57º SBPO
SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL
Gramado • RS
DE 5 A 9 DE OUTUBRO DE 2025

OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE PRODUÇÃO NA BINADEIRA: MODELO MATEMÁTICO PARA ALOCAÇÃO DE FUSOS

Danylo de Araujo Viana
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01 – Vargem Limpa, Bauru – SP, 17.033-360
danylo.viana@unesp.br

Adriana Cristina Cherri
Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"
Av. Engenheiro Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01 – Vargem Limpa, Bauru – SP, 17.033-360
adriana.cherri@unesp.br

RESUMO

Este estudo aborda a programação da produção em uma máquina de binadeira, utilizada na fabricação de fio tangleado na indústria têxtil, por meio da otimização de 160 fusos disponíveis ao longo de 31 dias. Desenvolveu-se um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para minimizar o número de trocas (*setups*) entre sete produtos distintos, considerando restrições de capacidade, demanda e prazos. A metodologia envolveu a implementação do modelo em linguagem *Python*, utilizando a biblioteca *DOcplex* e o solucionador *IBM ILOG CPLEX*. Os resultados mostraram que o modelo atendeu integralmente à demanda com apenas quatro trocas, mantendo 100% de ocupação dos fusos durante o período. Conclui-se que o modelo é eficiente, representa bem a dinâmica real da produção e possui potencial de aplicação em contextos industriais semelhantes, contribuindo para a redução de custos e maior estabilidade na programação da produção.

PALAVRAS CHAVE. Programação da Produção. Otimização de Recursos. Indústria Têxtil.

Tópicos (Pesquisa Operacional na Administração e Gestão da Produção. Pesquisa Operacional na Indústria. Otimização Discreta)

ABSTRACT

This study addresses the production scheduling on a binadeira machine, used in the manufacturing of tangled yarn in the textile industry, through the optimization of 160 available spindles over a 31-day period. A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) mathematical model was developed to minimize the number of changeovers (*setups*) among seven distinct products, considering constraints related to capacity, demand, and deadlines. The methodology involved implementing the model in *Python* using the *DOcplex* library and the *IBM ILOG CPLEX* solver. The results showed that the model fully met the demand with only four changeovers, maintaining 100% spindle utilization throughout the period. It is concluded that the model is efficient, accurately represents the real dynamics of production, and has potential for application in similar industrial contexts, contributing to cost reduction and greater stability in production scheduling.

https://proceedings.science/p/212505?lang=pt-br

KEYWORDS. Production Scheduling. Resource Optimization. Textile Industry.

Paper topics (Operational Research in Production Management. Operational Research in Industry. ODiscrete Optimization)

1. Introdução

No contexto atual de alta competitividade, as empresas buscam constantemente maneiras de se diferenciar da concorrência e alcançar um desempenho superior, o que é fundamental para sua sobrevivência [Bugor e de Lucca Filho, 2021]. Nesse cenário, a adoção de um bom Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) torna-se um fator diferencial, permitindo à organização destacar-se no mercado ao planejar e controlar eficientemente todo o sistema produtivo, promovendo maior eficácia operacional [Sberse et al., 2024].

A função do PPCP está relacionada à operação e coordenação dos recursos da empresa no dia a dia. O objetivo é garantir a disponibilidade de materiais e demais recursos variáveis necessários para fornecer os bens e serviços que atendem às demandas dos clientes [Chiavenato, 2014]. O PPCP abrange processos decisórios e políticas referentes ao planejamento (estimativa, roteirização, programação e carregamento de recursos) e ao controle (despacho, acompanhamento, inspeção, avaliação e ações corretivas) dos processos e recursos produtivos [Slack et al., 2013].

A necessidade de aperfeiçoar os processos produtivos e as decisões tem levado as empresas a buscar mecanismos que auxiliem nas análises de desempenho e resultados. Com os avanços na área computacional e por razões econômicas, muitas organizações têm buscado tornar seus processos produtivos mais eficientes. Isso tem impulsionado o surgimento de pesquisas acadêmicas voltadas ao desenvolvimento de modelos de otimização aplicados ao controle e planejamento de sistemas produtivos. Nesse contexto, a pesquisa operacional destaca-se como um dos mecanismos mais utilizados [Tilindis e Kleiza, 2014].

