



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

RAPHAEL COSTA DOS SANTOS

**PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DE TAREFAS EM MÁQUINAS PARALELAS  
COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA E CONSIDERAÇÕES  
AMBIENTAIS**

Caruaru

2024

RAPHAEL COSTA DOS SANTOS

**PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DE TAREFAS EM MÁQUINAS PARALELAS  
COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA E CONSIDERAÇÕES  
AMBIENTAIS**

Versão Final da dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

**Área de concentração:** Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Walton Pereira Coutinho

Caruaru  
2024

.Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Santos, Raphael Costa Dos.

Problema de escalonamento de tarefas em máquinas paralelas com tempos de setup dependentes da sequência e considerações ambientais / Raphael Costa Dos Santos. - Caruaru, 2024.

83f.: il.

Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, 2024.

Orientação: Walton Pereira Coutinho.

1. Escalonamento de máquinas; 2. Problema de programação; 3. Modelo de programação matemática. I. Coutinho, Walton Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

CDD 658.5

RAPHAEL COSTA DOS SANTOS

**PROBLEMA DE ESCALONAMENTO DE TAREFAS EM MÁQUINAS PARALELAS  
COM TEMPOS DE *SETUP* DEPENDENTES DA SEQUÊNCIA E CONSIDERAÇÕES  
AMBIENTAIS**

Versão Final da dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 27/08/2024

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Walton Pereira Coutinho  
(Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Luciano Carlos Azevedo da Costa  
(Examinador Interno)  
Universidade Federal da Paraíba

---

Prof. Dr. Antônio Augusto Chaves  
(Examinador Externo)  
Universidade Federal de São Paulo

Dedico este trabalho à minha filha, Lise Beatriz, fonte constante de inspiração, alegria e amor. És a minha maior motivação para ser sempre melhor. Que o teu sorriso e curiosidade me lembrem todos os dias que o conhecimento é uma jornada contínua e que cada conquista é também para ti.

## AGRADECIMENTOS

São muitas as pessoas às quais devo minha gratidão pela conclusão deste trabalho, que concluo com grande alegria. Ao longo de toda a trajetória, muitas pessoas se fizeram presentes e plantaram sementes que permitiram que os frutos desta pesquisa surgissem. Desde antes da seleção para o programa até a conclusão desta dissertação, recebi apoio incalculável e sou profundamente grato a cada um. Mesmo que não cite todos nominalmente, saibam que reconheço e valorizo a contribuição de cada um que fez parte deste resultado.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela força, sabedoria e pela constante presença em minha vida, permitindo-me superar cada desafio ao longo desta jornada.

Gostaria de expressar imensa gratidão ao meu professor e orientador, Walton Pereira Coutinho, pelo acompanhamento dedicado, pelos conselhos valiosos e pela paciência ao longo de todo o processo. Sem a sua orientação, esta dissertação não teria alcançado a qualidade desejada.

Agradeço também aos demais professores do programa que de alguma forma deram suas contribuições para este trabalho.

À minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos, acompanhando cada passo, incentivando-me e dando-me forças para seguir. Agradeço à minha esposa e à minha filha, cuja paciência, carinho e contribuição foram o alicerce ao longo desta jornada. O apoio de minha mãe, pai e irmãos também foi essencial para que eu chegasse até aqui. A todos vocês, minha eterna gratidão.

Aos meus colegas de turma, que se tornaram um pilar de apoio mútuo, ajudando-nos a superar as dificuldades e a buscar nossos objetivos. Todos vocês são parte integrante deste trabalho. Entre eles, agradeço especialmente ao meu amigo e colega de laboratório, Ricardo Cavalcanti, pelas inúmeras conversas, pela troca de experiências e pelo apoio constante durante todo o mestrado. Agradeço também ao amigo Rodrigo Cavalcante, cuja presença em diversos momentos foi de grande valor, sempre disposto a ajudar. Sou profundamente grato a vocês.

Agradeço também a Josenildo Ferreira por todos os momentos de troca de conhecimento, pelas conversas e reuniões que contribuíram de forma significativa para o desenvolvimento deste trabalho. A sua disponibilidade e competência foram essenciais.

Não posso deixar de expressar a minha gratidão ao meu amigo e colega de trabalho, Rodrigo Oliveira, por sua inestimável contribuição nas análises quantitativas desta pesquisa. O seu conhecimento foi fundamental para o sucesso desta fase do trabalho.

Sou muito grato por tudo e por todos vocês.

## RESUMO

Esta pesquisa tem por objetivo a criação de modelos de programação matemática para solucionar um problema de escalonamento de máquinas paralelas, levando em consideração o consumo energético e os tempos de *setup* dependentes da sequência. Os modelos desenvolvidos visam minimizar o consumo total de energia e o *makespan*, no setor metalúrgico de uma indústria. O processo produtivo envolve a fundição de ligas de Zamac em máquinas injetoras para fabricar botões, plaquetas e rebites metálicos. Foram realizadas avaliações no local para a coleta de dados reais, incluindo medições de consumo energético com um analisador de energia e análise das atividades de produção para o desenvolvimento da modelagem matemática. Dois modelos de programação matemática foram propostos para resolver o problema de escalonamento. Para avaliar a eficácia dos modelos, foram geradas 150 instâncias baseadas em dados reais. O primeiro modelo encontra soluções viáveis para instâncias menores, mas tem desempenho computacional insatisfatório para instâncias maiores. Já o modelo reformulado apresenta desempenho superior em todas as instâncias avaliadas e corrige restrições operacionais existentes. Os resultados obtidos foram comparados com um cenário real e mostraram um desempenho promissor nas métricas avaliadas, atendendo aos objetivos estabelecidos.

**Palavras-chave:** escalonamento de máquinas; problema de programação; modelo de programação matemática.

## ABSTRACT

This research aims to on the creation of mathematical programming models to solve a parallel machine scheduling problem, taking into account energy consumption and sequence-dependent setup times. The developed models aim to minimize the total energy consumption and the makespan, in the metallurgical sector of an industry. The production process involves casting Zamac alloys in injection machines to manufacture buttons, plates, and metal rivets. On-site evaluations were carried out to collect real data, including energy consumption measurements with an energy analyzer and an analysis of production activities for the development of the mathematical modeling. Two mathematical programming models were proposed to solve the scheduling problem. To evaluate the effectiveness of the models, 150 instances were generated based on real data.. The first model finds feasible solutions for smaller instances but has unsatisfactory computational performance for larger instances. The reformulated model, on the other hand, shows superior performance in all evaluated instances and corrects existing operational constraints. The obtained results were compared with a real scenario and showed promising performance in the evaluated metrics, meeting the established objectives.

**Keywords:** parallel machine scheduling; programming problem; mathematical programming model.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Estrutura de árvore das peças de Zamac produzidas. . . . .	29
Figura 2 – Vista Frontal de uma injetora de Zamac (DUTRA; ROSA; BRAUN, 2021) .	29
Figura 3 – Fluxograma . . . . .	32
Figura 4 – Analisador de Energia ET-5051C . . . . .	34
Figura 5 – Gráfico do Software . . . . .	35
Figura 6 – Avaliação do consumo médio de potência das injetoras . . . . .	40
Figura 7 – Escalonamento de produção por máquina na velocidade padrão . . . . .	41
Figura 8 – Gráfico de Gantt com escalonamento de 9 tarefas em 4 máquinas . . . . .	44
Figura 9 – Conjunto de instâncias de todos os Subgrupos . . . . .	57
Figura 10 – Gráficos de Escalonamento do Modelo de Eventos . . . . .	58
Figura 11 – Gráficos de Escalonamento do Modelo de Períodos . . . . .	60
Figura 12 – Gráficos de escalonamento baseado em dados reais . . . . .	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de Velocidades com Diferentes Estados da Matéria-Prima . . . . .	36
Tabela 2 – Configurações definidas para análise . . . . .	37
Tabela 3 – Potência (W) consumida pelas máquinas a cada 2 minutos . . . . .	38
Tabela 4 – Potência (W) consumida pelo forno a cada 2 minutos . . . . .	39
Tabela 5 – Dados completos do escalonamento . . . . .	42
Tabela 6 – Dados discretizados - Modelo de Eventos . . . . .	49
Tabela 7 – Dados discretizados - Modelo de Períodos . . . . .	53
Tabela 8 – Médias Por Grupo de Instâncias no Modelo de Eventos . . . . .	56
Tabela 9 – Simulação Média do Subgrupo 12x4 . . . . .	57
Tabela 10 – Instância j10_k2_10 . . . . .	59
Tabela 11 – Instância j6_k2_9 . . . . .	61
Tabela 12 – Instâncias baseadas em dados reais . . . . .	61
Tabela 13 – Comparação entre as soluções . . . . .	63
Tabela 14 – Capacidade integral do forno . . . . .	64
Tabela 15 – Dados Computacionais do Modelo de Eventos . . . . .	73
Tabela 16 – Dados Gerenciais do Modelo de Eventos . . . . .	75
Tabela 17 – Dados Computacionais do Modelo de Períodos . . . . .	77
Tabela 18 – Dados Gerenciais do Modelo de Períodos . . . . .	79

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$M_{L1}$	Máquina número 1
$M_{L2}$	Máquina número 2
$M_{P1}$	Máquina número 3
$P_1$	Velocidade padrão com matéria-prima sólida
$P_2$	Velocidade padrão com matéria-prima fundida
$A_1$	Velocidade aumentada com matéria-prima sólida
$A_2$	Velocidade aumentada com matéria-prima fundida
$R_1$	Velocidade reduzida com matéria-prima sólida
$R_2$	Velocidade reduzida com matéria-prima fundida
MO	Máquina Ociosa
Med	Consumo Médio
DP	Desvio Padrão
Max	Consumo Máximo
Min	Consumo Mínimo
$T_{MED}$	Temperatura Média do Forno
$T_{MIN}$	Temperatura Mínima do Forno
$T_{MAX}$	Temperatura Máxima do Forno
PCM	Potência Consumida pela Máquina
PCF	Potência Consumida pelo Forno
PTC	Potência Total Consumida
TC	Tempo Computacional

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>13</b>
1.1	DEFINIÇÃO DO TEMA . . . . .	13
1.2	JUSTIFICATIVA . . . . .	16
1.3	OBJETIVOS . . . . .	17
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> . . . . .	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> . . . . .	<b>18</b>
2.1	PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO . . . . .	18
<b>2.1.1</b>	<b>Escalonamento de Máquina Única</b> . . . . .	<b>18</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Escalonamento de Máquinas Paralelas</b> . . . . .	<b>19</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Flow shop</b> . . . . .	<b>20</b>
<b>2.1.4</b>	<b>Job Shop</b> . . . . .	<b>21</b>
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA . . . . .	23
2.3	PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO COM CONSIDERAÇÕES AM- BIENTAIS . . . . .	24
2.4	MÉTODOS EXATOS E HEURÍSTICOS DE ESCALONAMENTO . . . . .	25
2.5	ABORDAGENS ALTERNATIVAS DE OTIMIZAÇÃO . . . . .	26
<b>3</b>	<b>DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO</b> . . . . .	<b>28</b>
3.1	FLUXOGRAMA . . . . .	31
3.2	COLETA DE DADOS . . . . .	33
<b>4</b>	<b>FORMULAÇÃO MATEMÁTICA</b> . . . . .	<b>44</b>
4.1	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA . . . . .	44
4.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 1: MODELO DE EVENTOS . . . . .	45
<b>4.2.1</b>	<b>Conjuntos</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Parâmetros</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Variáveis</b> . . . . .	<b>46</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Modelo</b> . . . . .	<b>47</b>
4.3	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 2: MODELO DE PERÍODOS . . . . .	49
<b>4.3.1</b>	<b>Parâmetros</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Variáveis</b> . . . . .	<b>50</b>
<b>4.3.3</b>	<b>Modelo</b> . . . . .	<b>51</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> . . . . .	<b>54</b>

5.1	DEFINIÇÃO DAS INSTÂNCIAS . . . . .	54
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .	65
	REFERÊNCIAS . . . . .	66
	APÊNDICE A – RESULTADOS POR INSTÂNCIA . . . . .	73

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 DEFINIÇÃO DO TEMA

A programação de produção é um processo fundamental de tomada de decisões em sistemas de manufatura. Essa prática visa otimizar o desempenho por meio da alocação eficiente de recursos, para antecipar possíveis obstáculos na produção, melhorando a capacidade da empresa em tomar decisões. Ao integrar tecnologias avançadas, como sistemas de automação e análise de dados, o planejamento e a programação da produção potencializam a agilidade operacional, promovendo uma resposta mais rápida às mudanças do mercado e garantindo uma produção mais eficiente. Segundo Wang, Pan e Wang (2021) a programação da produção é um componente de conexão essencial no sistema de manufatura. A melhoria da eficiência e eficácia da produção é impulsionada por algoritmos de programação, que se tornaram um tema de pesquisa significativo em campos interdisciplinares, tais como engenharia industrial, automação, ciência da administração e outras áreas relacionadas.

Dentre os inúmeros problemas de programação de produção, podemos encontrar os problemas de escalonamento, que de acordo com Parveen e Ullah (2010) são amplamente definidos como o processo de atribuir um conjunto de tarefas a recursos durante um período de tempo. Também podem ser definidos como a alocação de recursos ao longo do tempo para executar um conjunto de tarefas. Os problemas de escalonamento podem ser exemplificados em problemas de agendamento *Flow-shop* ou *Job-shop*, máquina única ou paralelas. De acordo com Komaki, Sheikh e Malakooti (2019) o problema de flow shop padrão é composto por trabalhos com o mesmo fluxo de produção em um conjunto de máquinas. O objetivo é encontrar a sequência de trabalhos que satisfaçam um ou vários critérios. Parveen e Ullah (2010) definem *Flow-shop* como uma instalação industrial na qual as máquinas são dispostas em série. As tarefas começam a ser processadas em uma máquina inicial, passam por várias máquinas intermediárias e terminam em uma máquina final. Já em um *Job-shop* os trabalhos podem ser processados em máquinas em qualquer ordem, não havendo essa restrição de fluxo de trabalho.

Os problemas de programação da produção também envolvem problemas de escalonamento. Conforme definição de Pinedo (2012) o escalonamento é um processo de tomada de decisão amplamente utilizado em diversos setores de manufatura e serviços. Ele lida com a alocação de recursos para tarefas em determinados períodos de tempo, com o objetivo de otimizar um ou mais objetivos. Os recursos e tarefas em uma organização podem assumir muitas formas diferentes. Os recursos podem ser máquinas em uma indústria, pistas em um aeroporto, equipes em um canteiro de obras. As tarefas podem ser operações em um processo de produção, decolagens e pousos em um aeroporto, etapas de um projeto de construção. Cada tarefa pode ter um determinado nível de prioridade, um horário de início mais cedo possível e uma data de vencimento. Um objetivo pode ser a minimização do tempo de conclusão da última tarefa e outro pode ser a

minimização do número de tarefas concluídas após suas respectivas datas de vencimento.

Em problemas de escalonamento em ambientes de produção e manufatura é comum ter que lidar com tempos de *setup*. Em geral, o tempo de *setup* pode ser definido como o tempo necessário para preparar os recursos necessários (por exemplo, máquinas, pessoas) para realizar uma tarefa (por exemplo, trabalho, operação). As atividades de preparação podem incluir aquisição de ferramentas, limpeza, configuração de gabaritos, substituição de moldes e acessórios necessários, ajuste de ferramentas e inspeção de materiais no sistema de fabricação (ALLAHVERDI; SOROUSH, 2008). Conforme abordagem de Gupta e Smith (2006) vale ressaltar que sempre que a máquina precisa parar e passar por ajustes para mudar de serviço, o tempo de *setup* de um trabalho é dependente do que terminou de ser realizado anteriormente, fazendo com que essa dependência de sequência seja importante na maioria dos casos práticos, devendo ser considerados nos algoritmos para escalonamento. Inúmeras empresas, em diferentes ramos de negócios, enfrentam problemas com tempo de *setup* dependentes de sequência, o que acaba limitando a produção e aumentando seus custos. Este cenário de produção existe em muitas indústrias de processo, onde o uso eficiente da capacidade disponível é fundamental para se manter competitivo. Os tempos de *setup* dependentes de sequência podem ocorrer em indústrias como as de bebidas, ao alternar os tipos de engarrafamento de diferentes tamanhos ou para diferentes tipos de bebidas. Outro exemplo pode ser dado na indústria de vidro, onde ocorrem trocas em linhas de moldagem devido a diferenças de molde ou cor do recipiente. Da mesma forma, na indústria têxtil, onde as máquinas de fios realizam a combinação de misturas de fibras (GUIMARÃES; KLABJAN; ALMADA-LOBO, 2014). Os tempos de *setup* também são bastante comuns em ambientes em que é necessário regular a temperatura dos equipamentos para processamento de produtos distintos. Isso também é exemplificado nas indústrias química, farmacêutica e alimentícia com rigorosos processos de esterilização, cuja complexidade e tempo dependem das substâncias manuseadas antes e depois no mesmo posto de trabalho (FREITAS; FUCHIGAMI, 2022).

Os modelos de programação matemática buscam resolver problemas dessa natureza de forma eficiente e otimizada. No entanto, ao aplicar esses modelos a problemas do mundo real, diversas diferenças e desafios surgem devido às complexidades e variabilidades inerentes a cada situação prática. De acordo com Pinedo (2012) listar todas as diferenças entre os problemas do mundo real e os modelos de programação matemática é um grande desafio, pois cada situação apresenta suas particularidades. Por exemplo, os modelos matemáticos frequentemente assumem que há  $n$  trabalhos a serem escalonados e que, uma vez concluídos, o problema está resolvido. No mundo real, no entanto, mudanças podem ocorrer continuamente. Além disso, nos modelos matemáticos, é comum considerar que um trabalho pode ser escalonado em uma máquina específica, mas por motivos práticos pode haver uma preferência por processá-lo em outra. A maioria dos modelos também presume que as máquinas estão disponíveis o tempo todo, enquanto na prática a manutenção preventiva pode ser agendada, e as máquinas estão sujeitas a avarias e reparos inesperados. Outro ponto é que, embora muitas pesquisas se

concentrem em modelos com um único objetivo, no mundo real geralmente há uma série de objetivos a serem considerados simultaneamente, como minimizar o tempo total de produção, equilibrar a carga de trabalho e reduzir o consumo de energia.

Aprofundando para o setor de indústria têxtil, no contexto das operações com injetoras, que é a fonte de pesquisa deste trabalho, a variedade de configurações para atender a pedidos customizados para cada cliente podem se tornar um problema de otimização complexo. Conforme abordado por Cervantes-Sanmiguel, Vargas-Flores e Ibarra-Rojas (2021) a injeção é um processo de fabricação que requer moldes e máquinas injetoras para transformar a matéria-prima em peças sólidas. Nesse processo, os moldes são instalados nas máquinas e, a seguir, o material fundido entra nas cavidades do molde onde é resfriado e solidificado. Estes processos são amplamente utilizados devido à sua flexibilidade de produzir um grande número de peças de formas diferentes com geometria complexa em um curto espaço de tempo.

Somando-se ao que já foi abordado, a atualidade possui demandas urgentes que necessitam de atenção, inclusive dos setores industriais. Aliado ao aumento da produtividade, objetivando a maximização dos lucros, as indústrias necessitam atender critérios ambientais, para alcançar uma produção mais sustentável. Embora os problemas de escalonamento com tempos de *setup* dependentes de sequencia tenham sido estudados extensivamente, há a necessidade de ampliar os estudos sobre o conceito de fabricação verde. Em particular, alguns trabalhos recentes estudaram a emissão de carbono nos problemas de escalonamento (CHEN et al., 2019).

A preocupação das indústrias com a fabricação verde se dá também pelo fato do aumento de preço com eletricidade. Há uma constante busca pela redução do consumo através, por exemplo, da melhoria das instalações, manutenções preventivas para garantir que todos os equipamentos operem com máxima eficiência e integração de fontes de energia renovável. Empresas de manufatura nos EUA estão enfrentando uma pressão constante e crescente para reduzir sua dependência de combustíveis fósseis e reduzir sua pegada de carbono. Conforme Fang et al. (2011) essa pressão é intensificada por preocupações relacionadas às mudanças climáticas, custos de energia e segurança energética. As questões energéticas tendem a assumir um papel ainda mais relevante ao longo dos anos, devido à demanda crescente por energia dos países em desenvolvimento. Esses fatores econômicos e ambientais incentivam as iniciativas direcionadas a reduzir consideravelmente o consumo de energia e as emissões de Gases do Efeito Estufa das empresas manufatureiras. Em um estudo realizado por Bouzid, Masmoudi e Yalaoui (2021) foi identificado que o consumo de energia nas indústrias nacionais correspondeu a 28% do total em 2018, de acordo com a Agência Internacional de Energia. Junto com as preocupações científicas, há uma crescente demanda da sociedade por desenvolvimento sustentável. Isso tem pressionado os governos a oferecerem incentivos fiscais, além de pressionar as empresas a incorporarem a fabricação verde em seus projetos. A literatura aborda diferentes hipóteses referentes aos aspectos energéticos, mas no geral há o consenso de que essas ações precisam ser implementadas.

Portanto, a presente pesquisa busca desenvolver modelos de programação matemática base-

ado no escalonamento de máquinas paralelas com tempos de *setup* dependentes de sequência, o que é considerado um problema *NP*-difícil. Bem como atender as perspectivas do mercado, que busca introduzir uma economia sustentável para atender as questões ambientais. Desse modo, o modelo matemático de otimização deve considerar uma Função Objetivo com dois termos: a minimização do *makespan*, que é o maior tempo de duração de processamento entre as máquinas utilizadas, e da potência total consumida pelas máquinas. A pesquisa se desenvolveu em um conjunto de máquinas injetoras de uma indústria no interior de Pernambuco.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Na era da Indústria 4.0, a programação da produção deve saber lidar com um sistema de manufatura inteligente, impulsionado por tecnologias emergentes como customização em massa, Big Data, Internet das Coisas (IoTs), Inteligência Artificial (AI). Esse aprendizado é alimentado através de pesquisas científicas, que buscam inovação e desenvolvimento para as indústrias. De acordo com Klement et al. (2021), com a Internet das Coisas, que permite a comunicação entre departamentos e fornecedores, os sistemas industriais ficarão mais inteligentes e capazes de antecipar a falta de materiais, a necessidade de operações de manutenção ou de responder a comandos urgentes. Isso implicará no uso de ferramentas mais eficientes para planejar e replanejar as operações do chão de fábrica. Com esses desafios das tecnologias emergentes é preciso revisar os modelos de problemas de escalonamento atualizados, além de explorar as novas direções de desenvolvimento, identificando técnicas para reformular esses problemas, com o objetivo de oferecer suporte para futuras fábricas inteligentes (ZHANG et al., 2019).

