltroniere et al. (2008), Campello et al. (2020) e Ayres et al. (2021) investigaram o processo produtivo da indústria de papel. Outros trabalhos são encontrados na literatura, no entanto destacamos o trabalho de Melega et al. (2018) como uma boa referência para esse tema, uma vez que os autores fazem uma ampla revisão de vários outros artigos que abordam o problema integrado (PDL e PCE) em diferentes tipos de indústrias, incluindo a indústria têxtil, de processamento de madeira, alumínio, cobre e móveis.

O foco deste artigo é o processo produtivo da indústria de móveis, onde deve-se definir não só quais e quantos lotes de móveis devem ser produzidos em cada período do horizonte de planejamento, mas também quais padrões de corte e quantas vezes eles devem ser utilizados para cortar as placas de madeira (matéria-prima) com o objetivo de satisfazer o plano completo de produção. Gramani e França (2006), Ghidini (2008), Gramani et al. (2011), Santos et al. (2011), Alem e Morabito (2012), Silva et al. (2014) e Vanzela et al. (2017) são alguns trabalhos que tratam especificamente do processo produtivo da indústria de móveis. Uma gama de novos modelos matemáticos de otimização linear inteira ou combinatória para a representação do problema foram desenvolvidos nesses estudos, além de apresentarem métodos exatos ou heurísticos

específicos de resolução de acordo com o tipo de modelo proposto.

Em particular, o trabalho de Ghidini (2008) foi utilizado como referência para a realização de parte do estudo proposto nesse artigo. Para tratar o processo produtivo da indústria de móveis, Ghidini (2008) introduziu um modelo matemático de otimização linear inteira com restrições que integram os problemas PDL e PCE. As dificuldades de resolução apresentadas pelo modelo proposto, tais como a grande quantidade e a integralidade das variáveis de decisão, foram superadas por meio do desenvolvimento de um método heurístico de resolução baseado no método simplex com geração de colunas e numa heurística residual para obtenção de uma solução factível inteira. Uma característica comum do modelo matemático proposto por Ghidini (2008), assim como de outros trabalhos citados anteriormente, é que os parâmetros utilizados na modelagem matemática do problema integrado são conhecidos a priori, obtidos empiricamente ou por meio do uso de valores médios que aproximam os valores práticos. Porém, como comentado anteriormente, existe a possibilidade das soluções do modelo matemático determinadas por métodos heurísticos ou mesmo por métodos exatos serem ineficazes quando são aplicadas no dia a dia da indústria. Por exemplo, os tempos para cortar as peças que compõem os produtos, que são obtidas a partir do corte das placas de madeira seguindo os padrões de corte estabelecidos, são valores médios e fixos determinados *in locu* com base em algumas visitas técnicas feitas à indústria de móveis no estudo de Ghidini (2008). No entanto, os tempos de corte podem diferir da situação real de operação, uma vez que esses tempos costumam ter uma certa variabilidade devido à imprevistos operacionais ou mesmo a falta de uniformidade na condução dos processos pelos operadores de um turno para outro. Além disso, existem outras incertezas inerentes a esse tipo de problema que devem ser levadas em consideração e que não são tratadas quando o problema é representado por modelos matemáticos determinísticos, como por exemplo a definição dos custos gerais envolvidos no processo de fabricação, custos de *setup* e de estoque de peças e produtos, além das incertezas na demanda por produtos, as quais podem mudar a qualquer momento com a chegada de um novo pedido ou mesmo por meio do cancelamento de pedidos ao longo do horizonte de planejamento.

A falta de informação a respeito das características de uma variável ou do seu comportamento estocástico intrínseco é o que conduz ao não conhecimento dos valores exatos de algumas variáveis no instante da tomada de decisão (Pflug, 1999). O que pode ser considerado decisivo no caso do problema integrado em questão. Dessa forma, o uso da simulação computacional do processo produtivo da indústria de móveis pode ser uma alternativa muito útil, uma vez que ela permite tratar incertezas dos parâmetros e também a aleatoriedade das variáveis do problema. A simulação computacional permite incorporar variações nos parâmetros do modelo no processo de resolução, avaliar a viabilidade da solução e, ainda, verificar se existem gargalos no sistema que possam e devam ser otimizados para se obter uma resposta mais adequada. Segundo Figueira (2019), no contexto da Pesquisa Operacional para a resolução de problemas de tomada de decisão, a Simulação e a Otimização devem ser vistas como áreas colaborativas na abordagem de problemas, podendo ser combinadas em uma perspectiva de usar a simulação para ajudar a otimização e vice-versa. Essa perspectiva, levou os pesquisadores de ambas as áreas a procurar estender os seus métodos com as técnicas da outra área. Abordagens baseadas em simulação começaram a envolver a otimização dos parâmetros de entrada da simulação e abordagens baseadas em otimização passaram a usar simulação para o cálculo de parâmetros ou a amostragem de cenários para modelos de programação estocástica. No entanto, esta dicotomia está gradualmente desaparecendo, uma vez que alguns métodos de resolução já combinam simulação e otimização de uma forma mais equilibrada.

O método nomeado Simulação-Otimização tem sido foco de estudo há mais de três décadas por profissionais das áreas de Pesquisa Operacional, Ciências Administrativas e Tecnologia da Informação, dentre outras. Esse tema foi tratado em alguns trabalhos recentes na literatura. Por exemplo, Bianchi et al. (2008) aplicaram técnicas de simulação com otimização em um problema para definir o plano mensal de mineração em uma área de exploração de uma mineradora. Azadivar et al. (2009) utilizaram simulação-otimização para a criação de um sistema de apoio a tomada de

decisão na gestão da pesca. Sha e Srinivasan (2016) utilizaram a simulação integrada com um modelo de otimização para decidir políticas de roteamento e abastecimento de clientes de uma cadeia de suprimentos da indústria química. Gruler et al. (2017) combinaram metaheurística e simulação de Monte Carlo para resolver o problema de coleta de lixo com múltiplos depósitos e demanda estocástica. Adicionalmente, Guçdemir e Selim (2017) utilizaram a simulação para agregar variabilidade na função objetivo de um modelo de otimização aplicado à gestão de recursos de uma linha de manufatura.

A principal contribuição deste artigo envolve utilizar a técnica Simulação-Otimização para tratar o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque presente na indústria de móveis considerando como estudo de caso uma indústria de pequeno porte. Diferentemente das propostas anteriores encontradas na literatura para o problema integrado PDL e PCE, que consideram como objetivo principal otimizar o processo produtivo por meio de um modelo determinístico, este artigo também leva em consideração as incertezas inerentes aos parâmetros problema, mais especificamente com relação a demanda, e a variabilidade existente nos tempos de processamento e *setup* das máquinas. Este artigo também avalia os impactos das incertezas nas soluções do modelo de otimização com parâmetros determinísticos, podendo assim determinar uma solução de qualidade e que seja realmente factível no dia a dia da indústria. É importante destacar que na etapa de otimização, o modelo matemático considerado neste artigo para representar o problema integrado é o mesmo proposto por Ghidini (2008). Além disso, o método de resolução adotado neste artigo para resolver o modelo matemático integrado também foi baseado na técnica heurística de resolução proposta por Ghidini (2008).

O restante do texto está organizado da seguinte forma. A Seção 2 contém a definição do problema integrado e uma descrição do processo produtivo da indústria de móveis de pequeno porte e do modelo matemático de otimização linear inteira usado para representar o problema integrado. A Seção 3 apresenta a metodologia proposta para resolver o problema integrado da indústria de móveis. A Seção 4 descreve os experimentos computacionais e fornece uma análise detalhada dos resultados numéricos que foram obtidos. A Seção 5 apresenta as considerações finais, seguida do referencial bibliográfico utilizado.

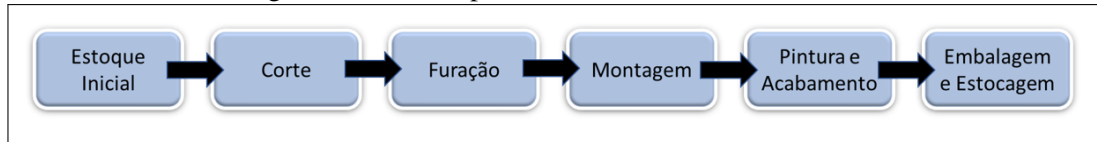
## **2. Problema Integrado na Indústria de Móveis**

O problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque consiste basicamente na junção destes dois problemas com o objetivo de procurar oportunidades de adiantar a produção (redimensionar os lotes) de determinados produtos de tal forma que o resultado do corte para a confecção de tais produtos reduza o máximo possível a quantidade de material utilizado e, também, a perda de material indesejável. Note que ao fazer isto, aumenta-se o custo de estoque, uma vez que esses produtos são manufaturados em períodos anteriores ao necessário. Portanto, esse adiantamento de lotes só será vantajoso quando a redução do custo com material é maior que o aumento do custo de estoque. Em indústrias onde a matéria prima é cara, como na indústria de móveis, sempre procura-se utilizar a menor quantidade de matéria prima possível. Assim, resolver o problema integrado pode trazer soluções muito vantajosas. Antes de apresentar a modelo matemático do problema integrado considerado neste artigo, a Seção 2.1 fornece uma descrição simplificada das principais etapas do processo produtivo de uma indústria de móveis de pequeno porte e algumas explicações de como alguns parâmetros foram determinados para a construção do modelo de otimização.

### **2.1. Processo Produtivo da Indústria de Móveis**

O processo produtivo da indústria de móveis possui várias etapas e as principais estão representadas na Figura 1. A primeira etapa do processo produtivo consiste no corte das placas de MDF estocadas em diferentes tipos de peças menores, de modo que sejam produzidas todas as peças necessárias para a composição dos produtos e o atendimento da demanda dos mesmos.

Figura 1: Processo produtivo da indústria de móveis.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Nesta etapa, é muito importante definir quais padrões de corte serão utilizados para que todas as peças sejam produzidas, utilizando a menor quantidade possível de placas e reduzindo o custo total da produção.