A aplicação de modelos matemáticos à programação da produção tem se mostrado eficaz para lidar com ambientes industriais complexos e de alta variabilidade. Segundo Georgiadis et al. [2020], o uso de modelos de programação linear inteira mista permite a geração de cronogramas ideais, mesmo diante de múltiplos produtos, restrições de capacidade e prazos rigorosos. Esses modelos são particularmente adequados para decisões discretas, pois capturam com elevado grau de detalhamento as restrições reais do ambiente produtivo [Lee e Lee, 2022].

Um dos aspectos mais relevantes nesse tipo de modelagem é a minimização dos tempos de *setups*, que impactam diretamente a eficiência do sistema produtivo. Como destacado por Velez et al. [2017], a consideração explícita dos tempos de setup na formulação do modelo pode resultar em ganhos operacionais significativos. Apesar desses avanços, ainda são escassas as aplicações específicas para programação de máquinas com múltiplos produtos na indústria têxtil. Um exemplo recente é o trabalho de Berthier et al. [2022], que propõe uma abordagem de programação de máquinas paralelas com tempos de *setup* dependentes da sequência, aplicada a um estudo de caso do setor têxtil europeu.

Diante desse cenário, em que a busca por eficiência operacional é essencial para a competitividade, a otimização dos processos produtivos torna-se cada vez mais relevante. Este estudo propõe um modelo matemático de programação linear inteira mista para otimizar a alocação dos 160 fusos disponíveis em uma máquina de binadeira, com o objetivo de minimizar o número de trocas entre produtos ao longo de 31 dias. O modelo considera variáveis inteiras para a alocação diária de fusos e variáveis binárias para representar eventos de *setup*. A função objetivo busca reduzir o número total de trocas, respeitando restrições de capacidade, atendimento da demanda e prazos de entrega. A modelagem foi implementada em *Python*, com uso da biblioteca *DOcplex* e do solucionador *IBM ILOG CPLEX*. Os resultados indicam que o modelo atendeu integralmente à

https://proceedings.science/p/212505?lang=pt-br

demanda com apenas quatro trocas ao longo do período, mantendo a ocupação total dos recursos produtivos e excedentes dentro da margem aceitável.

O artigo está estruturado em seis seções. A Seção 2 descreve a metodologia adotada, abordando as etapas de coleta e análise de dados, bem como os procedimentos utilizados para a construção do modelo matemático. Na Seção 3, apresenta-se a caracterização do problema industrial, incluindo informações sobre o processo produtivo da binadeira, os produtos envolvidos e os desafios operacionais enfrentados. A Seção 4 detalha o modelo de programação linear inteira mista desenvolvido, com a formalização das variáveis, restrições e função objetivo. Os resultados obtidos com a implementação do modelo, assim como sua avaliação em termos de desempenho e eficiência, são discutidos na Seção 5. Por fim, a Seção 6 apresenta as principais conclusões do estudo, destacando suas contribuições para o setor têxtil e apontando possíveis direções para estudos futuros.

2. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem quantitativa e aplicada, com foco no desenvolvimento de um modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM). O modelo busca atender à demanda de diferentes produtos ao longo de um período de 31 dias, respeitando os prazos de entrega estabelecidos e minimizando o número de trocas entre produtos, que geram perdas de eficiência produtiva. A coleta de dados foi conduzida por meio de fontes primárias e secundárias. As fontes primárias incluíram entrevistas semiestruturadas com supervisores de produção, enquanto as fontes secundárias consistiram na análise de registros históricos extraídos do sistema de gestão da produção, bem como de documentos operacionais e planos de produção anteriores.

A modelagem foi implementada na linguagem *Python*, utilizando a biblioteca *DOcplex (Decision Optimization Modeling for Python)*, desenvolvida pela *IBM*. A resolução do modelo foi realizada com o uso do solucionador *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. Foram definidas variáveis inteiras para representar a quantidade de fusos alocados por tipo de produto em cada dia, e variáveis binárias para indicar a ocorrência de trocas entre produtos. A função objetivo visa à minimização do número total de *setups* ao longo do período de planejamento. Entre as restrições incorporadas ao modelo, incluem-se: a capacidade máxima de 160 fusos por dia; o atendimento integral da demanda de cada produto dentro do prazo estabelecido; a consistência na alocação entre dias consecutivos; e as condições de integridade e não negatividade das variáveis. A validação do modelo foi realizada por meio da comparação entre os resultados otimizados e os dados históricos reais de programação da produção.