No quesito das considerações ambientais, a programação da produção voltada para a eficiência energética torna-se desafiadora, uma vez que as empresas devem equilibrar não apenas a eficiência energética, mas também a qualidade, os custos, o tempo e outras demandas peculiares a cada sistema de manufatura, o que cria um problema multiobjetivo e de complexidade *NP*-difícil. Conforme Zhou et al. (2016), para auxiliar as empresas a realizar a avaliação de eficiência energética, pesquisas têm sido realizadas sob os aspectos da tecnologia, como monitoramento dos dados e desenvolvimento de software para simular o consumo de energia, bem como processos e implementação de avaliação de eficiência energética. Esses avanços tecnológicos viabilizam o avanço inteligente da indústria.

Ferramentas de apoio à decisão desempenham um papel fundamental em todos os níveis de programação da produção e tomada de decisão. No nível estratégico, elas ajudam a escolher quais atividades realizar e a estimar recursos necessários a longo prazo. No nível tático, facilitam a alocação de recursos para atividades planejadas em um período específico. No nível operacional, auxiliam na programação das atividades, gerenciando alocação de tempo dos recursos e reagendando para lidar com emergências e atividades urgentes (KLEMENT et al., 2021).

Seguindo o raciocínio prático, numerosos problemas de programação tradicionais assumem

que um conjunto de  $n$  pedidos sejam aceitos e programados em um ambiente de produção específico. Uma empresa, no entanto, muitas vezes deve escolher os pedidos apropriados de acordo com sua capacidade disponível, foco no mercado, vantagem competitiva ou uma combinação destes. Como as empresas são vistas como sistemas complexos no gerenciamento de operações, seus mecanismos de operação são difíceis de gerenciar. Essa dificuldade aumenta ainda mais porque as empresas pertencem a um sistema de rede de suprimentos, no qual a complexidade e as relações com atores externos são latentes (ANDRES; GUZMAN; POLER, 2021). Portanto, a escolha correta dos pedidos acarreta diretamente nos lucros que a empresa vai obter. Segundo Chen et al. (2019) este problema de agendamento transformou-se em um problema de decisão de aceitar ou rejeitar pedidos e então escalonar os pedidos aceitos nas máquinas.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelos de programação matemática para resolver um problema de escalonamento de máquinas paralelas com considerações energéticas e tempos de *setup* dependentes da sequência.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Coletar e analisar dados reais do ambiente de produção, incluindo informações sobre tempos de *setup*, sequenciamento de tarefas e consumo de energia;
- Desenvolver modelos de programação matemática para o problema de escalonamento de máquinas paralelas, implementando os dados coletados;
- Investigar o *tradeoff* entre a minimização do tempo total de produção e do consumo de energia das máquinas;
- Realizar experimentos computacionais para validar o modelo proposto, avaliando a eficiência de produção e economia de energia.
- Propor estratégias práticas para a implementação do modelo proposto, oferecendo diretrizes para adoção de práticas de produção economicamente viáveis e sustentáveis.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 apresenta-se a fundamentação teórica pertinente ao tema da pesquisa. Na Seção 3 é descrito o processo produtivo e apresentado o detalhamento da coleta de dados. Logo após, na Seção 3, são apresentados os modelos matemáticos de programação. Na Seção 5 são apresentadas e discutidos os resultados da pesquisa. Por fim, a Seção 6 apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 PROBLEMAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Planejamento e programação da produção são componentes fundamentais para o desenvolvimento produtivo de uma empresa, por meio de ferramentas que buscam proporcionar uma visão estratégica da produção. Os problemas de escalonamento, frequentemente enfrentados nesse contexto, envolvem a atribuição de recursos para tarefas em intervalos específicos de tempo, com o objetivo de otimizar uma ou mais métricas de desempenho. A maioria desses problemas são classificados como  $NP$ -difíceis, apresentando desafios significativos para encontrar soluções eficientes (JACOB; ARROYO et al., 2016). Atualmente, esses problemas são amplamente estudados, pois possuem uma grande relevância tanto prática quanto teórica. Eles têm diversas aplicações em várias indústrias, incluindo química, metalurgia e têxtil. Conforme Rodrigues, Pinho e Sena (2020) a programação de uma linha de produção no mundo real pode ser altamente problemática, especialmente nos casos em que sequenciar pedidos com rotas diferentes, tempos de processo estocásticos, restrições de processo e deficiências podem afetar a possibilidade de atingir a meta de produção. Os métodos de planejamento e controle da produção que atendem a essas preocupações são de extrema relevância para o desenvolvimento industrial sustentável (MOKHTARI-MOGHADAM; POURHEJAZY; GUPTA, 2023).

Considerando ainda os problemas de programação de produção, em um estudo recente, Qasim, Wong e Saufi (2023) abordaram a crescente importância de considerar critérios ambientais nas estratégias de planejamento de produção, considerando a baixa emissão de carbono como um parâmetro principal. O estudo analisou diversos artigos em bases de dados relevantes para explorar essas abordagens sustentáveis e identificar novos caminhos de pesquisa para facilitar a integração desses critérios nas estratégias de planejamento de produção. De acordo com Mokhtari-Moghadam, Pourhejazy e Gupta (2023), no chão de fábrica, tanto as operações que agregam valor (ou seja, produção) quanto as que não agregam valor (ou seja, configuração e preparação) contribuem para o consumo de energia, o que fortalece a relevância de planejamento e programação de produção.

#### 2.1.1 Escalonamento de Máquina Única

Na área de otimização combinatória, o termo *Single-Machine* caracteriza-se por um modelo em que uma única máquina necessariamente processa toda a produção seguindo a sequência estabelecida. Problemas de escalonamento de máquina única são comuns em contextos industriais reais. O escalonamento eficiente dessa produção depende de diversos fatores, variáveis e especificidades de cada ambiente de produção. Numerosos estudos buscam encontrar soluções ótimas e heurísticas que superem as já existentes na literatura.

Seguindo esse contexto, Pacheco et al. (2018) analisaram um problema de escalonamento de uma única máquina, considerando dois aspectos simultâneos: manutenção preventiva e tempos de *setup* dependentes da sequência. A motivação do estudo partiu da necessidade de considerar as indisponibilidades das máquinas por manutenção preventiva, reparações periódicas ou trocas de ferramentas. Huang, Süer e Urs (2012) propuseram uma abordagem inteligente para resolver um problema de escalonamento em uma aplicação industrial real, em uma máquina injetora. A ideia principal do algoritmo genético sequencial desenvolvido foi analisar os dados do cotidiano industrial e aprender on-line durante a execução do algoritmo. Kirlik e Oguz (2012) apresentaram um algoritmo geral de busca de vizinhança variável aplicado ao problema de atraso ponderado total de uma única máquina com tempos de *setup* dependentes da sequência. O algoritmo de busca de vizinhança variável geral foi testado em um conjunto de instâncias de referência da literatura e comparado com os algoritmos de melhor desempenho e obteve resultados significativos.

Considerando as questões ambientais, Santos et al. (2023) desenvolveram uma abordagem multiobjetivo para o problema de sequenciamento de máquina única com tempo de *setup* dependentes de sequência e eficiência energética. O estudo abordou o *trade-off* entre a minimização do *makespan* e do consumo de energia, em um conjunto de tarefas de uma extrusora de plástico filme. Roshani et al. (2023) estudaram o problema de dimensionamento de lote integrado e escalonamento de máquina única considerando tempo de *setup* dependente da sequência e custos do ponto de vista da eficiência energética. O objetivo do problema foi minimizar a soma dos custos de fabricação, remanufatura, *setup*, manutenção de estoque e energia.

Valente e Alves (2008) abordaram o problema de agendamento de atraso ponderado em uma única máquina com tempo de *setup* dependente de sequência, onde o critério do atraso ponderado é fundamental. Para isso, apresentaram várias heurísticas baseadas na técnica de busca por feixes. Ertem, Ozcelik e Saraç (2019) propuseram uma abordagem de solução exata para o problema de escalonamento de máquina única com tempos de *setup* dependentes de sequência estocástica. Para isso, utilizaram um método de programação estocástica de dois estágios.

### **2.1.2 Escalonamento de Máquinas Paralelas**

Em otimização combinatória, o termo "máquinas paralelas" refere-se a um modelo em que várias máquinas operam simultaneamente para processar tarefas ou operações. Diferentemente do modelo de *Single Machine*, o escalonamento em máquinas paralelas envolve a distribuição de tarefas entre múltiplas máquinas de forma a otimizar a eficiência operacional. Conforme Müller, Dias e Araújo (2002) o objetivo principal é alocar um determinado número  $n$  de tarefas independentes, com tempos de execução conhecidos, para um número  $m$  de máquinas paralelas. O problema de sequenciamento em máquinas paralelas pode ser classificado quanto ao tipo de máquina utilizado: máquinas paralelas idênticas, máquinas paralelas uniformes e máquinas paralelas não-relacionadas. As máquinas paralelas são idênticas quando existe um conjunto

único contendo os tempos de execução das tarefas e estes tempos permanecem constantes. As máquinas paralelas são uniformes quando existe um conjunto único contendo os tempos de execução das tarefas, mas os tempos de execução são alterados por um fator uniforme, dependendo da tarefa a ser atribuída a uma máquina ou à outra. As máquinas paralelas não estão relacionadas quando existem  $n$  tarefas para serem distribuídas entre as  $m$  máquinas, mas cada tarefa é representada por um subconjunto contendo  $t$  tempos de execução (KELLER; LITZINGER, 2022).

No contexto de máquinas paralelas, nos quais múltiplas máquinas trabalham simultaneamente para realizar tarefas, Andres, Guzman e Poler (2021) propuseram um modelo de programação linear inteira mista para resolver um problema de dimensionamento e programação de lotes com uma configuração dependente da sequência. O trabalho considerou os moldes de injeção como o principal índice para programar as máquinas injetoras flexíveis paralelas. Talens et al. (2020) abordaram o problema de programação de montagem de múltiplas máquinas em dois estágios, um layout que consiste em várias máquinas paralelas no primeiro estágio e máquinas paralelas idênticas no segundo estágio. Os autores propuseram duas novas heurísticas eficientes, com o objetivo de minimizar o *makespan*. Seguindo na mesma linha, Edis e Ozkarahan (2012) trataram de um problema de programação do mundo real em um departamento de moldagem por injeção. Eles investigaram um problema de escalonamento de máquinas paralelas com o objetivo de minimizar o *makespan*. Duas abordagens foram propostas para obter resultados mais eficientes, ambas particionando todo o problema em subproblemas de carregamento e escalonamento. Keller e Litzinger (2022) investigaram a programação estática de tarefas em máquinas paralelas para compreender como as restrições de diferentes etapas influenciam o consumo de energia. O estudo apresentou programas lineares inteiros para todas as variantes de escalonamento e comparou o consumo de energia para um conjuntos de tarefas sintéticas de diferentes tamanhos e para conjuntos de tarefas derivados de dados reais.

Motivados pelos padrões atuais de fabricação sustentável, Li e Ou (2023) estudaram um modelo de programação de máquinas paralelas em que o custo de energia incorrido em cada máquina é dependente da máquina e proporcional à carga da máquina. O objetivo foi determinar um cronograma de produção com o *makespan* mínimo, sujeito à restrição energética de que o custo total da energia não exceda um determinado limite. Na mesma linha, Gao et al. (2023) estudaram um problema de programação de máquina paralela não relacionado com várias restrições de emissão de carbono em diferentes intervalos de tempo. Propuseram um modelo de Programação Linear Inteira Mista com o objetivo de minimizar o *makespan*.

### 2.1.3 Flow shop

O flow shop está entre os problemas de escalonamento mais conhecidos. Representa um quarto dos sistemas de produção e tem recebido muita atenção devido à sua complexidade e relevância prática (SEKKAL; BELKAID, 2023). Os estudos sobre flowshop, especialmente no contexto de otimização e programação linear, abordam problemas relacionados ao sequenci-

amento de tarefas em uma linha de produção, onde cada tarefa deve passar por uma série de máquinas em uma ordem específica. Dentro dessa classificação, existem diferentes configurações, como o Flowshop Flexível, nos quais diferentes máquinas podem executar a mesma tarefa em tempos diferentes. Shen et al. (2021) propuseram um modelo generalizado de flow shop flexível com máquinas paralelas não relacionadas em cada estágio, através de uma formulação de programação inteira mista. Eles utilizaram um algoritmo genético de duas fases, que lida com o sequenciamento de tarefas e a alocação de máquinas em cada fase. Já Sanati, Moslehi e Reisi-Nafchi (2023) abordaram a programação de eficiência energética de máquinas paralelas não relacionadas, considerando os tempos de *setups* dependentes da sequência, considerando diferentes tarifas de consumo de energia. Ainda na mesma linha, Carvalho e Nascimento (2022) abordaram o problema de dimensionamento e programação integrados para máquinas paralelas não idênticas, com restrições de capacidade, transferência de configuração, custos e tempos de configuração dependentes da sequência.

No contexto multiobjetivo, estudos que consideram o consumo de energia e os impactos ambientais ainda são raros. Visando preencher essa lacuna Öztop et al. (2020), desenvolveram um estudo para minimizar o tempo de fluxo total e consumo total de energia em um ambiente de flowshop, no qual as máquinas podem ser operadas em níveis de velocidade variados. Ainda nessa pegada ambiental, Li et al. (2023) realizaram um grande número de experimentos para os problemas de programação de flowshops com consumo de energia de pico. Os resultados e a discussão mostraram que as heurísticas e metaheurísticas propostas apresentam bom desempenho na resolução do problema.

O problema de programação flowshop sem espera de duas máquinas foi abordado por Ay-dilek et al. (2022) com o objetivo de minimizar o atraso máximo onde os tempos de *setup* são modelados como incertos, com limites inferiores e superiores fornecidos. Nesse estudo, novas relações de dominância e novas heurísticas foram desenvolvidas e se mostraram mais eficientes que a melhor existente na literatura sob o mesmo tempo de CPU. Santana e Fuchigami (2023) apresentaram quatro modelos de programação linear inteira mista para otimizar o processo de flow shop de linha de montagem, com o objetivo principal de minimizar o makespan. A pesquisa abrange a introdução de três novos modelos de programação linear mista e aprimora um modelo existente para resolver um problema que, até então, não havia sido abordado. Conforme abordado por Alves e Delgado (1997) um problema de Programação Linear Inteira é um problema de Programação Linear em que todas ou alguma das suas variáveis assumem valores inteiros. Quando todas as variáveis estão sujeitas à condição de integralidade estamos perante um problema de Programação Linear Inteira Pura; e se apenas algumas o estão trata-se de um problema de Programação Linear Inteira Mista.

#### **2.1.4 Job Shop**

O *jobshop* é um problema clássico de programação de produção que envolve a alocação de diferentes operações a um conjunto de máquinas, onde cada trabalho pode exigir diferentes

processos. No *jobshop* cada trabalho consiste em uma série de operações distintas, em ordens específicas, que precisam ser realizadas em diferentes máquinas.

Este problema é conhecido por ser *NP*-difícil, o que significa que encontrar uma solução ótima em tempo polinomial pode ser computacionalmente complexo, especialmente para instâncias maiores. Portanto, o Jobshop é frequentemente estudado em otimização combinatória, envolvendo métodos exatos, heurísticas e meta-heurísticas para encontrar soluções eficientes em um tempo computacional razoável. Diante desse contexto, em um estudo recente, Burmeister, Guericke e Schryen (2023) propuseram um algoritmo memético multi-objetivo baseado no algoritmo genético, com objetivos de minimização de custos de energia e tempo total de produção em um ambiente *jobshop*. Os resultados foram comparados com os de um solucionador exato de última geração. Já He et al. (2021) estudaram um problema de escalonamento job-shop energeticamente eficiente com tempo de *setup* dependente da sequência, visando minimizar o *makespan*, o atraso total e o consumo total de energia simultaneamente. Para abordar essa mesma linha de pesquisa, Vallejos-Cifuentes et al. (2019) implementaram um algoritmo genético multiobjetivo elitista genérico em um problema de escalonamento. O estudo analisou a velocidade do processo como a variável principal de decisão, com foco especial na relação com a energia. Dado que a variação da velocidade impacta diretamente o tempo de processamento, mas também impacta na demanda de energia, o objetivo foi determinar a velocidade apropriada para cada operação em sua respectiva máquina.

Outras recentes pesquisas têm se dedicado ao estudo de ambientes *Job Shop*, concentrando-se em aprofundar a compreensão e encontrar soluções mais avançadas. Defersha e Rooyani (2020) desenvolveram um algoritmo genético de dois estágios, onde o primeiro estágio dita a sequência em que as operações são consideradas para atribuição. Já o segundo estágio, partindo das soluções do anterior, permite que o algoritmo pesquise todo o espaço de soluções, incluindo soluções que podem ter sido excluídas devido à natureza gananciosa da primeira etapa. Motivado pela escassez de modelos de programação extensivos anteriores, bem como pela falta de heurísticas genéricas e eficientes, Grumbach et al. (2023) desenvolveram um novo algoritmo memético para resolver um extenso problema de escalonamento de *Job Shop* flexível com restrição de recursos duplos. A motivação subjacente foi criar uma estrutura de algoritmo capaz de mapear requisitos complexos e gerar cronogramas de forma confiável com o mínimo de tempo computacional. Rodrigues, Pinho e Sena (2020) realizaram uma comparação dos resultados de três métodos de escalonamento em um sistema *Job Shop*: primeiro, com a sequência de chegada; em segundo lugar, usando uma lógica de sequenciamento; e, por fim, utilizando a mesma lógica, porém com ajustes na sequência durante a produção do lote, buscando melhorar os pontos negativos gerados pela lógica.

## 2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Conforme Zandi, Ramezani e Monplaisir (2020) a consciência de sustentabilidade na manufatura tornou-se um tópico interessante para muitos pesquisadores nos últimos anos. Há também uma maior preocupação em muitas empresas com a redução do consumo de energia na fabricação. Melhorar a saúde e a segurança ambiental, reduzir os custos de produção, o acesso a incentivos governamentais, como subvenções e créditos fiscais, e também melhorar a imagem da marca são as razões mais importantes que estão levando muitas empresas a um planejamento de produção ecologicamente correto. Os fabricantes também enfrentam pressões decorrentes da crescente conscientização pública sobre a sustentabilidade, aumento dos custos de energia e crescentes preocupações com a segurança energética. Diante disso, a linha de pesquisa focada na redução do consumo de energia na fabricação, sem comprometer os níveis de serviço ganha uma nova perspectiva (MANSOURI; AKTAS; BESIKCI, 2016). De acordo com Bektur (2022) uma das estratégias de eficiência energética é o mecanismo de escalonamento de velocidade. No mecanismo de dimensionamento de velocidade, as máquinas podem processar trabalhos em diferentes velocidades. De acordo com Fang e Lin (2013), não parece haver motivo para diminuir a velocidade da máquina para adiar o processamento dos trabalhos. No entanto, se a entrega não for urgente ou o custo implícito for compensado pela redução do custo de energia, é razoável reduzir as velocidades de processamento. Para que o ajuste de velocidade seja eficiente e efetivo, é fundamental levar em consideração diversos fatores, incluindo a qualidade do material produzido e as exigências mínimas e máximas de produção. De acordo com (ZHOU et al., 2016) a eficiência energética de uma máquina é influenciada tanto pelas suas características intrínsecas quanto pelas condições de processamento. As características intrínsecas, como perdas de energia no motor, perdas mecânicas e perdas do sistema hidráulico, têm um impacto significativo na eficiência energética. No contexto do processamento, as perdas manifestam-se em fatores como um consumo de energia durante períodos em que a máquina está ociosa. Em ambientes de produção com uma grande variedade de produtos ou tarefas diferentes, os tempos de *setup* também podem ser especialmente significativos para essas perdas de eficiência. Com base nisso, Sagar, Jerald e Khan (2023) propuseram um modelo baseado em um problema de agendamento em um sistema de máquinas flexíveis com um total de cinco máquinas, com tempo *setup* dependente de sequência. O modelo multiobjetivo analisou o *tradeoff* entre minimizar os atrasos e as emissões de carbono.

Seguindo esse contexto, Sagar, Jerald e Khan (2023) estudaram a relação entre a ordem e a programação de tarefas e o uso de energia, buscando ampliar as investigações sobre a viabilidade do uso da técnica *ON/OFF* no nível da máquina para reduzir o uso de energia em marcha lenta. O estudo propõe uma abordagem integrada que otimiza tanto a programação quanto o consumo de energia.

### 2.3 PROBLEMAS DE ESCALONAMENTO COM CONSIDERAÇÕES AMBIENTAIS

De acordo com Santos et al. (2023) em processos multiobjetivos com considerações ambientais os tomadores de decisão tentam otimizar suas decisões em termos de um conjunto de objetivos conflitantes, como a minimização do consumo energético e minimizar o *makespan*. Nesse contexto, o sequenciamento de tarefas desempenha um papel fundamental, envolvendo a alocação de recursos, levando em consideração diversas restrições e objetivos. Seguindo essa mesma linha, Fallahi, Shahidi-Zadeh e Niaki (2023) estudaram um problema de escalonamento formulado como um problema de otimização multiobjetivo para simultaneamente minimizar o tempo de produção e o custo total, incluindo penalidades por atraso, custo de aquisição de máquinas e custo de emissão de carbono.

A otimização de problemas de programação de produção e escalonamento em ambientes de manufatura abrange diferentes abordagens que consideram as particularidades de cada problema. Um algoritmo evolucionário de otimização multiobjetivo aprimorado baseado em decomposição foi apresentado por Jiang e Wang (2019) para resolver o problema de programação de *flowshop* de permutação com considerações ambientais e tempos de *setup* dependentes da sequência.

Mansouri, Aktas e Besikci (2016) aproveitaram a velocidade variável das operações de usinagem para analisar o *trade-off* entre minimizar *makespan* e o consumo total de energia, em um ambiente *flowshop* com tempos de *setup* dependente de sequência. Desenvolveram um modelo de otimização multiobjetivo linear inteira mista para encontrar a fronteira de Pareto e uma heurística construtiva para o problema. Fang et al. (2011) apresentaram uma formulação geral de programação linear inteira mista multiobjetivo para otimizar o cronograma operacional de uma operação que considera critérios relacionados à produtividade e energia para um ambiente *flowshop*. Esse tipo de abordagem difere das tradicionais de otimização de cronograma, em que a maior velocidade de operação possível é preferível para maximizar a produtividade. Fang e Lin (2013) investigaram um problema de escalonamento com máquinas paralelas heterogêneas que permitem flexibilidade para ajustar suas velocidades de processamento para cada tarefa individual com o objetivo de obter soluções sustentáveis. Mouzon e Yildirim (2008) propuseram um *framework* para obter um conjunto de soluções eficientes que minimizam o consumo total de energia e o atraso total dos trabalhos em uma única máquina. O estudo foi motivado pelo aumento do preço e da demanda por petróleo e outros combustíveis fósseis, juntamente com a redução das reservas de commodities energéticas e a crescente preocupação com o aquecimento global.

