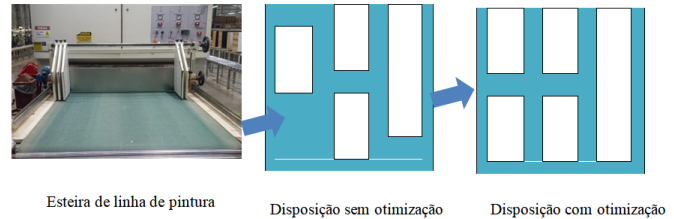


Indústria 4.0 e Produção enxuta

Utilização do modelo de otimização de corte unidimensional para aumento da eficiência do processo de pintura em uma indústria moveleira

Marcelo Ledur ^{1*}Leonardo Dagnino Chiwiacowsky ¹¹ Universidade de Caxias do Sul, Área do conhecimento de Ciências Exatas e Engenharias. Rua Francisco Getúlio Vargas, 1130, Caxias do Sul –RS, Brasil

*Autor correspondente: mledur1@ucs.br

Recebido: 4 de outubro de 2023
Revisado: 6 de março de 2024
Aceito: 7 de março de 2024
Publicado: 31 de março de 2024

Resumo: Um dos processos industriais que compõem uma indústria moveleira é o processo de pintura, geralmente composto por uma esteira na qual as peças são colocadas para que sejam pintadas. O objetivo do presente estudo é permitir o aprimoramento da etapa produtiva de pintura realizada em uma indústria moveleira da Serra Gaúcha a partir do desenvolvimento e aplicação de um modelo de otimização. Devido à forma como é realizado o processo de pintura, o emprego do modelo de otimização para solução do problema de corte unidimensional se mostra adequado. Para aplicação da solução da otimização, foi desenvolvida uma rotina em Python para geração dos padrões de corte, além da utilização do sistema CPLEX para obtenção das soluções otimizadas. O estudo conduzido foi dividido em duas etapas, na primeira etapa foram gerados os resultados da otimização para cinco cenários reais de produção e, na segunda etapa, foi realizado um comparativo com os desempenhos reais. Neste comparativo, obteve-se um ganho geral de aproximadamente 64 % na redução do desperdício observado na organização das peças na esteira de pintura. Como a realização do estudo, foi possível observar que a aplicação da otimização no processo de pintura apresenta um alto potencial de ganhos, com redução de desperdícios e consequente aumento de produtividade.

Palavras-chave: Indústria moveleira, otimização, problema de corte unidimensional, pintura de madeira, indústria 4.0.

Industry 4.0 and Lean Production

Use of the one-dimensional cutting stock optimization model to increase efficiency of painting process in a furniture industry

Abstract: One of the industrial processes that make up a furniture industry is the painting process, generally consisting of a conveyor belt on which the pieces are placed to be painted. The objective of the present study is to allow the improvement of the painting production stage carried out in a furniture industry in Serra Gaúcha through the development and application of an optimization model. Due to the way the painting process is carried out, the use of an optimization model to solve the one-dimensional cutting stock problem is appropriate. To apply the optimization solution, a Python routine was developed to generate cutting patterns, in addition to using the CPLEX system to obtain optimized solutions. The study conducted was divided into two stages, in the first stage the optimization results were generated for five real production scenarios, in the second stage, a comparison was made with the real performances. In this comparison, an overall gain of approximately 64 % was achieved in reducing waste observed when organizing parts on the painting mat. As the study was carried out, it was possible to observe that the application of optimization in the painting process presents a high potential for gains, with a reduction in waste and a consequent increase in productivity.

Keywords: Furniture industry, optimization, one-dimensional cutting stock problem, wood painting process, industry 4.0.

Introdução

A indústria 4.0 é responsável por mudar a visão das indústrias sobre seus controles de processo e, com isso, criou-se uma necessidade delas se adaptarem e colocarem em prática

© The author(s) 2023. This is an open access article published under the terms and conditions of the [Creative Commons Attribution International License](#), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and source are credited. The author(s) granted the publication rights to *Scientia cum Industria*.

alguns dos conceitos deste movimento de transformação da indústria [1]. Entre os conceitos abordados nessa revolução industrial, tem-se o monitoramento e controle [2], os quais muitas indústrias utilizam para acompanhar a eficiência dos seus processos produtivos. Existem diferentes ferramentas que auxiliam no monitoramento e controle da eficiência dos

processos produtivos no contexto industrial, podendo ser programas ligados a sensores de equipamentos, inteligências virtuais, além de cálculos que comparam a disponibilidade da máquina com o seu efetivo tempo de operação [3].

Com o uso de recursos que auxiliam o monitoramento da eficiência de um processo industrial, é possível identificar necessidades de melhorias, adaptações de produtos e otimizações de processos [4]. O aumento da eficiência está diretamente ligado ao ganho na produtividade, evidenciando assim uma melhor utilização dos mecanismos que estão envolvidos no processo [5]. Para que se tenha o aumento da eficiência, é preciso reunir dados relativos ao processo em estudo, analisar, discutir e aplicar métodos de apoio à tomada de decisão, dentre os quais se destacam as abordagens de otimização [6].

O conceito de otimização não é novo, constantemente esse tópico é abordado na indústria, seja pelo setor de desenvolvimento de produto, seja pelo setor encarregado do planejamento e controle de produção e processos industriais, na busca por melhorias e aperfeiçoamentos de políticas e estratégias produtivas [7]. A otimização está relacionada a um dos pilares apresentados na instaurada indústria 4.0, ela se associa ao conceito de simulação, conceito esse responsável por apresentar cenários que representam possíveis adequações de processos e projetos, antes e durante sua execução [2]. A otimização de um processo, associada ao emprego da simulação, pode ser desenvolvida de diversas maneiras, visto que seu campo de aplicação é amplo, com várias novas vertentes e, em alguns casos, com foco em situações específicas já conhecidas [8].

Vários são os setores industriais que podem tirar proveito da otimização, entre eles o setor moveleiro. A indústria moveleira é caracterizada por um processo produtivo composto por uma sequência de etapas de produção, as quais podem se beneficiar com a utilização de métodos de otimização, especialmente as etapas de corte, laminação, furação, pintura e embalagem [9]. Em alguns casos, o setor moveleiro já se utiliza desses métodos, como no processo de corte, no qual é realizada a otimização dos planos de corte de chapas, sendo empregado um sistema de otimização de corte bidimensional [10].

A partir do momento que uma indústria de móveis também dispõe do processo de pintura, grande parte da sua produção passa por esta etapa. Entre os métodos de pintura existentes, um deles se utiliza de uma esteira sobre a qual as peças a serem pintadas devem ser posicionadas de forma eficiente e, em função desta característica, algumas vezes essa etapa é considerada como um gargalo da produção [11]. No momento em que uma etapa do processo produtivo é considerada o gargalo de produção, ela passa a ser analisada por alguns aspectos fundamentais do processo como, por exemplo, eficiência, tempo de produção, ociosidade, qualidade, entre outros [12]. Para melhorar esses aspectos, são realizadas melhorias de produtos, estudos de melhoria de fluxo, análises de causa e efeito, tudo isso para que se tenha um menor impacto da etapa do processo industrial que foi identificada como gargalo da produção [13].