Observou-se que o modelo apresentou soluções consistentes com as práticas adotadas pela indústria, mas com uma redução significativa no número de *setups* realizados. Além disso, o modelo contribuiu para uma melhor distribuição da carga de trabalho ao longo dos dias, respeitando os limites de capacidade estabelecidos. Esses resultados reforçam o potencial de aplicação da abordagem proposta no suporte à tomada de decis ao em ambientes de produção com múltiplos produtos e restrições operacionais.

3. Descrição do Problema

Este trabalho está inserido no contexto da indústria têxtil e tem como foco a otimização do processo produtivo em uma máquina de binadeira, utilizada na fabricação de fio tangleado. O fio tangleado é constituído por multifilamentos unidos por jatos de ar, conferindo coesão entre os filamentos e garantindo estabilidade para as etapas subsequentes, como a tecelagem plana. O principal desafio abordado neste estudo é realizar a alocação eficiente dos 160 fusos disponíveis na máquina de binadeira, de modo a atender à demanda de sete produtos distintos (A, B, C, D, E, F e G), respeitando o prazo global de produção estabelecido. O fuso da binadeira é o componente que torce as fibras, formando um fio contínuo, cujo produto final é a roca, que corresponde ao conjunto de fios torcidos enrolados em uma bobina, pronta para ser utilizada em processos têxteis.

4. Modelagem Matemática

4.1. Índices, Conjuntos e Parâmetros

Nesta seção, são definidos os índices, conjuntos e parâmetros utilizados na formulação matemática do problema, com o objetivo de facilitar o entendimento da modelagem e da resolução do planejamento da produção.

- $p \in P$: conjunto de produtos a serem produzidos, sendo $P = \{A, B, C, D, E, F, G\}$;
- $d \in D$: conjunto de dias do horizonte de planejamento, sendo $D = \{1, 2, \ldots, 31\}$;
- D_p: demanda total do produto p, em quilogramas;
- P_p: produtividade do produto p, em kg por fuso por dia;
- T_p: prazo máximo de entrega do produto p, em dias;
- F_{total}: capacidade total de fusos por dia, sendo $F_{total} = 160$.

4.2. Variáveis de Decisão

Duas variáveis de decisão são definidas para representar o planejamento da produção: as variáveis inteiras de alocação de fusos, denotadas por $x_{p,d}$, e as variáveis binárias de troca, denotadas por $t_{p,d}$. A variável $x_{p,d}$ indica a quantidade de fusos utilizada para o produto p no dia d, sendo $p \in P$ e $d \in D$. Já a variável $t_{p,d}$ assume valor 1 se houver uma troca associada ao produto p no dia d, e 0 caso contrário. O fato de d iniciar em 2 no conjunto de variáveis binárias se deve ao fato de que não há comparação com um dia anterior no primeiro dia do horizonte. Assim:

- $x_{p,d}$: quantidade de fusos alocados ao produto $p \in P$ no dia $d \in D$;
- $t_{p,d}$: variável binária que indica se houve troca do produto $p \in P$ no dia $d \in \{2, \ldots, 31\}$.

4.3. Função Objetivo

A função objetivo do modelo matemático, representada na Equação 1, tem por finalidade minimizar o número total de trocas entre os produtos ao longo do horizonte de planejamento.

$$\min \; Z = \sum_{p \in P} \sum_{d=2}^{31} t_{p,d} \tag{1}$$

em que:

- Z: valor total da função objetivo, correspondente à soma das trocas realizadas entre os dias;
- $t_{p,d}$: variável binária que assume valor 1 caso tenha ocorrido troca na produção do produto $p \in P$ no dia $d \in \{2, \ldots, 31\}$, e valor 0 caso contrário;
- P: conjunto de produtos a serem produzidos.