Há também abordagens que não priorizam apenas a redução do consumo de energia, mas sim o custo advindo do consumo, que pode sofrer alterações em decorrência do horário de uso. Conforme Sanati, Moslehi e Reisi-Nafchi (2023), uma das estratégias bem conhecidas para equilibrar o consumo de energia é a precificação de eletricidade por tempo de uso (TOU), amplamente implementada em países industrializados em todo o mundo. De acordo com a

política TOU, o preço da eletricidade seria dependente do tempo e varia de hora a hora no dia. De acordo com Wang et al. (2020), as 24 horas em um dia são divididas em vários períodos de preços diferentes. O preço da eletricidade é o mais alto nos períodos de pico e o mais baixo nos períodos fora de ponta. Em aplicações da vida real, os períodos de pico são geralmente durante o dia, enquanto os períodos fora de pico são geralmente em horas noturnas. Utilizando essa abordagem, empresas de manufatura têm a capacidade de transferir suas operações de produção, resultando em economias substanciais de custos. Zhang et al. (2021) desenvolveram um modelo de Programação Linear Inteira Mista para um problema de programação de máquinas paralelas em dois estágios sob tarifas de tempo de uso para minimizar os custos totais de eletricidade. O algoritmo envolve mecanismo de inserção ganancioso, bem como heurística de ajuste de velocidade.

Para contribuir com esses objetivos ambientais, a produção de energia renovável se coloca como recurso valioso para empresas onde a energia tem um impacto significativo em seus processos de produção. Cronogramas de produção ótimos podem reduzir a dependência de usinas de energia. Além disso, o uso de energia renovável pode contribuir significativamente para reduzir o impacto ambiental dos processos de produção. Na era contemporânea, o número de fábricas que usam energia renovável aumenta a cada dia. (GHORBANZADEH; RANJBAR, 2023)

#### 2.4 MÉTODOS EXATOS E HEURÍSTICOS DE ESCALONAMENTO

Os métodos exatos de escalonamento são modelos de programação matemática precisos usados para resolver problemas de escalonamento. Eles visam encontrar a solução ótima, formulando um problema de otimização, onde se busca minimizar ou maximizar uma função objetivo sob restrições específicas. Esses modelos garantem a otimalidade da solução. Enquanto os métodos heurísticos, segundo Bueno (2009) são algoritmos exploratórios que se baseiam em aproximações sucessivas a partir de soluções viáveis, não necessariamente ótimas, visando encontrar as melhores soluções possíveis.

Seguindo essa linha Gmys et al. (2020) propuseram um algoritmo eficiente *branch-and-bound* para o problema de permutação *flow-shop* com objetivo minimizar o *makespan* em um cenário de máquinas paralelas. O estudo apresentou um novo esquema de decomposição de nós que combina estratégias de ramificação dinâmica e refinamento de limite inferior de forma computacionalmente eficiente, através de um mecanismo inspirado no aprendizado on-line para prever soluções promissoras. Muter (2020) abordaram problemas de escalonamento de máquinas de processamento em lote único e paralelo com o objetivo de minimizar o *makepan* através de um algoritmo exato. Na primeira parte, o algoritmo proposto resolve o problema de processamento em lote único por meio de um algoritmo de geração de colunas e cortes. A segunda parte emprega um mecanismo de busca para encontrar o *makespan* mínimo para o problema da máquina paralela, o que implica na reformulação deste problema pela geração de colunas a

cada iteração.

Lin e Liao (2008) abordaram um problema clássico de programação que visa minimizar o *makespan* em máquinas paralelas uniformes. Um algoritmo foi desenvolvido para obter a solução ótima, e apesar de sua complexidade temporal exponencial, extensos experimentos computacionais mostraram sua notável eficiência ao lidar com uma variedade de tamanhos do problema. Liao e Lin (2003) consideraram o problema de duas máquinas paralelas uniformes com o objetivo de minimizar o *makespan*, partindo do ponto de vista da carga de trabalho ao invés do tempo de conclusão. Um algoritmo ótimo foi desenvolvido para o problema.

Em um estudo recente desenvolvido por Bektur (2022), foi analisado um problema de programação de máquinas paralelas não relacionadas. Um modelo multiobjetivo de programação linear inteira mista foi proposto para o problema. Devido à natureza *NP*-difícil do problema uma heurística foi proposta, através de um algoritmo memético. Seguindo a mesma linha, Mansouri, Aktas e Besikci (2016) consideraram a variabilidade na velocidade das operações das máquinas para analisar o *trade-off* entre a minimização do *makespan* e do consumo total de energia, através de um modelo de otimização multiobjetivo linear inteiro misto para identificar a fronteira de Pareto. Para lidar com a complexidade combinatorial, criaram uma heurística construtiva para uma análise rápida do *trade-off*.

Ertem, Ozcelik e Saraç (2019) realizaram um estudo onde consideraram o problema estocástico de escalonamento de máquina única com os tempos de *setup* dependentes da sequência e incertos, enquanto os tempos de processamento e as datas de vencimento eram determinísticos. Para a solução deste problema *NP*-difícil, várias heurísticas e alguns algoritmos de programação dinâmica foram desenvolvidos. Bektur (2021) também investigou o problema de escalonamento de uma única máquina energeticamente eficiente com tempo de *setup* dependente da sequência. No problema foi levado em consideração o método de ajuste de velocidade da máquina, com o objetivo de minimizar o consumo total de energia e o número total de trabalhos atrasados. O algoritmo heurístico multiobjetivo proposto obteve melhores resultados do que o da literatura estudada.

Essas pesquisas são determinantes para fornecer ferramentas práticas e eficientes para resolver uma variedade de problemas do mundo real, onde a obtenção de uma solução exata pode ser desafiadora e inviável. O foco está em encontrar métodos que equilibrem eficiência computacional com a qualidade da solução obtida.

## 2.5 ABORDAGENS ALTERNATIVAS DE OTIMIZAÇÃO

As pesquisas sobre otimização combinatoria seguem por diversas ramificações, com o objetivo de desenvolver métodos mais eficazes para resolver problemas complexos de produção. Alvarez-Meaza et al. (2021) realizaram uma análise bibliométrica e em rede para encontrar as tendências científicas a partir de um conjunto de dados formado por 420 documentos científicos publicados de 2006 a 2020. Os resultados mostram que o "agendamento verde" é uma área de

pesquisa crescente na comunidade científica e, nos últimos anos, o número de novos tópicos de pesquisa tem experimentado um crescimento considerável. A pesquisa foi desenvolvida na Ásia, Europa e América.

Estudos versam também sobre ambientes de produção, onde o sistema pode conter um gargalo de máquina que afeta, em alguns casos, toda a produção. A gestão desse gargalo é essencial para a empresa, pois ele é responsável por atrasos na entrega dos pedidos dos clientes. Nesses casos a otimização possui grande possibilidade de trazer melhorias nos resultados da produção (SIOUD; GRAVEL; GAGNÉ, 2012)

Outra ramificação das pesquisas sobre otimização busca minimizar o atraso total nas entregas. O cumprimento das datas de vencimento dos clientes deve ser levado em conta ao tomar decisões de agendamento. Com base nisso Allahverdi e Aydilek (2015) abordaram o problema de programação em duas etapas para indústrias de montagem, com o objetivo de minimizar o atraso total. O problema de programação bi-objetivo de minimizar o número de trabalhos atrasados e o tempo médio de fluxo em uma única máquina foi estudado por Erenay et al. (2010). Esse problema, que é conhecido por ser NP-difícil, é importante na prática, pois o primeiro critério transmite a posição do cliente, e o segundo reflete a perspectiva do fabricante na cadeia de suprimentos.

### 3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

A moldagem por injeção pode ser considerada como um processo de fabricação de estágio único em que as peças são produzidas pela injeção de um material fundido. Na máquina de injeção, o material é fundido, misturado e injetado no molde, adquirindo, após o resfriamento, a forma imposta pela configuração da cavidade e sendo então ejetado. Em geral, o chão de fábrica é composto por várias máquinas injetoras que são compartilhadas por diferentes produtos que necessitam de diferentes moldes (KLEMENT et al., 2021).

Essa pesquisa se concentra na operação de injetoras de Zamac, máquinas essenciais na indústria de fundição. Estas máquinas são utilizadas para fabricar peças de metal a partir da liga conhecida como Zamac. O nome Zamac vem da abreviatura dos nomes dos elementos que compõe a liga: zinco, alumínio, magnésio e cobre. Tratam-se de ligas de zinco, com teores de alumínio em torno de 4%, bem como magnésio e cobre como elementos de liga. Sua grande diversidade de aplicações deve-se à grande facilidade de processamento e boa fluidez (FUHR et al., 2020). Além disso, esta liga possui características e propriedades importantes para aplicação na confecção de elementos estáticos para o setor da moda. Uma delas é o baixo ponto de fusão, de cerca de 400°C, que implica em uma baixa demanda de energia durante o processo de fundição quando comparado com bronze e latão (PAGE; HARTMANN, 2018). Fazendo um breve comparativo com o latão, o processo de injeção sob pressão para obtenção de Zamac permite maior produtividade associada a melhores características dimensionais, além de apresentar custo 30% menor (COSTA et al., 2023). O baixo ponto de fusão permite a obtenção de peças de paredes finas e maior produtividade associada a melhores características dimensionais (FUHR et al., 2020). Ademais, o processo de injeção de Zamac permite produzir peças metálicas geometricamente complexas com características de alta qualidade, design versátil e um alto grau de precisão e repetibilidade, sem a necessidade de processamento adicional (PAGE; HARTMANN, 2018). O Zamac encontra diversas aplicações na indústria da transformação, sendo usado em componentes automotivos, acessórios de moda, arte e decoração, assim como na construção civil. Sua versatilidade e características de resistência, facilidade de moldagem e durabilidade fazem dele uma escolha valiosa em várias áreas de produção.

As injetoras de Zamac da empresa atuam na produção de rebites, plaquetas e botões personalizados, atendendo às demandas variadas de seus clientes da indústria de acessórios de moda. As peças produzidas são utilizadas em itens como calças, blusas, camisas, bermudas e acessórios. Após a produção, a peça chamada de árvore, adquire um formato com ramificações, correspondentes a quantidade de produtos, conforme Figura 1, que apresenta uma árvore (peça) contendo 6 botões (produtos). Os produtos possuem moldes individuais, que recebem customizações específicas, conforme as solicitações de cada cliente, tais como a impressão da marca.



Figura 1 – Estrutura de árvore das peças de Zamac produzidas.

Após o seu completo resfriamento, as árvores são colocadas em uma betoneira para que seja realizado desprendimento dos produtos mecanicamente. Os produtos são retirados da betoneira e separados. A parte sobressalente volta para ser aquecida no forno extra e passa por um novo processo produtivo. O produto final passa por inspeções rigorosas de qualidade para garantir que atendam às especificações dos clientes, além dos processos adicionais, como polimento, galvanização ou tratamentos de superfície para aprimorar a aparência e as características necessárias.

Vale destacar que peças que não atendem aos padrões de qualidade são encaminhadas para o retrabalho, onde passarão por todo o processo novamente. Isso garante que apenas produtos que atendam aos critérios de qualidade estabelecidos pela empresa sejam entregues aos clientes, mantendo sua reputação de alta qualidade na indústria da moda. A Figura 2 apresenta, através de uma vista frontal, o diagrama de detalhamento das partes de uma injetora de Zamac, seguido de uma especificação de cada parte.

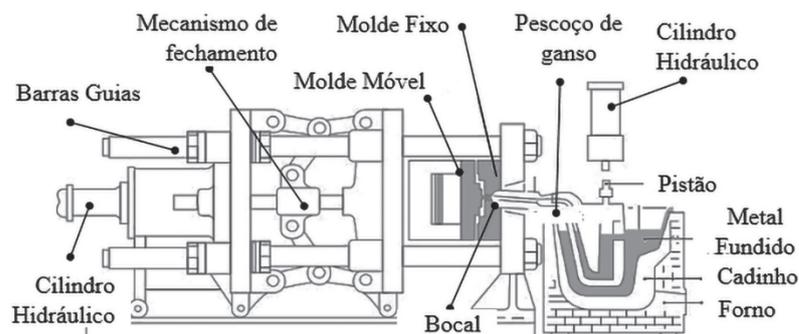


Figura 2 – Vista Frontal de uma injetora de Zamac (DUTRA; ROSA; BRAUN, 2021)

- Cilindro hidráulico: Gera a pressão necessária para empurrar o material fundido para o molde;

- Barras Guias: Fornecem suporte estrutural e orientam o movimento preciso do molde móvel durante a abertura e fechamento do molde;
- Mecanismo de fechamento: Controla o movimento coordenado do molde móvel e fixo, permitindo a inserção e extração da peça moldada;
- Molde móvel: Se move para permitir a injeção do material fundido e posteriormente a remoção da peça moldada;
- Molde fixo: Mantém-se estável durante o processo de injeção, fornecendo o molde no qual o material é injetado para criar a peça desejada;
- Pescoço de ganso: Liga o bocal ao molde móvel, permitindo o fluxo do material fundido para dentro do molde;
- Pistão: Opera no cilindro hidráulico para gerar a pressão necessária que impulsiona o material fundido para dentro do molde;
- Metal fundido: O material derretido que é injetado no molde para solidificar e formar a peça desejada;
- Cadinho: Recipiente que contém o material fundido antes da injeção;
- Forno: Aquece o metal para fundi-lo, preparando-o para a injeção, mantendo-o no estado líquido necessário;
- Bocal: Ponto de entrada do material fundido no molde.

Para atender às demandas variadas de produção a empresa opera com quatro unidades de injetoras de Zamac, abrangendo três modelos distintos. A seguir, são apresentados os modelos disponíveis e suas principais características:

1.  $M_{L1}$

- Capacidade de Injeção: 200g
- Capacidade do forno: 100kg
- Principal uso no local: Produção de Plaquetas

2.  $M_{L2}$  (02 unidades)

- Capacidade de Injeção: 300g
- Capacidade do forno: 180kg
- Principal uso no local: Produção de Botões

3.  $M_{P1}$

- Capacidade de Injeção: 300g
- Capacidade do forno: 100kg
- Principal uso no local: Produção de Rebites

Além das injetoras disponíveis a empresa faz uso de um forno extra, dedicado ao derretimento do Zamac. A finalidade desse forno é acelerar o processo de fundição do material. Ao garantir que o Zamac chegue à injetora já fundido e na temperatura ideal, acelera-se o processo de produção, proporcionando maior eficiência na produção das peças. Vale destacar que ao introduzir o Zamac proveniente do forno extra, não ocorrem variações significativas na temperatura do forno da injetora. Em contraste, quando a matéria-prima é inserida à temperatura ambiente, observa-se uma notável redução na temperatura do forno da máquina. Esse processo de redução de temperatura requer cerca de 10 minutos para retornar à temperatura ideal de produção.

### 3.1 FLUXOGRAMA

Nesta seção, apresenta-se um fluxograma do processo produtivo, juntamente com uma descrição detalhada do processo de fabricação das peças de Zamac:

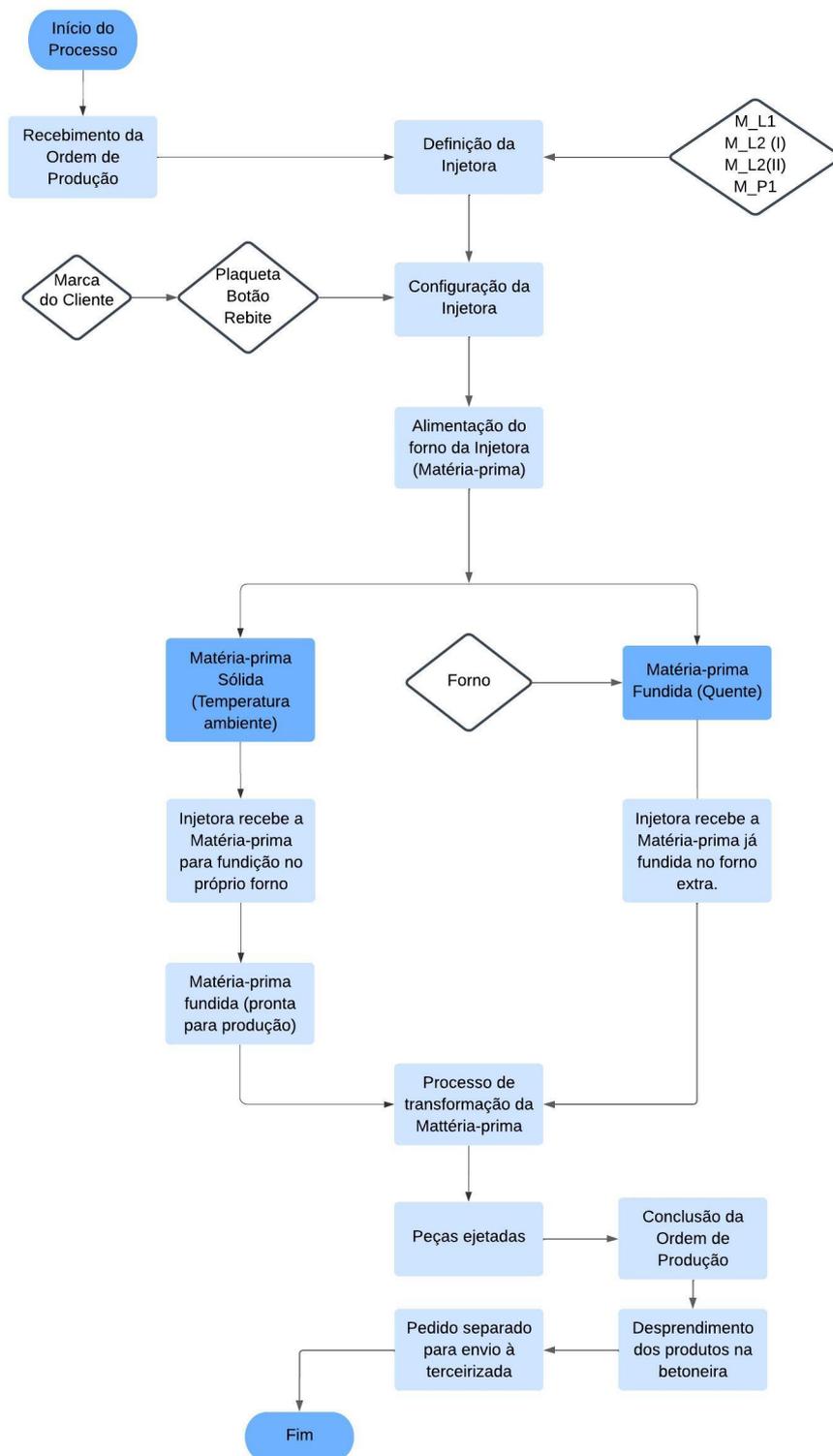


Figura 3 – Fluxograma

1. Recebimento do Pedido: O processo começa quando a empresa recebe um pedido do cliente para fabricar peças de Zamac. Este pedido é realizado com as especificações detalhadas sobre as peças, como tipo, quantidade, tamanho e design;
2. Preparação da Ordem de Produção: Com base nos pedidos recebidos, as ordens de pro-

dução são preparadas. Estas ordens contêm informações precisas sobre as peças a serem produzidas, incluindo as especificações técnicas, os materiais necessários e os prazos de entrega;

3. Definição da Máquina Injetora: Existem quatro máquinas injetoras disponíveis para a produção. Nesta etapa, é feita a seleção da máquina injetora adequada com base nas características das peças a serem fabricadas.
4. Fundição da Matéria-Prima: Uma parte da matéria-prima é fundida no forno extra antes de chegar no forno da injetora.
5. Utilização da Matéria-Prima Sólida: Enquanto parte do Zamac é fundida no forno extra, outra parte é utilizada na forma sólida. Isso envolve o carregamento de material sólido, em temperatura ambiente, no forno próprio da máquina injetora;
6. Produção na Injetora: A máquina injetora opera de acordo com as especificações da ordem de produção. Através do pistão, ela injeta a liga de Zamac na cavidade do molde, que tem o formato das peças desejadas. Sob pressão e temperatura adequadas, a liga se solidifica dentro do molde, criando as peças de Zamac, que é ejetada da máquina.
7. Inspeção de Qualidade: As peças ejetadas passam por um processo de inspeção de qualidade para garantir que atendam aos padrões estabelecidos na ordem de produção. Também é realizada a verificação de acabamento e integridade das peças.
8. Peças Aprovadas: Após a aprovação, as peças são encaminhadas para o processo de desprendimento dos produtos, onde ele é separado do restante da estrutura em uma betoneira. O material excedente é novamente direcionado para o processo de fundição, enquanto o produto final segue para a etapa de acabamento.
9. Produto Acabado: As peças finalizadas são despachadas para uma empresa terceirizada responsável pela separação por cliente. Posteriormente, o produto é entregue ao cliente

### 3.2 COLETA DE DADOS

Neste trabalho, estuda-se um problema de escalonamento de máquinas paralelas com tempos de *setup* dependentes da sequência. O objetivo considerado é a minimização da potência elétrica total consumida no processo produtivo.

Para realizar a avaliação do consumo de energia, foi utilizado o analisador de energia ET-5051C fabricado pela Minipa, conforme registrado na Figura 4 em um dia de avaliação. Este equipamento possui capacidade para medir uma ampla variedade de parâmetros elétricos, tais como tensão, corrente, potência ativa e reativa, fator de potência, frequência, energia ativa e reativa. O equipamento permite registrar e calcular o consumo total ao longo de períodos específicos. Isso possibilita uma análise abrangente do padrão de consumo de energia, auxiliando na

identificação de tendências, avaliação de eficiência energética e no planejamento de otimizações para redução de custos ou melhoria da eficiência do sistema elétrico.



Figura 4 – Analisador de Energia ET-5051C

As análises de consumo de energia foram realizadas entre os meses de novembro e dezembro de 2023 nos três modelos de injetoras disponíveis, assim como no forno extra. Os dados gerados pelo equipamento foram extraídos através de pendrive e posteriormente armazenados em um notebook contendo o software TopView, que é o software próprio do equipamento para realização das análises através de gráficos e tabelas de dados.

