

Problema de sequenciamento com *setups* dependentes da sequência e eficiência energética: um estudo de caso em uma indústria de plásticos no interior de Pernambuco

Raphael C. Santos, Walton P. Coutinho, Josenildo F. Silva Júnior, Luciano C. A. da Costa

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Centro Acadêmico do Agreste

Av. Marielle Franco, s/n, Km 59, Nova Caruaru, Caruaru-PE, 55014-900

raphael.rcs, walton.coutinho, josenildo.ferreira,

luciano.ccosta@ufpe.br

Raphael H. F. R. Kramer

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção

Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária, Recife-PE, 50670-901

raphael.kramer@ufpe.br

RESUMO

Uma abordagem multiobjetivo é proposta para o problema de sequenciamento de máquina única com tempo de *setup* dependente de sequência e eficiência energética. O estudo aborda o *trade-off* entre a minimização do *makespan* e do consumo de energia, em um conjunto de tarefas de uma extrusora de plástico filme. Inicialmente é proposta uma formulação de Programação Não Linear (PNL) com restrições de fluxo. Devido à natureza *NP*-difícil do problema uma relaxação é proposta utilizando o AUGMECON. São geradas duas versões lineares para o problema: *Linear Programming Relaxation (LPRelax)* e *branch-and-cut (B&C)*. Um conjunto de soluções de Pareto é apresentado. Os resultados indicam o melhor desempenho das versões lineares para as métricas utilizadas.

PALAVRAS CHAVE. Sequenciamento da produção, Eficiência energética, Indústria de plásticos

OC - Otimização Combinatória, PM - Programação Matemática

ABSTRACT

A multi-objective approach is proposed for the single-machine sequencing problem with sequence-dependent setup time and energy efficiency. The study addresses the trade-off between minimizing the makespan and energy consumption for a set of tasks in a plastic film extrusion. Initially, a Nonlinear Programming (PNL) formulation with flow constraints is proposed. Due to the NP-hard nature of the problem, a relaxation is proposed using AUGMECON. Two linear versions are generated for the problem: Linear Programming Relaxation (LPRelax) and branch-and-cut (B&C). A set of Pareto solutions is presented. The results indicate the superior performance of the linear versions for the metrics used.

KEYWORDS. Production sequencing. Energy efficiency. Plastics industry.

OC - Combinatorial Optimization. PM - Mathematical Programming

1. Introdução

A eficiência operacional é um fator determinante para o sucesso e a competitividade das empresas nos dias de hoje. Em uma indústria do setor produtivo, a alocação inadequada de recursos e um sequenciamento ineficiente das tarefas podem acarretar em atrasos, custos elevados e insatisfação dos clientes. De acordo com [Oke et al., 2006], como forma de oferecer soluções, uma série de estratégias de gestão são adotadas ao longo do tempo. Dentre as quais: engenharia de processos de negócios, reestruturação de sistemas e manufatura enxuta.

Nesse contexto, a minimização do tempo total necessário para concluir todas as ordens de produção se tornou uma preocupação primordial para muitas empresas. Além disso, mais recentemente, os aspectos ambientais também ganharam relevância. Nesse cenário, o consumo total de energia é um indicador de sustentabilidade ambiental e a importância disso vem do uso de diferentes tempos de processamento [Yüksel et al., 2020].

Com o objetivo de otimizar seus processos, uma empresa do setor de produção de sacolas plásticas no interior de Pernambuco está buscando implementar medidas que melhorem o sequenciamento e agendamento das tarefas. Para tanto, tem buscado minimizar o tempo total de produção e reduzir o consumo de energia, através de medidas implementadas na extrusora de plástico. Essas ações têm como propósito maximizar a produtividade da empresa, reduzir custos, melhorar a utilização de recursos e fortalecer sua posição competitiva no mercado.

Conforme [Gao et al., 2020], a programação de eficiência energética possui dois tipos de abordagens estratégicas: o objetivo único e o multiobjetivo. Diante dessa demanda, este artigo trabalha com a abordagem multiobjetivo, que considera simultaneamente a minimização do tempo total de produção e a redução da energia consumida no processo. Este trabalho ainda considera a presença de tempos de *setup* dependente de sequência, necessário para ajustar as diferentes configurações do processo produtivo. O tempo de *setup*, em geral, pode ser definido como o tempo necessário para preparar o recurso necessário para realizar uma tarefa [Allahverdi e Soroush, 2008].

Em processos multiobjetivos com considerações ambientais os tomadores de decisão tentam otimizar suas decisões em termos de um conjunto de objetivos conflitantes (por exemplo, minimizar a emissão total *versus* minimizar o custo total). Conforme [Zhou et al., 2013], essa é uma das tarefas mais desafiadoras enfrentadas pelas empresas de manufatura em todo o mundo, impactando na gestão operacional e no planejamento estratégico das empresas. Nesse contexto, o sequenciamento de tarefas desempenha um papel fundamental. Trata-se de um problema crucial em diferentes domínios, envolvendo a alocação de recursos. O sequenciamento de tarefas refere-se ao processo de definir horários de início e durações às tarefas, levando em consideração diversas restrições e objetivos.