A partir da contextualização e problemática apresentadas, o presente estudo tem como objetivo utilizar uma abordagem de otimização para aprimorar o processo produtivo de uma indústria moveleira da Serra Gaúcha a partir do desenvolvimento de um modelo de otimização, alinhado com as necessidades presentes nesta indústria e que permite obter uma configuração otimizada para a disposição de peças no processo de pintura. Para que este objetivo seja atingido, deverão ser consideradas características específicas da etapa produtiva de pintura, como a quantidade e o tamanho das peças destinadas à pintura, bem como, especificação de cores e espessuras.

Referencial Teórico

Nesta seção, são apresentados os conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do presente estudo, sendo abordados aspectos relacionados à indústria moveleira, ao problema tratado no presente estudo e também relacionado às técnicas para sua solução.

Indústria moveleira

Indústrias do setor moveleiro geralmente estão localizadas em microrregiões de alguns estados do Brasil, destacando-se o estado da Bahia, na região do Recôncavo Baiano, o Rio Grande do Sul, na Serra Gaúcha, Santa Catarina, na microrregião de São Bento do Sul, mas também em outros estados. Por estarem agrupadas nessas microrregiões, as indústrias do setor moveleiro mostram-se responsáveis por impulsionar boa parte da economia que movimenta a comunidade onde estão inseridas [14,15].

Com um alto número de unidades industriais voltadas ao ramo moveleiro, tem-se uma ampla gama de sistemas de produção empregados com objetivos distintos, sendo os mais comuns os de projeto e o de estocagem. O estilo de produção de projeto é aplicado em indústrias que produzem, principalmente móveis sob medida, onde ocorre desenvolvimento de um projeto personalizado do móvel com base no espaço que o cliente tem disponível. Posterior à aprovação do projeto por parte do cliente, tem-se a produção e então entrega e montagem do produto [16]. Já o estilo de produção por estocagem consiste na produção de móveis seriados, no qual o cliente pode fazer a seleção dos produtos que melhor lhe atendem, com base em um portfólio de produtos existentes e disponibilizados pela empresa moveleira [17].

A existência desses dois estilos de produção na indústria moveleira não interfere no processo produtivo de um móvel, que, indistintamente, se caracteriza pela realização das etapas de corte, laminação, furação, pintura e embalagem. Na Figura 1, são apresentadas as etapas do processo de produção de um móvel.

A etapa de corte consiste no seccionamento da chapa de matéria-prima em peças menores, nos tamanhos necessários para montagem do móvel. Na sequência, o processo de laminação consiste em colar uma película de papel, ou de PVC, em uma ou mais bordas da peça. O processo de furação é aquele em que a peça é furada para que possa ser montada e encaixada em outras peças. Em seguida, é realizado o processo

de pintura, etapa responsável por garantir o acabamento ao móvel, ou seja, dar cor à peça, podendo ser pintada em um ou dois lados. O último processo é o de embalagem, no qual ocorre o embrulho de todas as peças para que o móvel seja transportado até o seu destino [9].

Entre todos os processos de produção de uma indústria moveleira, o processo de pintura é um dos únicos onde pode haver uma personalização. Essa personalização ocorre devido às diferentes formas de pintura existentes. Atualmente, as principais formas de aplicação da tinta existentes são a poliuretana (PU) e a ultravioleta (UV). Um dos métodos de pintura empregados na indústria moveleira é aquele realizado com pistola, no qual se utiliza a tinta PU, tendo como desvantagem o tempo de secagem do material. Outro método de pintura utiliza uma sequência de máquinas interligadas (denominada industrialmente como linha de pintura) e que realizam a pintura utilizando a tinta UV. Ao contrário do processo anterior, assim que a peça passa por essa sequência de máquinas, ela já se encontra seca e pronta para seguir no processo de produção [18].

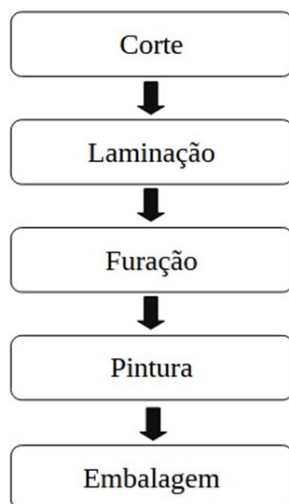


Figura 1. Fluxograma do processo produtivo de uma indústria moveleira.

Além da vantagem apresentada sobre a secagem das peças, a modalidade de pintura utilizando essa sequência de máquinas confere ao processo de produção de móveis uma maior agilidade. Porém, além de ágil, ele também precisa ser eficiente. Para que se tenha uma melhora na eficiência desse processo, é necessário avaliar a dependência de algumas características, como o tamanho das peças que são produzidas e o espaço disponível na linha de pintura. Na Figura 2, se tem a representação da esteira que compõe a linha de pintura sobre a qual as peças são alocadas para serem pintadas.

O sistema apresentado evidencia uma situação-problema relacionada à forma como as peças a serem pintadas deverão ser alocadas ou organizadas na esteira. Por se tratar de uma esteira de pintura, a sua movimentação ocorre apenas no sentido longitudinal, de modo que existe a possibilidade de realizar o aprimoramento do uso do espaço disponível apenas no sentido transversal da esteira. Mediante essas informações,

existem diferentes abordagens possíveis de serem aplicadas com o objetivo de encontrar as melhores configurações de organização das peças sobre a esteira, sendo a abordagem de otimização uma escolha adequada. O tipo de problema que se apresenta pode ser descrito por um modelo de otimização linear, sendo identificado como um problema de corte unidimensional [19].

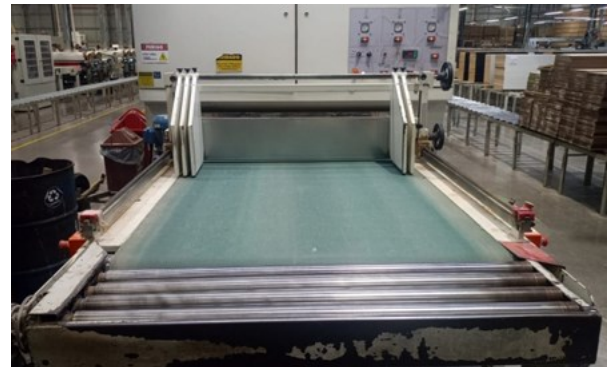


Figura 2. Esteira de pintura.

Problema de corte unidimensional

Modelos de otimização conhecidos como problemas de corte são observados nas indústrias, principalmente, no processo de corte de matéria-prima, podendo ser aplicados no corte de superfícies planas, como chapas de madeira, placas granito ou chapas de aço, sendo identificado como problema de corte bidimensional, pois considera as dimensões longitudinal e transversal [10]. Outros modelos relacionados ao corte são caracterizados como problemas de corte unidimensional, como, por exemplo, cortes de barras metálicas, cilindros metálicos ou de rolos de papel, sendo relevante apenas a dimensão relativa ao comprimento do material [20]. Na Figura 3, é exemplificada a otimização de corte de uma chapa de material (bidimensional) e de uma barra cilíndrica (unidimensional).