O equipamento foi calibrado em laboratório antes do início da pesquisa, conforme certificado de calibração anexo A. Para as análises o equipamento foi configurado para coletar os dados a cada 2 minutos, em sistema trifásico 4 fios (trifásico + neutro + terra), conforme o padrão das máquinas analisadas. A Figura 5 é um exemplo que mostra o modelo do gráfico gerado pelo software durante um intervalo de tempo. Os dados da figura possuem um filtro que permite a análise de um intervalo de tempo específico dentro da análise global. É possível também identificar quais variáveis foram solicitadas para geração do gráfico, que no exemplo foram:  $EA_1+_Avg$ , que representa o consumo de energia em *Watts* (W) para a primeira fase ao longo do tempo;  $EA_2+_Avg$ , semelhante ao primeiro item, mas se refere à segunda fase monitorada pelo analisador de energia;  $Ea3+_Avg$ , novamente semelhante aos anteriores, mas para a terceira fase;  $Eat+_Avg$ , que se refere à soma total de todas as fases monitoradas e indica novamente o consumo de energia em W. Esses dados apresentados em gráficos também são gerados em uma tabela de dados numéricos que possibilita uma ampla análise de dados. Na tabela gerada é possível filtrar a diferença entre a coleta em intervalos de tempo. Na configuração

definida, essas coletas representam cada intervalo de 2 minutos. Esse tempo foi determinado pela capacidade de armazenamento de dados do equipamento. Portanto, é possível realizar diversas análises de consumo energético a partir do software, que possui todas as opções de funcionalidades do equipamento.

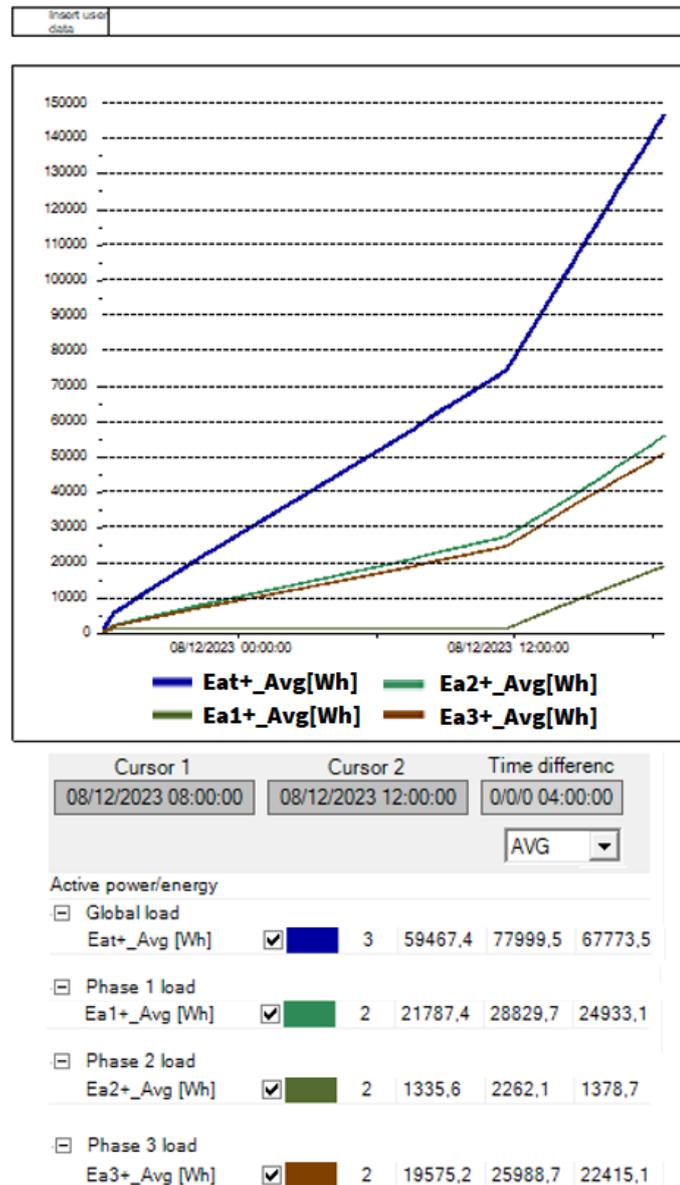


Figura 5 – Gráfico do Software

Embora cada máquina tenha a capacidade de produzir todos os tipos de peças que a empresa fabrica, atualmente há um padrão de designação de item que cada injetora deverá produzir. Essa designação se dá com o objetivo de reduzir a quantidade de *setups* para alteração dos moldes e foi definido pela empresa, de acordo com a experiência prática. Portanto, a produção acontece preferencialmente com a  $M_{LI}$  produzindo Plaquetas, as duas  $M_{L2}$  produzindo Botões e a  $M_{PI}$  produzindo Rebites.

No que diz respeito as velocidades de operação, embora seja possível alterar as velocidades de produção, as máquinas seguem um padrão estabelecido operacionalmente. O mesmo ocorre com a definição da quantidade de matéria-prima que deve ser inserida nos fornos das injetoras em seus diferentes estados (à temperatura ambiente ou fundida).

Para compreender melhor o desempenho energético das máquinas em diferentes cenários, buscou-se explorar cenários com diferentes velocidades de operação, sem comprometer a qualidade do produto final. Para isso foram definidas mais duas velocidades de operação, sendo uma superior e outra inferior a que é utilizada como padrão em cada máquina. Portanto, o estudo analisou três velocidades distintas, dentro dos limites aceitáveis pela empresa, para cada máquina. De acordo com (BEKTUR, 2021) a alta velocidade da máquina garante que os trabalhos sejam concluídos mais rápido, mas causa um alto índice de consumo de energia. A baixa velocidade da máquina proporciona baixo consumo de energia, mas prolonga o tempo de conclusão dos trabalhos. Como resultado, as metas de eficiência energética e de produção são contraditórias e o problema deve ser considerado multifuncional.

O outro comportamento estudado foi o desempenho energético da máquina quando recebe a matéria-prima em seu forno. Essa matéria-prima pode chegar no forno da injetora em estado sólido ou fundida. O estudo analisou esses dois cenários de estado da matéria. A matéria-prima em seu estado sólido está em temperatura ambiente e segue para o forno da injetora para ser fundida. Esse processo gera aumento no consumo energético, por demandar o acionamento da resistência responsável por aquecer e manter a alta temperatura no forno. Enquanto que a matéria-prima fundida no forno extra já chega ao forno da injetora em temperatura de aproximadamente 450°C.

A coleta de dados teve como objetivo analisar o desempenho energético das máquinas em cada cenário definido, para buscar uma solução que minimize o tempo total de produção e o consumo de energia. As configurações de velocidade e estado da matéria-prima estabelecidas para essa pesquisa são apresentadas na Tabela 1.

<b>Configurações</b>	<b>Velocidade x Estado da Matéria</b>
<i>P<sub>1</sub></i>	Velocidade Padrão com matéria-prima fundida
<i>P<sub>2</sub></i>	Velocidade Padrão com matéria-prima sólida
<i>A<sub>1</sub></i>	Velocidade Aumentada com matéria-prima fundida
<i>A<sub>2</sub></i>	Velocidade Aumentada com matéria-prima sólida
<i>R<sub>1</sub></i>	Velocidade Reduzida com matéria-prima fundida
<i>R<sub>2</sub></i>	Velocidade Reduzida com matéria-prima sólida

Tabela 1 – Tabela de Velocidades com Diferentes Estados da Matéria-Prima

No contexto da pesquisa, a Velocidade Padrão se refere a velocidade que cada máquina costuma operar na empresa habitualmente. A Velocidade Aumentada foi uma velocidade maior de produção, possibilitando produzir mais peças em menos tempo. Já a Velocidade Reduzida consiste em uma velocidade de trabalho mais lenta, resultando em uma menor produção ao longo do tempo. Para definir essas configurações, foram realizadas alterações nas velocidades

de produção das máquinas, dentro dos limitantes definidos junto com o operacional da empresa, garantindo a manutenção da qualidade do produto. A alteração da velocidade se deu através de modificações em três configurações essenciais no processo de injeção:

- Tempo de Reciclo (TR): refere-se ao intervalo, em segundos, entre a conclusão de um ciclo de injeção e o início do próximo ciclo. É o tempo necessário para reiniciar o processo e injetar novamente no molde.
- Tempo de Solidificação (TS): o tempo de solidificação é o período, em segundos, durante o qual o material injetado no molde passa do estado líquido para o estado sólido.
- Tempo de Ciclo (TC): Engloba todas as fases desde a injeção do material até a ejeção da peça moldada, medido em segundos. Podemos considerar esse parâmetro como o principal, visto que a definição do TC é o que impacta diretamente na quantidade de árvores produzidas ao longo do tempo.

Como cada máquina possui suas particularidades, as produções de cada uma difere dentro dos padrões definidos. Dessa forma, o Tempo de Ciclo (TC) oscilou entre 6,1 e 7,6 segundos, dependendo da configuração e da injetora utilizada. Isso implica que cada peça (árvore), contendo os produtos (botões, rebites ou plaquetas), foi ejetada dentro desses tempos mínimo e máximo, conforme apresentado na Tabela 2. Os dados de Produção (Prod) mostram a quantidade de peças que cada máquina produz em um intervalo de 2 minutos.

Configuração	$M_{L1}$				$M_{L2}$				$M_{PI}$			
	TR (s)	TS (s)	TC (s)	Prod (Un)	TR (s)	TS (s)	TC (s)	Prod (Un)	TR (s)	TS (s)	TC (s)	Prod (Un)
$P_1$ e $P_2$	1.0	1.8	<b>7.0</b>	<b>17.2</b>	0.6	1.8	<b>7.4</b>	<b>16.2</b>	1.6	1.6	<b>6.5</b>	<b>18.4</b>
$A_1$ e $A_2$	0.8	1.6	<b>6.5</b>	<b>18.4</b>	0.5	1.4	<b>7.0</b>	<b>17.2</b>	1.0	1.3	<b>6.1</b>	<b>19.6</b>
$R_1$ e $R_2$	1.2	2.0	<b>7.4</b>	<b>16.2</b>	0.8	2.0	<b>7.6</b>	<b>15.8</b>	1.9	2.1	<b>7.1</b>	<b>16.8</b>

Tabela 2 – Configurações definidas para análise

Conforme apresentado na Tabela 2, a velocidade de produção não está diretamente ligada ao estado da matéria-prima inserida no forno, ou seja, em cada uma das três velocidades analisadas, a produção se mantém a mesma independente de ser inserida matéria-prima sólida ou fundida.

Além das configurações já citadas, foi conduzida uma análise detalhada do consumo de energia da **Máquina Ociosa (MO)**, onde foi avaliado o consumo durante o tempo em que permanece ligada em um estado de baixo consumo, sem estar produzindo. Geralmente, a máquina permanece ociosa quando está trocando de configuração, para produzir uma nova ordem de produção.

Além disso, foi analisado o consumo de energia durante a **Operação do Forno (OF)**, responsável por fundir o Zamac que será inserido nas injetoras. Vale ressaltar que o forno não

possui capacidade de fundição do Zamac para todas as máquinas em tempo integral, caso estejam trabalhando simultaneamente. A estimativa operacional é que o forno consiga atender aproximadamente 60% da produção em sua máxima capacidade, podendo variar de acordo com os cenários de produção.

A Tabela 3 compila os resultados das análises dos dados coletados nas máquinas injetoras. Esses dados são originados do software do analisador de energia. Para cada configuração e máquina são apresentados os seguintes parâmetros: **Consumo Médio (Med)**, **Desvio Padrão (DP)**, **Consumo Máximo (Max)** e **Consumo Mínimo (Min)**. É importante destacar que os resultados são baseados em medições realizadas a cada intervalo de 2 minutos pelo analisador de energia. Dessa forma, os valores de potência consumida relatados referem-se a cada período de 2 minutos, o que possibilita uma análise mais granular das tendências ao longo do tempo. Esse intervalo foi definido por ser o menor a possibilitar armazenamento suficiente na memória do equipamento.

Config	$M_{L1}$				$M_{L2}$				$M_{P1}$			
	Med	DP	Max	Min	Med	DP	Max	Min	Med	DP	Max	Min
<b>MO</b>	<b>131,2</b>	9,1	140,0	104,3	<b>164,4</b>	6,3	174,7	153,1	<b>233,5</b>	243,8	620,0	30,5
$P_1$	<b>330,9</b>	44,3	397,7	261,4	<b>349,6</b>	16,9	402,0	334,0	<b>329,7</b>	268,4	730,3	54,2
$A_1$	<b>334,7</b>	23,2	388,0	273,2	<b>374,8</b>	19,2	427,3	324,0	<b>333,0</b>	249,4	726,9	86,0
$R_1$	<b>324,1</b>	33,2	385,0	257,7	<b>367,8</b>	20,3	417,3	335,0	<b>340,3</b>	243,5	701,7	74,7
$P_2$	<b>470,7</b>	33,7	493,7	371,3	<b>439,2</b>	44,0	584,7	383,7	<b>397,7</b>	265,4	751,0	93,6
$A_2$	<b>449,7</b>	39,3	490,0	345,7	<b>449,6</b>	23,3	507,3	413,0	<b>534,7</b>	147,0	693,3	101,7
$R_2$	<b>470,7</b>	25,2	493,3	414,7	<b>450,0</b>	23,2	491,0	413,3	<b>439,7</b>	236,9	736,3	62,6

Tabela 3 – Potência (W) consumida pelas máquinas a cada 2 minutos

Uma análise detalhada desses dados revela padrões distintos de comportamento em diferentes configurações e máquinas. A configuração  $A_2$  demonstra resultados *Med* próximos nas máquinas  $M_{L1}$  e  $M_{L2}$ , mas uma notável dispersão na  $M_{P1}$ . Na configuração  $R_2$ , destaca-se uma relativa estabilidade na *Med* em todas as máquinas, indicando consistência no desempenho dessa configuração, porém com um melhor desempenho na  $M_{P1}$ . Ao examinar as configurações  $P_1$ ,  $A_1$  e  $R_1$ , observa-se também um comportamento com menor disparidade na métrica *Med*. Além disso, é evidente que todas as configurações com matéria-prima no estado sólido ( $P_2$ ,  $A_2$ ,  $R_2$ ) apresentam um consumo médio superior em relação à matéria-prima fundida.

Os dados de desvio padrão (DP), consumo máximo (Max) e consumo mínimo (Min) também oferecem *insights* importantes. Nas máquinas  $M_{L1}$  e  $M_{L2}$ , esses valores mostram menor

dispersão, sendo possível observar padrões de variações com baixo índice no DP. O valor máximo identificado foi 44,3 na máquina  $M_{L1}$ , configuração  $P_1$ .

Em contrapartida, na  $M_{P1}$ , observa-se uma dispersão mais acentuada, indicando uma maior variabilidade nos dados. Essa grande variação dos dados da injetora  $M_{P1}$  ocorre porque ela opera com um sistema de controle *on/off*. Este tipo de controlador compara o sinal de entrada, representado pelo valor atual da grandeza, com o *Set Point*, que é o valor de referência. Se o valor atual ultrapassa o *Set Point*, o atuador é desligado; se o *Set Point* é superior ao valor atual, o atuador é ligado. Esse sistema pode ser exemplificado no controle de temperatura do forno da injetora, onde o acionamento e desligamento ocorre de acordo com a temperatura definida como referência para operação. Nesse tipo de controle, a variável manipulada é rapidamente ajustada para o valor máximo ou mínimo, levando a oscilações contínuas em torno do valor desejado (DURAES et al., 2021)

A avaliação de potência consumida pelo forno também foi analisada considerando diferentes níveis de temperatura durante a Operação do Forno (OF). Os dados presentes na Tabela 4 representam os resultados dessas análises.

O forno permanece em operação sempre que ao menos uma das máquinas injetoras esteja produzindo. As temperaturas definidas foram baseadas na **temperatura média** ( $T_{MED}$ ) mantida habitualmente na operação, que é de 465°C. Seguindo o mesmo critério utilizado para analisar o consumo das injetoras, foram definidas três diferentes temperaturas de operação para o forno. Além da  $T_{MED}$ , foram estabelecidas uma **Temperatura Mínima** ( $T_{MIN}$ ) de 430°C e uma **Temperatura Máxima** ( $T_{MAX}$ ) de 495°C. A mudança nas temperaturas influencia no tempo em que o Zamac leva para ser fundido, mas não é uma constante, visto que oscila sempre que mais liga sólida é inserida no forno.

Config	FORNO (W)			
	Med	DP	Max	Min
$T_{MIN}$	146,6	5,3	153,2	136,1
$T_{MED}$	143,8	4,8	168,2	128,7
$T_{MAX}$	151,7	5,1	166,5	131,3

Tabela 4 – Potência (W) consumida pelo forno a cada 2 minutos

Ao observar os dados, nota-se que não há uma variação significativa do consumo médio (Med) nas configurações analisadas, ou seja, não há uma alteração significativa na potência consumida quando comparadas as três temperaturas avaliadas. Ainda assim, com um Med de 143,8, os dados com a  $T_{MED}$  apresentam um consumo médio menor que os demais. Vale lembrar que os dados se referem a potência consumida em intervalos de 2min.

Os gráficos retratados na figura 6 apresentam os dados de consumo médio de todas as máquinas. Destaca-se a variação acentuada no consumo ao comparar configurações com diferentes estados da matéria-prima. Independentemente da velocidade da máquina, é evidente o aumento no consumo médio (Med) ao utilizar matéria-prima no estado sólido em comparação com a matéria-prima fundida. Esse padrão é corroborado pelos dados numéricos da Tabela 3.

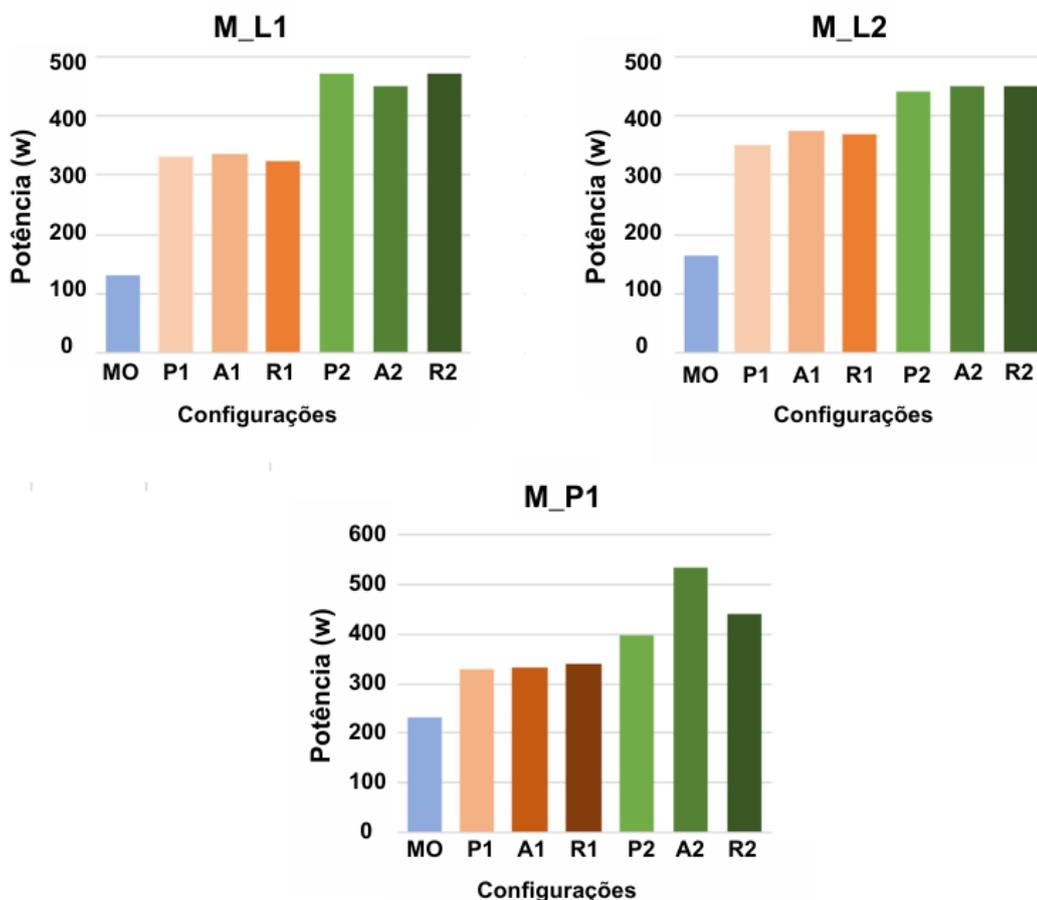


Figura 6 – Avaliação do consumo médio de potência das injetoras

Observa-se uma uniformidade nos consumos quando o estado da matéria é o mesmo, com exceção da configuração  $A_2$  (Velocidade Aumentada com matéria-prima sólida) da máquina  $M_{P1}$ , que registrou uma média consideravelmente superior em comparação com as demais configurações. Durante períodos de ociosidade, a máquina apresenta consistentemente um consumo inferior. No entanto, vale ressaltar que ela não está em produção.

Destacam-se também as configurações com maior consumo por máquina: a  $A_2$  obteve a maior média de consumo na  $M_{P1}$ . Enquanto as configurações  $P_2$  e  $R_2$  obtiveram maior média de consumo na  $M_{L1}$ . Já na  $M_{L2}$ , embora muito próximas o maior valor foi na configuração  $R_2$ .

Quanto aos menores consumos médios por máquina, destacam-se o  $P_1$  na  $M_{P1}$  e  $M_{L2}$ , e o  $R_1$  na  $M_{L1}$ .

O gráfico de Gantt na Figura 7 ilustra um escalonamento de tarefas baseado nos dados obtidos na empresa durante o período de novembro de 2023. O gráfico é uma estimativa do tempo de produção baseado nas ordens de produção reais fornecidas pela empresa.

Para gerar o gráfico, foi assumido um intervalo de tempo em horas, considerando uma linha de produção que opera 24h por dia, sempre na Velocidade Padrão ( $P_1$  e  $P_2$ ). Cada cor do gráfico representa uma ordem de produção específica. As áreas não coloridas indicam os tempos de *setup*, nos quais ocorrem alterações na configuração das máquinas, incluindo mudanças nos tipos de moldes ou logomarcas dos clientes.