Diante desse cenário, vale destacar a produção de plástico, que é uma indústria de grande impacto ambiental. Nesse segmento, máquinas extrusoras de filme plástico desempenham um papel fundamental no processo de fabricação. De acordo com [Patel et al., 2022] o processo de extrusão refere-se à deformação plástica de um material por meio da aplicação de força, o que resulta no fluxo desse material através de um orifício ou matriz. Nesse processo, os grânulos de plástico são alimentados na máquina por meio de um funil de alimentação. Em seguida, ocorre o derretimento e a homogeneização do material dentro de um cilindro de extrusão, onde são aplicadas temperaturas e pressões adequadas.

Neste trabalho busca-se alcançar uma programação eficiente da produção, por meio da minimização do tempo total de produção e da energia consumida em uma indústria de plásticos, com foco no processo de extrusão. Como se trata de uma extensão do conhecido problema de escalonamento com tempos de *setup* dependentes da sequência, o problema aqui estudado pode ser

considerado como NP -difícil [Pacheco et al., 2018]. Além disso, o modelo considera dois objetivos conflitantes, o que acrescenta uma camada adicional de dificuldade ao problema.

Uma vez que a velocidade de execução das tarefas e a sequência em que são realizadas afetam diretamente o tempo total necessário de conclusão o problema também adquire natureza não linear. A programação não linear refere-se à programação matemática com variáveis contínuas e discretas, com não linearidades na função objetivo e nas restrições [Bussieck et al., 2003]. Na busca por melhores soluções, a opção de linearização do problema surge como alternativa para encontrar melhores soluções, através da relaxação das restrições

A estrutura do artigo apresenta, na Seção 2, uma revisão da literatura no contexto da otimização de processos. Posteriormente o problema de pesquisa é descrito na Seção 3 e o modelo matemático é apresentado. Na Seção 4 são mostrados e discutidos os resultados computacionais obtidos a partir da solução do modelo matemático. Por fim, as conclusões deste artigo são apresentadas na Seção 5.

2. Revisão da Literatura

De acordo com [Gaspar-Cunha et al., 2016], ao combinar conceitos de programação matemática e otimização multiobjetivo, é possível desenvolver modelos que abordem de forma abrangente o problema da minimização do tempo total de produção, bem como dos custos de energia na indústria de plástico e do sequenciamento de máquina única. Yin et al. [2016] estudaram a programação de uma única máquina com processamento controlável e tempos de *setup* para minimizar os custos de produção e o consumo de energia e desenvolveram um modelo matemático multiobjetivo.

Considerando a importância da otimização da extrusão na indústria de plásticos, bem como os desafios inerentes à busca por soluções que atendam a múltiplos objetivos, é fundamental explorar e aprimorar as abordagens de otimização existentes. [Denysiuk et al., 2018] propuseram um projeto de otimização de uma extrusora de parafuso único. O método utilizado abordou vários estudos de caso envolvendo a definição das condições de operação da extrusora, projeto da rosca e ambos em conjunto. [Gaspar-Cunha et al., 2016] também propuseram uma abordagem de otimização de extrusora de parafuso único. O objetivo foi apoiar o engenheiro de processo na identificação das soluções com as características mais desejáveis. Ainda tratando da indústria de plástico, um estudo foi desenvolvido por [Oke et al., 2006] em resposta à crescente preocupação global de diversos *stakeholders*, incluindo governos, consumidores e partes interessadas no meio ambiente. O estudo adotou uma abordagem neuro-fuzzy para quantificar os parâmetros de fluxo em um processo de extrusão em uma usina de reciclagem de plástico.

Recentemente, [de Freitas e Fuchigami, 2022] desenvolveram uma formulação matemática para otimizar um ambiente de máquina única com tempos de *setup* dependentes de sequência através de uma analogia com o problema do caixeiro viajante, utilizando um *benchmark* de instâncias de dados da literatura. [Subramanian e Farias, 2017] desenvolveram uma pesquisa sobre programação de atraso ponderado total de uma única máquina com tempos de *setup* dependentes da sequência. O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma estratégia de limitação simples, mas eficaz, para acelerar o procedimento de busca local sem perda significativa na qualidade da solução.

Outro trabalho que apresenta relevância para o tema foi proposto por [Kirlik e Oguz, 2012], através de uma heurística de busca de vizinhança variável geral para resolver um problema de escalonamento de máquina única para minimizar o atraso ponderado total na presença de *setup* dependente de sequência. Na mesma linha de pesquisa [Mustu e Eren, 2018] abordaram um problema NP -difícil de minimizar o atraso total em uma única máquina com tempos de *setup* dependentes da sequência e um efeito de aprendizado baseado na posição nos tempos de processamento.