A máquina de corte usada na indústria de móveis, chamada a partir de agora de serra, pode cortar várias placas simultaneamente, desde que a soma das espessuras não ultrapasse a capacidade máxima, e possui um tempo de corte diferente para cada peça. O tempo de corte de um padrão foi considerado como sendo a soma dos tempos de corte das peças que o compõe. Estes tempos de corte são médios e determinísticos no modelo matemático. No entanto, na realização da simulação, tais tempos são transformados em curvas estatísticas, com o objetivo de aproximar melhor o modelo abstrato da realidade prática. Para determinar o tempo de corte de cada peça, foi calculado o tempo de corte do padrão de corte homogêneo (padrão composto por apenas um tipo de peça) dividido pela quantidade de peças presente nele.

Após serem cortadas, as peças aguardam no setor de furação para passarem pela furadeira (uma peça por vez). Porém, nem todas as peças precisam de furos, mas para facilitar a simulação do problema foi considerado que todas as peças são furadas, distribuindo o tempo de furo entre as peças. Por exemplo, caso o tempo para furar uma peça seja de 2 segundos e apenas a metade das peças precisam de fato ser furadas, então considera-se a furação de todas as peças com o tempo de furo igual a 1 segundo. Tanto a serra como a furadeira possuem capacidades limitadas, definidas pela quantidade máxima de tempo (em segundos) que cada uma fica disponível para realizar suas atividades, sendo descontados os tempos de *setup*, carregamento e descarregamento das mesmas. Na indústria considerada há um único turno por dia, de 8 horas (28800 segundos) e dentro deste turno a serra e a furadeira possuem capacidades de 26208 e 10000 segundos, respectivamente. Essas capacidades foram inicialmente utilizadas na resolução do problema de otimização integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque e, posteriormente, auxiliaram na definição do tempo de *setup* das máquinas (parâmetro usado nas simulações).

A próxima etapa do processo produtivo da indústria de móveis é a montagem das peças que compõem os móveis. Aqui, elas são coladas, lixadas e preparadas para as duas etapas seguintes: pintura e acabamento. Nessas duas últimas, as peças são pintadas, secadas em estufas e envernizadas. Uma vez prontas, são embaladas em caixas de papelão com os devidos acessórios e seguem para o estoque, onde ficam armazenadas até a data de entrega. Apesar de serem também etapas importantes do processo produtivo da indústria de móveis, a montagem, pintura, acabamento, embalagem e estocagem dos produtos não foram consideradas na modelagem matemática do problema integrado e nem na etapa de simulação, uma vez que essas etapas não constituem gargalos no processo de produção da indústria de pequeno porte considerada neste trabalho.

## 2.2. Modelagem Matemática do Problema Integrado na Indústria de Móveis

Ghidini (2008) desenvolveu um modelo matemático para representar o problema integrado na indústria de móveis, que segue a ideia de antecipar ou não a produção de certos produtos para o atendimento da demanda, a fim de minimizar o custo total do processo produtivo. O modelo é de otimização linear inteira, determinístico, que integra o PDL com o PCE através de um conjunto de restrições, onde foram considerados dois tipos de máquinas com capacidades limitadas, as quais configuram possíveis gargalos do processo produtivo.

A modelagem também utiliza a técnica de horizonte de planejamento rolante para lidar com

oscilações da demanda ao longo do horizonte de planejamento, no sentido de que apenas o primeiro período do horizonte é suficientemente detalhado e somente as suas decisões são implementadas. Além disso, a demanda total é representada pela soma da carteira de pedidos (parâmetro de entrada) mais uma demanda extra de segurança (variável de decisão adicional). A última molda-se para atender demandas não previstas, permitindo melhor flexibilidade na produção de um produto. Os índices, parâmetros e variáveis utilizados no modelo matemático são apresentados a seguir.

### Índices

$t = 1, \dots, T$  : período do horizonte de planejamento;  
 $e = 1, \dots, S$  : tipo de espessura para a placa  $L \times W$ ;  
 $j = 1, \dots, N^e$  : padrão de corte para a placa de espessura  $e$ ;  
 $i = 1, \dots, M$  : tipo de produto;  
 $\tau = 1, \dots, \Theta$  : subperíodo do primeiro período;  
 $p = 1, \dots, P^e$  : tipo de peça de espessura  $e$  que compõe os produtos.

### Parâmetros

$T$ : número de períodos do horizonte de planejamento;  
 $S$ : número de tipos de espessuras para a placa de dimensões  $L \times W$ ;  
 $N^e$ : número de diferentes padrões de corte para a placa de espessura  $e$ ;  
 $M$ : número de tipos de produtos;  
 $\Theta$ : número de sub-períodos em que o período 1 é subdividido;  
 $P^e$ : número de tipos de peças de espessura  $e$ ;  
 $P$ : número total de tipos de peças que compõem os produtos nas  $S$  espessuras ( $P = P^1 + \dots + P^S$ );  
 $c_{it}$ : custo de manufaturar o produto tipo  $i$  no período  $t$ ;  
 $cp^e$ : custo por unidade da placa de espessura  $e$ ;  
 $h_{it}$ : custo de estoque por unidade do produto tipo  $i$  no final do período  $t$ , para o atendimento da demanda em carteira;  
 $f_{it}$ : custo de estoque por unidade do produto tipo  $i$  no final do período  $t$  para o atendimento da demanda extra;  
 $d_{it}$ : demanda em carteira do produto tipo  $i$  no período  $t$ ;  
 $r_{pi}^e$ : quantidade de peças do tipo  $p$  e espessura  $e$  requerida por unidade do produto tipo  $i$ ;  
 $tc_i$ : tempo gasto para cortar todas as peças que compõem uma unidade do produto tipo  $i$ ;  
 $tf_i$ : tempo gasto para furar todas as peças que compõem uma unidade do produto tipo  $i$ ;  
 $v_j^e$ : tempo gasto para cortar uma placa de espessura  $e$  conforme o padrão de corte  $j$ ;  
 $b_p^e$ : tempo gasto para furar uma peça do tipo  $p$  e espessura  $e$ ;  
 $cs_{j\tau}^e$ : custo de preparação da serra para cortar uma placa de espessura  $e$  conforme o padrão de corte  $j$  no subperíodo  $\tau$ ;  
 $capS_\tau$ : disponibilidade da serra (em horas) no subperíodo  $\tau$ ;  
 $CapS_t$ : disponibilidade da serra (em horas) no período  $t$ ;  
 $capF_\tau$ : disponibilidade da furadeira (em horas) no subperíodo  $\tau$ ;  
 $CapF_t$ : disponibilidade da furadeira (em horas) no período  $t$ ;  
 $a_{pj\tau}^e$ : quantidade de peças do tipo  $p$  no padrão de corte  $j$  para a placa de espessura  $e$  no subperíodo  $\tau$ ;  
 $D_i$ : demanda esperada do produto tipo  $i$  no horizonte de planejamento;  
 $Q$ : quantidade máxima de peças que podem ser cortadas no período 1.

### Variáveis de decisão

$x_{it}$ : quantidade do produto tipo  $i$  a ser manufaturada no período  $t$ ;  
 $E_{it}$ : parcela da demanda extra do produto tipo  $i$  manufaturada no período  $t$ ;  
 $I_{it}$ : quantidade do produto tipo  $i$  estocada no final do período  $t$  para o atendimento da demanda em carteira;  
 $y_{j\tau}^e$ : quantidade de placas de espessura  $e$  cortada conforme o padrão de corte  $j$  no subperíodo  $\tau$ ;  
 $z_{j\tau}^e$ : variável binária de preparação (indica a utilização ou não da serra para cortar a placa de es-

peSSura  $e$  conforme o padrão de corte  $j$  no subperíodo  $\tau$ , ou seja,  $z_j^e = 1$  se  $y_j^e > 0$  ou  $z_j^e = 0$  caso contrário).

**Modelo Matemático**

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^M \sum_{t=1}^T (c_{it}x_{it} + h_{it}I_{it} + f_{it}E_{it}) + \sum_{\tau=1}^{\Theta} \sum_{e=1}^S \sum_{j=1}^{N^e} (cp^e y_{j\tau}^e + cs_{j\tau}^e z_{j\tau}^e) \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad x_{it} + I_{i(t-1)} - I_{it} = d_{it} + E_{it}, \quad i = 1, \dots, M, \quad t = 1, \dots, T; \quad (2)$$

$$\sum_{t=1}^T (d_{it} + E_{it}) = D_i, \quad i = 1, \dots, M; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^M tc_i x_{it} \leq CapS_t, \quad t = 2, \dots, T; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^M tf_i x_{it} \leq CapF_t, \quad t = 2, \dots, T; \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^{N^e} \sum_{\tau=1}^{\Theta} a_{pj\tau}^e y_{j\tau}^e = \sum_{i=1}^M r_{pi}^e x_{i1}, \quad p = 1, \dots, P^e, \quad e = 1, \dots, S; \quad (6)$$

$$\sum_{e=1}^S \sum_{j=1}^{N^e} v_j^e y_{j\tau}^e \leq capS_{\tau}, \quad \tau = 1, \dots, \Theta; \quad (7)$$

$$\sum_{e=1}^S \sum_{j=1}^{N^e} \sum_{p=1}^{P^e} b_p^e a_{pj\tau}^e y_{j\tau}^e \leq capF_{\tau}, \quad \tau = 1, \dots, \Theta; \quad (8)$$

$$y_{j\tau}^e \leq Qz_{j\tau}^e, \quad j = 1, \dots, N^e, \quad e = 1, \dots, S, \quad \tau = 1, \dots, \Theta; \quad (9)$$

$$x_{it}, I_{it}, E_{it} \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad i = 1, \dots, M, \quad t = 1, \dots, T; \quad (10)$$

$$y_{j\tau}^e \geq 0 \text{ e inteiros}, \quad j = 1, \dots, N^e, \quad e = 1, \dots, S, \quad \tau = 1, \dots, \Theta; \quad (11)$$

$$z_{j\tau}^e \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \dots, N^e, \quad e = 1, \dots, S, \quad \tau = 1, \dots, \Theta. \quad (12)$$

No modelo matemático (1)-(12), a Fun o Objetivo (1) minimiza, na primeira parcela, os custos totais do processo produtivo, composto pelos custos de produ o e de estoque dos produtos e dos custos com a demanda extra  $e$ , na segunda parcela, minimiza as perdas das placas cortadas e a prepara o das máquinas. A Restri o (2) e a Restri o (10) de não negatividade garantem que todas as demandas de produtos finais serão atendidas para todos os períodos. A Restri o (3) modela a demanda esperada (previsão adicional) como uma oportunidade de superar as incertezas com oscila o da demanda. A soma da demanda em carteira com a demanda extra (variável de oportunidade ( $E_{it}$ )) para cada produto em todos os períodos   igual a demanda adicional prevista ( $D_i$ ) para cada produto.