4.4. Restrições

O modelo matemático proposto é composto por quatro restrições. Estas restrições são: a capacidade total da máquina, limitada a 160 fusos por dia (Eq. 2), a garantia de que a demanda total de cada produto seja atendida até sua data limite de entrega (Eq. 3), a condição de que a troca seja ativada apenas quando houver uma mudança na alocação de fusos entre os dias, capturando qualquer aumento ou diminuição (Eq. 4) e (Eq. 5). A seguir, cada uma dessas restrições é detalhada e formulada matematicamente.

A restrição de capacidade total (Eq. 2) garante que a soma dos fusos alocados para todos os produtos, em cada dia, não ultrapasse a capacidade máxima da máquina:

$$\sum_{p \in P} x_{p,d} \leq F_{total}, \quad \forall d \in D \tag{2}$$

em que:

- $x_{p,d}$: quantidade de fusos alocados para a produção do produto $p \in P$ no dia $d \in D$;
- $F_{total} = 160$: capacidade total de fusos por dia.

A restrição de atendimento à demanda (Eq. 3), assegura que a produção acumulada de cada produto $p \in P$, até sua data limite de entrega T_p, seja suficiente para atender sua demanda D_p, considerando a produtividade diária de cada fuso:

$$\sum_{d=1}^{T_p} x_{p,d} \cdot P_p \geq D_p, \quad \forall p \in P \tag{3}$$

em que:

- P_p: produtividade do produto p, em kg por fuso por dia;
- D_p: demanda total do produto p, em kg;
- T_p: prazo máximo de entrega do produto p.

As duas restrições seguintes utilizam a abordagem do *Big-M*. O valor de $M = 160$, correspondente à capacidade máxima da máquina, e foi adotado como limite superior da diferença entre alocações. A restrição de troca por aumento (Eq. 4) garante que a variável binária $t_{p,d}$ seja ativada quando houver incremento na alocação de fusos de um dia para o seguinte:

$$x_{p,d} - x_{p,d-1} \leq M \cdot t_{p,d}, \quad \forall p \in P,\ d \geq 2 \tag{4}$$

A restrição de trocas por redução (Eq. 5), assegura que a mesma variável $t_{p,d}$ seja ativada também quando houver redução na alocação entre os dias:

$$x_{p,d-1} - x_{p,d} \leq M \cdot t_{p,d}, \quad \forall p \in P,\ d \geq 2 \tag{5}$$

em que:

- $t_{p,d}$: variável binária que indica se houve troca (*setup*) para o produto p no dia d;
- $M = 160$: constante do *Big-M* que garante a correta ativação de $t_{p,d}$.

4.5. Representação Matemática do Modelo

O modelo matemático proposto é composto pelas seguintes equações, que definem a função objetivo e as restrições do problema de planejamento da produção:

$$\min \ Z = \sum_{p \in P} \sum_{d=2}^{31} t_{p,d} \tag{1}$$

$$\sum_{p \in P} x_{p,d} \leq F_{total}, \quad \forall d \in D \tag{2}$$

$$\sum_{d=1}^{T_p} x_{p,d} \cdot P_p \geq D_p, \quad \forall p \in P \tag{3}$$

$$x_{p,d} - x_{p,d-1} \leq M \cdot t_{p,d}, \quad \forall p \in P, d \geq 2 \tag{4}$$

$$x_{p,d-1} - x_{p,d} \leq M \cdot t_{p,d}, \quad \forall p \in P, d \geq 2 \tag{5}$$

$$x_{p,d} \in \mathbb{Z}^+, \quad \forall p \in P, d \in D \tag{6}$$

$$t_{p,d} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, d \in D \tag{7}$$

5. Resultados

Os experimentos computacionais foram conduzidos em um computador *Acer Aspire* 3 A315-23G, com processador *AMD Ryzen*™ 3 3250U (*dual-core*, 4 *threads*, frequência base de 2,6 GHz e turbo de até 3,5 GHz, com 4 MB de cache). A implementação e a resolução do modelo foram realizadas por meio do *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*, versão 22.1.0.0. O tempo total de processamento para a obtenção da solução ótima foi de aproximadamente 81,17 segundos.