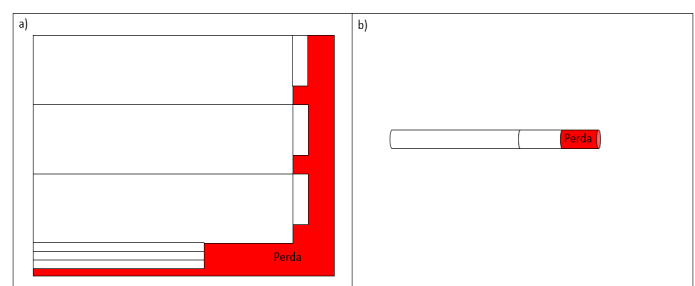


Figura 3. a) Otimização de corte bidimensional, b) otimização de corte unidimensional.

A solução do problema de corte unidimensional pode estar baseada na otimização de diferentes métricas como, por exemplo, maximizar o uso de matéria-prima, minimizar o tempo de setup, minimizar sobras de matéria-prima, entre outras medidas [21]. Para que se consiga atingir o objetivo de determinar a forma de cortar um objeto de comprimento conhecido em tamanhos menores, é necessário o desenvolvimento de uma função destinada a definir os padrões

de corte, com a qual, a partir do conhecimento do comprimento do objeto e das peças menores, é possível desenvolver estratégias possíveis de corte, denominadas padrões de corte [22]. Um padrão de corte é uma das diversas formas diferentes de se seccionar um objeto em dimensões menores com comprimentos predefinidos, conforme representado na Figura 4. Assim sendo, o problema de corte seleciona quantas vezes cada um dos estilos prováveis de corte, isto é, os padrões de corte, devem ser empregados para que sejam produzidas as quantidades de itens demandados [23]. O processo de otimização fica responsável por determinar a quantidade de vezes que cada padrão de corte deverá ser empregado de modo a otimizar uma medida objetivo, ao mesmo tempo que cumpre com a demanda estabelecida [20].

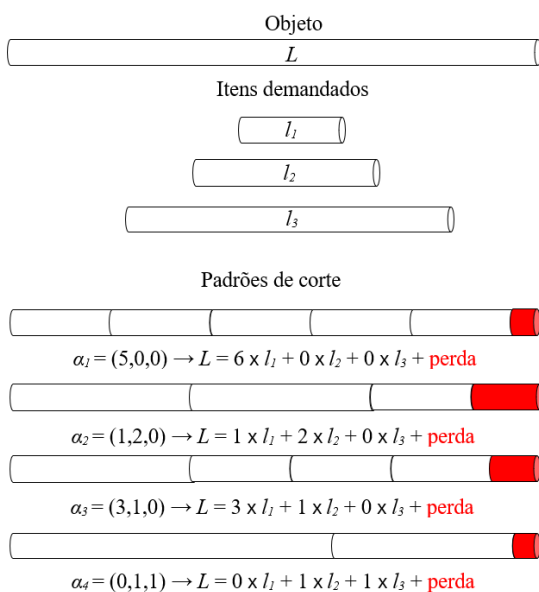


Figura 4. Padrão de corte.

A fim de permitir um melhor entendimento do uso dos padrões de corte no contexto do presente estudo, a Figura 5 apresenta um exemplo de uso de possíveis padrões empregados na disposição das peças em uma esteira da linha de pintura.

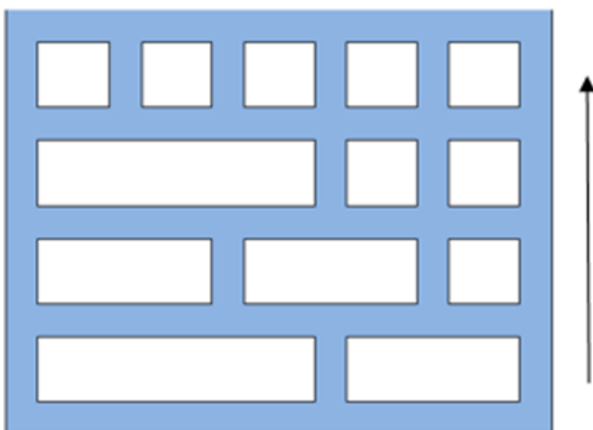


Figura 5. Representação dos padrões de organização das peças na esteira.

Com a apresentação dos conceitos relativos ao problema de corte, na sequência será apresentado o modelo matemático correspondente a sua versão unidimensional, tomando como base o modelo proposto no estudo desenvolvido por Campello [23].

Para apresentar a modelagem matemática do problema, inicialmente é apresentada a definição dos índices empregados no modelo, seguido dos parâmetros e das variáveis:

- $j = 1, \dots, J$ representando os padrões de corte;
- $i = 1, \dots, I$ representando os tipos de itens;
- c_j = custo associado a cada padrão de corte j ;
- x_j = número de vezes que o padrão de corte j é utilizado;
- d_i = demanda de cada item i ;
- L = comprimento do objeto a ser cortado;
- l_i = comprimento de cada item i ;
- α_{ij} = quantidade de itens i presentes no padrão de corte j ;
- A = matriz dos itens i presentes em cada padrão de corte j ;
- d = vetor das demandas de itens d_i ;
- x = vetor das variáveis de decisão x_j ;
- c = vetor de custos c_j .

Com base na definição das notações anteriores, a função objetivo (FO) e as restrições do modelo de otimização são definidas como:

Função Objetivo:

$$\min \mathbf{c}^T \mathbf{x} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\mathbf{Ax} \geq \mathbf{d} \quad (2)$$

$$\mathbf{x} \geq 0 \text{ e inteiro.} \quad (3)$$

Padrão de corte:

$$\alpha_j = [\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \dots, \alpha_{Ij}]^T \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I l_i \alpha_{ij} \leq L \quad (5)$$

$$\alpha_{ij} \geq 0 \text{ e inteiro.} \quad (6)$$

Na Equação (1), é definida a FO que minimiza o custo associado aos padrões de corte utilizados. As Equações (2) e (3) representam as restrições do modelo de otimização. A Equação (2) refere-se à necessidade dos padrões de corte atenderem a demanda de itens, e a Equação (3) indica que as variáveis de decisão são inteiras e não-negativas.

As Equações (4) a (6) representam a modelagem matemática para definição dos padrões de corte utilizados no problema de corte. A Equação (4) refere-se a como o padrão de corte é definido, já a Equação (5) garante que a quantidade de vezes que cada comprimento de item utilizado em cada padrão de corte não supera o comprimento L do objeto. A Equação (6) indica que a quantidade de itens em um padrão é inteira e não-negativa.

O modelo de otimização de um problema de corte unidimensional é caracterizado como um modelo de

programação linear inteira, cuja solução pode ser obtida pelo emprego de diferentes abordagens de otimização [23].