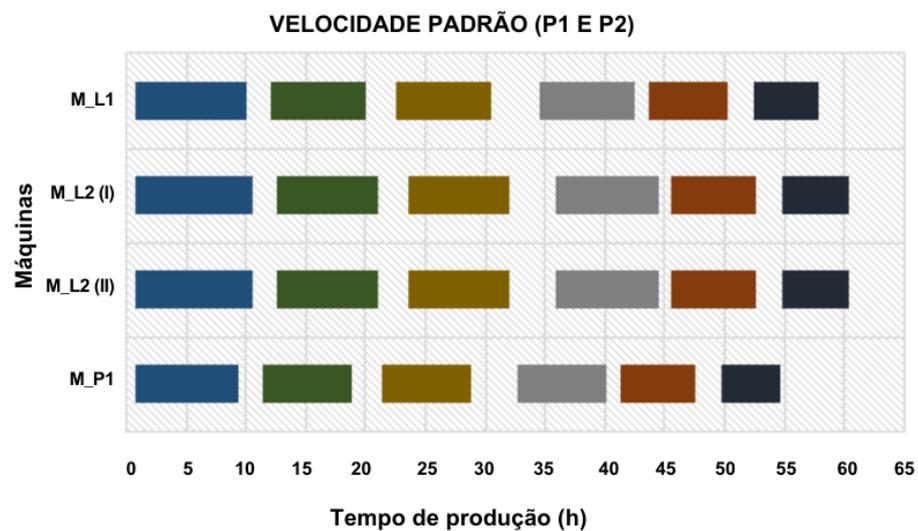


Figura 7 – Escalonamento de produção por máquina na velocidade padrão

As estimativas desse mesmo escalonamento, considerando cada máquina estão na Tabela 5. Ela inclui os dados da potência consumida para cada uma das configurações analisadas. Essa estimativa considera cada máquina produzindo as suas ordens de produção em cada uma das configurações estudadas.

Máquinas	Configurações	Makespan (h)	Potência Consumida (W)
$M_{L1}$	$P_1$	57,14	496534
	$P_2$	57,14	686690
	$A_1$	53,96	473583
	$A_2$	53,96	615209
	$R_1$	59,75	512648
	$R_2$	59,75	703390
$M_{L2}$	$P_1$	59,75	560955
	$P_2$	59,75	689845
	$A_1$	57,14	568131
	$A_2$	57,14	670146
	$R_1$	61,10	602328
	$R_2$	61,10	705381
$M_{P1}$	$P_1$	53,96	514000
	$P_2$	53,96	600006
	$A_1$	51,25	491101
	$A_2$	51,25	729813
	$R_1$	57,82	566676
	$R_2$	57,82	704045

Tabela 5 – Dados completos do escalonamento

A  $M_{P1}$  se mostra mais eficiente em relação ao tempo total de produção, tendo um *makepan* inferior às demais ao analisar cada configuração individualmente. Já no objetivo da potência total consumida, a  $M_{L1}$  apresenta resultados menores em relação às demais na maioria das configurações, tendo a  $P_2$  como única exceção.

A configuração  $R_2$  foi responsável por três dos quatro maiores consumos, além de possuir os maiores *makespan* registrados. Por outro lado a configuração  $A_1$  da  $M_{P1}$  obteve o menor *makespan* e também o menor consumo energético registrado. Esses dados contribuem para a compreensão do comportamento das máquinas dentro dos objetivos propostos.

As análises iniciais tiveram como objetivo principal compreender o comportamento das máquinas em relação às diferentes velocidades de operação. Os dados coletados durante essas análises trazem resultados que apresentam uma observação relevante: não houve uma variação expressiva no consumo de energia em relação às distintas velocidades de operação das máquinas.

Este resultado sugere que, no contexto das velocidades avaliadas, a eficiência energética

das máquinas não demonstrou uma sensibilidade ligada às alterações nas velocidades de operação. Essa constatação inicial pode ter implicações importantes na gestão operacional, indicando que ajustes nas velocidades podem ser considerados sem acarretar impactos substanciais no consumo energético das máquinas. Vale ressaltar a importância de avaliar variações mais expressivas nas velocidades, bem como realizar avaliações mais extensas para obtenção de novos resultados, o que não foi possível no presente estudo, devido a limitações de tempo e das restrições operacionais existentes

Ao analisar os dados, observa-se que, embora a variação de velocidade não demonstre grandes variações no consumo médio de energia, é evidente uma variação significativa ao considerarmos os diferentes estados da matéria-prima. Em todos os cenários analisados, constatou-se um aumento no consumo ao introduzir a matéria-prima em estado sólido diretamente no forno da injetora, comparativamente ao uso da matéria-prima previamente fundida.

Considerando as análises preliminares, optou-se por concentrar as análises na Velocidade Padrão com diferentes matérias-primas, devido a significativa influência no consumo energético após mudanças de estado. Portanto, as configurações  $P_1$  e  $P_2$  são base para a formulação do modelo matemático. Da mesma forma, no caso do forno extra, optou-se por modelar o consumo baseado na Temperatura Média ( $T_{MED}$ ), dada a mínima influência das variações de temperatura. Essas escolhas foram motivadas pelo alinhamento com as práticas rotineiras da empresa

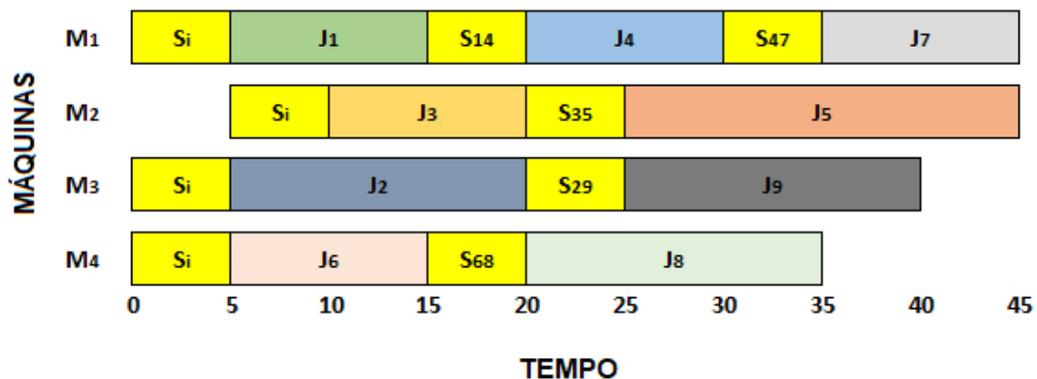
## 4 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Neste capítulo são descritos dois modelos de programação matemática para o problema de escalonamento de máquinas paralelas com considerações energéticas e tempos de *setup* dependentes da sequência. O objetivo dos modelos se baseia na minimização do consumo energético e do *makespan*, que é o maior tempo de duração de processamento entre as máquinas utilizadas. O primeiro modelo busca minimizar a potência total consumida e o tempo total de processamento com restrições para capacidade do forno, tempo de processamento, produção conforme demanda, além de evitar subciclos e múltiplas tarefas na mesma máquina. De maneira semelhante, o modelo reformulado busca minimizar a potência total e o *makespan*, com o incremento de restrições que limitam a capacidade instantânea do forno extra por períodos. Os modelos foram desenvolvidos baseados no cenário real de uma indústria.

### 4.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O problema estudado trata do escalonamento de tarefas em máquinas paralelas, com tempos de *setup* dependentes da sequência e considerações ambientais. O sistema de produção possui diferentes operações que precisam ser escalonadas nas máquinas disponíveis, considerando a limitação dos recursos. Os pedidos recebidos limitam-se a produção de árvores de zamac com botões, rebites ou plaquetas. Os pedidos recebidos no setor de produção são organizados e separados de acordo com o tipo de produto, a quantidade e a máquina onde será produzido, para que aguardem o processamento. As máquinas injetoras possuem capacidade de produzir qualquer pedido e possuem velocidades de operação e consumo energético distintos entre si. A Figura 8 exemplifica um problema de escalonamento de máquinas paralelas.

Figura 8 – Gráfico de Gantt com escalonamento de 9 tarefas em 4 máquinas



Fonte: O autor (2024)

Na Figura 8 é possível observar o escalonamento de nove tarefas distribuídas nas quatro máquinas disponíveis. Como exemplo, a máquina 4 ( $M_4$ ) inicia sua operação no tempo 0 com

o *setup* inicial ( $S_i$ ). Após isso, inicia a tarefa 6 ( $J_6$ ), depois um novo *setup* entre as tarefas 6 e 8 e em seguida executa a tarefa 8 ( $J_8$ ), concluindo suas tarefas. No exemplo exposto, qualquer pedido poderia ser destinado a qualquer uma das máquinas paralelas, mas ao implementar um modelo matemático com objetivo de minimizar o consumo energético e o *makespan*, a solução encontrada escalona as tarefas buscando as melhores soluções.

Nesse problema de pesquisa, foram desenvolvidos dois modelos de programação matemática com o objetivo de escalonar as tarefas minimizando a potência total consumida pelas máquinas e o *makespan*. Os modelos levam em consideração fatores como a ordem de processamento e a alocação das tarefas nas máquinas.

Além disso, consideram a utilização eficiente dos recursos disponíveis, considerando o tipo de matéria-prima, já que há diferenças nos custos energéticos entre a matéria-prima sólida e a fundida no forno extra. Os modelos também asseguram o cumprimento de restrições operacionais, como a capacidade limitada das máquinas, a não ocorrência de subciclos e a execução completa de cada tarefa iniciada.

No início do processo produtivo as máquinas aquecem a matéria-prima presente em seus fornos próprios, enquanto são configuradas para iniciar as tarefas. Cada máquina tem a restrição de só processar uma tarefa por vez. Além disso, o forno extra também inicia sua operação e permanece fundindo matéria-prima durante todo o tempo de produção.

Os tempos de *setup* são necessários sempre que uma tarefa  $i$  é concluída. Durante o *setup*, o molde utilizado para produção das peças é substituído antes do início do processamento de uma tarefa  $j$ . Todas as tarefas devem ser concluídas.

## 4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 1: MODELO DE EVENTOS

O aqui chamado modelo de eventos, busca escalonar todas as tarefas nas máquinas disponíveis, de modo que a potência total consumida e o *makespan*, sejam minimizados. A denominação do modelo se dá pela presença da variável  $x_{ikt}$ , onde  $t$  induz uma ordem de processamento. Cada posição na ordem de processamento é referida como um evento. O modelo garante que não haja subciclos durante a produção e que cada máquina só produza uma tarefa por vez. A capacidade do forno é determinada considerando o tempo total de processamento das tarefas e fica disponível para ser utilizada a qualquer tempo e em qualquer máquina, considerando que cada uma delas possui um tempo de processamento e um consumo energético específicos. O modelo considera a disponibilidade dos dois estados da matéria-prima disponíveis e considera que a configuração  $P_1$  (matéria-prima fundida no forno extra) não demanda consumo energético extra, enquanto que a configuração  $P_2$  (matéria-prima fundida no forno da injetora) demanda um consumo extra, conforme identificado no cenário real.

As máquinas possuem uma capacidade de processamento limitada e processam uma tarefa por vez. A demanda  $\delta_i$  para cada tipo de árvore  $i \in I$  é conhecida previamente. Cada máquina  $k \in K$  pode permanecer em uma das três configurações: matéria-prima sólida, matéria-prima

fundida, ou ociosa. As tarefas são processadas de forma sequencial, de acordo com a variável binária  $y_{ijk}$ , que define a precedência entre tarefas. O processamento de uma tarefa, uma vez iniciado, não pode ser interrompido até sua conclusão. Todas as máquinas são capazes de processar qualquer tipo de árvore. O forno extra permanece em funcionamento durante o tempo total de processamento das atividades e todas as tarefas precisam ser concluídas.

#### 4.2.1 Conjuntos

- $I = \{1, \dots, n\}$  Conjunto de  $n$  tipos de árvores a serem produzidas.
- $V = I \cup \{0\}$  Conjunto de vértices.
- $K = \{1, \dots, m\}$ , Conjunto de  $m$  máquinas.
- $M = \{1, 2, 3\}$  Conjunto das possíveis configurações das máquinas, sendo 1, 2 e 3 respectivamente a matéria-prima sólida, a matéria-prima fundida e a máquina ociosa.
- $T = \{1, \dots, n\}$  Conjunto de eventos.

#### 4.2.2 Parâmetros

- $\delta_i$ , demanda total da árvore  $i \in I$ .
- $\tau_k$ , tempo de processamento de uma unidade de árvore na máquina  $k \in K$ .
- $\sigma_{ijk}$ , tempo de *setup* entre  $i, j \in I$  na máquina  $k \in K$ .
- $\epsilon_{km}$ , potência consumida (W) da máquina  $k \in K$  ao processar a matéria prima na configuração  $m \in M$ .
- $\epsilon_k^s$ , potência consumida (W) da máquina  $k \in K$  durante o *setup*.
- $\epsilon^f$ , potência consumida (W) do forno.
- $\gamma^f$ , capacidade de fundição do forno.
- $\gamma_k$ , capacidade de processamento das máquinas.

#### 4.2.3 Variáveis

- $y_{ijk}$  Variável binária que assume valor 1 se o processamento da tarefa  $i \in V$  precede o da Tarefa  $j \in V$  na máquina  $k \in K$ , e 0 caso contrário.
- $w_{ikt}$  Variável binária que assume valor 1 se a tarefa  $i \in I$  é processada na máquina  $k \in K$  no evento  $t \in T$ , e 0 caso contrário.
- $z_{ktm}$  Variável binária que assume valor 1 na configuração  $m \in M$  na máquina  $k \in K$  no evento  $t \in T$ , e 0 caso contrário.
- $x_{ikt} \in \mathbb{Z}$  Variável auxiliar que calcula o número de árvores a serem processadas na máquina  $k \in k$  no evento  $t \in T$ .
- $p_{kt}^e \in \mathbb{R}$  Tempo de processamento da máquina  $k \in K$  no evento  $t \in T$ .
- $p_{km}^s \in \mathbb{R}$  Tempo total de processamento da máquina  $k \in K$  no estado da máquina  $m \in M$ .

- $C^{\max}$  Maior tempo de duração de processamento dentre as máquinas utilizadas, i.e., *makespan*.

#### 4.2.4 Modelo

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{m \in M} \epsilon_{km} p_{km}^s + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} \sum_{k \in K} \epsilon_k^s \sigma_{ijk} y_{ijk} + \epsilon^f C^{\max} \quad (4.1)$$

$$\text{s.t. } C^{\max} \geq \sum_{m \in M} p_{km}^s + \sum_{i \in V} \sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} \sigma_{ijk} y_{ijk} \quad \forall k \in K \quad (4.2)$$

$$\sum_{k \in K} \gamma_k p_{k2}^s \leq \gamma^f C^{\max} \quad (4.3)$$

$$p_{km}^s = \sum_{t \in T} z_{ktm} p_{kt}^e \quad \forall k \in K, m \in M \quad (4.4)$$

$$p_{kt}^e = \tau_k \sum_{i \in I} x_{ikt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.5)$$

$$x_{ikt} \leq \delta_i w_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.6)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} w_{ikt} \leq 1 \quad \forall i \in I, \quad (4.7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} x_{ikt} = \delta_i \quad \forall i \in I \quad (4.8)$$

$$y_{ijk} \geq w_{ikt} w_{jk(t+1)} \quad \forall i \in I, j \in I \setminus \{i\}, k \in K, t \in T \setminus \{p\} \quad (4.9)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ikt} \leq \sum_{m \in M} z_{ktm} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.10)$$

$$\sum_{j \in I} y_{0jk} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4.11)$$

$$\sum_{i \in I} w_{ikt} \geq \sum_{i \in I} w_{ik(t+1)} \quad \forall k \in K, t \in T \setminus \{n\} \quad (4.12)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{ijk} = \sum_{t \in T} w_{jkt} \quad \forall j \in I, k \in K \quad (4.13)$$

$$\sum_{\substack{j \in V \\ i \neq j}} y_{ijk} = \sum_{t \in T} w_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (4.14)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{\substack{j \in S \\ j \neq i}} y_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall k \in K, S \subset I \quad (4.15)$$

$$x_{ikt} \in \mathcal{Z}_+ \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.16)$$

$$y_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in I \setminus \{i\}, t \in T \quad (4.17)$$

$$z_{ktm} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, t \in T, m \in M \quad (4.18)$$

$$p_{kt}^e \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.19)$$

$$p_{km}^s \geq 0 \quad \forall k \in K, m \in M \quad (4.20)$$

A função Objetivo (4.1) busca minimizar a potência total consumida e o tempo total de processamento. As restrições (4.2) garantem que o tempo total de processamento não seja inferior ao tempo total de processamento em todas as máquinas  $k \in K$ . Enquanto as restrições (4.3) definem e limitam a capacidade do forno à soma dos tempos de processamento. As restrições (4.4) calculam o tempo total de processamento para todo  $m \in M$ , enquanto a (4.5) calculam o tempo total de processamento para todas as máquinas  $k \in K$  no período  $t \in T$ . As restrições (4.6) garantem a soma das árvores  $i \in I$  processadas nas máquinas  $k \in K$  não excedam a demanda total. Já as restrições (4.7) garantem que uma árvore  $i \in I$  passe no máximo uma vez na máquina  $k \in K$ . As restrições (4.8) garantem que a quantidade produzida seja igual a demanda. Enquanto as restrições (4.9) é uma variável binária que assume valor 1 caso a tarefa  $i$  seja processada antes da tarefa  $j$  na máquina  $k$  e 0 caso contrário. As restrições (4.10) garantem que só tarefas com matéria-prima nos estágios  $m \in M$  serão produzidas. As restrições (4.11) definem 0 como ponto inicial. As restrições (4.12)-(4.14) determinam o sequenciamento das tarefas  $i$  para as tarefas  $j$  no período  $t$ . As restrições (4.15) garantem que não haverá subciclo. As restrições (4.16)-(4.20) são restrições de integralidade e não-negatividade.

O modelo possui uma limitação importante no que diz respeito a capacidade do forno extra. Essa capacidade é calculada de acordo com o tempo total de processamento das atividades. Portanto, as soluções encontradas pelo modelo calculam a produção total do forno de acordo com o *makespan*. Como não há uma restrição que considere que a produção do forno é gradativa, a capacidade total da solução fica disponível para uso a qualquer tempo, o que pode levar a exceder a capacidade em intervalos menores. Essa capacidade distribuída em intervalos menores se dá pela limitação do forno em fundir o zamac de forma gradativa ao longo do tempo de produção. Na Tabela 6 é possível verificar uma análise discretizada em intervalos de tempo, onde verifica-se etapas da produção em que a **Demanda da Máquina (DM)** é maior que a **Capacidade do Forno (CF)**, ambos medidos em Kg. Ao calcular a demanda total, pode-se perceber que o modelo não ultrapassa a capacidade de produção do forno, mas em intervalos de tempo menores essa violação ocorre, tornando a solução inviável na prática. Exemplificando de forma mais detalhada, ao somar a capacidade total do forno ao longo de todas as etapas na instância  $j6\_k2\_8$ , o valor resultante é de 547 kg. Da mesma forma, a demanda total das máquinas ao longo dessas etapas também é de 547 kg. Com isso nota-se que a CF é capaz de atender a DM em sua totalidade. Quando observa-se a instância  $j9\_k3\_10$  a CF também atende a DM ao considerar o cenário produtivo total. No entanto, ao analisar as etapas individualmente, observa-se que já na primeira etapa ocorre uma situação em que a demanda da máquina (DM) é de 245 kg, enquanto a capacidade do forno (CF) é de apenas 196 kg. Nesse cenário, o forno não consegue atender à demanda total logo na primeira etapa, e, por se tratar do início da produção, não há matéria-prima fundida de etapas anteriores que possa suprir essa diferença. Em situações como essa, ocorre uma violação da CF, uma vez que a solução apenas considera a demanda total da produção para calcular a capacidade, ignorando as limitações específicas de cada etapa. Esse cenário se repete em diversos casos da Tabela 6.

Para corrigir isso, o modelo precisa respeitar a capacidade do forno por períodos, em vez de considerar apenas a demanda total ao longo de todo o processo. Por essa razão, foi desenvolvido um novo modelo que impõe restrições à capacidade do forno extra em intervalos de tempo específicos, denominados períodos.

Tabela 6 – Dados discretizados - Modelo de Eventos

<b>j6_k2_8</b>			<b>j8_k2_4</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	84	96	P1	<b>143</b>	<b>121</b>
P2	98	97	P2	130	120
P3	<b>114</b>	<b>97</b>	P3	<b>160</b>	<b>122</b>
P4	95	97	P4	95	120
P5	93	97	P5	76	123
P6	63	63	P6	47	47
<b>j10_k2_10</b>			<b>j9_k3_10</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	88	132	P1	<b>245</b>	<b>196</b>
P2	<b>139</b>	<b>132</b>	P2	225	194
P3	110	134	P3	219	192
P4	138	133	P4	20	129
P5	149	93			
<b>j12_k4_3</b>			<b>j8_k2_5</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	<b>398</b>	<b>362</b>	P1	121	98
P2	273	350	P2	82	98
P3	251	213	P3	105	98
			P4	<b>127</b>	<b>98</b>
			P5	63	98
			P6	33	45

### 4.3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA 2: MODELO DE PERÍODOS

A reformulação do modelo busca limitar o uso do forno extra em períodos ao longo do tempo. O forno extra permanece fundindo a matéria-prima durante todo o período de produção, mas essa produção ocorre de forma lenta e gradativa. Dessa forma, em cada período de tempo existe uma quantidade limitada para ser utilizada, e isso se repete durante todo o horizonte de produção.

O modelo de períodos busca escalonar todas as tarefas nas máquinas disponíveis, de modo que a potência total consumida e o *makespan*, que é o maior tempo de duração de processamento entre as máquinas utilizadas, sejam minimizados. O modelo garante que não haja subciclos durante a produção e que cada máquina só produza uma tarefa por vez. A capacidade do forno extra considera o fato de que a fundição da matéria-prima ocorre de maneira escalonada. Isso

inviabiliza o uso da capacidade total a qualquer momento e determina a capacidade por períodos de tempo em qualquer máquina. Cada máquina possui um tempo de processamento e um consumo energético específicos. O modelo também considera a disponibilidade dos dois estados da matéria-prima disponíveis  $P_1$  e  $P_2$ . Para a reformulação do modelo foram acrescentados Parâmetros e Variáveis que definem períodos fixos de tempo  $\eta$  para que o Modelo limite a capacidade do forno extra em cada um dos períodos.

As máquinas possuem uma capacidade de processamento limitada e processam uma tarefa por vez. A demanda para cada tipo de árvore  $i \in I$  é conhecida previamente. Cada máquina  $k \in K$  pode permanecer em uma das três configurações: matéria-prima sólida, matéria-prima fundida, ou ociosa. As tarefas são processadas de forma sequencial, de acordo com a variável binária  $y_{ijk}$ , que define a precedência entre tarefas. O processamento de uma tarefa, uma vez iniciado, não pode ser interrompido até sua conclusão. Todas as máquinas são capazes de processar qualquer tipo de árvore. O forno extra permanece em funcionamento durante o tempo total de processamento das atividades e todas as tarefas precisam ser concluídas. A capacidade de produção do forno extra é limitada por períodos.