5.1. Dados de Entrada

A Tabela 1 apresenta a demanda de cada produto, a produção unitária por fuso em um dia e a quantidade total de fusos necessários para atender à demanda de produção. Essa quantidade foi obtida por meio da divisão da demanda pela produtividade diária de cada produto por fuso. Ressalta-se que os valores de demanda foram ajustados de modo a garantir que essa divisão resultasse em números inteiros, evitando frações na alocação e tornando o modelo mais coerente com a realidade operacional da máquina.

Tabela 1: Demanda, produção por fuso/dia, fusos necessários e fusos/dia por produto

Produto	Demanda (kg)	Produção Fuso/Dia (kg)	Fusos Necessários	Fusos/Dia
A	2257	37	61	1,97
B	3050	25	122	3,94
C	10854	27	402	12,97
D	16170	21	770	24,84
E	29106	21	1386	44,71
F	18800	20	940	30,32
G	22482	18	1249	40,29

A coluna Fusos/Dia apresenta a média diária de fusos necessários para cada produto ao longo do horizonte de planejamento de 31 dias. Esse valor foi obtido dividindo-se a demanda

de cada produto pela sua produtividade diária por fuso, resultando na quantidade total de fusos necessários, e, em seguida, dividindo-se esse total pelo número de dias do período de produção. Para fins de cálculo, as demandas foram ajustadas de forma que essa divisão resultasse em valores inteiros de fusos, facilitando a implementação computacional do modelo. Esse ajuste pode resultar em uma produção ligeiramente superior. Esse excedente, porém, é aceito pela indústria, que trabalha com uma margem operacional que permite uma produção adicional de até 1.000 kg, sem impactos negativos significativos no estoque ou na distribuição dos produtos.

5.2. Programação da Produção

A solução obtida resultou em um valor final da função objetivo igual a 4, o que representa o total de trocas realizadas ao longo do horizonte de planejamento. Esse resultado indica um excelente desempenho do modelo em reduzir os *setups*, promovendo maior eficiência na alocação dos recursos produtivos sem comprometer o atendimento da demanda. A Tabela 2 apresenta a programação da produção da binadeira ao longo de 31 dias, detalhando a alocação dos 160 fusos disponíveis entre os sete produtos A, B, C, D, E, F e G.

Do dia 1 ao dia 21, a alocação se mantém constante: os produtos A, B e C recebem, respectivamente, 2, 4 e 13 fusos por dia. Nesse mesmo período, os produtos D, E e F são produzidos com 36, 66 e 39 fusos, respectivamente, enquanto o produto G não é produzido. A partir do dia 22, observa-se uma mudança significativa na distribuição dos fusos. Os produtos D, E e F têm suas alocações reduzidas, passando a receber apenas 2, 0 e 14 fusos por dia, respectivamente. Simultaneamente, o produto G passa a ocupar 125 fusos diários, tornando-se o principal foco da produção até o fim do mês. Essa transição evidencia uma estratégia eficiente de planejamento da produção, que minimiza o número de trocas ao longo do horizonte de 31 dias. A redução para apenas quatro trocas no total reflete o sucesso do modelo em priorizar uma alocação estável de recursos produtivos, respeitando os prazos de entrega e maximizando a eficiência operacional.

A partir dos dados de alocação de fusos ao longo dos 31 dias, detalha-se a redistribuição dos recursos entre os produtos em dias consecutivos, com foco nas trocas realizadas durante o período de planejamento. A análise identifica, para cada par de dias, os produtos que tiveram redução na quantidade de fusos alocados (indicando saída de fusos) e os produtos que receberam fusos adicionais (indicando entrada). Ao longo de todo o horizonte, observou-se um padrão altamente estável de produção entre os dias 1 e 21, sem alterações nas alocações diárias de fusos. A única redistribuição significativa ocorreu do dia 21 para o dia 22.

Essa mudança pontual, que representa a transição da produção dos produtos D, E e F para o produto G, permitiu ao modelo minimizar o número total de trocas, reduzindo-o para apenas quatro ao longo de todo o período. Isso evidencia uma estratégia de alocação bem estruturada e eficiente, priorizando a estabilidade produtiva e o aproveitamento contínuo dos fusos disponíveis. No dia 22, houve uma redistribuição de fusos entre os produtos: o Produto D teve uma saída de 34 fusos, o Produto E, uma saída de 66 fusos, e o Produto F, uma saída de 25 fusos. Por outro lado, o Produto G recebeu uma entrada de 125 fusos.