O limite de capacidade para a serra e furadeira são modeladas pelas Restri es (4) e (5), respectivamente. Elas evitam que uma quantidade muito grande de produtos seja planejada para ser produzida a partir do segundo período do horizonte de planejamento, impedindo assim que a capacidade dos equipamentos seja violada em cada período. As Restri es (7) e (8) têm referem-se aos limites de capacidade da serra e da furadeira, respectivamente. No entanto, elas garantem a não viola o do tempo total disponível desses equipamentos em cada subperíodo.

A demanda de peças do primeiro   satisfeita pela Restri o (6), a qual fornece uma integra o do PDL com o PCE e d  a quantidade de peças em fun o dos padrões de corte selecionados. Ou seja, ela garante que a quantidade de cada tipo de peça e cada espessura cortada em todos os subperíodos do primeiro período seja igual a quantidade de cada peça e espessura necessária para compor todos os produtos que serão manufaturados no primeiro período. O tempo de prepara o

das máquinas é modelado pela Restrição (9), computando custos na função objetivo quando alguma placa de espessura  $e$  é cortada conforme o padrão de corte  $j$  em cada subperíodo. Por fim, as Restrições (10)-(12) definem o domínio das variáveis de decisão.

Notadamente o modelo matemático (1)-(12) apresenta algumas dificuldades de resolução, tais como a integralidade das variáveis, a presença de variáveis binárias de preparação de máquina e também a quantidade significativa de padrões de corte bidimensional que precisam ser determinados. Em Ghidini (2008) foram desenvolvidas as heurísticas de Decomposição e de Acoplamento para resolver o modelo (1)-(12), as quais tratam essas dificuldades e determinam soluções factíveis de boa qualidade. A heurística de Decomposição resolve primeiro o PDL e usa essa solução para resolver o PCE. Por outro lado, a heurística de Acoplamento resolve o modelo integrado, sem decompô-lo, conforme é descrito brevemente na Seção 2.3. Por apresentar um melhor desempenho, a Heurística de Acoplamento foi escolhida para ser usada neste trabalho.

### 2.3. Heurística de Acoplamento

A heurística de Acoplamento é um processo iterativo composto por um laço externo e um laço interno. A cada iteração, o laço externo resolve um problema de programação linear (problema mestre restrito) que é alimentado por um conjunto reduzido de novas colunas na matriz de restrições. O laço interno envolve a resolução de vários subproblemas de otimização (um para cada tipo de espessura e cada subperíodo), que retornam um conjunto de padrões de corte bidimensionais que irão compor as colunas candidatas a serem inseridas no problema mestre. Note que esse processo iterativo é baseado na técnica de geração de colunas. Vale ressaltar que o problema mestre restrito consiste do modelo matemático (1)-(12) relaxado, com todas as variáveis de decisão consideradas contínuas e as variáveis de *setup* eliminadas. Por outro lado, cada subproblema resolvido no laço interno é um problema de corte bidimensional guilhotinado 2-estágio exato irrestrito. O vetor dual obtido da resolução ótima do problema mestre restrito relaxado compõe a função objetivo do subproblema de otimização. Na primeira iteração da heurística, no laço externo, as colunas do problema mestre restrito são compostas somente pelos padrões de corte bidimensional homogêneos. Uma descrição detalhada desta heurística pode ser encontrada em Ghidini (2008).

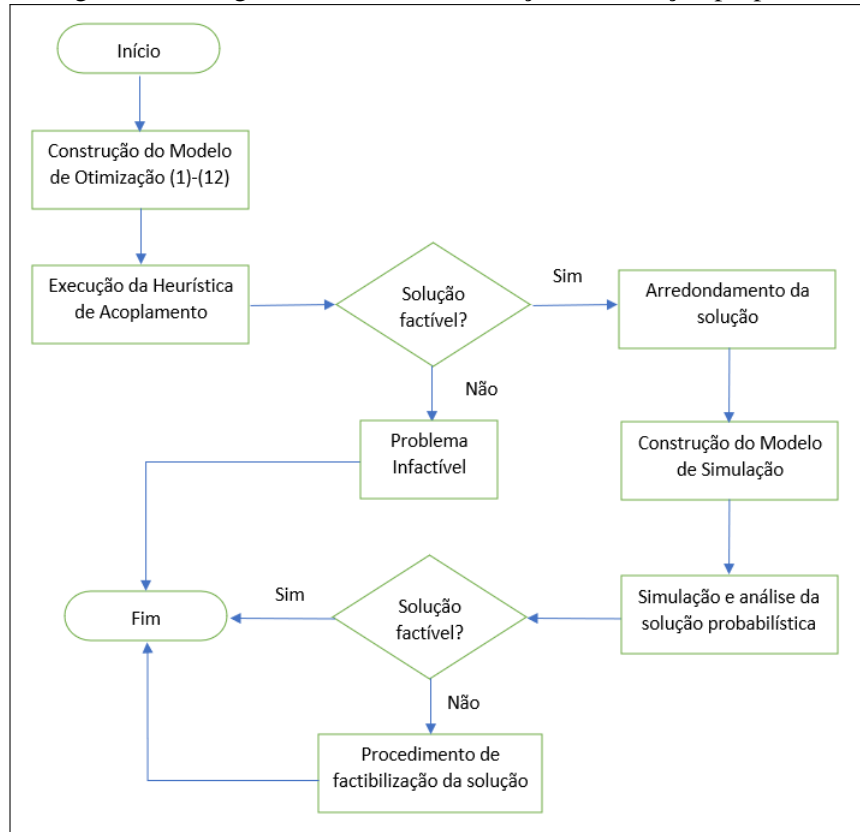
### 3. Metodologia de Solução

Neste trabalho, a abordagem Simulação-Otimização (SO) foi utilizada para tratar e otimizar o processo produtivo da indústria de móveis de pequeno porte. Segundo Amaran et al. (2016), o termo simulação-otimização define as técnicas utilizadas na otimização de simulações estocásticas, onde procura-se encontrar os melhores parâmetros de entrada (*inputs*) de um modelo de simulação para que uma função objetivo, relacionada as saídas (*outputs*) do modelo, seja minimizada ou maximizada. As técnicas de SO utilizadas para otimizar um determinado sistema dependem das características do mesmo, tais como, se ele pode ou não ser representado algebricamente, se ele possui uma ou várias saídas, se seus resultados são determinísticos ou estocásticos e se seus parâmetros são discretos ou contínuos.

Caso um sistema não possua uma descrição algébrica da simulação disponível, a simulação funciona como uma caixa preta em que a avaliação dos resultados da simulação é realizada apenas para um único parâmetro de entrada. Assim, os dados encontrados nas relações entrada-saída são fundamentais na busca dos parâmetros ideais (Amaran et al., 2016). Além disso, se um sistema possui mais de uma saída, o impacto causado na função objetivo por todas as saídas deve ser analisado e considerado na escolha da situação ótima. Por outro lado, quando o sistema possui uma descrição algébrica, esta facilita na interpretação dos resultados das simulações e nos impactos causados pelos parâmetros de entrada. Adicionalmente, é possível que um modelo algébrico relaxado seja resolvido e então simulado para que os resultados deste modelo sejam avaliados por SO. Segundo Figueira (2019), existem diferentes formas de combinar simulação e otimização e não tem uma que seja superior as outras para um conjunto diverso de problemas. Para ele, a melhor



Figura 2: Fluxograma da técnica Simulação-Otimização proposta



Fonte: Elaborada pelos autores.

forma depende das características do problema e quando o problema apresenta uma estrutura em que os modelos analíticos trazem alguma vantagem, esse deve ser o ponto de partida e a simulação será usada para os complementar ou melhorar, na chamada modelagem híbrida. Nesse tipo de modelagem, os modelos analítico e de simulação individualmente geram uma solução completa, porém trocam informação entre si na geração da solução final.

Assim a técnica Simulação-Otimização que está sendo considerada neste artigo é a modelagem híbrida, a qual é composta basicamente por duas etapas principais, a etapa Otimização e a etapa Simulação descritas a seguir.

- **Etapa Otimização:** Esta etapa consiste em resolver o modelo matemático (1)–(12) relaxado utilizando a heurística de Acoplamento descrita na Seção 2.3 e, caso uma solução tenha sido determinada, os valores das variáveis que não são inteiros são arredondados para cima.

- **Etapa Simulação:** Esta etapa consiste em resolver o modelo de simulação criado no FlexSim para representar o processo produtivo da indústria de móveis em questão. Os valores das variáveis de decisão da solução obtida na Etapa Otimização são utilizados como parâmetros de entrada. Caso o modelo simulado detecte alguma infactibilidade na solução probabilística determinada com as simulações, um procedimento de factibilização da solução é aplicado. Este procedimento consiste basicamente em identificar os subperíodos em que acontece a infactibilidade e fazer um redimensionamento no tamanho dos lotes nos subperíodos de forma a satisfazer as restrições de capacidade que foram violadas, ou seja, parte da produção dos subperíodos com infactibilidade é transferida para subperíodos com ociosidade. Na Seção 4.2.4, é mostrado em detalhes um exemplo de como é

aplicado esse procedimento de factibilização da solução.

A Figura 2 ilustra em um fluxograma os detalhes de cada passo da técnica Simulação-Otimização que foi proposta neste artigo para resolver o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque presente no processo produtivo de uma indústria de móveis de pequeno porte. Vale ressaltar que o modelo desenvolvido para simular a produção da indústria de móveis é um modelo de simulação dinâmico, estocástico e discreto. Nele, a produção da indústria é avaliada ao longo de turnos de trabalho, os tempos de processamento e de *setup* das máquinas são funções de probabilidade e todas as variáveis são definidas como discretas.

#### 4. Experimentos Computacionais

Esta seção trata separadamente os testes computacionais realizados em cada uma das duas etapas principais que compõe a técnica Simulação-Otimização.