Métodos de solução

Um modelo programação linear inteira refere-se ao formato do problema de otimização representado por um modelo matemático baseado apenas em funções lineares [20], cujo domínio de solução é constituído apenas por números inteiros. Para que se obtenha a solução ótima do problema foco do presente estudo, tem-se a possibilidade de utilizar diferentes métodos de solução, como o Simplex, *Branch and Bound*, entre outros [23].

O método de solução Simplex consiste no processo de encontrar uma solução prévia a partir de um vértice da região viável e a partir dele realizar um processo de busca iterativa, ou seja, caso esse vértice não seja uma solução ótima o método propõe movimentações para outros vértices até se chegar em um vértice ótimo [24]. O método Simplex é uma técnica de otimização proposta em 1939 e detalhes sobre sua forma de funcionamento podem ser encontrados no trabalho de Huang [24].

Outro procedimento de solução que se utiliza para a resolução de modelos de programação linear inteira é o método *Branch and Bound* (B&B), que consiste na ideia de criar ramificações para encontrar de forma mais rápida a solução ótima [25]. Assim como no método Simplex, esse método possui algumas variações desenvolvidas ao longo do tempo, sendo uma delas o *Binary Branching*, no qual é aplicado o cálculo para dois valores obtidos, sendo um deles descartado e a partir disso surgindo uma nova ramificação [24]. Esse processo ocorre sucessivamente até que seja obtida a solução ótima. Detalhes sobre o método de desenvolvimento e resolução da técnica B&B podem ser encontrados no trabalho de Morrison [25].

Além dos métodos de otimização mencionados, identificados como métodos exatos, existem também os métodos de solução heurística. Um método de solução heurística é empregado quando é necessário avaliar um sistema de alta complexidade ou de grande dimensão, cuja solução comumente exige um tempo longo para ser obtida quando empregadas as técnicas exatas apresentados anteriormente [20]. Signorini e colaboradores [20] utilizaram um método de otimização heurística denominado *relax-and-fix* para o desenvolvimento de soluções inteiras para o problema de corte avaliado, devido à qualidade dos resultados obtidos, bem como o menor tempo exigido para gerar as soluções. Já Cherri e colaboradores [26] fazem um estudo comparativo do método de otimização heurística para avaliar o percentual de sobra.

A escolha do método a ser empregado depende da dificuldade de resolução do problema proposto, ou também da dimensão do problema, isto é, da quantidade de variáveis de decisão e restrições existentes no modelo de otimização.

Materiais e Métodos

O presente estudo visa à melhoria de um processo industrial. O desenvolvimento do trabalho tem como base uma indústria moveleira da Serra Gaúcha composta por aproximadamente 1000 colaboradores e que fabrica móveis de estocagem.

Contexto do problema

Como apresentado na Figura 1, o processo produtivo de uma indústria moveleira pode ser dividido em cinco etapas de fabricação, entre as quais tem-se a pintura. A etapa que antecede a pintura é a furação e a que a sucede é a etapa de embalagem, de modo que a etapa de pintura é considerada um gargalo do processo de fabricação de móveis. É importante destacar que o setor de pintura trabalha com base na demanda do setor de embalagem, aliado ao estoque gerado pelas peças que passam pela etapa de furação.

Após a etapa de furação, as peças são organizadas em pilhas de 50 unidades, cada uma acompanhada por uma ficha de informações onde consta uma série de dados, entre eles a dimensão das peças, espessura, cor da peça e lote de produção. Com o auxílio dessa ficha, serão coletados os dados necessários para o desenvolvimento do estudo de otimização. A validação da solução de otimização será feita utilizando os dados de uma semana de produção.

Modelo matemático de otimização

A escolha pela modelagem do problema de corte unidimensional para tratar o problema foco do presente estudo é devida à similaridade dos conceitos envolvidos, pois refere-se à necessidade de dividir um objeto de comprimento L em objetos menores de comprimento l_i , de modo a garantir uma menor perda de produto, ou tempo de produção [22]. A linha de pintura foco do estudo possui o mesmo princípio, no entanto ao invés de se ter um objeto de comprimento L , tem-se uma esteira de largura L a ser preenchida com peças de comprimento l_i a serem alocadas sobre essa esteira. A Figura 2 representa esta situação-problema.

A organização das peças na esteira é feita com base na demanda da produção definida pela etapa de embalagem e, por muitas vezes, com uma perda significativa da eficiência, devido à estratégia definida pelo setor de planejamento da produção que prioriza o atendimento da demanda latente em detrimento de uma melhor eficiência do processo.

Com base no cenário descrito, foi desenvolvido o modelo de otimização aplicado para o sistema de produção em estudo, tendo por base o modelo desenvolvido por Campello [23].

Para apresentar a modelagem matemática utilizada para solução do problema, inicialmente são apresentados os índices empregados no modelo, seguido dos parâmetros e das variáveis:

$i = 1, \dots, I$ representando os tipos de peça;

$p = 1, \dots, P$ representando os padrões de corte;

r_p = resto ou sobra de espaço na esteira quando empregado o padrão de corte p ;

x_p = número de vezes que o padrão de corte p é utilizado;

D_i = demanda de peças i a serem produzidas;

L = largura da esteira;
 l_i = comprimento da peça i ;
 A_{ip} = quantidade de peças i presentes no padrão de corte p ;
 MP = máximo de peças por padrão;
 MI = máximo de tipos de peças por padrão;
 ε = espaçamento entre cada peça.

Com base na definição das notações anteriores, a função objetivo (FO) e as restrições do modelo de otimização são definidas como:

Função Objetivo:

$$\min \sum_{p=1}^P r_p x_p \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{p=1}^P \alpha_{ip} x_p = D_i, \forall i \quad (8)$$

$$\alpha_{ip} \in \mathbb{Z}^+, \forall i, p \quad (9)$$

$$x_p \in \mathbb{Z}^+, \forall p \quad (10)$$

Padrão de corte:

$$\sum_{i=1}^I (l_i + \varepsilon) \alpha_{ip} \leq L, \forall p \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^I \alpha_{ip} \leq MP, \forall p \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^I \left\lfloor \frac{\alpha_{ip}}{MP} \right\rfloor \leq MI, \forall p \quad (13)$$

$$\alpha_{ip} \in \mathbb{Z}^+, \forall i, p \quad (14)$$

A Equação (7) apresenta a FO com o objetivo de minimizar a sobra total de espaço na esteira a partir dos padrões de organização utilizados para cada cor e espessura, as Equações (8) a (10) referem-se às restrições do modelo de otimização. A Equação (8) garante o atendimento da demanda de cada tipo de peça, as Equações (9) e (10) indicam as restrições de variáveis inteiras e não-negativas.

As demais equações do modelo referem-se ao padrão de corte, com a Equação (11) garantindo que os padrões de corte não violam a largura L da esteira. A Equação (12) refere-se à quantidade máxima MP de peças que podem compor um padrão de corte, a Equação (13) limita a quantidade máxima MI de tipos de peças por padrão de corte, por fim a Equação (14) indica as restrições de variável inteira e não-negativa.