[Fernandez-Viagas e Costa, 2021] abordaram o problema de escalonamento de máquina única com tempos de *setup* dependentes da sequência e tempos de liberação para minimizar o tempo total de produção. Duas políticas diferentes de *setup*, a saber, antecipatória e não antecipatória, foram levadas em consideração.

[Chen et al., 2019] propuseram um modelo de programação linear inteira mista (MILP) e um método de relaxação do modelo MILP para resolver problemas de aceitação e agendamento de pedidos examinando o custo da emissão de carbono e o custo da eletricidade no tempo de uso nos problemas. Essas pesquisas contribuem para a compreensão da importância da produção verde no contexto do desenvolvimento sustentável e fornecem *insights* relevantes para a presente pesquisa.

Dentre outros estudos, [Bouazid et al., 2021] desenvolveram uma pesquisa promissora concentrada em um problema de agendamento de aceitação de pedidos em máquina única sob tarifas de tempo de uso. [Zhou et al., 2013] Propuseram uma abordagem integrada que consiste em desenvolver e usar o modelo de simulação, para identificar soluções Pareto-ótimas sob múltiplos objetivos.

Portanto, a otimização dos processos de sequenciamento no contexto do processo de extrusão mostra-se de extrema importância. Essa abordagem permite uma alocação mais eficiente dos recursos disponíveis, contribuindo para a melhoria contínua da produtividade e competitividade da indústria de plásticos.

3. Problema de sequenciamento com tempos de *setup* dependentes da sequência e eficiência energética

O problema aqui estudado envolve a otimização do sequenciamento da produção no setor de extrusão em uma indústria de plásticos no interior de Pernambuco. No entanto, aspectos ambientais devem ser levados em consideração em termos do consumo de energia elétrica no processo produtivo, com o intuito de atender uma demanda de minimização desse consumo.

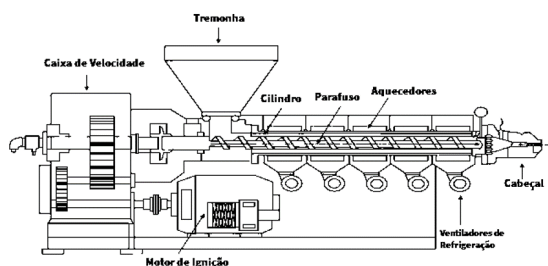
3.1. Descrição do processo produtivo de sacolas plásticas

O processo de extrusão de plásticos desempenha um papel crucial na fabricação de sacolas plásticas a partir de materiais virgens e reciclados. Para a produção de sacolas plásticas a partir de material reciclado é necessária uma etapa de pré-processamento, na qual as sacolas plásticas pós-consumo são trituradas e lavadas para remover contaminantes. Em seguida, o material reciclado é combinado com o polímero virgem em uma proporção adequada, visando obter as propriedades desejadas para a sacola plástica final.

Inicialmente, o plástico é alimentado em um extrusor de parafuso único, onde ocorre a fusão e homogeneização do material por meio da aplicação de calor e pressão (Figura 1). Durante a extrusão, o polímero é aquecido acima de sua temperatura de transição vítrea e se torna viscoso, permitindo que seja facilmente moldado. O extrusor de parafuso único realiza a função de transporte, compressão, mistura e derretimento do plástico. A resina fundida é então forçada através de uma matriz de extrusão, que dá forma ao filme plástico utilizado para fabricar sacolas.

O processo de extrusão de plásticos com aplicação de calor e pressão pode resultar em um alto consumo de energia elétrica, especialmente em relação à velocidade de produção, o que, por sua vez, tem um impacto ambiental significativo. A aplicação de calor requer uma fonte de energia para elevar a temperatura do plástico acima de sua temperatura de transição vítrea, possibilitando sua fusão e moldagem. Além disso, a compressão do material dentro do extrusor também demanda energia (potência) para realizar o trabalho mecânico necessário. Para uma determinada máquina e material, o ideal é que as eficiências térmica e energética sejam alcançadas por meio da seleção adequada das configurações do processo [Abeykoon et al., 2014].

A velocidade de produção desempenha um papel crítico no consumo de energia elétrica durante o processo de extrusão. Quando a produção é acelerada, mais plástico deve ser aquecido e



(a) Fonte: [Bublitz, 2018]



(b) Fonte: Autores.