#### 4.3.1 Parâmetros

- $\eta$ , duração de período.

#### 4.3.2 Variáveis

- $u_{kt}$  Variável binária que assume valor 1 se alguma tarefa é processada na máquina  $k \in K$  no período  $t \in T$ , e 0 caso contrário.
- $p_{ktm}$  Tempo de processamento da máquina  $k \in K$  no tempo  $t \in T$  utilizando matéria prima no estado  $m \in M$ .

### 4.3.3 Modelo

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \epsilon_{km} p_{ktm} + C^{\max} \epsilon^f \quad (4.21)$$

$$\text{s.t. } C^{\max} \geq \sum_{m \in M} p_{ktm} + \sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in I \\ j \neq i}} \sigma_{ijk} y_{ijkt} + \eta(t-1) u_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.22)$$

$$\sum_{m \in M} p_{ktm} + \sum_{i \in I} \sum_{\substack{j \in I \\ j \neq i}} \sigma_{ijk} y_{ijkt} \leq \eta u_{kt} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.23)$$

$$\sum_{m \in M} p_{ktm} = \tau_k \sum_{i \in I} x_{ikt} \quad k \in K, t \in T \quad (4.24)$$

$$\sum_{k \in K} \gamma_k p_{kt2} \leq \gamma^f \eta \quad \forall t \in T \quad (4.25)$$

$$x_{ikt} \leq \delta_i w_{ikt} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.26)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{t \in T} x_{ikt} = \delta_i \quad \forall i \in I \quad (4.27)$$

$$y_{i0kt} = y_{0ik(t+1)} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \setminus \{h\} \quad (4.28)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{ijkt} = w_{jkt} \quad \forall j \in I, k \in K, t \in T \quad (4.29)$$

$$\sum_{\substack{i \in V \\ i \neq j}} y_{jik} = w_{jkt} \quad \forall j \in I, k \in K, t \in T \quad (4.30)$$

$$\sum_{j \in V} y_{0jkt} = 1 \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.31)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in V \setminus S} y_{ijkt} \geq w_{hkt} \quad \forall k \in K, t \in T, h \in S, S \subset I \quad (4.32)$$

$$y_{ijkt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in I \setminus \{i\}, t \in T \quad (4.33)$$

$$w_{ikt} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.34)$$

$$u_{kt} \in \{0, 1\} \quad \forall k \in K, t \in T \quad (4.35)$$

$$x_{ikt} \in \mathcal{Z}_+ \quad \forall i \in I, k \in K, t \in T \quad (4.36)$$

$$p_{ktm} \geq 0 \quad \forall k \in K, t \in T, m \in M \quad (4.37)$$

A função objetivo (4.21) busca minimizar a potência total consumida, bem como o *makespan*. Enquanto as restrições (4.22) asseguram que o *makespan* seja maior ou igual ao tempo total de processamento para todas as máquinas  $k \in K$ . Já as restrições (4.23) determinam um tempo de processamento máximo por período. As restrições (4.24) relacionam o tempo de processamento ao número de tarefas processadas em todas as máquinas. As restrições (4.25)

limitam a capacidade de fundição do forno em qualquer período. As restrições (4.26) limitam a demanda das tarefas a serem processadas na máquina  $k \in K$  no período  $t \in T$ . Por sua vez, as restrições (4.27) assegura que a demanda total para cada tipo de árvore  $i \in I$  seja satisfeita. Enquanto as restrições (4.28) garantem continuidade de precedência entre períodos, as (4.29) asseguram que uma tarefa  $j$  seja precedida por outra tarefa na mesma máquina e período. As restrições (4.30) garantem que uma tarefa  $j$  preceda outra na mesma máquina e período. As restrições (4.31) asseguram que existe uma tarefa inicial 0 para cada máquina e período. Já as restrições (4.32) eliminam subciclos. As restrições (4.33)-(4.37) são variáveis binárias, de integralidade e não-negatividade.

Conforme apresentado na Tabela 7, a inclusão das restrições (4.25) solucionou a limitação do modelo anterior, restringindo a capacidade de uso do forno em intervalos de períodos menores. Nessa reformulação,  $\gamma_k$  representa a capacidade de processamento da máquina  $k$ ,  $p_{kt}$  o tempo de processamento da máquina  $k$  utilizando matéria-prima fundida durante o período  $t$ . Já  $\gamma^f$   $\eta$  representa a capacidade máxima de fundição do forno extra durante um período. Dessa forma o modelo limita o uso do forno extra por períodos, para que sua capacidade não seja excedida, além de seguir respeitando a capacidade máxima total.

Ao analisar os dados da Tabela 7 é possível observar que em todos os casos a capacidade total do forno atende a demanda total das máquinas. Como exemplo, tem-se que na instância  $j8\_k2\_5$  a capacidade total do forno é de 535kg, para uma demanda de 531kg. Já na  $j10\_k2\_10$  essa capacidade é de 624kg para uma demanda de 623kg. Isso segue para todas as instâncias avaliadas e apresentadas na Tabela 7. Além de atender a demanda total, ao direcionar a atenção para as demandas em cada etapa, é possível observar que a DM se mantém inferior a CF em todas as situações, com exceção dos últimos períodos de cada instância.

Ao trazer para o cenário real, a produção da instância  $j8\_k2\_4$  segue da Etapa P1 até a Etapa P5 com a DM inferior a CF. Isso quer dizer que em todas as etapas a capacidade de produção do forno superou a demanda das máquinas e manteve matéria-prima fundida suficiente para produção, além de manter uma quantidade fundida disponível no forno. Ao chegar no último período de produção, em todas os casos avaliados, a produção das máquinas supera a capacidade do forno e faz-se o uso da matéria-prima fundida que permaneceu disponível das etapas anteriores.

Na solução encontrada pela instância  $j6\_k2\_8$  observa-se uma condição semelhante à anteriormente descrita. Nas cinco primeiras etapas, a CF excede a DM, permitindo não apenas atender à demanda dessas etapas, mas também armazenar matéria-prima fundida. No início do último período, no entanto, a demanda da máquina ultrapassa a capacidade do forno em 17 kg, impossibilitando que o forno atenda a demanda dessa etapa individualmente. Contudo, por ser a última etapa e haver matéria-prima suficiente armazenada das etapas anteriores, a CF consegue suprir a demanda, concluindo as tarefas sem violar a capacidade total do forno, além de maximizar o uso da matéria-prima acumulada.

Para possibilitar essa gestão da Capacidade do Forno, as soluções encontradas alternam o

uso das máquinas nos períodos que antecedem ao último, intercalando momentos em operação e momentos paradas ou em *setup*. Essa alternância reduz a demanda da máquina (DM) em cada período. No último período, todas as máquinas operam simultaneamente e aumentam a demanda total, enquanto a Capacidade do Forno (CF) se mantém como parâmetro constante ao longo de todo o horizonte da produção. Como resultado, a última etapa consegue produzir mais peças em menos tempo, o que gera aumento na demanda pelo forno, fazendo com que a DM supere a CF, utilizando assim o excesso de produção acumulado nas Etapas anteriores. Nos gráficos presentes na Figura 11 é possível verificar esse comportamento do modelo de períodos.

Tabela 7 – Dados discretizados - Modelo de Períodos

<b>j6_k2_8</b>			<b>j8_k2_4</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	92	96	P1	117	121
P2	93	97	P2	118	120
P3	91	97	P3	120	122
P4	94	97	P4	117	120
P5	95	97	P5	118	123
P6	80	63	P6	60	47
<b>j10_k2_10</b>			<b>j9_k3_10</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	127	132	P1	186	196
P2	118	132	P2	177	194
P3	125	134	P3	183	192
P4	122	133	P4	163	129
P5	131	93			
<b>j12_k4_3</b>			<b>j8_k2_5</b>		
<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>	<b>Etapa</b>	<b>DM (kg)</b>	<b>CF (kg)</b>
P1	332	362	P1	94	98
P2	325	350	P2	95	98
P3	263	213	P3	94	98
			P4	95	98
			P5	95	98
			P6	58	45

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da pesquisa. Os modelos matemáticos são analisados através dos aspectos computacionais e gerenciais.

As implementações foram realizadas na linguagem de programação Julia 1.9.4. Quanto ao modelo, foi feito na linguagem de modelagem matemática JuMP, sendo resolvido pelo solver comercial Gurobi. Os experimentos foram executados em um computador Intel Core i5-8265U CPU 1.60GHz 1.80GHz com 8gb de RAM. No contexto computacional é verificado a viabilidade do modelo em gerar soluções de qualidade em um tempo computacional baixo, permitindo uma resposta mais ágil a mudanças e a tomada de decisões em tempo hábil. O tempo máximo estabelecido para encontrar as soluções é de 3600 segundos. Com relação às questões gerenciais, são feitas avaliações da aplicabilidade prática do modelo, na busca de soluções que minimizem o consumo total de energia, bem como o tempo total de produção. A análise comparativa é realizada entre os modelos para encontrar as melhores soluções. Uma instância é gerada para solucionar o escalonamento apresentado na Figura 7.

Conforme observado no decorrer do capítulo 3, as variações de velocidades na produção possuem pouco impacto no consumo energético. Isso significa que as alterações de velocidade estudadas nessa pesquisa não demonstraram grandes influências nos resultados de consumo. Por outro lado, a utilização da matéria-prima sólida para fundição no forno das injetoras demonstrou um impacto significativo no consumo energético de todas as máquinas.

Ao inserir a liga sólida no forno das injetoras foi avaliado um aumento de até 42% no consumo energético, em comparação ao uso da liga previamente fundida no forno extra. Como o forno extra permanece ligado durante toda a operação, utilizar a sua capacidade máxima para abastecer as máquinas evita custos excessivos associados à inserção de ligas sólidas no forno das injetoras. No entanto, a capacidade do forno é limitada e não atende a 100% da demanda máxima das máquinas.

Por esse motivo, os resultados concentraram-se na análise do consumo energético nas configurações  $P_1$  e  $P_2$ , ou seja, com os dois estados da matéria-prima na velocidade padrão. Essa escolha foi feita para refletir o cenário rotineiro da empresa.

### 5.1 DEFINIÇÃO DAS INSTÂNCIAS

Foram desenvolvidas instâncias baseadas nos dados reais, com o objetivo avaliar a qualidade do modelo e a eficácia das soluções propostas. Um conjunto de instâncias foi gerado com tarefas  $j = \{6, 8, 9, 10, 12\}$  e máquinas  $k = \{2, 3, 4\}$ . Cada conjunto de  $n \times m$  possui 10 instâncias, somando um total de 150 Instâncias. A geração dessas instâncias pode ser exemplificada por uma específica, como a  $j10\_k2\_3$  que envolve 10 tarefas e 2 máquinas. Cada tarefa demanda a produção de um determinado número de árvores de Zamac, enquanto cada máquina possui

uma configuração de produção que introduz variações no tempo de processamento, na potência consumida e no tempo de *setup*. Isso significa que cada máquina produz em uma velocidade específica e possui um consumo energético próprio, como já apresentado nas Tabelas 2 e 3. Para a geração das instâncias, os valores de consumo energético foram definidos através dos resultados coletados pelo analisador de energia. Já os tempos de *setup* e as quantidades produzidas foram definidos a partir das coletas realizadas na empresa, através de ordens de serviço.

As métricas foram criadas com base nas coletas realizadas na indústria e na análise do problema real. Foram definidas com o propósito de apresentar resultados de caráter computacional e gerencial, a fim de permitir uma análise de sua eficiência e aplicabilidade no cenário de produção. No grupo das métricas computacionais é analisado o tempo computacional de resolução do modelo (TC (s)). Além do **Gap (%)**, que indica a qualidade da solução. Quanto menor *gap*, mais próxima do ótimo está a solução.

No que diz respeito as métricas de caráter gerencial, tem-se o grupo de métricas com objetivos energéticos e do tempo total de produção:

- **PCM (W)** = Potência Consumida pelas Máquinas, medida em W;
- **PCF (W)** = Potência Consumida pelo Forno Extra, medida em W;
- **PTC (W)** = Potência Consumida Total, que é o resultado da PCM + PCF, também medida em W;
- **Makespan (s)** = Maior tempo de duração de processamento entre as máquinas utilizadas, medido em segundos

Para permitir uma análise mais direcionada, a Tabela 8 traz as soluções médias por subgrupo de instâncias. Essa análise permite analisar o comportamento dos modelos e entender a eficácia e as limitações de acordo com os tamanhos das instâncias avaliadas.

As instâncias foram agrupadas de acordo com o número de tarefas e máquinas, conforme exemplo: 6x2 (6 tarefas e 2 máquinas). Cada grupo possui um total de dez instâncias solucionadas. A Tabela 8 agrupa as instância da menor para a maior e separa os modelos de eventos e períodos.

A coluna de **Tempo Computacional (TC)** mostra a maior eficiência computacional do modelo de períodos. As soluções foram geradas a partir de 15 segundos em média, para as instâncias menores. Além disso ela obteve tempos médios abaixo de 7min nos quatro grupos iniciais, incluindo as instâncias médias. No subgrupo das instâncias grandes o modelo demandou o tempo máximo para resolução, mas ainda assim conseguiu encontrar uma solução com Gap 0.0 que indica uma boa solução. Já o modelo de eventos utilizou o tempo total na maioria dos subgrupos, conseguindo uma solução mais rápida apenas na instância menor. Além do TC superior, o modelo de eventos obteve o Gap 0.0 apenas na instância menor, enquanto nas

Tabela 8 – Médias Por Grupo de Instâncias no Modelo de Eventos

<b>Categoria</b>	<b>Instância</b>	<b>TC (s)</b>	<b>Gap (%)</b>	<b>PTC (w)</b>	<b>PCF (w)</b>	<b>PCM (w)</b>	<b>Makespan (s)</b>
<b>Eventos</b>	<b>6x2</b>	555.4	0.0	438166.7	90506.8	347659.9	69113.2
	<b>8x2</b>	3600.0	0.7	567952.6	103841.8	464110.8	91202.2
	<b>10x2</b>	3600.0	0.9	767675.4	152777.9	614897.5	121398.3
	<b>9x3</b>	3600.0	0.9	644245.2	109527.9	534717.4	74248.7
	<b>12x4</b>	3600.1	1.0	862952.5	130590.6	732361.9	87188.0
<b>Períodos</b>	<b>6x2</b>	15.0	0.0	434866.6	87194.6	347671.9	68403.3
	<b>8x2</b>	57.4	0.0	563843.7	102348.8	461494.8	90300.2
	<b>10x2</b>	441.8	0.0	761706.2	149946.1	611760.2	119574.6
	<b>9x3</b>	408.5	0.0	639227.2	110381.9	528845.3	75022.7
	<b>12x4</b>	3600.1	0.0	854558.9	118023.4	736535.4	79850.4

demais instâncias os valores ultrapassaram 0.7, sugerindo que as soluções encontradas foram menos eficientes.

Ao direcionar a atenção aos valores de **Potência Total Consumida (PTC)**, o modelo de períodos mais uma vez se mostra superior em todos os subgrupos de instâncias avaliados. A instância 12x4 obteve a maior diferença entre os resultados, com uma média de 8393.6 (W) menor e um makespan 9% melhor.

Ao analisar os consumos de máquinas e forno separadamente, nota-se que no grupo de instâncias 9x3 o modelo de eventos alcançou um resultado superior ao de períodos na métrica PCF. Enquanto na PCM o modelo alcançou resultados melhores nos subgrupos 6x2 e 12x4. Porém essas superioridades em instâncias específicas não foram suficientes para que o modelo alcançasse um desempenho total superior na PTC.

A métrica do *Makespan* é mais uma que apresenta a maioria dos resultados superiores para o modelo de períodos, principalmente nas instâncias maiores, onde essa diferença é ainda mais significativa. A exceção fica por conta das instâncias 9x3, onde o modelo de eventos se mostrou superior em aproximadamente 1%. Nas demais instâncias o de períodos tem resultados que vão de 1% a 9% de superioridade. No subgrupo 10x2, que possui o maior *makespan*, se convertermos essa diferença do resultados em horas, significa que o escalonamento de eventos totalizou 33,7h, enquanto o de períodos totalizou 33,2h. Além de um tempo inferior, a solução também encontrou uma solução com consumo inferior.

Outro ponto relevante é a queda substancial do *Makespan* nas instâncias com mais de duas máquinas, mesmo com o número maior de tarefas. O acréscimo de máquinas no processo produtivo possibilita distribuir mais tarefas simultaneamente e minimizar o tempo total de produção. Isso também resulta na redução da *PCF*, já que um *makespan* menor reduz o tempo de uso do forno. Esse cenário resultou em melhores soluções médias das instâncias 9x3 em relação as 10x2 em todas as métricas avaliadas. A PTC ficou em média 19% menor e o *makespan*

reduziu em aproximadamente 63%, demonstrando números significativos, mesmo tratando-se de uma instância que possui apenas uma tarefa a menos.

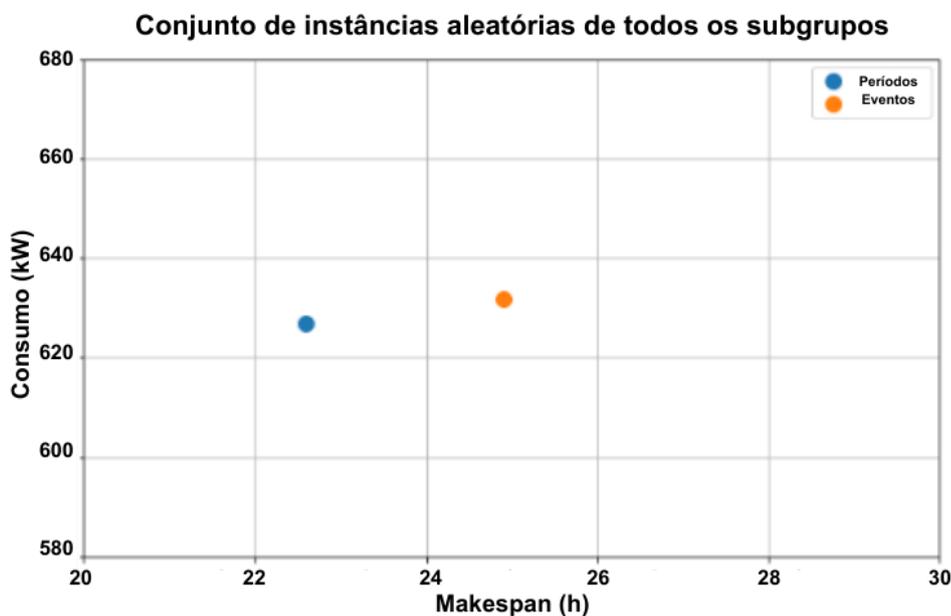
A Tabela 9 converte os dados de W para kW e simula a diferença percentual entre os dois modelos para as métricas gerenciais do conjunto da instância maior.

Tabela 9 – Simulação Média do Subgrupo 12x4

Métrica	Eventos	Períodos	Dif %
<b>PTC (kW)</b>	862.9	854.5	-1.0%
<b>PCF (kW)</b>	130.5	118.0	-9.6%
<b>PCM (kW)</b>	732.3	736.5	0.6%
<b>Makespan (h)</b>	24.2	22.1	-8.7%

Embora a PTC tenha apresentado números aproximados nos dois modelos, é importante ressaltar que o modelo de períodos também teve um resultados melhor no *makespan*. Desse modo, há um cenário de minimização simultânea das duas métricas, possibilitando uma folga em relação ao modelo de eventos. Aprofundando mais ainda essa análise, a Figura 9 apresenta um gráfico com a solução de um grupo de instâncias de todos os tamanhos.

Figura 9 – Conjunto de instâncias de todos os Subgrupos

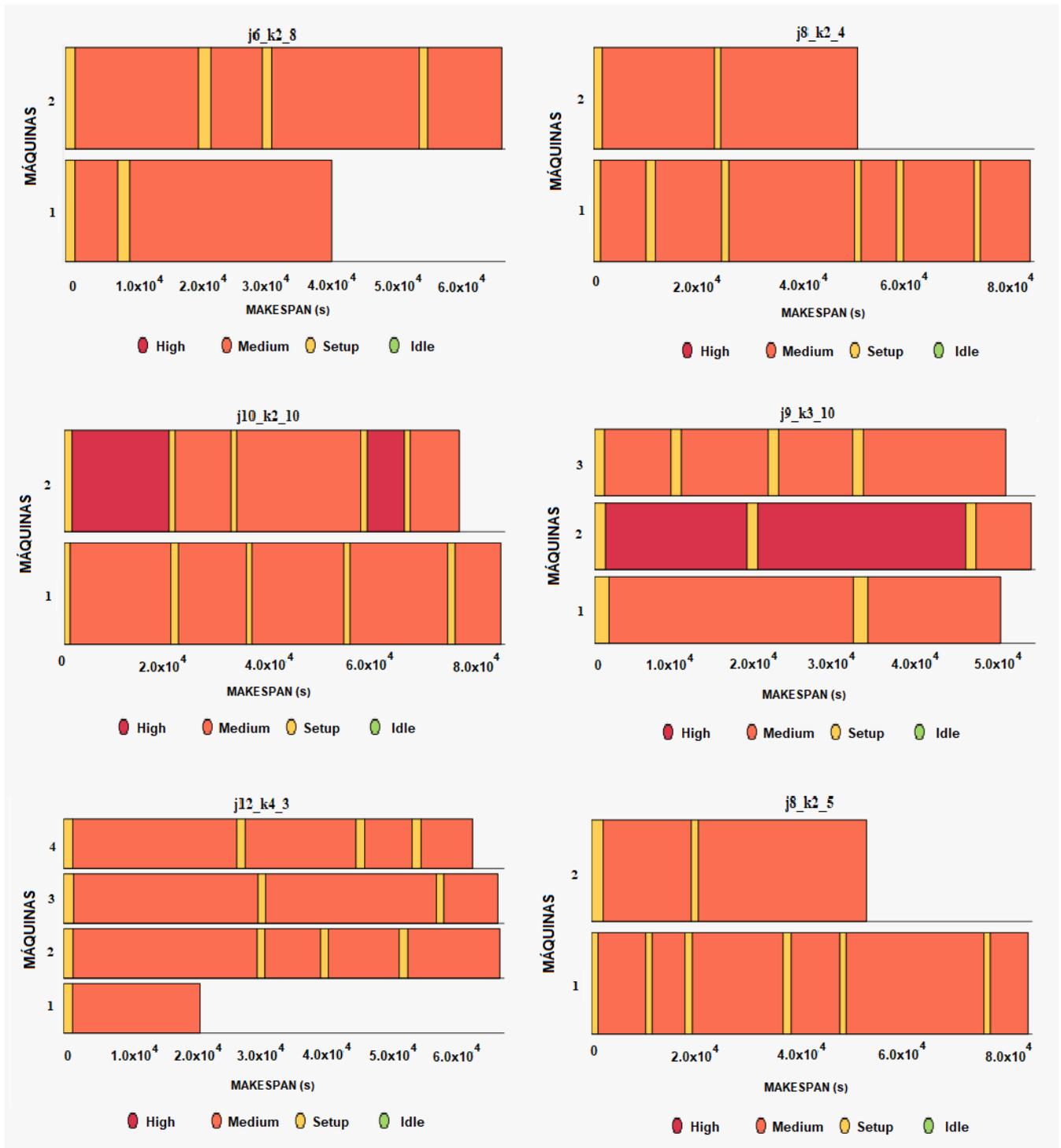


Para a plotagem do gráfico da Figura 9, foram utilizadas as quatro primeiras instâncias de todos os subgrupos disponíveis no Apêndice A. O escalonamento solucionado pelo conjunto de instâncias resultou em um consumo energético médio de 631,7kW e um *makespan* de 24,9h no modelo de eventos. Enquanto que o modelo de períodos conseguiu solucionar esse mesmo escalonamento com um consumo de 626,7kW em 22,6h de operação. Esse padrão é corroborado

por soluções de outras instâncias demonstradas e disponibilizadas, mantendo a tendência de melhores soluções do modelo de períodos.