Os padrões de corte foram gerados com o auxílio de uma rotina implementada a parte do modelo de otimização, como uma etapa de pré-processamento que fornece os padrões de corte a partir das características das peças como largura, cor, espessura e demanda, a serem consideradas no processo de otimização. A etapa de pré-processamento pode ser dividida em duas etapas, a primeira etapa de obtenção de dados e

subsequente geração dos padrões de corte e a segunda etapa referente à geração do arquivo de dados contendo as informações necessárias e no formato adequado ao processo de otimização.

Esta lógica foi desenvolvida para que fosse possível a geração dos padrões de corte com base nas larguras das peças mediante a restrição de que espessura e cores presentes em um lote fossem iguais, uma vez que essas duas variáveis são restrições do processo de pintura.

Modelo computacional

Devido ao modelo de otimização proposto se tratar de um modelo de programação linear inteira, optou-se pelo uso do sistema IBM ILOGCPLEX [27] para sua resolução e validação. A escolha desse sistema de resolução se justifica pela sua capacidade em trabalhar com uma quantidade de variáveis suficiente de acordo com a demanda do modelo proposto no presente estudo.

Cenários de avaliação

Devido ao fato de se tratar de um estudo aplicado, o trabalho teve por base o emprego de dados reais oriundos de alguns dias de produção da indústria, para que se tenha uma avaliação mais alinhada com a realidade observada no chão de fábrica.

Análise dos resultados

Por se tratar de um estudo aplicado, é possível fazer a comparação dos resultados obtidos pelo emprego do modelo de otimização com a forma de organização empregada no processo produtivo real e, dessa forma, validar o modelo proposto.

Resultados

Para a realização desse trabalho, utilizou-se um computador com as seguintes configurações para realização dos experimentos: processador Intel core i5 de 5ª geração, memória RAM de 4 Gb, sistema operacional Windows 10 e sistema IBM ILOG CPLEX 22.1.1. Além do sistema da IBM, utilizou-se também a IDE Python executada na ferramenta Visual Studio Code para o desenvolvimento da lógica de programação para a geração dos padrões de corte.

Para desenvolvimento da lógica de otimização, é necessário que sejam definidos os parâmetros \mathcal{E} (Equação 11). MP (Equação 12) e MI (Equação 13)). Em virtude de limitações impostas pelo processo produtivo, esses parâmetros foram adotados como $\mathcal{E} = 20$, $MP = 6$ e $MI = 2$.

Resultados do caso estudado

A empresa em que se aplicada o estudo de caso faz a utilização de cinco espessuras, de um conjunto de diferentes de peças com 150 possíveis larguras, além de possuir uma variedade de vinte tipos de cores. Os dados da demanda de produção foram coletados a partir de uma semana de produção, sendo eles compostos por pelas seguintes informações: a) item produzido, b) quantidade a ser produzida e c) cor do item.

O estudo de otimização foi realizado considerando a produção correspondente a uma semana de trabalho. Para cada dia, foi feita a separação de cada item de acordo com sua cor e espessura, formando assim lotes de peças. Assim sendo, foram gerados diferentes lotes de otimização definidos com base na cor e na espessura.

No primeiro dia considerado na análise, foram obtidos sete lotes de otimização, ou seja, sete combinações de cores e espessuras diferentes.

Em um desses lotes de otimização, foi considerada a combinação da cor 1 e a espessura 2, representando um primeiro cenário de avaliação. Para essa combinação específica, as peças componentes do lote em questão apresentavam as seguintes larguras, medidas em milímetros: 621, 488, 291, 142, 520 e 489. Com base na largura total da esteira de 1121 mm e das peças consideradas no cenário avaliado, foram obtidos 44 padrões de corte, dos quais dez estão expostos na Tabela 1. Nesta tabela, a primeira coluna apresenta o identificador do padrão de corte (Id). Da segunda até a sétima coluna, são apresentadas as quantidades de peças empregadas no respectivo padrão de corte, para cada uma das larguras consideradas na análise. Por fim, a última coluna (Resto) apresenta a sobra de espaço, em milímetros, na largura da esteira, quando empregado o respectivo padrão de corte.

Tabela 1. Exemplos de padrões de corte gerados com base nas larguras presentes no lote.

Id	621	488	291	142	520	489	Resto
3	0	0	0	0	0	2	103
5	0	0	0	0	1	1	72
6	0	0	0	0	2	0	41
15	0	0	0	3	1	0	95
26	0	0	1	5	0	0	0
32	0	0	3	1	0	0	26
37	0	1	0	2	0	0	289
40	0	2	0	0	0	0	105
43	1	0	0	2	0	0	156
44	1	0	1	0	0	0	169

Neste primeiro cenário avaliado, para as larguras consideradas na análise, as respectivas demandas são: 300, 400, 800, 400, 400 e 1000. Conforme restrição definida no modelo matemático de otimização, a solução ótima deve suprir todas as demandas de forma exata.

Na Tabela 2, é apresentada a solução ótima obtida para esse cenário de otimização. Na tabela são apresentados os identificadores dos padrões utilizados, a correspondente sobra de espaço na esteira, a quantidade de vezes que cada padrão é utilizado e o somatório de sobras de espaço na esteira.

Tabela 2. Padrões de corte selecionados pela solução ótima.

Id	Resto	Nº de vezes utilizado	Total de resto
3	103	500	51500
6	41	200	8200
32	26	200	5200
40	105	200	21000
43	156	100	15600
44	169	200	33800
			135300*

*total de resto gerado pela solução ótima.

Na Tabela 3, são apresentadas as quantidades totais de cada largura de peça fornecidas pelos padrões de corte presentes na solução ótima comprovando o atendimento da demanda.

Tabela 3. Atendimento da restrição de demanda.

Id	621	488	291	142	520	489
3	0	0	0	0	0	1000
6	0	0	0	0	400	0
32	0	0	600	200	0	0
40	0	400	0	0	0	0
43	100	0	0	200	0	0
44	200	0	200	0	0	0
Total	300	400	800	400	400	1000

Na Tabela 3, são apresentadas as quantidades totais de cada largura de p. Os resultados para os demais cenários avaliados no primeiro dia de análise, correspondentes às outras seis combinações de cores e espessuras obtidas, estão apresentados na Tabela 4. Nesta tabela, são apresentadas as seguintes informações: Lote de otimização (L), quantidade ou Número de Larguras consideradas na análise (NL), identificador da Espessura (E), identificador da Cor (C), Total de Padrões de Corte considerados na análise (TPC), Total de Padrões de Corte utilizados (TPCu) e Total de Resto gerado (TR). Os significados dessas colunas se mantêm nas Tabelas 5 a 8.

As tabelas que apresentam os resultados obtidos para os demais dias considerados no estudo possuem a mesma estrutura.

Tabela 4. Resultados para os demais lotes do dia 1 de análise.

L	NL	E	C	TPC	TPCu	TR
2	1	1	1	4	1	19400
3	9	1	4	123	8	189100
4	11	2	2	282	16	227052
5	11	2	4	150	10	635800
6	6	2	6	43	6	984800
7	1	4	4	2	1	250500

No segundo dia de análise, foram gerados nove lotes de otimização, cujos resultados ótimos são apresentados na Tabela 5, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 5. Resultados para o dia 2 de análise.