A média de ocupação dos fusos na binadeira ao longo dos 31 dias foi calculada em 100,00%, indicando uma utilização completa da capacidade total de 160 fusos disponíveis. Esse resultado reflete um planejamento altamente eficiente e otimizado, garantindo que todos os recursos foram aproveitados ao máximo ao longo do horizonte de planejamento. A ocupação foi consistente ao longo de todos os dias, sem variações ou subutilização dos fusos, o que demonstra a estabilidade do modelo e a excelente distribuição dos recursos para atender às demandas de todos os produtos. Esse desempenho reforça o impacto positivo das restrições introduzidas, alinhando eficiência operacional e atendimento pleno.

Tabela 2: Programação da alocação de fusos

Dia	A	B	C	D	E	F	G	Total Fusos
1	2	4	13	36	66	39	0	160
2	2	4	13	36	66	39	0	160
3	2	4	13	36	66	39	0	160
4	2	4	13	36	66	39	0	160
5	2	4	13	36	66	39	0	160
6	2	4	13	36	66	39	0	160
7	2	4	13	36	66	39	0	160
8	2	4	13	36	66	39	0	160
9	2	4	13	36	66	39	0	160
10	2	4	13	36	66	39	0	160
11	2	4	13	36	66	39	0	160
12	2	4	13	36	66	39	0	160
13	2	4	13	36	66	39	0	160
14	2	4	13	36	66	39	0	160
15	2	4	13	36	66	39	0	160
16	2	4	13	36	66	39	0	160
17	2	4	13	36	66	39	0	160
18	2	4	13	36	66	39	0	160
19	2	4	13	36	66	39	0	160
20	2	4	13	36	66	39	0	160
21	2	4	13	36	66	39	0	160
22	2	4	13	2	0	14	125	160
23	2	4	13	2	0	14	125	160
24	2	4	13	2	0	14	125	160
25	2	4	13	2	0	14	125	160
26	2	4	13	2	0	14	125	160
27	2	4	13	2	0	14	125	160
28	2	4	13	2	0	14	125	160
29	2	4	13	2	0	14	125	160
30	2	4	13	2	0	14	125	160
31	2	4	13	2	0	14	125	160

5.3. Produção Total

A Figura 1 apresenta a produção acumulada de cada produto ao longo dos 31 dias de planejamento. Observa-se que os produtos E, G e F concentram os maiores volumes produzidos, com destaque para o Produto G, cuja produção se intensifica a partir do dia 22, refletindo a reconfiguração na alocação dos fusos na fase final do horizonte.

A produção do Produto A foi de 2.294 kg, excedendo a demanda ajustada de 2.257 kg em 37 kg. Esse pequeno excesso pode indicar uma alocação eficiente dos fusos, proporcionando uma margem de segurança para atender variações na demanda, mas deve ser monitorado para evitar custos desnecessários. No Produto B, a produção foi de 3.100 kg, superando a demanda ajustada de 3.050 kg em 50 kg. O excesso moderado pode ser visto como uma medida preventiva, sendo importante revisar a alocação de fusos para evitar excessos futuros.

O Produto C teve uma produção de 10.881,00 kg, superando a demanda ajustada de 10.854 kg em 27 kg. Esse pequeno excesso reflete uma boa sincronização entre a produção planejada e a demanda ajustada, sem gerar custos significativos. Para o Produto D, a produção foi de 16.254 kg, excedendo a demanda ajustada de 16.170 kg em 84 kg. Embora mais significativo, esse excesso oferece flexibilidade para imprevistos, sem comprometer a eficiência.