Foram selecionadas doze instâncias, sendo seis de cada modelo, com tamanhos variados, para a geração de gráficos que permitem analisar o padrão de comportamento de cada um.

Figura 10 – Gráficos de Escalonamento do Modelo de Eventos



A figura 10 ilustra soluções do modelo de eventos. Analisando os gráficos é possível per-

ceber que em todos os casos existe o padrão de manutenção de uso de apenas um tipo de matéria-prima por tarefa. Duas instâncias apresentadas graficamente utilizam o Zamac fundido 100% do tempo. Isso indica que o modelo entende que a capacidade do forno atende toda a demanda, inclusive na instância  $j_{12k\_4\_3}$ , que em dado momento faz uso de quatro máquinas simultaneamente. As demais alternam o uso, assumindo a necessidade de utilização do forno da máquina para fundição. As instâncias  $j_{10\_k2\_10}$  e  $j_{10\_k2\_5}$  fazem uso da configuração  $P_2$  em dois momentos distintos, mas apenas em uma máquina. Em ambas as instâncias as tarefas foram divididas igualmente entre as duas máquinas. Já na instância com 8 tarefas, o modelo priorizou o uso das duas máquinas por aproximadamente 60% do tempo total de produção e utilizando apenas uma no restante. Esse escalonamento assumiu o uso da configuração  $P_1$  durante toda a produção.

Os gráficos da Figura 11 apresentam os resultados de instâncias solucionadas pelo Modelo de Períodos.

Os gráficos de períodos apresentam soluções que limitam o uso do forno extra por cada período. As soluções também demonstram priorizar massivamente o uso da configuração  $P_1$ , para proporcionar um consumo energético menor. Para possibilitar isso, há paradas constantes no uso de máquinas. Essa condição tende a elevar o *makespan*. Das soluções apresentadas, apenas a instância  $j_{10\_k2\_10}$  utilizou a configuração  $P_2$  e reduziu o tempo das máquinas paradas.

A instância  $j_{12\_4\_3}$  também está presente nessas soluções e pode ser comparada com a presente na Tabela 10. É possível observar a diferença do comportamento desse modelo em relação ao anterior. Aqui, o modelo mantém as máquinas paradas em alguns períodos de tempo e distribui as tarefas ao longo de quase todo o *makespan* para todas as máquinas. No modelo de eventos o modelo prioriza a conclusão de todas as tarefas sem q haja intervalo de funcionamento, ocasionando a conclusão de operação de algumas máquinas com tempo inferior as demais.

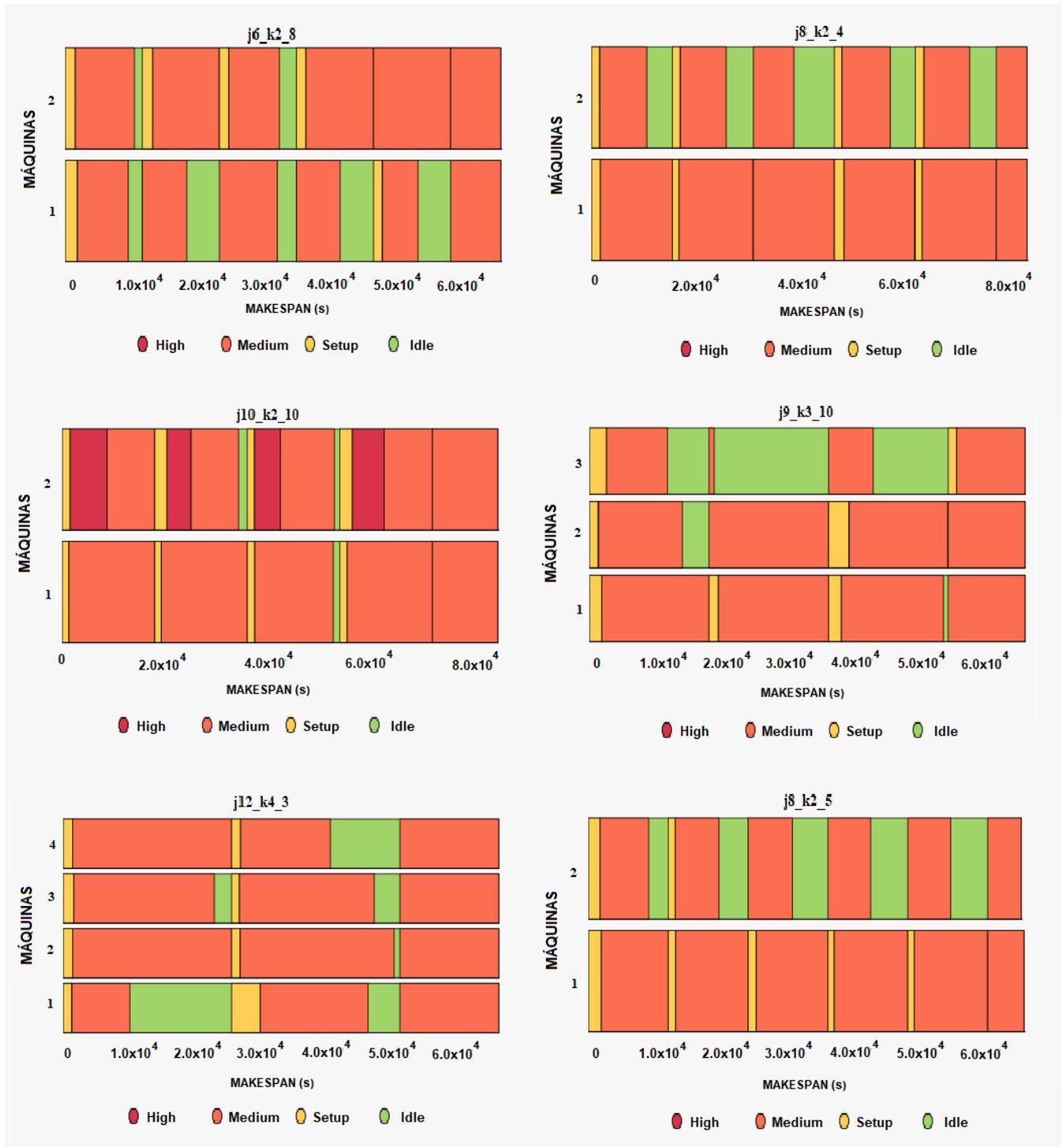
As instâncias com 6 e 8 máquinas demonstraram uma alternância maior entre o uso e a parada de uma das máquinas, enquanto a outra permanece em produção quase que em tempo integral. Essas soluções assumem a capacidade do forno em atender integralmente o uso de pelo menos uma máquina ininterruptamente.

A instância  $j_{10\_k2\_10}$ , que também está presente graficamente em ambos os modelos é apresentada na Tabela 10 para uma análise numérica e com os dados convertidos de W para kW e de Segundos para Horas, permitindo uma análise através de uma ótica mais prática.

Tabela 10 – Instância  $j_{10\_k2\_10}$

<b>Métrica</b>	<b>Eventos</b>	<b>Períodos</b>	<b>Dif (%)</b>
<b>PTC (kW)</b>	587.2	583.0	-0.72%
<b>PCF (kW)</b>	85.2	82.0	-3.8%
<b>PCM (kW)</b>	502.0	501.0	-0.2%
<b>Makespan (h)</b>	25.9	25.2	-2.31%

Figura 11 – Gráficos de Escalonamento do Modelo de Períodos



A solução presente na Figura 10 apresenta resultados de uma produção de 93946 peças. Tanto no modelo de eventos como no de períodos houve uso dos dois estados da matéria-prima, sendo que no segundo o uso é intercalado em períodos menores. Os resultados mostram que o modelo de períodos obteve qualidade superior ao de eventos em todas as instâncias, conseguindo concluir as tarefas com menor potência consumida e um *makespan* inferior.

Repetindo essa mesma análise para uma instância menor, observa-se o comportamento dos modelos na Tabela 11

Tabela 11 – Instância j6\_k2\_9

<b>Métrica</b>	<b>Eventos</b>	<b>Períodos</b>	<b>Dif (%)</b>
<b>PTC (kW)</b>	607.6	603.9	-0.60%
<b>PCF (kW)</b>	133.4	123.7	-7.27%
<b>PTM (kW)</b>	474.2	480.2	1.26%
<b>Makespan (h)</b>	31.3	29.0	-7.35%

Novamente o Modelo de Períodos obtém resultados melhores tanto na potência consumida como no *makespan*. A solução economiza mais de 2h no *Makespan*. Apesar de haver um consumo um pouco superior na PCM, há uma economia energética ao final dos trabalhos. Esse padrão também se repete nas demais instâncias, conforme dados completos disponibilizados.

Considerando a coleta de dados realizadas na empresa e apresentada na Figura 7, uma instância foi gerada para análise da solução através dos modelos desenvolvidos. Para esta instância foram considerados os consumos energéticos de cada injetora e do forno. Para o *Makespan* foi considerado o tempo de produção de cada máquina e também o tempo de *setup* baseados nos dados reais. As ordens de serviço somaram 6 tarefas, com as 4 máquinas disponíveis. Um total de 23374 árvores de zamac foram produzidas, divididas entre as tarefas.

A Tabela 12 apresenta as soluções encontradas para cada um dos modelos.

Tabela 12 – Instâncias baseadas em dados reais

<b>Instância</b>	<b>TC (W)</b>	<b>gap (%)</b>	<b>PTC (W)</b>	<b>PCF (W)</b>	<b>PCM (W)</b>	<b>Makespan (s)</b>
<b>Eventos</b>	3600.0	0.9	2277405.5	489286.8	1788118.6	423625.0
<b>Períodos</b>	233.8	0.0	2265344.3	478985.4	1786358.8	414720.0

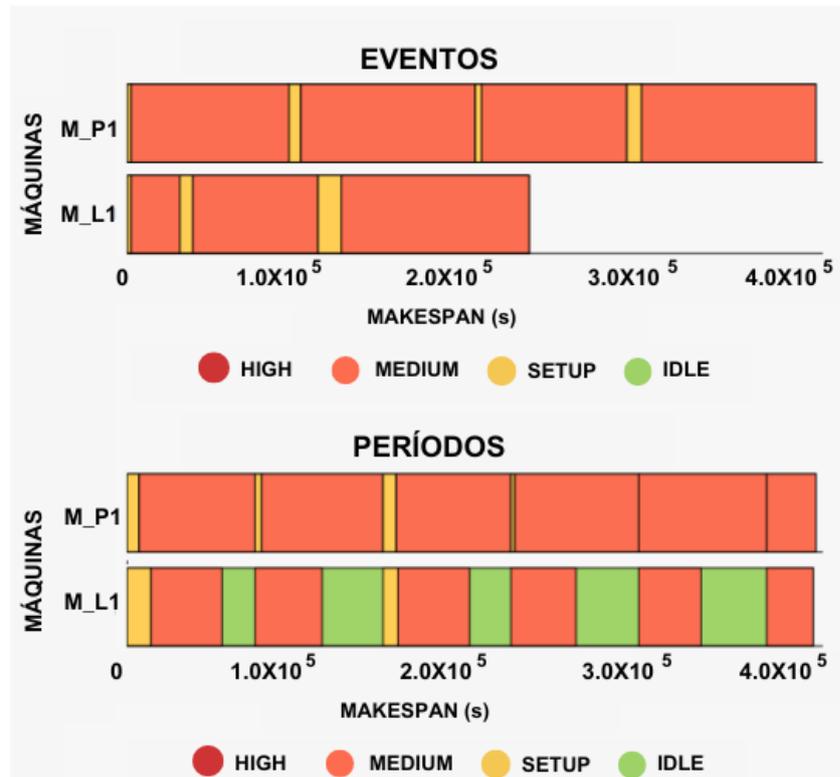
Com um baixo tempo computacional e um Gap que indica uma solução próxima do ótimo, o modelo de períodos demonstrou uma superioridade computacional em comparação ao de eventos. Nas métricas gerenciais também há melhores desempenhos energéticos e de *makespan* para o modelo de períodos.

Essas soluções são detalhadas novamente na Tabela 13 e são comparadas com a solução da produção realizada efetivamente na empresa, durante um período de operação real das máquinas. A coleta desses dados foram baseadas na realidade vivenciada na empresa, através do sequenciamento real. A proporção de uso das matérias-primas sólidas e fundidas, bem como

os tempos de operação de todas as máquinas e os tempos de *setup* também se basearam nesses dados reais.

Os gráficos das soluções de ambos os modelos da instância real também são apresentados na figura 12.

Figura 12 – Gráficos de escalonamento baseado em dados reais



A partir dos objetivos definidos nos modelos, as soluções indicam o uso de apenas duas máquinas em ambos os casos. Esse resultado difere da solução desenvolvida na empresa, que utiliza todas as máquinas disponíveis. As soluções implementadas priorizaram o uso da matéria-prima previamente fundida no forno extra. Como a capacidade dessa matéria-prima é limitada, os modelos assumem o aumento significativo do *makespan* para minimizar a potência consumida. Ao comparar com o gráfico da 7, o *makespan* leva praticamente o dobro do tempo, chegando a 117,7h no modelo de eventos, contra 60,3h na solução desenvolvida na empresa.

Acontece que ao aumentar o *makespan*, há uma redução considerável no consumo total de energia para produzir esse mesmo escalonamento. Como o modelo implementado prioriza o uso das máquinas mais econômicas, bem como o uso apenas da configuração  $P_1$ , essa redução supera os 500kW ao comparar com a solução Real.

Ao utilizar todas as máquinas para reduzir o tempo total de conclusão das tarefas, é necessário pagar um preço maior pelo aumento do consumo energético devido a necessidade de uso da matéria-prima sólida. Conforme já demonstrado na Tabela 3, o aumento do consumo energético na durante o uso da configuração  $P_2$  pode ultrapassar os 40% a depender da máquina utilizada.

Para o escalonamento analisado, esse aumento ficou em aproximadamente 22% de acréscimo no consumo.

Os gráficos demonstram que o modelo de eventos utiliza as duas máquinas em paralelo por um período de tempo e posteriormente finaliza as tarefas utilizando apenas a  $M_{PI}$ , assumindo a capacidade do forno em alimentar apenas uma máquina pelo restante do tempo.

De forma semelhante, mas escalonada, o modelo de períodos priorizou o uso da  $M_{PI}$  durante todo o tempo de processamento e alternou a  $M_{LI}$  entre momentos em operação e os momentos parada.

Em ambas as soluções os modelos mantiveram as máquinas  $M_{L2}$  (I) e (II) inutilizadas.

Essas soluções se mostram economicamente viáveis para métricas de consumo energético, mas podem refletir em atrasos e inviabilidades nas entregas, por aumentar muito o *makespan*. A solução Real minimiza o *makespan*, mas assume o aumento no consumo pela fundição nas injetoras. Isso demonstra um *trade-off* entre os objetivos da pesquisa dentro das condições atuais da empresa. A Tabela 13 mostra esses dados.

Tabela 13 – Comparação entre as soluções

<b>Métrica</b>	<b>Eventos</b>	<b>Períodos</b>	<b>Real</b>
<b>PTC (kW)</b>	2277.4	2265.3	2775.4
<b>PCF (kW)</b>	489.3	478.9	260.1
<b>PTM (kW)</b>	1788.1	1786.4	2515.3
<b>Makespan (h)</b>	117.7	115.2	60.3

A solução baseada no cenário Real da empresa refletiu em um consumo elevado em comparação com os modelos implementados. Ao utilizar as 4 máquinas a solução obtém uma redução de aproximadamente 90% no *makespan*. Essa disparidade se dá justamente pelo uso das 4 máquinas em paralelo. Diante disso há o aumento da demanda por matéria-prima sólida nas injetoras, fazendo com que o consumo energético das máquinas eleve consideravelmente, ficando aproximadamente 40% acima das soluções dos modelos implementados.

Por outro lado, como consequência de um *makespan* inferior no cenário real, o consumo de energia do forno teve uma redução de aproximadamente 45%. Essa redução se justifica pelo fato do forno permanecer ligado por menos tempo no cenário Real.

Desse modo, os dados possibilitam apresentados possibilitam uma análise gerencial para auxiliar nas tomadas de decisão sobre a produção. Nota-se que com uma produção mais acelerada há um aumento no consumo de energia, já que é necessário manter todas as máquinas ligadas, inclusive as que possuem um consumo energético mais elevado, além de utilizar mais matéria-prima sólida nos fornos das injetoras. Em contrapartida, quando há um aumento nos prazos de entrega é possível gerenciar quais as máquinas permanecerão em operação, além de fazer máximo uso da matéria-prima fundida durante a produção. Esses cenários podem se alternar de acordo com as demandas e prioridades da empresa.

Um outro cenário gerencial que pode ampliar o cenário de decisões é o aumento da capacidade de fundição em forno extra. Para analisar esse cenário, uma simulação foi desenvolvida com base nos dados reais. Ao considerar o mesmo escalonamento, mas assumindo que o forno seja capaz de atender a 100% das demandas das injetoras temos um cenário onde é possível manter *makespan* real, utilizando-se apenas da configuração  $P_I$  em todas as máquinas, possibilitando minimizar simultaneamente as duas métricas, e estimar o consumo energético para esse cenário, conforme simulado na Tabela 14.

Tabela 14 – Capacidade integral do forno

<b>Máquina</b>	<b>Consumo das Máquinas</b>	<b>Consumo do Forno</b>	<b>Makespan</b>
M_L1	466.4 kW		
M_L2 (I)	564.9 kW	520.2 kW	60.3h
M_L2 (II)	564.9 kW		
M_P <sub>I</sub>	536.0 kW		
<b>TOTAL</b>	<b>2132.2 kW</b>	<b>520.2 kW</b>	<b>60.3h</b>

Ao considerar um cenário onde o forno possui 100% da capacidade de fundição da matéria-prima, assume-se que a potência consumida pelo forno é multiplicada por 2, resultando em 520,2 kW. Já o consumo energético das máquinas totalizou 2132,2 kW na configuração  $P_I$ . Ao somar os consumos, temos que esse cenário consumiu um total de 2652,4 kW, para um *makespan* de 60,3h.

Esse cenário representa uma redução de 4,5% em relação ao consumo encontrado nos dados Reais. Isso representa uma economia de 123 kW referentes ao escalonamento avaliado. Ao considerar um cenário de funcionamento de 24h, 6 dias por semana, com demanda máxima, essa redução pode superar 1230 kW ao mês. Além de minimizar o consumo energético, esse cenário também possibilita a minimização do *makespan* ao assumir que todas as máquinas podem funcionar simultaneamente utilizando a matéria-prima fundida.

Esse cenário ainda possibilita uma melhor tomada de decisão para períodos onde há menor demanda ou quando existe a possibilidade de prolongar os prazos de entrega, permitindo o escalonamento com a utilização das máquinas energeticamente mais eficientes e uma economia ainda maior no consumo energético da empresa.

As principais limitações encontradas durante a pesquisa relacionaram-se à necessidade de alinhar as coletas de dados com a disponibilidade produtiva da empresa. Com apenas um analisador de energia disponível, que precisava ser instalado em uma máquina por vez, foi necessário conciliar o funcionamento das máquinas com a disponibilidade da equipe interna, assim como a disponibilidade do próprio analisador para viabilizar as coletas. Além disso, o acesso restrito aos dados reais impossibilitou a realização de uma análise ao longo de um período mais extenso.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente estudo analisou um ambiente industrial que produz peças metálicas para a indústria da moda a partir de ligas de Zamac. As máquinas injetoras moldam as peças a partir da fundição do Zamac e produzem botões, rebites e plaquetas metálicas, que são usadas em roupas e acessórios.

O objetivo do estudo é otimizar o processo, minimizando o consumo energético e o *makespan*. Para isso, dois modelos matemáticos foram desenvolvidos. 150 instâncias foram geradas para analisar a qualidade dos algoritmos. Desse total, 50 instâncias geraram soluções para cada um dos modelos.

O primeiro modelo gerou soluções com menor qualidade computacional, resultando em Gaps elevados e Tempo Computacional alto, mesmo em instâncias menores.

O modelo reformulado conseguiu gerar soluções com maior qualidade computacional, através de baixo tempo para resoluções e Gap próximo do ótimo. Além disso, os resultados de consumo energético e *makespan* se mostraram melhores neste modelo.

Ambos modelos demonstraram soluções viáveis em termos energéticos em comparação com os resultados obtidos nas análises operacionais.

Os insights desta pesquisa fornecem uma base para a tomada de decisões em diferentes cenários operacionais. Em períodos de maior demanda, a produção em sua máxima capacidade gera custos extras, devido ao uso maior dos fornos das injetoras para fundição, mas isso acelera as entregas e reduz o tempo total de produção. Em contrapartida, em cenários onde é possível estender os prazos de entrega, os custos energéticos podem ser minimizados ao priorizar a fundição diretamente no forno extra.

Outra abordagem estratégica se baseia no aumento da capacidade disponível do forno. Esse investimento pode reduzir a dependência do uso dos fornos das injetoras, resultando em uma operação mais eficiente e econômica, otimizando simultaneamente os dois objetivos.