Figura 1: À esquerda, um modelo de extrusora. À direita, imagem da extrusora utilizada na empresa. Grânulos de plástico são transportados da tremonha para o cilindro, por meio do parafuso, onde ocorre a aplicação de pressão e aquecimento. No final do cilindro, o material é direcionado para o cabeçal (matriz de extrusão) para ser moldado.

comprimido em um intervalo de tempo mais curto (dentro das especificações máximas e mínimas para cada tipo de plástico) [Fang e Lin, 2013]. Esse aumento desproporcional no fornecimento de energia elétrica em relação ao aumento da taxa de produção resulta em um impacto ambiental maior devido à geração adicional de eletricidade [Zhou et al., 2013].

A otimização do escalonamento da produção e o controle adequado da velocidade de produção podem reduzir a potência requerida e o impacto ambiental [Yüksel et al., 2020]. Ao planejar o escalonamento da produção de forma eficiente, é possível evitar a superprodução e minimizar o desperdício de energia associado ao funcionamento de equipamentos em capacidade ociosa. Além disso, controlar adequadamente a velocidade de produção permite otimizar o tempo de processamento, resultando em um consumo de energia mais eficiente e um menor impacto ambiental.

Considerando esses aspectos, este trabalho busca minimizar o tempo total de produção e a potência requerida no processo produtivo. O modelo considera parâmetros como eficiência energética, tempo de *setup* dependente de sequência, velocidade de produção e variáveis de decisão relacionadas ao sequenciamento das atividades. No processo produtivo estudado, cada tarefa é realizada sequencialmente e sem pausas. A máquina extrusora trabalha continuamente durante seis dias por semana. Há preparação específica para cada tipo de bobina de plástico e cada tarefa passa por apenas um processamento. As instâncias são baseadas em dados reais coletados na indústria.

3.2. Descrição formal do problema

Neste trabalho, estuda-se um problema de escalonamento de máquina única com tempos de *setup* dependentes da sequência. Os objetivos considerados são a minimização do *makespan* e da potência elétrica total requerida no processo produtivo. A extrusora considerada pode ser descrita pelos seguintes parâmetros: o torque T (expresso em Newton-metro, $N \times m$), que é a medida da força rotacional que a máquina é capaz de produzir; o raio da rosca do fuso r medido em metros, e; a eficiência energética da máquina ε , expressa em termos percentuais.

Seja n o número de tarefas disponíveis no tempo zero que devem ser processados. O conjunto $I = \{0, 1, \dots, n\}$ é composto por uma tarefa artificial 0 e as n tarefas. Para cada tarefa $i \in I$ é conhecida a massa em kg (ou demanda) de plástico a ser processada, denotada por m_i . Para a tarefa 0 define-se $m_0 = 0$. Cada tarefa é processada apenas uma vez e nenhuma preempção é permitida. Os tempos de *setup* s_{ij} executados entre cada par de tarefas (i, j) , $i, j \in I$, são dependentes da sequência, variando de acordo com a ordem de execução das tarefas. São assumidos limitantes inferiores e superiores na velocidade de processamento de cada tarefa $i \in I$, denotados

respectivamente por ω^l e ω^u .

As variáveis binárias $x_{ij}, i, j \in I$, assumem o valor 1 se as tarefas i e j são executadas nessa ordem e 0 caso contrário. As variáveis f_{ij} são variáveis de fluxo utilizadas para proibir subciclos [Applegate et al., 2006]. As variáveis contínuas $\omega_i \in \mathbb{R}^+$ representam a velocidade angular de processamento das tarefas $i \in I$, expressas em *rad*. Por fim, a variável contínua t_i representa o tempo de processamento da tarefa $i \in I$ em segundos.

Como mencionado, os objetivos são a minimização do *makespan* e do consumo total de energia. O *makespan* é calculado como a soma dos tempos de processamento de cada tarefa mais os tempos de *setup* incorridos entre elas. Já o consumo de energia é calculado por meio da potência total requerida em Watts (W) como uma função da velocidade angular de processamento. Dessa maneira, o problema de sequenciamento tempos de *setup* dependentes da sequência e eficiência energética pode ser escrito de acordo com a Formulação de Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) bi-objetivo (1)–(11).

$$\min \sum_{i \in I} t_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in I} x_{ij} s_{ij} \quad (1)$$

$$\min \sum_{i \in I} \frac{T \omega_i}{1000 \times \varepsilon} \quad (2)$$

s.a.