No Produto E, a produção foi exatamente igual à demanda de 29.106 kg, indicando um ajuste preciso e eficiente, sem necessidade de excessos. A produção do Produto F foi de 18.900 kg,

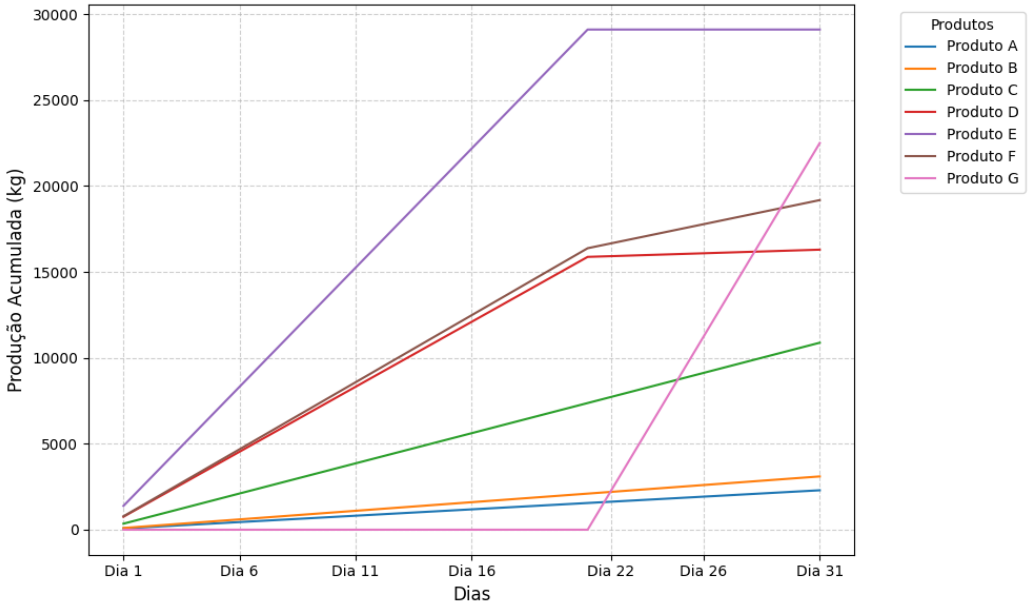


Figura 1: Distribuição da produção ao longo do horizonte de planejamento

excedendo a demanda ajustada de 18.800 kg em 100 kg. Esse excesso deve ser monitorado para evitar custos adicionais, embora tenha garantido o atendimento à demanda. Finalmente, o Produto G teve uma produção de 22.500 kg, superando a demanda de 22.482 kg em 18 kg, o que reflete um bom ajuste, com um pequeno excesso como medida de precaução.

5.4. Utilização de Fusos por Produto

A distribuição percentual da utilização de fusos ao longo do planejamento evidencia a prioridade dada aos produtos com maior demanda. O Produto E concentrou 27,94% da utilização total, seguido pelos Produtos G (25,20%) e F (19,33%), refletindo sua relevância no planejamento. Em contraste, os Produtos A (1,25%) e B (2,50%) apresentaram baixa utilização, coerente com suas menores demandas. Os Produtos D (15,65%) e C (8,12%) ocuparam posição intermediária. Assim, os resultados apresentados na Tabela 3 destacam a consistência do modelo de planejamento em priorizar demandas mais robustas, garantindo flexibilidade suficiente para atender produtos menos prioritários.

Tabela 3: Utilização de Fusos por Produto no mês (%)

Produto	**Utilização (%)**
A	1,25
B	2,50
C	8,12
D	15,65
E	27,94
F	19,33
G	25,20

Os resultados revelam uma alocação coerente e eficiente dos fusos, privilegiando produtos de maior impacto no planejamento, como o Produto E, e alocando recursos de forma suficiente, embora limitada, para produtos com menor participação na produção, como os Produtos A e B.

Essa abordagem balanceada assegura que as demandas ajustadas sejam atendidas sem comprometer a eficiência do processo produtivo.

6. Conclusão

O presente estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo matemático para a otimização da programação da produção em uma máquina de binadeira, com foco na alocação eficiente dos 160 fusos disponíveis ao longo de 31 dias. Utilizou-se a metodologia de programação linear inteira mista, com variáveis inteiras para a alocação diária de fusos e variáveis binárias para representar eventos de *setups*. A implementação foi realizada com o uso da linguagem *Python*, por meio da biblioteca *DOcplex*, e o solucionador *IBM ILOG CPLEX*. O modelo visou garantir a utilização máxima dos fusos, minimizando o número de trocas entre produtos e atendendo às restrições de capacidade e demanda de produção.