##### 4.1. Etapa Otimização

Esta etapa foi codificada em linguagem de programação C. Algumas bibliotecas do *solver* CPLEX na versão 12.6.1 e o Visual Studio Community 2017 foram utilizados para implementar a heurística de Acoplamento para a resolução do modelo matemático determinístico relaxado do problema integrado, a qual é baseada no método simplex com geração de colunas.

##### 4.1.1. Descrição dos Parâmetros para o Modelo de Otimização

O processo produtivo da indústria de móveis de pequeno porte, referência para o desenvolvimento deste trabalho, produz móveis retilíneos, em geral, móveis residenciais de dormitório, como por exemplo, armários, cômodas e criados, de diferentes tamanhos e cores. Para os testes foram considerados 4 tipos de produtos, sendo dois tipos de armários (um com 4 portas e outro com 5 portas), uma cômoda e um criado. Para a fabricação destes produtos são utilizados 67 tipos de peças de diferentes tamanhos ( $l \times w$ ) e espessuras, obtidas através do corte das placas de MDF *Medium Density Fiberboard* de uma única dimensão retangular ( $L \times W = 2750\text{mm} \times 1830\text{mm}$ ) e com 6 diferentes espessuras (3mm, 9mm, 12mm, 15mm, 20mm, 25mm).

A Tabela 1 apresenta a matriz de composição dos 4 tipos de produtos dividida conforme a espessura das placas. As Colunas “Peça” identificam qual é a peça considerada, as Colunas “ $l$ ” e “ $w$ ” apresentam as dimensões das peças ( $l \times w$ ) e as demais colunas (“ $i = 1$ ”, “ $i = 2$ ”, “ $i = 3$ ” e “ $i = 4$ ”) informam a quantidade de peças, de um dado tipo, que cada produto contém. Por exemplo, na Coluna “ $i = 1$ ” estão a quantidade de peças de cada tipo, variando conforme as 6 diferentes espessuras, que compõe o produto do Tipo 1. A linha de produção da fábrica possui uma serra, uma furadeira e uma máquina de pintura. Além de uma prensa, uma lixadora e uma máquina de colar bordas usadas nas etapas de montagem e acabamento dos produtos. O horizonte de planejamento considerado é de um mês, dividido em quatro períodos (4 semanas), sendo que o primeiro período é subdividido em cinco subperíodos (5 dias úteis).

A demanda por produtos na indústria em questão oscila durante o ano similar a indústria de móveis em geral, tendo o seu pico em dezembro devido as festas de final de ano e ao 13º salário. A menor demanda ocorre no mês de abril. Assim, conforme os dados apresentados na Tabela 2, para este estudo foi considerada somente a demanda do mês de dezembro, composta pela demanda em carteira de cada semana do mês mais uma demanda esperada (previsão adicional) para todo o mês.

O custo total com matéria prima e com o processo de produção é formado por quatro parcelas, que englobam o custo  $cp^e$  das placas de acordo com a espessura, o custo  $c_{it}$  de manufatura e o custo  $h_{it}$  de estoque para cada produto, além do custo  $f_{it}$  de estoque referente a variável de oportunidade  $E_{it}$  de atendimento da oscilação da demanda para cada produto. A Tabela 3 apresenta o custo unitário de cada placa de acordo com a espessura e o custo de manufatura para cada

Tabela 1: Estrutura dos produtos e dimensões das peças.

Peça	<i>l</i>	<i>w</i>	<i>i=1</i>	<i>i=2</i>	<i>i=3</i>	<i>i=4</i>		Peça	<i>l</i>	<i>w</i>	<i>i=1</i>	<i>i=2</i>	<i>i=3</i>	<i>i=4</i>
<b>Espessura 1 (3mm)</b>														
<b>1</b>	2500	565	6	0	0	0		<b>9</b>	710	535	6	0	0	0
<b>2</b>	647	453	4	0	0	0		<b>10</b>	1062	530	4	0	0	0
<b>3</b>	710	454	2	0	6	0		<b>11</b>	388	377	2	0	6	0
<b>4</b>	454	454	2	2	0	0		<b>12</b>	410	383	2	2	0	0
<b>5</b>	1080	454	5	1	0	0		<b>13</b>	445	213	5	1	0	0
<b>6</b>	530	454	5	4	0	0		<b>14</b>	2000	565	5	4	0	0
<b>7</b>	1050	500	1	4	0	0		<b>15</b>	647	454	1	4	0	0
<b>8</b>	483	215	2	0	0	0		<b>16</b>	428	454	2	0	0	0
<b>Espessura 2 (9mm)</b>														
<b>1</b>	510	450	1	1	0	0		<b>3</b>	433	50	0	0	2	0
<b>2</b>	630	50	0	0	3	0		<b>4</b>	295	50	0	0	3	0
<b>Espessura 3 (12mm)</b>														
<b>1</b>	454	180	8	8	6	0		<b>5</b>	454	135	0	0	4	0
<b>2</b>	635	180	4	4	3	0		<b>6</b>	635	135	0	0	2	0
<b>3</b>	440	65	0	0	2	0		<b>7</b>	390	110	0	0	0	6
<b>4</b>	635	50	0	0	1	0		<b>8</b>	370	110	0	0	0	3
<b>Espessura 4 (15mm)</b>														
<b>1</b>	1049	452	5	0	0	0		<b>13</b>	1047	450	0	4	0	0
<b>2</b>	499	452	5	0	0	0		<b>14</b>	700	200	0	4	0	0
<b>3</b>	452	429	2	0	0	0		<b>15</b>	490	60	0	2	0	0
<b>4</b>	1050	535	2	0	0	0		<b>16</b>	1060	60	0	1	0	0
<b>5</b>	535	500	2	0	0	0		<b>17</b>	440	60	0	4	0	0
<b>6</b>	535	430	2	0	0	0		<b>18</b>	510	60	0	1	0	0
<b>7</b>	700	212	4	0	0	0		<b>19</b>	970	570	0	0	2	0
<b>8</b>	1050	535	0	2	0	0		<b>20</b>	700	75	0	0	1	0
<b>9</b>	430	535	0	2	0	0		<b>21</b>	700	212	0	0	3	0
<b>10</b>	500	535	0	2	0	0		<b>22</b>	700	163	0	0	2	0
<b>11</b>	497	450	0	4	0	0		<b>23</b>	600	440	0	0	0	2
<b>12</b>	497	450	0	1	0	0		<b>24</b>	450	132	0	0	0	3
<b>Espessura 5 (20mm)</b>														
<b>1</b>	2500	60	12	0	0	0		<b>7</b>	430	60	3	0	0	0
<b>2</b>	445	60	12	0	0	0		<b>8</b>	440	60	4	0	0	0
<b>3</b>	445	40	26	0	0	0		<b>9</b>	1060	60	2	0	0	0
<b>4</b>	490	60	1	0	0	0		<b>10</b>	2000	60	0	12	0	0
<b>5</b>	500	60	3	3	0	0		<b>11</b>	444	40	0	22	0	0
<b>6</b>	1050	60	5	3	0	0		<b>12</b>	444	60	0	12	0	0
<b>Espessura 6 (25mm)</b>														
<b>1</b>	430	60	2	0	0	0		<b>3</b>	1050	60	4	2	0	0
<b>2</b>	500	60	4	2	0	0								

Fonte: Ghidini (2008).

Tabela 2: Demandas dos produtos em dezembro.

Produto	1a. Semana	2a. Semana	3a. Semana	4a. Semana	Demanda esperada ( $D_i$ )
1	27	98	17	8	191
2	82	115	32	4	273
3	80	32	5	1	218
4	85	71	19	7	242

Fonte: Elaborada pelos autores.

tipo de produto considerado, o qual é independente do período e determinado da seguinte forma:  $h_{it} = hc_{it}$ , para  $h = 0,0001; 0,001; 0,01; \text{ e } 0,1$ . Já o custo de estoque da variável de oportunidade é determinado por:  $f_{it} = \alpha h_{it}$ , para  $\alpha = 0,5; 1; \text{ e } 1,5$ . Vale ressaltar que a variação de  $h$  e  $\alpha$  permite gerar diferentes classes de problemas.

A quantidade máxima de placas que a serra consegue cortar ao mesmo tempo é equivalente a 60mm. Por exemplo, se placas de 15mm de espessura precisam ser cortados, então podem ser colocadas 4 placas na serra para serem cortadas.

Tabela 3: Preços das placas e dos produtos.

Matéria prima ( $cp^e$ )		Manufatura ( $c_{it}$ )	
Espessuras	Custo unitário (R\$)	Produto	Custo unitário (R\$)
1	23,97	1	259,95
2	47,22	2	212,55
3	61,12	3	62,67
4	72,85	4	20,22
5	98,65		
6	138,73		

Fonte: Elaborada pelos autores.

#### 4.1.2. Solução do Modelo de Otimização

A seguir é apresentada a solução ótima obtida na Etapa Otimização para um exemplar do modelo matemático de otimização relaxado, pertencente a uma classe com demanda alta e custos de estoque baixos, assim como todas as demais informações que são necessárias na Etapa Simulação. Note que apesar da solução encontrada dimensionar os lotes para todos os períodos, ela fornece informações mais detalhadas somente para o primeiro período e seus subperíodos, uma vez que a técnica de horizonte de planejamento rolante está sendo usada.

- Custo total (função objetivo): R\$239.774,60.
- Número de placas utilizadas no primeiro período: 1736,78 placas.
- Número de iterações da Heurística de Acoplamento: 42 iterações.
- Número de padrões de corte gerados durante a resolução: 495 padrões de corte.

A Tabela 4 contém a quantidade que deve ser produzida de cada um dos produtos demandados em cada um dos períodos do horizonte de planejamento. Observe que a produção de certos períodos foi antecipada para o Período 1, devido aos baixos custos de estocagem e também porque havia recursos disponíveis. A solução obtida contém 68 padrões de corte diferentes, utilizados em quantidades que variam desde 0,41 até 291,98 vezes. Existem 3 padrões de corte homogêneos na solução final, que produzem as peças 14, 21 e 51. Todas as outras peças são produzidas apenas por padrões não homogêneos.

Tabela 4: Quantidade de produção por período.

Produto	Período 1	Período 2	Período 3	Período 4	Total
1	146,06	0	10,91	34,03	191
2	114,08	82,92	32	44	273
3	108,98	3,02	106	0	218
4	212,00	0	0	0	212

Fonte: Elaborada pelos autores.