$$\sum_{j \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{i \in V} x_{ij} = 1 \quad \forall j \in I \quad (4)$$

$$\sum_{j \in V} f_{ik} - \sum_{j \in I} f_{kj} = 1 \quad \forall k \in I \setminus \{0\} \quad (5)$$

$$f_{ij} \leq (n - 1)x_{ij} \quad \forall i \in I \setminus \{0\}, j \in I \quad (6)$$

$$t_i = \frac{m_i}{r \omega_i} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\omega_i^l \leq \omega_i \leq \omega_i^u \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \in I \quad (9)$$

$$f_{ij} \in \mathbb{R}^+, \quad \forall i, j \in I \quad (10)$$

$$t_i, \omega_i \in \mathbb{R}^+, \quad \forall i \in I \quad (11)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o tempo total de produção, enquanto a função objetivo (2), busca minimizar a potência total requerida (em Watts) pelo processamento. As Restrições (3)–(6) são clássicas para problemas de sequenciamento envolvendo uma máquina de Freitas e Fuchigami [2022]. As Restrições não lineares (7) calculam o tempo de processamento para todas as tarefas $i \in I$ em relação à velocidade angular de rotação do parafuso extrusor. Enquanto que as Restrições (8) definem limites inferiores e superiores para as variáveis de decisão ω_i de acordo com as características de cada tarefa $i \in I$. Finalmente, as Restrições (9)–(11) definem o domínio das variáveis de decisão.

Devido ao termo bilinear presente nas restrições (7), a formulação resultante (1)–(11) torna-se um problema de PNLIM. Tais formulações são conhecidas por serem computacionalmente mais difíceis de resolver. Por este motivo, apresenta-se a seguir reformulações mais tratáveis numericamente.

3.3. Reformulações do PNLIM proposto

A reformulação da expressão bilinear presente nas restrições (7) pode ser alcançada através de Envelopes de McCormick, uma técnica tradicional que fornece uma relaxação convexa para esse tipo de restrição [McCormick, 1976]. Para isso, além dos limitantes nas variáveis de velocidade, define-se os seguintes limitantes para as variáveis de tempo presentes na restrição bilinear:

$$t_i^l \leq t_i \leq t_i^u \quad \forall i \in I. \quad (12)$$

Faça $z_i = t_i \omega_i$, $i \in I$, então as restrições (7) podem ser reformuladas como:

$$z_i \leq \frac{m_i}{r}, \quad (13)$$

$$z_i \geq t_i^l \omega_i + t_i \omega_i^l - t_i^l \omega_i^l, \forall i \in I \quad (14)$$

$$z_i \geq t_i^u \omega_i + t_i \omega_i^u - t_i^u \omega_i^u, \forall i \in I \quad (15)$$

$$z_i \leq t_i^u \omega_i + t_i \omega_i^l - t_i^u \omega_i^l, \forall i \in I \quad (16)$$

$$z_i \leq t_i \omega_i^u + t_i^l \omega_i - t_i^l \omega_i^u, \forall i \in I. \quad (17)$$

Nesta reformulação, $z_i, i \in I$, são variáveis auxiliares introduzidas para representar a linearização dos termos bilineares $t_i \omega_i$. Através da substituição das Restrições (7) pelo conjunto de Restrições (12)–(17) é possível a resolução do problema de otimização resultante usando um *software* de programação inteira mista.

Uma questão natural concernente à formulação (1)–(11) reside na possibilidade de aprimorar o desempenho computacional de sua resolução por meio da utilização de cortes e desigualdades válidas. Nesse sentido, além de resolver diretamente essa formulação utilizando um software de propósito geral, este trabalho propõe um método de *branch-and-cut* (B&C) baseado em cortes e desigualdades válidas frequentemente empregados na literatura sobre problemas de roteamento de veículos. O método B&C proposto baseia-se em uma relaxação combinatória da formulação (1)–(11), na qual as restrições (5) e (6) são omitidas. Sempre que uma solução inteira candidata ao incumbente é encontrada, o método inicialmente verifica, por inspeção, se essa solução contém sub-rotas. Caso existam, a solução é descartada e a seguinte desigualdade é acrescentada para todos os subconjuntos $S \subseteq I$ que a violam:

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i}} x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subset V, |S| \geq 2. \quad (18)$$

Dessa maneira, este trabalho apresenta três versões do modelo proposto para o problema de sequenciamento com tempos de *setup* dependentes da sequência e eficiência energética, a saber:

1. *PNL*: A formulação original de PNLIM com restrições de fluxo;
2. *LPRelax*: A relaxação convexa da formulação original através dos envelopes de McCormick com restrições de fluxo;
3. *B&C*: A relaxação através de McCormick com método B&C para evitar sub-rotas.

3.4. Algoritmo de resolução da formulação bi-objetivo

Para a resolução do modelo proposto aplicou-se o algoritmo AUGMENCON, proposto por Mavrotas [2009], que se baseia no conhecido método ε -constraint. Para gerar a fronteira de Pareto, o AUGMECON, implementado no pacote JuMENTO [Silva Júnior e Coutinho, 2023], resolve sucessivos problemas mono-objetivo que podem ser representados pela Formulação (19)-(21). Nesse modelo, s_i e ε_i representam respectivamente as variáveis de folga e o valor que restringe a função objetivo i .