L	NL	E	C	TPC	TPCu	TR
1	10	1	2	435	12	39484
2	10	1	4	466	12	60225
3	1	2	1	3	1	28200
4	1	2	2	3	1	63350
5	9	2	4	108	10	309259
6	1	2	5	3	1	1350
7	6	2	6	68	8	144214
8	7	2	13	50	8	21974
9	7	2	14	50	8	21974

No terceiro dia, foram gerados seis lotes de otimização, cujos resultados ótimos são apresentados na Tabela 6, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 6. Resultados para o dia 3 de análise.

L	NL	E	C	TPC	TPCu	TR
1	2	1	1	24	2	7950
2	9	1	2	259	10	183914
3	7	1	6	148	6	58125
4	11	2	1	173	13	168353
5	12	2	2	242	14	162015
6	11	2	6	244	10	94930

Para o quarto dia, também foram gerados seis lotes de otimização, cujos resultados ótimos são apresentados na Tabela 7, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 7. Resultados para o dia 4 de análise.

L	NL	E	C	TPC	TPCu	TR
1	2	1	2	13	2	36325
2	8	1	4	347	9	56949
3	12	2	4	331	13	288260
4	7	1	6	151	10	112690
5	1	2	5	3	1	1350
6	9	2	6	121	9	524300

O quinto dia analisado foi o dia que apresentou a maior quantidade de lotes de otimização, sendo um total de doze lotes. Os resultados ótimos estão apresentados na Tabela 8,

juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

A partir dos resultados obtidos, observou-se que os lotes de otimização que possuem um baixo número de larguras, juntamente com tamanhos de largura grandes, apresentaram padrões de corte válidos com uma quantidade de resto bem elevada e, por conta disso, uma solução ótima com um total de resto igualmente elevado. Outro fator que impacta no valor da solução ótima, isto é, no valor absoluto da medida total de resto (TR), está ligado diretamente à quantidade demandada, que foi diferente para todos os casos avaliados.

Tabela 8. Resultados para o dia 5 de análise.

L	NL	E	C	TPC	TPCu	TR
1	4	1	1	155	7	7013
2	12	1	2	392	16	46844
3	9	1	4	248	9	683100
4	8	1	6	158	11	191130
5	2	2	1	4	2	970250
6	2	2	2	4	2	984750
7	6	2	4	17	6	1227350
8	6	2	6	35	5	690600
9	2	2	13	6	2	259600
10	2	2	14	6	2	259600
11	1	4	1	3	1	6150
12	2	4	4	13	3	260600

Outro fator observado durante o desenvolvimento do estudo de caso foi que, para cenários em que o lote de otimização possuía poucas larguras e, conseqüentemente, poucos padrões de corte, a sua resolução se tornava mais rápida e a quantidade de padrões de corte selecionados para comporem a solução ótima era semelhante à quantidade de larguras. Por outro lado, quando o cenário avaliado é mais complexo, ou seja, com maior número de larguras e, conseqüentemente, de padrões de corte, a quantidade de padrões utilizados é maior que a quantidade de larguras presentes no lote avaliado.

Para avaliação do sistema de otimização, levou-se em conta cinco dias inteiros de produção, o que gerou alguns lotes de otimização de difícil solução, o que se mostra inadequado para o processo produtivo real devido ao tempo necessário para obtenção da solução ótima. No entanto, pelo fato da produção chegar até o processo de pintura em bateladas de 50 peças, não se tem a totalidade dessas peças disponíveis no pulmão da linha de pintura, o que pode levar à diminuição do tamanho daqueles lotes cujo processo de otimização demanda um tempo maior e, assim, possibilitar a geração de uma solução otimizada em um tempo adequado.

O desenvolvimento do presente estudo tem como base a evolução da indústria, mais especificamente a evolução proporcionada pelas tecnologias habilitadoras da indústria 4.0, a qual em um de seus pilares destaca a simulação do processo. A simulação desenvolvida no presente estudo teve como

objetivo auxiliar o processo produtivo e aumentar a produtividade da linha de pintura.

Comparação com o procedimento real

Com os resultados apresentados anteriormente, foi possível se ter apenas uma visão a partir do desempenho do processo de otimização em diferentes cenários de avaliação. Nessa seção, é apresentado um comparativo entre os resultados obtidos anteriormente e aqueles gerados com base na realidade do processo, para que seja possível entender o ganho real obtido a partir da aplicação de uma ferramenta de otimização em um processo específico da indústria.

A Tabela 9 apresenta os resultados para as condições empregadas atualmente no processo de pintura no qual, por não existir ferramentas que auxiliem o operador na tomada de decisão da melhor alocação das peças na esteira, o operador pela comodidade utilizada apenas uma largura por vez. Para descrição do processo na íntegra, serão utilizados os mesmos dados que na seção anterior, ou seja, lote de otimização com a cor 1 e a espessura 2 do dia 1, larguras em milímetros com medidas 621, 488, 291, 142, 520 e 489 e, com respectivas demandas de 300, 400, 800, 400, 400 e 1000.

Tabela 9. Restos obtidos no procedimento real.

Largura	Resto	Nº de vezes utilizado	Total de resto
621	480	300	144000
488	105	200	21000
291	499	1	499
	188	266	50008
142	473	1	473
	149	66	9834
520	41	200	8200
489	103	500	51500
			285514*

*total de resto obtido no procedimento real.

Para o lote em análise, o emprego do processo real de pintura apresentou um resto de 285514 milímetros, enquanto o emprego do modelo de otimização forneceu uma configuração otimizada com um resto total de 135300 milímetros, sendo obtido uma redução de 52,61 % no desperdício de utilização da esteira de pintura, o que impacta diretamente no parâmetro de desempenho do OEE (Eficiência Global do Equipamento).

Os comparativos para os demais lotes do primeiro dia de análise são apresentados na Tabela 10. Nesta tabela, são apresentadas as seguintes informações: Lote de otimização (L), Total de Resto gerado na versão otimizada (TRo), Total de Resto gerado no procedimento real (TRr) e Porcentagem de Ganho (PG). Os significados dessas colunas se mantêm nas Tabelas 11 a 14.

As tabelas que apresentam os comparativos dos resultados obtidos para os demais dias considerados no estudo apresentam a mesma estrutura apresentada. O comparativo do segundo dia de análise é apresentado na Tabela 11, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 10. Comparativo para os demais lotes do dia 1 de análise.

L	TRo	TRr	PG
2	19400	19400	0,00 %
3	189100	1468427	87,12 %
4	227052	604735	62,45 %
5	635800	3197285	80,11 %
6	984800	1993700	50,60 %
7	250500	250500	0,00 %

Tabela 11. Comparativo para o dia 2 de análise.

L	TRo	TRr	PG
1	39484	955341	95,86 %
2	60225	575885	89,54 %
3	28200	28200	0,00 %
4	63350	63350	0,00 %
5	309259	764385	59,54 %
6	1350	1350	0,00 %
7	144214	490603	70,60 %
8	21974	721478	96,95 %
9	21974	721478	96,95 %

O comparativo do terceiro dia de análise é apresentado na Tabela 12, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 12. Comparativo para o dia 3 de análise.