Todas as informações dos padrões de corte utilizados, assim como suas quantidades, os subperíodos em que são produzidos e a iteração na qual foram gerados, foram organizadas de acordo com a espessura da placa de MDF. Para ilustrar essa organização, a Tabela 5 apresenta os dados referentes a Espessura 6 de 25mm. Cada linha da tabela fornece a quantidade de vezes que

o padrão de corte será cortado e a quantidade de cada tipo de peça presente neste padrão. Por exemplo, o padrão de corte 420 é utilizado 3,74 vezes e, para cada placa cortada neste padrão, são produzidas 30 peças do Tipo 66 e 60 peças do Tipo 67.

Tabela 5: Informações resultantes na solução para os padrões de corte (Espessura 6).

Nº padrão de corte	Quantidade	Subperíodo	Iteração	65	66	67
420	3,74	2	0	0	30	60
480	1,73	2	2	0	150	0
421	9,8	3	0	0	30	60
453	2,43	5	1	120	60	0

Fonte: Elaborada pelos autores.

## 4.2. Etapa Simulação

Nesta etapa foram realizadas diversas simulações do processo produtivo da indústria de móveis representado no modelo de simulação construído com base na solução obtida na Etapa Otimização utilizando o simulador FlexSim na versão 18.2.2. O objetivo é verificar a qualidade da solução obtida na etapa Otimização, otimizá-la ainda mais se for possível e também factibilizá-la caso seja necessário. As simulações foram realizadas somente para os 5 subperíodos do primeiro período devido ao horizonte rolante de planejamento considerado quando foi feita a modelagem matemática do problema integrado da Etapa Otimização.

### 4.2.1. Parâmetros para o Modelo de Simulação

Para construir o modelo de simulação foram definidos os tempos para cortar cada um dos padrões de corte que aparecem na solução do modelo de otimização, a quantidade de peças produzidas por eles, o tempo de furar cada peça e os tempos de *setup* das máquinas (serra e furadeira). Além disso, foram dimensionados os lotes de cada padrão de corte necessário para que toda a quantidade do padrão seja produzida, levando em consideração que para cada espessura a serra consegue cortar simultaneamente diferentes quantidades de placas.

Na Etapa Simulação, o tempo total de *setup* é definido como sendo todo o tempo de preparação das máquinas para a realização de suas tarefas, como por exemplo o ajuste das posições das facas na serra para um determinado padrão de corte ou ajustes da furadeira conforme o *layout* de furo de uma certa peça. Os valores de *setup* da serra e da furadeira usados no modelo de simulação foram determinados da seguinte forma: uma vez obtido o tempo total de *setup*, ao calcular a diferença entre o tempo total disponível para executar as tarefas e a respectiva capacidade da máquina, este foi dividido pela quantidade de vezes que cada máquina precisa realizar uma preparação (na troca de padrões de corte na serra e na troca de peças para a furadeira). Considerando o problema teste resolvido na Etapa Otimização, para o caso da serra, sabendo que sua capacidade é de 26208 segundos para um subperíodo de 28800 segundos então 2592 segundos é o tempo de *setup* por subperíodo. Em um período, este tempo é multiplicado por 5, resultando em 12960 segundos, que dividido pelo número total de padrões de corte diferentes, no caso 68, resulta em 190,59 segundos o tempo de *setup* da serra, o qual foi usado como parâmetro para o modelo de simulação. Similarmente, foi encontrado o valor do tempo de *setup* para a furadeira como sendo 2,05 segundos.

O tempo para processar o corte de cada peça foi calculado a partir do tempo de corte dos padrões de corte homogêneos. Note que o tempo total dos cortes individuais seguindo um determinado padrão de corte na placa constitui o tempo de corte desta placa. Por exemplo, o padrão de corte 424 é composto por 8 peças do Tipo 5 e 4 peças do Tipo 6, portanto o tempo de corte de uma placa para este padrão é  $8 \times 2,44 + 4 \times 0,98 = 23,4$  segundos. Este padrão de corte é utilizado em 87 placas, então o tempo total de corte com o padrão 424 é igual a 2035,8 segundos. O tempo de

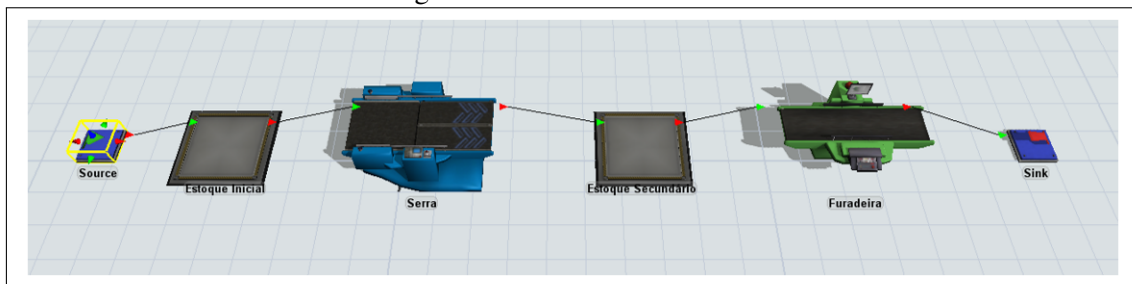
furo depende da quantidade de placas que serão cortadas. No modelo de otimização do problema integrado foi considerado que são necessários 5 segundos para furar todas as peças de um padrão de corte. Ao todo são geradas 45915 peças a partir de 1774 placas, assim o tempo de furo de todas as placas é igual a  $1774 \times 5 = 8870$  e de uma peça é igual a  $8870 \div 45915 = 0,19$  segundos. Uma vez que 2,05 segundos é o tempo de *setup* da furadeira, o tempo desta etapa de produção é composto majoritariamente pelo tempo de *setup*, equivalente a 91,5% do tempo consumido por uma peça.

Os lotes de padrões de corte foram dimensionados considerando a quantidade mínima de vezes que um padrão de corte específico precisaria passar pela serra, sendo que a serra pode cortar várias placas simultaneamente. Por exemplo, o padrão de corte 424 de Espessura 1, utilizado 87 vezes (arredondado para cima), pode ter até 20 placas cortadas simultaneamente, então são necessários 5 lotes, sendo 4 lotes com 20 placas e 1 lote com 7 placas.

#### 4.2.2. Construção do Modelo no Simulador

Esta seção contém o passo a passo de como construir o modelo de simulação no FlexSim. A Figura 3 mostra os seis elementos que compõem o modelo: uma *source* (origem da matéria prima), um estoque inicial, uma serra, um estoque secundário, uma furadeira e por fim uma *sink*, onde o modelo acaba. Na situação real, depois da furadeira as peças passam para o setor de pintura, porém esta etapa não está sendo considerada.

Figura 3: Modelo do FlexSim.



Fonte: Elaborada pelos autores.

Para facilitar a programação da serra foi utilizada a função “Global Table” para representar uma tabela cujas linhas representam os lotes de produção e cada coluna uma informação de cada lote. Desta forma, dividido em colunas, estão os tempos de *setup* e processamento, assim como a quantidade de peças geradas no corte de uma placa MDF para cada lote de padrão de corte. Esta tabela, criada com o nome “Sequência”, tem então a função de indicar quais serão os parâmetros de corte, fazendo com que toda a simulação esteja de acordo com a solução encontrada na Etapa Otimização.

A indústria de móveis em estudo não tem restrição de matéria-prima, dessa forma foi considerado um estoque inicial suficientemente grande para suprir toda demanda de placas de madeira. No simulador, para facilitar a programação, a quantidade de matéria-prima foi configurada para chegar uma por vez, em intervalos de tempo pequenos o suficiente (2 segundos) para que nunca falem placas. Com a chegada incremental unitária de placas, foram criadas dois *labels* diferentes para que cada placa criada tivesse uma representação com valores variando de forma crescente, de 1 até  $j$ , e indicasse com qual padrão de corte aquela placa seria cortada. O primeiro *label* chamado “Quantidade” indica quantas peças foram criadas na placa tendo valor inicial -1 e, na criação de uma nova peça, ele aumenta de valor em uma unidade. O segundo *label*, para as placas (*flow-items*), chamado “PadrãoDeCorte” indica quando uma placa sai da *source* e tem o valor conforme a seguinte fórmula:  $\text{fmod}(\text{current.Quantidade}, 279) + 1$ . A função *fmod* representa o resto da divisão do *label* “Quantidade” por 279, permitindo que, após todos os padrões de corte serem criados, ele retorne para o início. A primeira placa terá o *label* “PadrãoDeCorte” com valor igual 1, a segunda

placa com valor igual 2 e, assim, sucessivamente até o valor 279 quando então ele retornará ao início.

Os estoques são representados nos modelos por filas (*queue*), onde os itens (placas ou peças) aguardam até que a próxima etapa do processo esteja disponível. Neste recurso, é possível criar lotes (*batches*), limitar sua capacidade e definir para qual saída cada item vai. A disciplina da fila considerada na simulação é *First In First Out* (FIFO), em que o primeiro item a entrar no recurso será o primeiro a sair. Uma vez que no nosso estudo de caso o estoque inicial pode ser configurado em quantidade ilimitada, e foi programado para criar um item de entrada a cada 2 segundos, acaba resultando em um acúmulo de itens (placas) no estoque inicial, então foi limitado a quantidade máxima de itens neste estoque em 20 unidades, evitando uma poluição visual desnecessária nesta etapa.

A serra foi modelada no FlexSim através do recurso “Separator”, que tem a função de desfazer um lote ou dividir um item em vários. Neste recurso, devem ser definidos os tempos de *setup* e de processamento, o destino dos itens e, caso ele divida itens, quantos itens são gerados nesse processo. Como a serra segue os padrões de corte já definidos, cada um com um tempo de corte e uma quantidade de peças geradas, a tabela global citada anteriormente auxilia nesta configuração. A serra é então programada para ler o *label* “PadrãoDeCorte” e, com o valor encontrado, identificar qual linha da tabela contém as informações deste padrão. Por exemplo, a primeira placa possui o *label* “PadrãoDeCorte” igual a 1, assim esta placa será cortada conforme as informações da primeira linha da tabela global “Sequência”, com tempo médio de corte igual 468 segundos e tempo médio de *setup* igual 0 segundos, uma vez que não houve preparação da serra para esse padrão de corte, gerando 240 itens. Esta configuração é realizada utilizando a função “Global Lookup Table”, onde a tabela (Table) é “Sequência”, a linha (Row) é definida como “item.PadroDeCorte” para que seja consultado o valor do *label* “PadraoDeCorte”, e a coluna (Column) contém a informação desejada, que no caso do exemplo anterior é 1.