$$\min f_1(\mathbf{x}) - \alpha \times \sum_{i=2}^n s_i / r_i \quad (19)$$

$$\text{s.a. } f_i(\mathbf{x}) + s_i = \varepsilon_i, \forall i \in \{2, 3, \dots, n_{obj}\} \quad (20)$$

$$\mathbf{x} \in \mathcal{X}, s_i \in \mathbb{R}^+ \quad (21)$$

De modo sucinto, o AUGMENCON, implementado no pacote JuMENTO [Silva Júnior e Coutinho, 2023], é iniciado pela construção de uma tabela de *payoffs* através de otimização lexicográfica. Em posse dessa tabela, os valores de ε_i são alterados para cada objetivo i dentro do intervalo definido. Iterativamente, o ε_i de cada objetivo i vai se tornando cada vez mais restritivo. Um parâmetro importante no AUGMENCON é o tamanho da discretização do intervalo de cada ε_i . Através desse parâmetro, é possível controlar o número de soluções eficientes encontradas.

4. Resultados Computacionais

As implementações foram realizadas na linguagem de programação Julia 1.7.3. Quanto ao modelo, foi feito na linguagem de modelagem matemática JuMP, sendo resolvido pelo solver comercial CPLEX 20.1.0.0 e pelo solver comercial SCIP V0.11.12. Os experimentos foram executados em um computador Intel Core i7-4790 CPU 3.60GHz $\times$ 8 com 20gb de RAM DDR3.

4.1. Geração de Instâncias

Os dados de referência incluem um conjunto de 05 instâncias, baseadas em dados reais, coletadas através de informações da indústria. Cada instância com $n \in \{10, 20, 30, 40\}$, representando as diferentes configurações da máquina. Para cada tarefa i é definido um caminho j a ser percorrido dentro dos limitantes de velocidade ω^l e ω^u até que todas as tarefas sejam executadas uma única vez. O algoritmo foi executado em um conjunto de 10 tarefas selecionadas aleatoriamente.

4.2. Métricas de Performance Multiobjetivo

As métricas utilizadas para a avaliação dos métodos multiobjetivos foram:

Tempo Computacional (TC): Refere-se ao tempo necessário para resolver o problema e encontrar as soluções; Qualidade Métrica (QM): Avalia a qualidade da solução encontrada em termos dos objetivos do problema. Hipervolume (HV): Mede a quantidade de espaço dominado pelas soluções encontradas em relação a um ponto de referência com ponto de Nadir.

4.3. Análise dos Resultados

Os experimentos preliminares mostram a existência de um *trade-off* entre o tempo total de produção e o consumo de energia. Conforme [Fox et al., 2019], em um problema de otimização multiobjetivo busca-se encontrar o conjunto de soluções ótimas de Pareto e quantificar os *trade-offs*.

Comparou-se os resultados médios das instâncias nas versões *PNL*, *LPRelax* e *B&C* em relação às métricas, para analisar a capacidade e representatividade na geração de soluções eficientes. Os resultados mostraram resultados superiores dos métodos lineares através do AUGMECON, implementado no pacote JuMENTO [Silva Júnior e Coutinho, 2023]. As duas versões

testadas pelo AUGMECON também são comparadas, demonstrando melhores resultados através do *B&C*.

Por fim, de Um total de 100 soluções de Pareto geradas pela versão *B&C*, a solução 75 gerou um sequenciamento viável das tarefas em termos dos *trade-offs*. Os dados do sequenciamento e as velocidades mínima e máxima de cada tarefa são apresentados nas Figuras 3 e 4.

Tabela 1: Tempo Total de Resolução

Dimensão	TC		
	PNL	LPRelax	B&C
5x10	14.70	2.58	0.50
5x20	61.97	3.30	0.94
5x30	92.97	4.59	1.45
5x40	240.02	9.58	2.03

Tabela 2: Tabela de HiperVolume

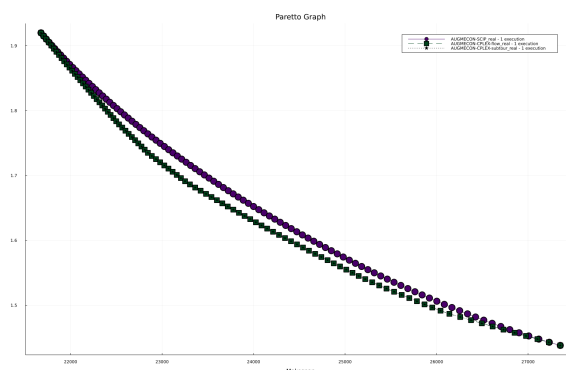
Dimensão	HV		
	PNL	LPRelax	B&C
5x10	6522,86	6612,88	6612,88
5x20	27642,35	28083,03	28085,10
5x30	59061,43	59918,50	59918,50
5x40	110231,24	111879,21	111879,21

Tabela 3: Qualidade da Solução

Dimensão	QM		
	PNL	LPRelax	B&C
5x10	0,02	1,00	1,00
5x20	0,018	0,90	0,90
5x30	0,02	1,00	1,00
5x40	0,02	1,00	1,00

Os resultados médios das métricas avaliadas são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Em termos de Tempo Total (1) e Qualidade (3) os métodos lineares possuem desempenho bem mais eficiente que o método não linear *PNL*. Os métodos lineares, *LPRelax* e *B&C*, apresentaram desempenho semelhante quanto ao HiperVolume e Qualidade. No entanto, é importante destacar que o *B&C* domina 100% das soluções de Tempo Total. Esses resultados eram esperados, devido a relaxação das restrições que reformulam e linearizam o PNLIM.