L	TRo	TRr	PG
1	7950	121171	94,43 %
2	183914	448470	58,99 %
3	58125	198250	70,68 %
4	168353	1187342	85,82 %
5	162015	1212392	86,63 %
6	94930	1182300	91,97 %

O comparativo do quarto dia de análise é apresentado na Tabela 13, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 13. Comparativo para o dia 4 de análise.

L	TRo	TRr	PG
1	36325	64350	43,55 %
2	56949	447057	87,26 %
3	288260	904756	68,13 %
4	112690	482620	76,65 %
5	1350	1350	0,00 %
6	524300	1337025	60,79 %

O comparativo do quinto dia de análise é apresentado na Tabela 14, juntamente com as demais informações relevantes das respectivas soluções.

Tabela 14. Comparativo para o dia 5 de análise.

L	TRo	TRr	PG
1	7013	134807	94,80 %
2	46844	762042	93,85 %
3	683100	1958798	65,12 %
4	191130	868214	77,98 %
5	970250	970250	0,00 %
6	984750	984750	0,00 %
7	1227350	1787850	31,35 %
8	690600	1251100	44,80 %
9	259600	409814	36,65 %
10	259600	409814	36,65 %
11	6150	6150	0,00 %
12	260600	260600	0,00 %

Na Tabela 15 será apresentado o comparativo para o somatório dos restos obtidos para cada dia e no junto a ela o comparativo semanal, que são apresentadas pelas seguintes informações: Dias analisados (Dia), Total de Resto gerado na versão otimizada (TRo), Total de Resto gerado no procedimento real (TRr) e Porcentagem de Ganho (PG).

Tabela 15. Comparativo da semana de análise.

Dia	TRo	TRr	PG
1	2441952	7819561	68,77 %
2	690030	4322070	84,03 %
3	675287	4349925	84,47 %
4	1019874	3237158	68,49 %
5	5586987	9804189	43,01 %
Semana	10414130	29532903	64,73 %

Quando analisado separadamente cada lote de otimização, é perceptível haver um grande potencial de ganho para alguns dos lotes avaliados, com percentuais na redução do desperdício acima de 80 %. Porém, quando feita a análise diária, observa-se uma redução no valor deste ganho, mas como o emprego do modelo de otimização se mostrando ainda bem vantajoso para o processo, com reduções de desperdício sempre superiores a 40 %.

No estudo de caso considerado neste trabalho, foi realizada a otimização do aproveitamento do espaçamento de uma esteira de trabalho, o que está diretamente ligado ao conceito de capacidade produtiva ou desempenho empregado no cálculo do OEE. Sendo assim, quando mencionado que se obterá um ganho de 64,73 % com o uso da otimização, é preciso considerar que se trata de um ganho sobre apenas um dos

parâmetros utilizados no cálculo deste índice global. Atualmente, devido à política de alocação de peças na esteira adotada na empresa, a sua eficiência é de 70 %, de modo que, com uma redução de 64,73 % no desperdício observado neste processo de alocação, seria possível alcançar uma eficiência de até 90 % de uso da esteira.

É importante destacar que os potenciais ganhos apresentados nessa seção são facilmente alcançados. No entanto, para a realização da otimização foi assumida uma simplificação relacionada a um parâmetro relevante para o processo, representado pelo comprimento da peça. Este parâmetro se mostra relevante, pois impõe uma restrição adicional ao modelo de otimização. Esta nova restrição teria como objetivo impedir o uso de peças em um mesmo padrão caso a diferença entre os seus comprimentos fosse superior a uma medida pré-estabelecida.

Conclusão

Com o desenvolvimento desse estudo aplicado, foi possível atingir o objetivo de desenvolver um modelo de otimização conciliando as necessidades de disposição de peças em uma esteira empregada no processo de pintura com as espessuras e cores utilizadas por uma empresa fabricante de móveis. Os resultados foram obtidos com a utilização de uma rotina que gerou os padrões de corte e que foram utilizados posteriormente em um sistema de otimização.

Uma das dificuldades que surgiram durante o desenvolvimento e aplicação do sistema de otimização foi relacionada à dificuldade de se considerar de forma conjunta todas as especificações de espessura, cor e tamanho para a geração dos padrões de corte, pois seria obtida uma quantidade grande de padrões de corte. Com essa quantidade grande de padrões gerados, o processo de otimização exigiria um tempo excessivo para gerar a solução devido à complexidade apresentada, sendo inviável sua aplicação do ponto de vista prático, no chão de fábrica. A estratégia adotada para viabilizar a obtenção de uma solução otimizada em um tempo viável foi a aplicação preliminar de um modelo de classificação por espessura e cor. Com isso, foram obtidas quantidades menores de padrões de corte e, consequentemente, processos de otimização menos onerosos.

A sugestão de melhora para futuros projetos é o desenvolvimento de um estudo de caso levando em consideração também os comprimentos das peças, uma vez que no estudo atual tal aspecto não foi considerado na formação dos padrões de corte, mas vale ressaltar que ao utilizar a restrição de comprimento, isso reduziria o número de padrões de corte possíveis de serem utilizados. Com essa redução no número de padrões de corte a serem avaliados na otimização, isso poderia reduzir o ganho possível com o uso do otimizador, em contrapartida teria poder ser obtida uma maior ocupação da esteira de pintura considerando o comprimento das peças e, dessa forma, alcançando um uso mais eficiente da área disponível para colocação das peças. Na Figura 6, são apresentados exemplos de possíveis padrões de organização que poderiam ser utilizados na linha de pintura

quando considerada a medida de comprimento das peças e quando não considerada esta medida.

É possível perceber que na linha de pintura A da Figura 6, quando todas as peças possuem o mesmo comprimento para todas as larguras tem-se um melhor uso da esteira. Já na linha de pintura B da Figura 6, quando os comprimentos são diferentes, tem-se uma pior acomodação das peças na esteira.

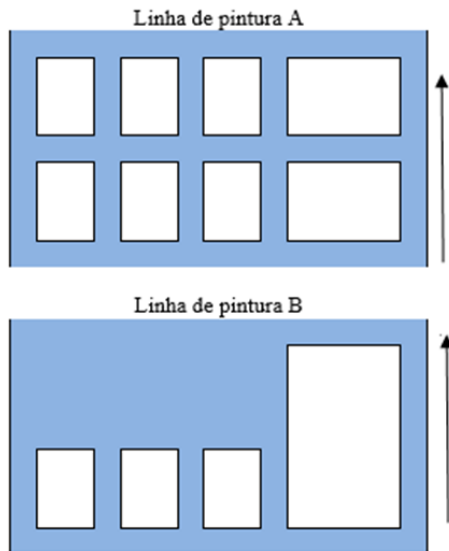


Figura 6. Representações dos padrões de organização na esteira considerando e não considerando o comprimento.

Contribuição dos autores

M. Ledur: Conceituação, Redação do manuscrito original;
L. D. Chiwiacowsky: Pesquisa, Metodologia, Redação - revisão e edição. Todos os autores aprovaram a versão final do artigo

Conflitos de Interesses

Os autores declaram que não há conflitos de interesses.