Para adicionar variabilidade aos tempos de corte, cada tempo fixo da tabela “Sequência” foi transformado em uma curva de distribuição normal, com média igual ao tempo de corte do padrão de corte e o desvio padrão igual a 20% deste valor. No conjunto de análises, também foram avaliados os cenários com esta porcentagem igual a 10% e 30%, de forma a medir o impacto da padronização e redução da variabilidade de processos nos resultados finais da produção. Esta transformação foi realizada modificando o código dos tempos de *setup* e processamento.

A serra também foi configurada para dividir as placas (*split*), com a quantidade de peças gerado sendo a informação da Coluna 5 da tabela nomeada como “Sequência”. Nesta etapa do processo produtivo também foram adicionadas *triggers* para que, quando o processo acabasse, as peças finais cortadas tivessem seu tamanho reduzido e para que a serra parasse de funcionar quando a última placa daquele subperíodo saísse da mesma. Assim como o estoque inicial, o estoque intermediário também é representado por uma fila, onde as peças aguardam para serem furadas através da sequência FIFO. Neste ponto, a única alteração nas configurações usuais foi o aumento da capacidade do estoque, inicialmente em 1000 peças, para 100000 peças, evitando que esta etapa atrase a produção.

A furadeira foi modelada no FlexSim pelo recurso fixo “Processor”, que retém um item (peça) por determinado tempo enquanto este é processado, no caso furado. Neste recurso, assim como no “Separator”, são definidos os tempos de *setup* e processamento conforme curvas de distribuição normal e valores determinados conforme descrito no início desta seção. A *sink* é o recurso que representa o fim do modelo, sendo o local onde os peças vão quando já estão acabadas. É possível configurar este recurso para reciclar uma porcentagem dos itens, o que representaria peças com defeitos que necessitam voltar para a produção. Além disso, é possível contabilizar quanta peças foram produzidas em determinado período de tempo ao ver quantas entraram no *sink* neste período.

Tabela 6: Informações dos subperíodos para a Etapa Simulação.

Subperíodo	Peças	Placas	Padrões	Lotes
1	13315	451	22	71
2	10548	190	12	50
3	11384	675	12	72
4	1368	160	4	19
5	9300	348	18	67

Fonte: Elaborada pelos autores.

### 4.2.3. Solução do Modelo de Simulação

Esta seção apresenta os resultados obtidos em diferentes cenários, que foram testados somente para cada um dos subperíodos do primeiro, uma vez que a técnica de horizonte de planejamento rolante foi usada ao construir o modelagem matemático para representar o problema integrado, o qual é resolvido na Etapa de Otimização e cujas informações do processo de corte são detalhadas somente para o primeiro período.

Os cenários foram criados alterando consecutivamente um dos parâmetros do modelo de simulação por vez, permitindo maior precisão na comparação entre os resultados. Os parâmetros considerados foram: os diferentes desvios padrão dos tempos de processamento e *setup*, os diferentes *streams* das curvas de distribuição normal (curvas normais diferentes, porém com o mesmo comportamento) e as alterações na ordem dos padrões de corte dentro de um subperíodo. No caso de alguma solução ser infactível, um procedimento de factibilização é executado, conforme explicado na Seção 4.2.4 para o problema teste.

Em cada cenário, a simulação foi realizada até o tempo de um turno (28800 segundos) ser atingido. Então, foram avaliadas a quantidade de placas cortadas (*input* serra), a quantidade de peças cortadas (*output* serra), quantas dessas peças foram furadas (*output* furadeira), qual foi a quantidade máxima de peças no estoque intermediário (após serra e antes da furadeira) e, continuando a simulação, foi encontrado o tempo total necessário para produzir todas as peças do primeiro período.

A Tabela 6 fornece as informações utilizadas em cada um dos subperíodos do primeiro período do horizonte de planejamento, as quais foram determinadas de acordo com a solução obtida na Etapa Otimização. A Coluna Subperíodo mostra qual é o subperíodo considerado, a Coluna Peças fornece a quantidade de peças a ser produzidas, a Coluna Placas contém o número de placas de MDF a serem cortadas no subperíodo, a Coluna Padrões mostra o número de diferentes padrões de corte utilizados e a Coluna Lotes fornece o número de lotes dos padrões de corte. Por exemplo, na primeira linha da Tabela 6 temos que para o primeiro subperíodo está programado a produção de 13315 peças por meio do corte de 451 placas de MDF, considerando 22 padrões de corte diferentes divididos em 71 lotes de padrões de corte.

Na primeira simulação, a sequência de corte para esses padrões foi escolhida aleatoriamente. O desvio padrão da curva de distribuição normal utilizada para simular os tempos de processamento e *setup* foi considerado igual a 10%, 20% e 30% da média dos respectivos tempos, e cada cenário foi avaliado 3 vezes mudando-se a *stream* das curvas, obtendo assim os três blocos de resultados numéricos apresentados na Tabela 7. Note nessa tabela que em todos os cenários do primeiro subperíodo o tempo de um turno não é suficiente para a produção de todas as peças. Desta forma, o dimensionamento de lotes previamente definido, ao ser arredondado para cima, contribui para gerar uma solução infactível, que ultrapassa as capacidades tanto da serra quanto da furadeira. Como pode ser visto na Figura 4, quando o tempo de um turno acaba, a serra ainda está processando placas do primeiro subperíodo e o estoque intermediário ainda possui 1466 peças a serem furadas. Essa infactibilidade encontrada durante a simulação ocorre majoritariamente por conta do arredondamento para cima dos valores da quantidade de placas cortadas. A Figura 4



ilustra o exemplo de um dos cenários (Simulação 4), onde o tempo total do turno é atingido sem que toda a produção planejada para o primeiro subperíodo se complete.

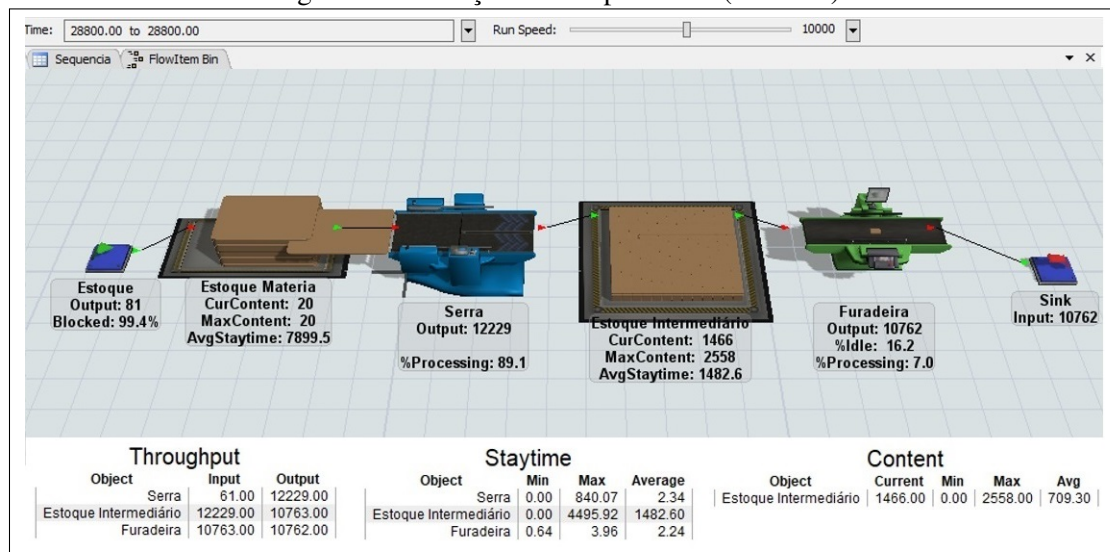
Considerando ainda os resultados apresentados na Tabela 7, é possível perceber que entre uma simulação e outra, alterando apenas as curvas de distribuição normal utilizadas para os tempos de processamento e *setup*, são encontradas diferentes soluções para o modelo. Isso já é esperado, por conta da aleatoriedade que uma curva estatística possui. Ademais, as simulações onde o desvio padrão é maior possuem uma maior diferença entre os resultados de uma e outra simulação, já que nestes casos os tempos tendem a variar mais entre um processamento e outro. É por este motivo que o melhor e o pior cenário (situações com menor e maior tempo total necessário para a produção de todas as peças) se encontram nas simulações com maior desvio padrão. O aumento do desvio padrão, possivelmente ocasionado por uma falta de padronização de atividades, resulta em uma maior imprevisibilidade do modelo proposto e de quais serão os resultados encontrados. Como na prática sempre há uma imprevisibilidade e uma variação nas atividades de uma linha de produção, incluir esta variação em um modelo de simulação é de suma importância para aproximar mais o

Tabela 7: Resultados do Subperíodo 1 considerando diferentes desvios padrão.

Subperíodo 1						
Nº da Simulação	Stream	Input Serra	Output Serra	Output Furadeira	Estoque Max Cont.	Tempo Total
<b>Desvio Padrão 10%</b>						
1	1	60	12161	10746	2526	35443,48
2	2	61	12229	10973	2455	34702,09
3	3	59	12093	10743	2464	35911,99
<b>Desvio Padrão 20%</b>						
4	1	61	12229	10763	2558	35284,25
5	2	61	12229	11210	2414	33800,28
6	3	59	12093	10752	2436	35911,99
<b>Desvio Padrão 30%</b>						
7	1	61	12229	10777	2590	35124,73
8	2	62	12297	11447	2375	32784,53
9	3	59	12093	10763	2410	36528,58

Fonte: Elaborada pelos autores.

Figura 4: Simulação 4 - Subperíodo 1 (FlexSim).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Tabela 8: Resultados do Subperíodo 1 com diferentes ordens dos padrões de corte.