Figura 2: Fronteira de Pareto obtida através de uma instância com 10 tarefas



Ao analisar o conjunto de soluções de Pareto na Figura 2 nota-se que a medida que o *makespan* é minimizado há um acréscimo no consumo de energia, e vice-versa. Isso mostra a característica conflitante dos objetivos. Conforme [Fatih Tasgetiren et al., 2018], para problemas

dessa natureza não existe uma única solução ótima, mas pode-se obter um conjunto de soluções que não são dominadas por nenhuma outra solução viável. No entanto, ao aplicar os métodos de relaxação *LP Relax* e *B&C*, foi possível obter melhores soluções de fronteira de Pareto quando comparado com a formulação original.

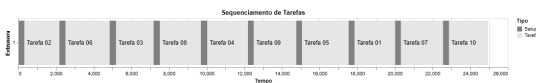


Figura 3: Ocupação da máquina por período

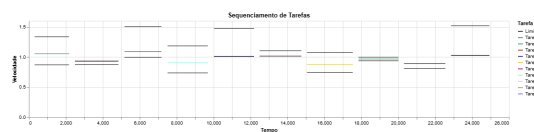


Figura 4: Velocidade de trabalho para as tarefas

O sequenciamento apresentado na Figura 3 representa uma solução viável, que cumpre todas as restrições do problema. Uma das restrições está demonstrada na Figura 4, onde pode-se observar que os limites de velocidade mínima e máxima para cada tarefa foram respeitados.

4.4. Análise de Aplicação

Contudo, ao considerar o *trade-off* inerente ao problema, que resulta no aumento do tempo total de produção em função da minimização do consumo de energia, a solução pode não se apresentar viável para os objetivos da indústria. Ao analisar o conjunto de soluções disponíveis, os tomadores de decisões podem examinar as diferentes opções entre o tempo de produção e o consumo de energia. Assim, podem selecionar a solução que mais se adapta às prioridades e limitações da empresa, ao mesmo tempo em que avalia às metas ambientais que pretende alcançar. Conforme abordado por [Fox et al., 2019], diante de uma abordagem multiobjetivo, uma solução final pode incorporar informações não modeladas, juntamente com as preferências subjetivas dos *stakeholders* e dos tomadores de decisão especializados.

5. Conclusões

Esta pesquisa propôs uma abordagem multiobjetivo para o problema de sequenciamento de máquina única, com tempos de *setup* dependentes de sequência e considerações ambientais, em uma extrusora de plástico filme, localizada em uma indústria no interior de Pernambuco. As instâncias avaliadas são baseadas em conjuntos de dados reais que foram coletados no local da pesquisa. A existência de um conflito acentuado entre os objetivos de minimizar o *makespan* e o consumo de energia simultaneamente impôs limitações aos resultados, porém ofereceu *insights* significativos para a indústria e para pesquisas futuras.

Com base nos resultados apresentados, podemos concluir que o uso de técnicas como relaxação lexicográfica e *branch-and-cut* mostrou-se eficiente na obtenção de soluções da fronteira de Pareto, que representam um conjunto de soluções não dominadas. Apesar dessas soluções, os dois objetivos não podem ser minimizados simultaneamente devido à natureza conflitante entre eles. Com isso, pode ocorrer um aumento significativo no tempo total de produção quando busca-se melhorar o aspecto energético, e vice-versa.

É importante ressaltar que essas conclusões são específicas para as métricas e instâncias avaliadas. Recomenda-se explorar cenários com máquinas paralelas, objetivos únicos, diferentes instâncias e outras métricas para obter resultados diversos e ampliar a compreensão do problema de sequenciamento.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), processo nº 404807/2021-6.