A principal meta foi alocar eficientemente os 160 fusos da máquina de binadeira, de forma a atender à demanda de sete produtos distintos ao longo de um período de 31 dias, respeitando os prazos de entrega e minimizando o número de trocas entre os produtos. A redução dos *setups* impacta diretamente a eficiência do processo produtivo, proporcionando uma operação mais estável e com menor custo operacional. O estudo buscou não apenas atender à demanda, mas também propor um modelo suficientemente robusto para aplicações em cenários reais da indústria.

O problema de pesquisa abordado envolveu a alocação eficiente dos fusos disponíveis para a produção de sete produtos distintos, considerando a capacidade limitada da máquina e os prazos de entrega específicos de cada item. O desafio foi minimizar o número de trocas ao longo dos 31 dias, de modo a evitar perdas de eficiência e garantir a pontualidade nas entregas. A pesquisa concentrou-se na otimização do uso dos recursos disponíveis, respeitando as restrições de capacidade e equilibrando a alocação dos fusos com o atendimento das demandas.

Os principais resultados obtidos indicam que o modelo matemático proposto foi eficaz na alocação dos fusos ao longo do período de planejamento, com utilização completa dos recursos e apenas quatro trocas entre produtos durante os 31 dias. O modelo atendeu à demanda de todos os sete produtos de forma eficiente, com uma alocação estável e sem ocorrência de subutilização. A produção foi ajustada para atender à demanda dentro dos prazos estabelecidos, e os pequenos excedentes ficaram dentro das margens aceitáveis. Esses resultados reforçam a eficácia do modelo na otimização da alocação de fusos, garantindo elevada eficiência no processo produtivo. As principais contribuições deste estudo são a implementação de um modelo matemático eficaz para otimizar a alocação de fusos em uma máquina de binadeira e a capacidade de reduzir os custos operacionais ao minimizar as trocas entre produtos. O modelo demonstrou ser uma ferramenta útil para a indústria, proporcionando um planejamento eficiente da produção e assegurando o atendimento das demandas sem comprometer os prazos.

O modelo apresentou limitações relacionadas à simplificação das condições operacionais, desconsiderando variações no desempenho dos fusos, custos de manutenção e falhas imprevistas. Além disso, assumiu-se que a demanda e a produtividade permaneceriam constantes, o que nem sempre reflete a realidade industrial. Para estudos futuros, recomenda-se incorporar variáveis dinâmicas e sistemas de monitoramento em tempo real, visando maior aderência à complexidade do ambiente produtivo.

Referências

Berthier, A., Yalaoui, A., Chehade, H., Yalaoui, F., Amodeo, L., e Bouillot, C. (2022). Unrelated parallel machines scheduling with dependent setup times in textile industry. *Computers & Industrial Engineering*, 174:108736.

Bugor, F. B. e de Lucca Filho, J. (2021). A importância do planejamento, programação e controle da produção (ppcp) para o desenvolvimento das indústrias atuais. *Revista Interface Tecnológica*, 18(1):461–473.

Chiavenato, I. (2014). Gestão da produção: uma abordagem introdutória. *Barueri, São Paulo*, 11.

Georgiadis, G. P., Pampín, B. M., Cabo, D. A., e Georgiadis, M. C. (2020). Optimal production scheduling of food process industries. *Computers & chemical engineering*, 134:106682.

Lee, Y. e Lee, K. (2022). New integer optimization models and an approximate dynamic programming algorithm for the lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setups. *European Journal of Operational Research*, 302(1):230–243.

Sberse, A. M., Cislaghi, T. P., e D'Arisbo, A. (2024). Uma proposta de implantação de ferramentas de planejamento, programação e controle da produção em uma indústria de pequeno porte na serra gaúcha/rs. *Produto & Produção*, 25(1):115–142.

Slack, N., Brandon-Jones, A., e Johnston, R. (2013). Operations management. *Pearsons Education*.

Tilindis, J. e Kleiza, V. (2014). Mathematical modeling of production operations and processes for product design and manufacturing. *Applied Mechanics and Materials*, 510:243–247.

Velez, S., Dong, Y., e Maravelias, C. T. (2017). Changeover formulations for discrete-time mixed-integer programming scheduling models. *European Journal of Operational Research*, 260(3): 949–963.