<b>Subperíodo 1 - Desvio Padrão: 20%</b>						
<b>Nº da Simulação</b>	<b>Stream</b>	<b>Input Serra</b>	<b>Output Serra</b>	<b>Output Furadeira</b>	<b>Estoque Max Cont.</b>	<b>Tempo Total</b>
<b>Sequência aleatória para os padrões de corte</b>						
1	1	61	12229	10763	2558	35284,25
2	2	61	12229	11210	2414	33800,28
3	3	59	12093	10752	2436	36220,15
<b>Sequência por quantidade de peças para os padrões de corte</b>						
4	1	58	11136	11136	3081	35126,76
5	2	59	11204	11204	2902	34997,48
6	3	56	11000	10978	2892	37004,94
<b>Sequência por tempo de corte para os padrões de corte</b>						
7	1	63	12790	12261	3468	34853,04
8	2	62	12730	12085	3406	35227,97
9	3	63	12790	12330	3470	35310,81

Fonte: Elaborada pelos autores.

modelo da realidade. Também é fundamental que sejam realizadas diversas simulações com os mesmos parâmetros e que sejam avaliadas as variações nas soluções encontradas.

Adicionalmente, foram testadas diferentes lógicas para ordenar a sequência dos 22 padrões de corte do primeiro período para verificar a sensibilidade e alterações dos resultados. As primeiras três simulações, cujos resultados aparecem na Tabela 7, foram realizadas sem considerar nenhuma ordem, ou seja, uma escolha aleatória. Em seguida, foi analisado o desempenho considerando que os padrões de corte encontram-se em ordem decrescente em relação a quantidade de peças gerada por eles e, por fim, em ordem crescente em relação ao tempo de corte de cada padrão de corte. Ao ordenar os padrões de corte pelas peças geradas, espera-se que haja uma menor quantidade de peças no estoque intermediário ao final do turno, já que os últimos padrões de corte possuem uma menor quantidade de peças para serem furadas. Por sua vez, ao ordenar a sequência por tempo de corte dos padrões de corte, espera-se que ao final do turno mais placas tenham sido cortadas, já que as mais rápidas são cortadas antes. Os resultados encontrados por estas simulações para o primeiro subperíodo estão na Tabela 8.

Conforme esperado, a quantidade de peças no estoque intermediário nas Simulações 4, 5 e 6, calculada pela diferença do número de peças cortadas e furadas, é bem pequena, sendo 0 em dois casos. Entretanto, uma menor quantidade de placas é cortada nestes cenários, com os valores do *input* da serra abaixo de 60 e valores totais de peças furadas abaixo de 12000. Nas Simulações 7, 8 e 9, com a sequência de padrões ordenadas pelo tempo de corte, uma maior quantidade de placas é de fato cortada, com os *inputs* da serra acima de 62. Como consequência disto, a quantidade de peças geradas e furadas também aumenta, para mais de 12000 peças. Em todas as simulações realizadas neste primeiro subperíodo, o tempo ocioso da serra foi baixo, perto de 0, 5% do tempo total. Isso significa que mesmo com a serra trabalhando durante todo o tempo ela não consegue cortar todas as placas necessárias, sendo ela o gargalo do problema neste subperíodo. Assim, possíveis soluções seriam a de adicionar mais uma serra ou redimensionar os lotes.

As simulações do Subperíodo 2 foram realizadas todas com o desvio padrão fixo em 20% e com alterações na sequência dos padrões de corte, de forma similar ao Subperíodo 1. Todas as 50 placas são cortadas dentro do intervalo de um turno, porém, conforme mostram a Tabela 9 e a Figura 5, mais de 1000 peças que já foram serradas não conseguem ser furadas antes do final deste turno. Este é o caso para as Simulações 1, 2 e 3, onde a sequência para os padrões de corte é aleatória.

Uma informação relevante é que o tempo de ociosidade da furadeira nestes casos é de mais

Tabela 9: Resultados do Subperíodo 2 com diferentes ordens dos padrões de corte.

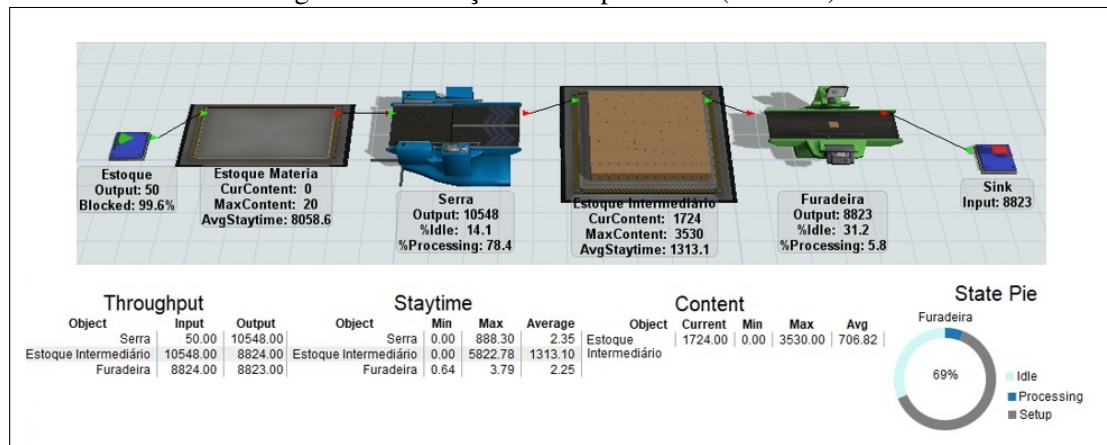
Subperíodo 2 - Desvio Padrão: 20%								
Nº da Simulação	Stream	Input Serra	Output Serra	Idle Serra	Output Furadeira	Idle Furadeira	Estoque Max Cont.	Tempo Total
<b>Sequência aleatória para os padrões de corte</b>								
1	1	50	10548	14,10%	8823	31,20%	3530	32642.21
2	2	50	10548	13,10%	8555	33,50%	3711	33263.63
3	3	50	10548	10,50%	8473	34,20%	3425	33446.76
<b>Sequência por quantidade de peças para os padrões de corte</b>								
4	1	50	10548	0,60%	10548	7,30%	4175	25511,07
5	2	50	10548	0,60%	10548	7,30%	3985	25640,61
6	3	50	10548	0,60%	10548	5,50%	4169	25020,63
<b>Sequência por tempo de corte para os padrões de corte</b>								
7	1	50	10548	1,40%	10548	7,70%	4021	25635,73
8	2	50	10548	2,10%	10548	10,70%	3746	26513,64
9	3	50	10548	1,70%	10548	7,70%	4008	25518,60

Fonte: Elaborada pelos autores.

de 30% do tempo total e, dado que no final do turno há uma demanda elevada da mesma, é provável que a sequência dos padrões de corte esteja ruim, produzindo muitas peças no final do turno, sem que haja tempo hábil para que elas sejam furadas. Portanto, alterando-se a sequência dos padrões de corte para que não ocorra esse acúmulo de peças em um momento tardio do turno, sendo que a furadeira fica ociosa por um longo período, é possível produzir todas as 10548 peças deste subperíodo em menos de 26600 segundos. Considerando os resultados da Tabela 8, pode-se dizer que o tempo ocioso da serra nas Simulações 4 a 9 foi bem menor do que nas três primeiras simulações, com um tempo médio de ociosidade em torno de 1,15%. Isso porque a execução acaba antes do final do tempo de um turno (28800s) e o tempo que a serra ficaria sem funcionar não é considerado.

No Subperíodo 3, foram verificados quais os impactos de se alterar a sequência dos padrões de corte dentro dele. Em nenhum dos cenários avaliados foi possível produzir todas as peças dentro do tempo disponível. A serra foi utilizada 100% do tempo, porém a quantidade de placas planejadas para este subperíodo foi muito elevada, com o tempo de corte das placas ultrapassando o tempo de um turno. Além da serra não conseguir cortar todas as placas necessárias para obter as peças, a furadeira ao final do tempo de simulação ainda tem uma demanda de peças para todas as

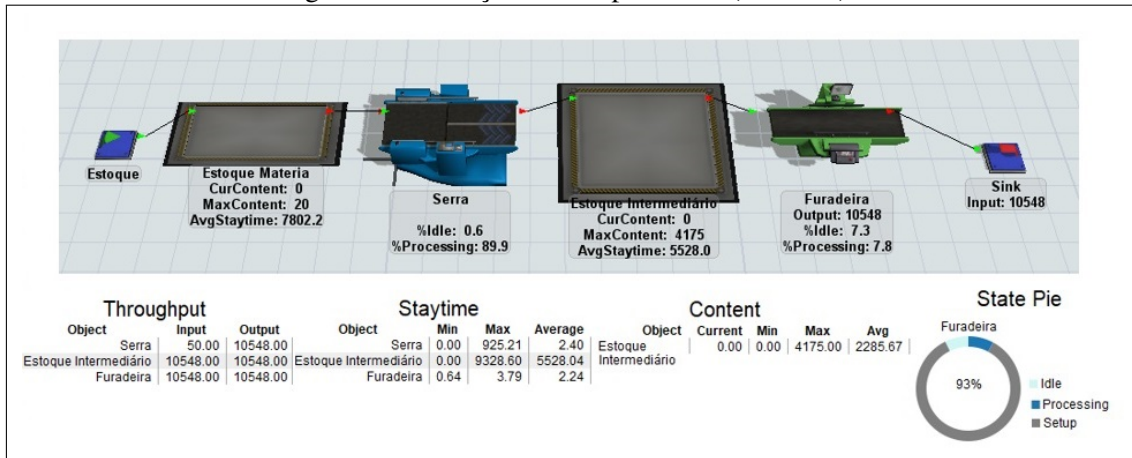
Figura 5: Simulação 1 - Subperíodo 2 (FlexSim)



Fonte: Elaborada pelos autores.

simulações com exceção das Simulações 4 (ilustrada na Figura 6), 5 e 6, onde a sequência busca utilizar melhor a capacidade da furadeira.

Figura 6: Simulação 4 - Subperíodo 2 (FlexSim).



Fonte: Elaborada pelos autores.