Referências

- [1] G. T. Junior, P. Saltorato, Impacts of the Industry 4.0 on Work Organization: A Systematic Review of the Literature. *Revista Produção Online*, vol. 18, pp. 743-769, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i2.2967>.
- [2] B. P Santos, A. Alberto, T. D. F. M. Lima, F. M. B. Charrua -Santos, Indústria 4.0: Desafios e Oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, vol. 4, pp.111-124, 2018.
- [3] M. Kujanpää, J. Hakala, T. Pajula, B. Beisheim, S. Krämer, D. Ackershott, M. Kalliski, S. Engell, U. Enste, J. L. P. Perez, Successful Resource Efficiency Indicators for Process Industries: Step-by-step Guidebook. *VTT Technical*, vol. 290, pp. 1-78, 2017.
- [4] F. Peregrino, Questões Sobre a Burocracia e as Sociedades Industriais e do Conhecimento. *Inteligência Empresarial (UFRJ)*, vol. 43, pp 1-19, 2021.
- [5] G. Santos-Navarro, P. Wonh-Gonzálvez, A. Martínez-Martínez, Technical Efficiency Measurement of the Automotive Industry Through *data Envelope Analysis*. *Economía, Sociedad y Territorio*, vol. 19, pp. 173-201, 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.22136/est20191294>.
- [6] M. G. Kibria, K. Nguyen, G. P. Villardi, K. Ishizu, O. Zhao, F. Kojima, Big Data Analytics, Machine Learning, and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks. *IEEE ACCESS*, vol. 6, pp. 32328-32338, 2018. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2837692.
- [7] M. Hosseini, A. Peer, Wood Products Manufacturing Optimization: A Survey. *IEEE ACCESS*, vol. 10 pp. 121653 -121683, 2022. DOI:10.1109/ACCESS.2022.3223053.
- [8] H. Zhao, X. Ning, X. Liu, C. Wang, J. Liu, What Makes Evolutionary Multi-task Optimization Better: A Comprehensive Survey. *Applied Soft Computing*, vol. 145, pp. 1-23, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asc.2023.110545>
- [9] D. J. Alem, R. Morabito, Production Planning in Furniture Settings via Robust Optimization. *Computers & Operations Research*, vol. 39, pp. 139-150, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2011.02.002>.
- [10] S. U. Sherif, N. Jawahar, M. Balamurali, Sequential Optimization Approach for Nesting and Cutting sequence in Laser Cutting. *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33 pp. 624-638, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.05.011>.
- [11] C. T. L. da S. Ghidini, P. M. Oliveira, W. A. de Oliveira, Simulação-Otimização Aplicada ao Problema Integrado na Indústria de Móveis. *Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento*, vol. 15, pp. 1-23, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4322/PODes.2022.008>.
- [12] C. C. E. Junior, R. J. Bernardy, Production Bottlenecks: The Current Scenario of a Refrigeration Industry. *Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo*, vol. 8 pp. 34-48, 2023.
- [13] R. B M. de Oliveira, V. A. Corrêa, L. E. N do P. Nunes, Mapeamento do Fluxo de Valor em uma Modelo de Simulação Computacional. *Revista Produção Online*, vol. 14, pp. 837-861, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14488/1676-1901.v14i3.1461>.
- [14] J. I. dos S. Filho, J. Morreira, O Setor Moveleiro de Exportação no Estado de Santa Catarina: Considerações gerais e impacto no Desenvolvimento Econômico. *Repositório de Informação Tecnológica da Embrapa*, vol. 340, pp. 43, 2020.
- [15] O. F. Guerra, P. S. H. Gonzales, Novas Mudanças Estruturais na Economia Baiana: Mito ou Realidade?. *Revista Econômica do Nordeste*, vol. 32 pp. 308-321, 2023. DOI: <https://doi.org/10.61673/ren.2001.1806>.

- [16] D. G. Monteiro, F. C. Melo, F. A. dos Santos, M. J. Machado, M. M. S. Aliganchuki, S. L. Guerreiro, Gestão de Processos: Mapeamento e Melhoria de Processo em uma Indústria Moveleira. *Inova +*, vol. 1, pp. 594-617, 2021.
- [17] V. L. Bazzanello, M. Brambatti, A. de Paris, A. Romanowski, The Influence of Automation in a Production Process: A Case Study in the Furniture Industry. *Administração de empresas em resista*, vol. 1, pp. 98-121, 2022.
- [18] T. R. Lopes, A. S. Fritsch, J. B. R. Mees, Metodologias e Medidas para a Minimização de Resíduos em uma Indústria Moveleira. *Tecno-Lógica*, vol. 19, pp. 6-17, 2015.
- [19] S. A. de Araujo. K. C. Poldi, J. Smith, A Genetic Algorithm for the One-Dimensional Cutting Stock Problem With Setups. *Pesquisa Operacional (Online)*, vol. 34, pp. 165-187, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2014.034.02.0165>.
- [20] C. A. Signorini, S. A. de Araujo, S. C. Poltroniere, G. M. Melega, One-dimensional multi-period cutting stock problem with two stages applied to lattice slab production. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 74, pp. 1378-1392, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/01605682.2022.2085067>.
- [21] G. M. Melega, S. A. de Araujo, R. Morabito, Mathematical model and solution approaches for integrated lot-sizing, scheduling and cutting stock problems. *Annals of Operations Research*, vol. 295, pp. 695-736, 2020. DOI: <https://doi.org/10.107/s10479-020-037964-9>.
- [22] F. K. Lemos, A. C. Cherri, S. A. de Araujo, The cutting stock problem with multiple manufacturing modes applied to a construction industry. *International Journal or Production Research*, vol. 59, pp. 1088-1106, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1720923>.
- [23] B. S. C. Campello, C. T. L. S. Ghidini, Métodos de Análise de Decisão Multicritério para Seleção de Padrões de Corte. *Trends in Computational and Applied Mathematics*, vol. 23, pp. 1-16, 2022. DOI: 10.5540/tcam.2022.023.01.00001.
- [24] M. Huang, Y. Zhong, H. Yang, J. Wang, L. Shi, Simplex Initialization: A Survey of Techniques and Trends. *Computer Science Review*, pp. 1-28, 2021. DOI: 2111.03376v1.
- [25] D. R. Morrison, S. H. Jacobson, J. J. Sauppe, E. C. Sewell, Branch-and-bound Algorithms: A Survey of Recent Advances in Searching, Branching, and Pruning. *Discrete Optimization*, vol. 19 pp. 79-102, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.disopt.2016.01.005>.
- [26] A. C. Cherri, M. N. Arenales, H. H. Yanasse, The One-Dimensional Cutting Stock Problem with Usable Leftover – A Heuristic Approach. *European Journal of Operational Research*, vol. 196 pp. 897-908, 2009. DOI: [doi:10.1016/j.ejor.2008.04.039](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.04.039).
- [27] IBM ILOG CPLEX – Optimization Studio. *IBM*, 2023. Site: <https://www.ibm.com/br-pt/products/ilog-cplex-optimization-studio>.