Referências

- Abeykoon, C., Kelly, A. L., Vera-Sorroche, J., Brown, E. C., Coates, P. D., Deng, J., Li, K., Harkin-Jones, E., e Price, M. (2014). Process efficiency in polymer extrusion: Correlation between the energy demand and melt thermal stability. *Applied Energy*, 135:560–571.
- Allahverdi, A. e Soroush, H. (2008). The significance of reducing setup times/setup costs. *European Journal of Operational Research*, 187(3):978–984.
- Applegate, D. L., Bixby, R. E., Chvátal, V., e Cook, W. J. (2006). The traveling salesman problem: A computational study. URL <http://www.jstor.org/stable/j.ctt7s8xg>.
- Bouazid, M., Masmoudi, O., e Yalaoui, A. (2021). Exact methods and heuristics for order acceptance scheduling problem under time-of-use costs and carbon emissions. *Applied Sciences*, 11(19): 8919.
- Bublitz, D. (2018). Aplicação da manutenção centrada na confiabilidade em extrusoras de borracha. Dissertação de mestrado.
- Bussieck, M. R., Pruessner, A., et al. (2003). Mixed-integer nonlinear programming. *SIAG/OPT Newsletter: Views & News*, 14(1):19–22.
- Chen, S.-H., Liou, Y.-C., Chen, Y.-H., e Wang, K.-C. (2019). Order acceptance and scheduling problem with carbon emission reduction and electricity tariffs on a single machine. *Sustainability*, 11(19):5432.
- de Freitas, M. G. e Fuchigami, H. Y. (2022). A new technology implementation via mathematical modeling for the sequence-dependent setup times of industrial problems. *Computers & Industrial Engineering*, 172:108624.
- Denysiuk, R., Recio, G., Covas, J. A., e Gaspar-Cunha, A. (2018). Using multiobjective optimization algorithms and decision making support to solve polymer extrusion problems. *Polymer Engineering & Science*, 58(4):493–502.
- Fang, K.-T. e Lin, B. M. (2013). Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. *Computers & Industrial Engineering*, 64(1):224–234.
- Fatih Tasgetiren, M., Öztop, H., Eliyi, U., Eliyi, D. T., e Pan, Q.-K. (2018). Energy-efficient single machine total weighted tardiness problem with sequence-dependent setup times. In *Intelligent Computing Theories and Application: 14th International Conference, ICIC 2018, Wuhan, China, August 15-18, 2018, Proceedings, Part I 14*, p. 746–758. Springer.
- Fernandez-Viagas, V. e Costa, A. (2021). Two novel population based algorithms for the single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and release times. *Swarm and Evolutionary Computation*, 63:100869.
- Fox, A. D., Corne, D. W., Mayorga Adame, C. G., Polton, J. A., Henry, L.-A., e Roberts, J. M. (2019). An efficient multi-objective optimization method for use in the design of marine protected area networks. *Frontiers in marine science*, 6:17.
- Gao, K., Huang, Y., Sadollah, A., e Wang, L. (2020). A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. *Complex & Intelligent Systems*, 6:237–249.

- Gaspar-Cunha, A., Covas, J., Denysiuk, R., e Recio, G. (2016). Multiobjective optimization of polymer extrusion: decision making and robustness.
- Kirlik, G. e Oguz, C. (2012). A variable neighborhood search for minimizing total weighted tardiness with sequence dependent setup times on a single machine. *Computers & Operations Research*, 39(7):1506–1520.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the ϵ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213:455–465.
- McCormick, G. P. (1976). Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part i—convex underestimating problems. *Mathematical programming*, 10(1):147–175.
- Mustu, S. e Eren, T. (2018). The single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times and a learning effect on processing times. *Applied Soft Computing*, 71:291–306.
- Oke, S., Johnson, A., Charles-Owaba, O., Oyawale, F., e Popoola, I. (2006). A neuro-fuzzy linguistic approach in optimizing the flow rate of a plastic extruder process. *International Journal of Science & Technology*, 1(2):115–123.
- Pacheco, J., Porras, S., Casado, S., e Baroque, B. (2018). Variable neighborhood search with memory for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times. *Knowledge-Based Systems*, 145:236–249.
- Patel, A., Patel, V., e Patel, C. (2022). A review on optimization of process parameters for pvc pipe using extrusion process.
- Silva Júnior, J. F. d. e Coutinho, W. P. (2023). JuMENTO. URL <https://github.com/Josa9321/JuMENTO.jl>.
- Subramanian, A. e Farias, K. (2017). Efficient local search limitation strategy for single machine total weighted tardiness scheduling with sequence-dependent setup times. *Computers & Operations Research*, 79:190–206.
- Yin, L., Li, X., Lu, C., e Gao, L. (2016). Energy-efficient scheduling problem using an effective hybrid multi-objective evolutionary algorithm. *Sustainability*, 8(12):1268.
- Yüksel, D., Taşgetiren, M. F., Kandiller, L., e Gao, L. (2020). An energy-efficient bi-objective no-wait permutation flowshop scheduling problem to minimize total tardiness and total energy consumption. *Computers & Industrial Engineering*, 145:106431.
- Zhou, M., Pan, Y., Chen, Z., e Yang, W. (2013). Optimizing green production strategies: An integrated approach. *Computers & Industrial Engineering*, 65(3):517–528.