Realizando simulações similares a dos subperíodos anteriores, verificou-se no Subperíodo 4 que, em todas elas, foi possível produzir todas as peças em um tempo bem inferior ao de um turno, ou seja, em torno de 10000 segundos, o que equivale a 35% dos 28800 segundos disponíveis. O que torna possível avaliar uma redistribuição do dimensionamento de lotes para que alguns padrões de corte dos subperíodos que estão ineficazes (ultrapassando o tempo limite) sejam transferidos para este subperíodo que possui muito tempo ocioso. O Subperíodo 5, assim como os Subperíodos 1 e 3, possui sua capacidade ultrapassada devido ao arredondamento realizado sobre os valores das variáveis da solução do problema integrado.

#### 4.2.4. Factibilização da Solução

Com os resultados obtidos pelas simulações, foi possível verificar que três dos cinco subperíodos do primeiro período do horizonte de planejamento estão ineficazes, com o tempo necessário para o processamento das placas na serra ultrapassando a sua capacidade. Por este motivo um redimensionamento de lotes será aplicado de forma a factibilizar a solução.

Enquanto os Subperíodos 1, 3 e 5 estão sobrecarregados, o Subperíodo 4 possui muito tempo ocioso, com a serra utilizando apenas 35% de sua capacidade. Desta forma, o corte de algumas placas, previamente planejado para os Subperíodos 1, 3 e 5, serão transferidos para o Subperíodo 4 e será avaliado então a factibilidade da nova solução. Para o Subperíodo 1, a Tabela 7 mostra que, ao ordenar em ordem decrescente os padrões de corte pela quantidade de itens produzidos, todas as peças até o lote 56 conseguem ser produzidas dentro do intervalo de tempo de um turno. Assim, os 15 lotes de padrões de corte restantes deste subperíodo serão transferidos para o Subperíodo 4. Para o Subperíodo 3, até o lote 69 pode ser produzido dentro deste subperíodo, restando 3 placas a serem cortadas no final do turno. Estas placas também serão transferidas para o Subperíodo 4. No Subperíodo 5, é possível produzir 53 lotes dentro do turno e, então, os 14 lotes restantes também serão transferidos para o Subperíodo 4. Assim, no novo Subperíodo 4 serão produzidas 5007 peças, enquanto antes eram produzidas 1368, utilizando 296 placas de MDF em 51 lotes de padrões de corte.

Foram realizadas 3 simulações com o Subperíodo 4 redimensionado para verificar se com o acréscimo de peças a serem produzidas ele continuaria factível. Os resultados mostraram que ele continuaria factível, produzindo todas as peças planejadas em menos de 24000 segundos e ainda possuiria uma capacidade não utilizada de aproximadamente 15%.

## 5. Conclusões

A principal contribuição deste artigo envolve utilizar a técnica Simulação-Otimização para tratar o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque presente na indústria de móveis considerando como estudo de caso uma indústria de pequeno porte. Esses dois problemas de otimização foram estudados com detalhes no contexto integrado para representar o processo de produção. Este artigo também leva em consideração as incertezas dos parâmetros nesse tipo de indústria.

Na etapa de otimização, uma versão relaxada de um modelo de otimização linear inteiro proposto para representar o problema integrado de dimensionamento de lotes e corte de estoque foi resolvida usando uma heurística baseada em geração de colunas, e em seguida os valores não inteiros das variáveis na solução ótima foram arredondadas. Essa solução final factível para o problema forneceu as variáveis e os dados que foram utilizados na Etapa Simulação, na qual um modelo de simulação foi construído usando o simulador FlexSim. O objetivo foi simular o processo produtivo da indústria de móveis, avaliar a viabilidade da solução encontrada na Etapa Otimização, identificar a existência de ineficiências e gargalos no processo produtivo, além de identificar potenciais melhorias para a indústria como um todo. Ao final da Etapa Simulação, se necessário, é aplicado um procedimento de factibilização da solução.

De acordo com os experimentos realizados, a partir de uma solução obtida para um exemplar do modelo de otimização e considerando diversos cenários criados ao utilizar diferentes parâmetros de entrada, foi possível verificar que a simulação detecta as ineficiências da solução determinística do modelo de otimização, identifica onde estão os gargalos do processo produtivo da indústria, e permite entender como os parâmetros de entrada interferem no sistema e como eles podem ser alterados em busca da otimização do processo produtivo. A utilização de parâmetros estocásticos para tratar as incertezas inerentes ao problema, como funções de probabilidade nos tempos de processamento e *setup* também foram fundamentais para aproximar o modelo da realidade prática e poder avaliar como um mesmo sistema pode se comportar diferente apenas pela aleatoriedade dos dados. Com este estudo foi possível entender a importância de uma padronização em uma linha de produção e como deixar um sistema mais previsível e controlável.

Finalmente, pode-se afirmar que a utilização da técnica Simulação-Otimização no processo produtivo pode trazer vários ganhos, além de auxiliar na tomada de decisão dos gerentes de processo, pois, caso aconteça ou seja necessário realizar alguma alteração no setor produtivo da indústria, como por exemplo, aumentar a demanda de produtos ou reduzir o número de máquinas disponíveis, a aplicação imediata da técnica permite avaliar a influência que estas mudanças trarão para a empresa de forma rápida e com custo baixo.

**Agradecimentos.** Os autores agradecem a FlexSim Brasil pela gentileza de ceder uma licença da versão completa do simulador, que foi fundamental para o desenvolvimento dessa pesquisa e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo 309925/2021-5) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (BIOS - Brazilian Institute of Data Science, processo 2020/09838-0) pelo suporte parcial.

## Referências

- Alem, D. J. e Morabito, R. Production planning in furniture settings via robust optimization. *Computers & Operations Research*, v. 39, n. 2, p. 139–150, 2012.
- Amaran, S., Bury, S. J., Sahinidis, N. V., e Sharda, B. Simulation optimization: a review of algorithms and applications. *Ann Oper Res*, v. 240, p. 351–380, 2016.
- Araujo, S. e Arenales, M. Problema de dimensionamento de lotes monoestágio com restrição de

capacidade: modelagem, método de resolução e resultados computacionais. *Pesquisa Operacional*, v. 20, n. 2, p. 287–306, 2000.

Arbib, C. e Marinelli, F. Integrating process optimization and inventory planning in cutting-stock with skiving option: an optimization model and its application. *European Journal of Operational Research*, v. 163, n. 3, p. 617–630, 2005.

Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R., e Yanasse, H. *Pesquisa Operacional para Engenharia*. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2007.

Ayres, A. O. C., Campello, B. S. C., Oliveira, W. A., e Ghidini, C. T. L. S. A bi-integrated model for coupling lot-sizing and cutting-stock problems. *OR Spectrum*, v. 43, n. 4, p. 1047–1076, 2021.

Azadivar, F., Jiao, T., e Truong, Y. A decision support system for fisheries management using operations research and systems science approach. *Expert Systems with Applications*, v. , n. 36, p. 2971–2978, 2009.

Bianchi, T. J., Ezawa, L., Fioroni, M. M., Franzese, L. A. G., Jr, G. M., e Pinto, L. R. Concurrent simulation and optimization models for mining planning. In: *Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference*. S.J. Mason, R.R. Hill, L. Mönch, O. Rose, T. Jefferson & J.W. Fowler, 2008. p. 783–793.

Campello, B. S., Ghidini, C. T., Ayres, A. O., e Oliveira, W. A. A multiobjective integrated model for lot sizing and cutting stock problems. *Journal of the Operational Research Society*, v. 71, n. 9, p. 1466–1478, 2020.

Figueira, G. Simulação-otimização: Porque e como combiná-las? *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, v. 11, n. 1, p. 1–5, 2019.

Ghidini, C. T. L. *Otimização de processos acoplados: programação da produção e corte de estoque*. 131p. Tese de Doutorado. Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, 2008.

Gramani, M. C. N. e França, P. M. The combined cutting stock and lot-sizing problem in industrial processes. *European Journal of Operational Research*, v. 174, p. 509–521, 2006.

Gramani, M. C. N., França, P. M., e Arenales, M. N. A linear optimization approach to the combined production planning model. *Journal of the Franklin Institute*, v. 348, n. 7, p. 1523–1536, 2011.

Gruher, A., Fikar, C., Juan, A. A., Hirsch, P., e Contreras-Bolton, C. Supporting multi-depot and stochastic waste collection management in clustered urban areas via simulation–optimization. *Journal of Simulation*, v. 11, n. 1, p. 11–19, 2017.

Guçdemir, H. e Selim, H. Customer centric production planning and control in job shops: A simulation optimization approach. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 43, p. 100–116, 2017.

Hayes, R. H., Pisano, G. P., Upton, D. M., e Wheelwright, S. C. *Operations, Strategy, and Technology: Persuading the Competitive Edge*. Indianapolis: John Wiley & Sons, 2004.

Melega, G. M., Araujo, S. A., e Jans, R. Classification and literature review of integrated lot-sizing and cutting stock problems. *European Journal of Operational Research*, v. 271, n. 1, p. 1–19, 2018.

Nonas, S. L. e Thorstenson, A. A combined cutting-stock and lot-sizing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 120, n. 2, p. 327–342, 2000.

Pflug, G. C. *Optimization of Stochastic Models: The Interface Between Simulation and Optimization*. Boston: Klumer Academic Publishers, 1999.

Poltroniere, S. C., Poldi, K. C., Toledo, F. M. B., e Arenales, M. N. A coupling cutting stock-lot sizing problem in the paper industry. *Annals of Operations Research*, v. 157, n. 1, p. 91–104, 2008.

Santos, S. M. P. G., Araujo, S., e Rangel, S. Integrated cutting machine programming and lot sizing in furniture industry. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, v. 3, p. 1–17, 2011.

Sha, M. e Srinivasan, R. Fleet sizing in chemical supply chains using agent-based simulation. *Computers and Chemical Engineering*, v. 84, p. 180–198, 2016.

Silva, E., Alvelos, F., e de Carvalho, J. M. V. Integrating two-dimensional cutting stock and lot-sizing problems. *Journal of the Operational Research Society*, v. 65, n. 1, p. 108–123, 2014.

Suliman, S. M. A. An algorithm for solving lot sizing and cutting stock problem within aluminum fabrication industry. In: *International conference on industrial engineering and operations management*. Bali, Indonesia. IOEM Society, 2012. p. 783–793.

Vanzela, M., Melega, G. M., Rangel, S., e Araujo, S. A. The integrated lot sizing and cutting stock problem with saw cycle constraints applied to furniture production. *Computers & Operations Research*, v. 79, p. 148–160, 2017.