Para trabalhos futuros, sugere-se a análise em um cenário de produção com capacidade superior de fornos extras, além uma nova reformulação nos modelos que busquem a solução de instâncias maiores e que melhorem os resultados de Tempo Computacional e Gap. Ainda há a sugestão de incorporação de novos parâmetros que considerem custos operacionais de manter a máquina parada. Podem ser analisadas maiores variações referentes a velocidades de operação das injetoras para analisar possíveis impactos energéticos, além de um tempo maior de análises e coleta de dados

## REFERÊNCIAS

- ALLAHVERDI, A.; AYDILEK, H. The two stage assembly flowshop scheduling problem to minimize total tardiness. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 26, p. 225–237, 2015.
- ALLAHVERDI, A.; SOROUSH, H. The significance of reducing setup times/setup costs. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 187, n. 3, p. 978–984, 2008.
- ALVAREZ-MEAZA, I. et al. Green scheduling to achieve green manufacturing: Pursuing a research agenda by mapping science. **Technology in Society**, Elsevier, v. 67, p. 101758, 2021.
- ALVES, R.; DELGADO, C. Programação linear inteira. 1997.
- ANDRES, B.; GUZMAN, E.; POLER, R. Corrigendum to “a novel milp model for the production, lot sizing, and scheduling of automotive plastic components on parallel flexible injection machines with setup common operators”. **Complexity**, Hindawi Limited, v. 2021, p. 1–17, 2021.
- AYDILEK, H. et al. More effective heuristics for a two-machine no-wait flowshop to minimize maximum lateness. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 13, n. 4, p. 543–556, 2022.
- BEKTUR, G. A hybrid heuristic solution based on simulated annealing algorithm for energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times. Gazi Üniversitesi, 2021.
- BEKTUR, G. An nsga-ii-based memetic algorithm for an energy-efficient unrelated parallel machine scheduling problem with machine-sequence dependent setup times and learning effect. **Arabian Journal for Science and Engineering**, Springer, v. 47, n. 3, p. 3773–3788, 2022.
- BOUZID, M.; MASMOUDI, O.; YALAOUI, A. Exact methods and heuristics for order acceptance scheduling problem under time-of-use costs and carbon emissions. **Applied Sciences**, MDPI, v. 11, n. 19, p. 8919, 2021.
- BUENO, F. Métodos heurísticos. **Teoria e implementações. Araranguá: IFSC**, 2009.
- BURMEISTER, S. C.; GUERICKE, D.; SCHRYEN, G. A memetic nsga-ii for the multi-objective flexible job shop scheduling problem with real-time energy tariffs. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, Springer, p. 1–41, 2023.
- CARVALHO, D. M.; NASCIMENTO, M. C. Hybrid matheuristics to solve the integrated lot sizing and scheduling problem on parallel machines with sequence-dependent and non-triangular setup. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 296, n. 1, p. 158–173, 2022.
- CERVANTES-SANMIGUEL, K.; VARGAS-FLORES, M.; IBARRA-ROJAS, O. A two-stage sequential approach for scheduling with lot-sizing decisions in the context of plastic injection systems. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 151, p. 106969, 2021.

- CHEN, S.-H. et al. Order acceptance and scheduling problem with carbon emission reduction and electricity tariffs on a single machine. **Sustainability**, MDPI, v. 11, n. 19, p. 5432, 2019.
- COSTA, C. D. d. et al. Selagem de zamac anodizado. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 28, p. e20230068, 2023.
- DEFERSHA, F. M.; ROOYANI, D. An efficient two-stage genetic algorithm for a flexible job-shop scheduling problem with sequence dependent attached/detached setup, machine release date and lag-time. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 147, p. 106605, 2020.
- DURAES, J. L. A. et al. Revisão bibliográfica: controladores de processos literature review: process controllers. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 77770–77785, 2021.
- DUTRA, E. J. B.; ROSA, J. S.; BRAUN, A. Estudo de um sistema de fechamento de unidade de fundição por pressão utilizando ferramentas de cad e cae1 study of a die casting unit closing system using cad and cae tools. 2021.
- EDIS, E. B.; OZKARAHAN, I. Solution approaches for a real-life resource-constrained parallel machine scheduling problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer, v. 58, p. 1141–1153, 2012.
- ERENAY, F. S. et al. New solution methods for single machine bicriteria scheduling problem: Minimization of average flowtime and number of tardy jobs. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 201, n. 1, p. 89–98, 2010.
- ERTEM, M.; OZCELIK, F.; SARAÇ, T. Single machine scheduling problem with stochastic sequence-dependent setup times. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 57, n. 10, p. 3273–3289, 2019.
- FALLAHI, A.; SHAHIDI-ZADEH, B.; NIAKI, S. T. A. Unrelated parallel batch processing machine scheduling for production systems under carbon reduction policies: Nsga-ii and mogwo metaheuristics. **Soft Computing**, Springer, v. 27, n. 22, p. 17063–17091, 2023.
- FANG, K. et al. A new approach to scheduling in manufacturing for power consumption and carbon footprint reduction. **Journal of Manufacturing Systems**, Elsevier, v. 30, n. 4, p. 234–240, 2011.
- FANG, K.-T.; LIN, B. M. Parallel-machine scheduling to minimize tardiness penalty and power cost. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 64, n. 1, p. 224–234, 2013.
- FREITAS, M. G. de; FUCHIGAMI, H. Y. A new technology implementation via mathematical modeling for the sequence-dependent setup times of industrial problems. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 172, p. 108624, 2022.
- FUHR, L. T. et al. Influência dos defeitos de solidificação na resistência à corrosão do zamac 5 obtido por injeção sob pressão. **Matéria (Rio de Janeiro)**, SciELO Brasil, v. 25, p. e-12630, 2020.
- GAO, M. et al. A tabu search algorithm for the unrelated parallel machine scheduling problem with varied carbon emission constraints in different time intervals. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, p. 1–15, 2023.

- GHORBANZADEH, M.; RANJBAR, M. Energy-aware production scheduling in the flow shop environment under sequence-dependent setup times, group scheduling and renewable energy constraints. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 307, n. 2, p. 519–537, 2023.
- GMYS, J. et al. A computationally efficient branch-and-bound algorithm for the permutation flow-shop scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 284, n. 3, p. 814–833, 2020.
- GRUMBACH, F. et al. A memetic algorithm with reinforcement learning for sociotechnical production scheduling. **IEEE Access**, IEEE, 2023.
- GUIMARÃES, L.; KLABJAN, D.; ALMADA-LOBO, B. Modeling lotsizing and scheduling problems with sequence dependent setups. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 239, n. 3, p. 644–662, 2014.
- GUPTA, S. R.; SMITH, J. S. Algorithms for single machine total tardiness scheduling with sequence dependent setups. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 175, n. 2, p. 722–739, 2006.
- HE, L. et al. Multiobjective optimization of energy-efficient job-shop scheduling with dynamic reference point-based fuzzy relative entropy. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, IEEE, v. 18, n. 1, p. 600–610, 2021.
- HUANG, J.; SÜER, G. A.; URS, S. B. Genetic algorithm for rotary machine scheduling with dependent processing times. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 23, p. 1931–1948, 2012.
- JACOB, V. V.; ARROYO, J. E. C. et al. IIs heuristics for the single-machine scheduling problem with sequence-dependent family setup times to minimize total tardiness. **Journal of Applied Mathematics**, Hindawi, v. 2016, 2016.
- JIANG, E.-d.; WANG, L. An improved multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition for energy-efficient permutation flow shop scheduling problem with sequence-dependent setup time. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 57, n. 6, p. 1756–1771, 2019.
- KELLER, J.; LITZINGER, S. Systematic search space design for energy-efficient static scheduling of moldable tasks. **Journal of Parallel and Distributed Computing**, Elsevier, v. 162, p. 44–58, 2022.
- KIRLIK, G.; OGUZ, C. A variable neighborhood search for minimizing total weighted tardiness with sequence dependent setup times on a single machine. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 39, n. 7, p. 1506–1520, 2012.
- KLEMENT, N. et al. Lot-sizing and scheduling for the plastic injection molding industry—a hybrid optimization approach. **Applied Sciences**, MDPI, v. 11, n. 3, p. 1202, 2021.
- KOMAKI, G.; SHEIKH, S.; MALAKOOTI, B. Flow shop scheduling problems with assembly operations: a review and new trends. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 57, n. 10, p. 2926–2955, 2019.

- LI, W.; OU, J. Approximation algorithms for scheduling parallel machines with an energy constraint in green manufacturing. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, 2023.
- LI, Y. et al. Heuristics and metaheuristics to minimize makespan for flowshop with peak power consumption constraints. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 14, n. 2, p. 221–238, 2023.
- LIAO, C.-J.; LIN, C.-H. Makespan minimization for two uniform parallel machines. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 84, n. 2, p. 205–213, 2003.
- LIN, C.-H.; LIAO, C.-J. Makespan minimization for multiple uniform machines. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 54, n. 4, p. 983–992, 2008.
- MANSOURI, S. A.; AKTAS, E.; BESIKCI, U. Green scheduling of a two-machine flowshop: Trade-off between makespan and energy consumption. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 248, n. 3, p. 772–788, 2016.
- MOKHTARI-MOGHADAM, A.; POURHEJAZY, P.; GUPTA, D. Integrating sustainability into production scheduling in hybrid flow-shop environments. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 1–19, 2023.
- MOUZON, G.; YILDIRIM, M. B. A framework to minimise total energy consumption and total tardiness on a single machine. **International Journal of Sustainable Engineering**, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 105–116, 2008.
- MÜLLER, F. M.; DIAS, O. B.; ARAÚJO, O. C. B. d. Algoritmo para o problema de seqüenciamento em máquinas paralelas não-relacionadas. **Production**, SciELO Brasil, v. 12, p. 6–17, 2002.
- MUTER, İ. Exact algorithms to minimize makespan on single and parallel batch processing machines. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 285, n. 2, p. 470–483, 2020.
- ÖZTOP, H. et al. An energy-efficient permutation flowshop scheduling problem. **Expert systems with applications**, Elsevier, v. 150, p. 113279, 2020.
- PACHECO, J. et al. Variable neighborhood search with memory for a single-machine scheduling problem with periodic maintenance and sequence-dependent set-up times. **Knowledge-Based Systems**, Elsevier, v. 145, p. 236–249, 2018.
- PAGE, M. A. M.; HARTMANN, S. Experimental characterization, material modeling, identification and finite element simulation of the thermo-mechanical behavior of a zinc die-casting alloy. **International Journal of Plasticity**, Elsevier, v. 101, p. 74–105, 2018.
- PARVEEN, S.; ULLAH, H. Review on job-shop and flow-shop scheduling using. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 41, n. 2, p. 130–146, 2010.
- PINEDO, M. L. **Scheduling**. [S.l.]: Springer, 2012. v. 29.
- QASIM, M.; WONG, K. Y.; SAUFI, M. S. R. M. Production planning approaches: a review from green perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, Springer, p. 1–26, 2023.

RODRIGUES, R. P.; PINHO, A. F. de; SENA, D. C. Application of hybrid simulation in production scheduling in job shop systems. **Simulation**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 96, n. 3, p. 253–268, 2020.

ROSHANI, A. et al. The capacitated lot-sizing and energy efficient single machine scheduling problem with sequence dependent setup times and costs in a closed-loop supply chain network. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 321, n. 1-2, p. 469–505, 2023.

SAGAR, K. V.; JERALD, J.; KHAN, M. A. An energy-aware optimisation model to minimise energy consumption and carbon footprint in a flexible manufacturing system. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)**, Springer, p. 1–12, 2023.

SANATI, H.; MOSLEHI, G.; REISI-NAFCHI, M. Unrelated parallel machine energy-efficient scheduling considering sequence-dependent setup times and time-of-use electricity tariffs. **EURO Journal on Computational Optimization**, Elsevier, v. 11, p. 100052, 2023.

SANTANA, J. R. da S.; FUCHIGAMI, H. Y. Production scheduling problem with assembly flow shop systems: mathematical optimisation models. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, p. 1–16, 2023.

SANTOS, R. C. dos et al. Problema de sequenciamento com setups dependentes da sequência e eficiência energética: um estudo de caso em uma indústria de plásticos no interior de pernambuco. Galoá, 2023.

SEKKAL, D. N.; BELKAID, F. A multi-objective optimization algorithm for flow shop group scheduling problem with sequence dependent setup time and worker learning. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 233, p. 120878, 2023.

SHEN, K. et al. A parallel genetic algorithm for multi-objective flexible flowshop scheduling in pasta manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 161, p. 107659, 2021.

SIOUD, A.; GRAVEL, M.; GAGNÉ, C. A hybrid genetic algorithm for the single machine scheduling problem with sequence-dependent setup times. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 39, n. 10, p. 2415–2424, 2012.

TALENS, C. et al. New efficient constructive heuristics for the two-stage multi-machine assembly scheduling problem. **Computers & industrial engineering**, Elsevier, v. 140, p. 106223, 2020.

VALENTE, J. M.; ALVES, R. A. Beam search algorithms for the single machine total weighted tardiness scheduling problem with sequence-dependent setups. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 35, n. 7, p. 2388–2405, 2008.

VALLEJOS-CIFUENTES, P. et al. Energy-aware production scheduling in flow shop and job shop environments using a multi-objective genetic algorithm. **Engineering Management Journal**, Taylor & Francis, v. 31, n. 2, p. 82–97, 2019.

WANG, L. et al. Multi-objective optimization based on decomposition for flexible job shop scheduling under time-of-use electricity prices. **Knowledge-Based Systems**, Elsevier, v. 204, p. 106177, 2020.

WANG, L.; PAN, Z.; WANG, J. A review of reinforcement learning based intelligent optimization for manufacturing scheduling. **Complex System Modeling and Simulation**, TUP, v. 1, n. 4, p. 257–270, 2021.

ZANDI, A.; RAMEZANIAN, R.; MONPLAISIR, L. Green parallel machines scheduling problem: A bi-objective model and a heuristic algorithm to obtain pareto frontier. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 71, n. 6, p. 967–978, 2020.

ZHANG, H. et al. Two-stage parallel speed-scaling machine scheduling under time-of-use tariffs. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 32, p. 91–112, 2021.

ZHANG, J. et al. Review of job shop scheduling research and its new perspectives under industry 4.0. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 30, n. 4, p. 1809–1830, 2019.

ZHOU, L. et al. Energy consumption model and energy efficiency of machine tools: a comprehensive literature review. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier, v. 112, p. 3721–3734, 2016.

**APÊNDICES**

## APÊNDICE A – RESULTADOS POR INSTÂNCIA

Tabela 15 – Dados Computacionais do Modelo de Eventos

Instância	Geração (s)	Tempo (s)	Gap
j6_k2_1	2.5	1225.3	0.0
j6_k2_2	0.0	616.2	0.0
j6_k2_3	0.0	335.5	0.0
j6_k2_4	0.0	644.6	0.0
j6_k2_5	0.0	404.5	0.0
j6_k2_6	0.0	431.3	0.0
<b>j6_k2_7</b>	<b>0.0</b>	<b>284.4</b>	<b>0.0</b>
j6_k2_8	0.0	703.2	0.0
j6_k2_9	0.0	262.8	0.0
j6_k2_10	0.0	646.5	0.0
j8_k2_1	0.0	3600.0	0.7
<b>j8_k2_2</b>	<b>0.1</b>	<b>3600.0</b>	<b>0.4</b>
j8_k2_3	0.0	3600.0	0.5
j8_k2_4	0.2	3600.0	0.9
j8_k2_5	0.0	3600.0	0.9
j8_k2_6	0.0	3600.0	0.6
j8_k2_7	0.0	3600.0	0.9
j8_k2_8	0.0	3600.0	0.8
j8_k2_9	0.3	3600.0	0.4
j8_k2_10	0.0	3600.0	0.6
j10_k2_1	0.1	3600.0	0.9
j10_k2_2	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_3	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_4	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_5	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_6	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_7	0.2	3600.0	0.9
j10_k2_8	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_9	0.0	3600.0	0.9
j10_k2_10	0.0	3600.0	0.9

---

<b>Instância</b>	<b>Geração (s)</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Gap</b>
j9_k3_1	0.0	3600.0	0.9
j9_k3_2	0.0	3600.0	1.0
j9_k3_3	0.4	3600.0	1.0
j9_k3_4	0.2	3600.0	0.9
j9_k3_5	0.0	3600.0	1.0
j9_k3_6	0.3	3600.0	0.9
j9_k3_7	0.0	3600.0	0.9
j9_k3_8	0.0	3600.0	0.9
j9_k3_9	0.0	3600.0	0.9
j9_k3_10	0.0	3600.0	0.9
j12_k4_1	0.4	3600.1	1.0
j12_k4_2	0.1	3600.0	1.0
j12_k4_3	0.8	3600.0	1.0
j12_k4_4	0.1	3600.1	1.0
j12_k4_5	0.5	3600.0	1.0
j12_k4_6	0.5	3600.0	1.0
j12_k4_7	0.0	3600.0	1.0
j12_k4_8	0.5	3600.0	1.0
j12_k4_9	0.6	3600.1	0.9
j12_k4_10	0.0	3600.1	1.0

---

Tabela 16 – Dados Gerenciais do Modelo de Eventos

<b>Instância</b>	<b>PCT (w)</b>	<b>PCF (w)</b>	<b>PCM (w)</b>	<b>Makespan (s)</b>
j6_k2_1	374377.6	63727.0	310650.6	55174.9
j6_k2_2	495714.0	101392.0	394322.0	69685.2
j6_k2_3	451544.5	120004.9	331539.6	77673.0
j6_k2_4	429666.6	77539.2	352127.4	68923.7
j6_k2_5	424534.8	82215.5	342319.2	62284.5
j6_k2_6	411370.6	103054.1	308316.5	60798.9
j6_k2_7	333884.4	61475.6	272408.8	48216.1
j6_k2_8	367265.3	73754.9	293510.3	65559.9
j6_k2_9	607626.4	133406.7	474219.7	112579.5
j6_k2_10	485683.3	88498.1	397185.2	70236.6
j8_k2_1	631040.1	106703.3	524336.8	122647.5
j8_k2_2	603574.2	103104.8	500469.4	118511.3
j8_k2_3	639389.3	111679.0	527710.3	89702.0
j8_k2_4	454691.8	84557.0	370134.8	85411.1
j8_k2_5	444089.6	73408.7	370680.9	84377.8
j8_k2_6	517368.0	84628.6	432739.3	74235.6
j8_k2_7	665097.9	130722.6	534375.3	90779.6
j8_k2_8	482879.1	99648.5	383230.6	71432.6
j8_k2_9	651606.2	111763.7	539842.5	95524.5
j8_k2_10	589789.5	132201.5	457588.0	79400.3
j10_k2_1	789935.5	212372.5	577563.1	132319.3
j10_k2_2	914072.7	192687.1	721385.6	125939.3
j10_k2_3	821419.6	172022.9	649396.7	113546.5
j10_k2_4	779937.4	123214.7	656722.7	149351.1
j10_k2_5	780887.1	139403.7	641483.5	114735.5
j10_k2_6	609134.3	107312.2	501822.0	125511.4
j10_k2_7	919925.6	190751.4	729174.1	125908.5
j10_k2_8	689640.3	152472.5	537167.8	125491.8
j10_k2_9	784543.0	152287.5	632255.6	108005.3
j10_k2_10	587258.3	85254.2	502004.1	93173.9
j9_k3_1	588615.4	82841.7	505773.7	61364.2
j9_k3_2	772922.3	123926.6	648995.7	78683.6
j9_k3_3	736723.7	122809.8	613913.9	73101.1
j9_k3_4	691335.8	147829.8	543506.0	90415.8

<b>Instância</b>	<b>PCT (w)</b>	<b>PCF (w)</b>	<b>PCM (w)</b>	<b>Makespan (s)</b>
j9_k3_5	720484.5	116077.9	604406.6	91041.5
j9_k3_6	581604.4	118302.1	463302.3	71052.3
j9_k3_7	644605.2	118072.2	526533.1	81149.3
j9_k3_8	687047.5	101520.1	585527.3	71242.2
j9_k3_9	527273.5	87944.0	439329.4	56921.7
j9_k3_10	491840.1	75954.4	415885.8	67515.0
j12_k4_1	817107.7	127152.6	689955.1	80731.8
j12_k4_2	993763.6	144536.0	849227.6	100372.2
j12_k4_3	713110.8	94858.4	618252.3	71055.0
j12_k4_4	1008340.0	155789.4	852550.4	104908.7
j12_k4_5	876758.9	140925.2	735833.6	86192.8
j12_k4_6	744290.6	100943.8	643346.8	73951.5
j12_k4_7	910238.5	145093.8	765144.8	93911.8
j12_k4_8	907399.0	138819.1	768579.9	95408.3
j12_k4_9	796066.0	122129.6	673936.4	77542.6
j12_k4_10	862450.5	121741.8	740708.7	87931.4

Tabela 17 – Dados Computacionais do Modelo de Períodos

<b>Instância</b>	<b>Geração (s)</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Gap</b>
j6_k2_1	0.0	10.3	0.0
j6_k2_2	0.0	13.2	0.0
j6_k2_3	0.0	16.2	0.0
j6_k2_4	0.0	24.4	0.0
j6_k2_5	0.0	11.3	0.0
j6_k2_6	0.0	12.3	0.0
j6_k2_7	0.0	6.1	0.0
j6_k2_8	0.0	18.2	0.0
j6_k2_9	0.0	23.7	0.0
j6_k2_10	0.0	14.3	0.0
j8_k2_1	0.0	97.2	0.0
j8_k2_2	0.0	56.5	0.0
j8_k2_3	0.0	69.7	0.0
j8_k2_4	0.0	86.9	0.0
j8_k2_5	0.0	28.0	0.0
j8_k2_6	0.0	22.4	0.0
j8_k2_7	0.0	53.6	0.0
j8_k2_8	0.0	76.6	0.0
j8_k2_9	0.0	41.9	0.0
j8_k2_10	0.0	41.5	0.0
j10_k2_1	0.0	137.3	0.0
j10_k2_2	0.0	222.1	0.0
j10_k2_3	0.0	452.9	0.0
j10_k2_4	0.0	1653.6	0.0
j10_k2_5	0.0	81.4	0.0
j10_k2_6	0.0	914.0	0.0
j10_k2_7	0.0	169.6	0.0
j10_k2_8	0.0	263.5	0.0
j10_k2_9	0.0	52.0	0.0
j10_k2_10	0.0	471.5	0.0
j20_k2_10	0.1	3600.0	0.0
j9_k3_1	0.0	246.6	0.0
j9_k3_2	0.0	182.2	0.0
j9_k3_3	0.0	698.1	0.0

---

<b>Instância</b>	<b>Geração (s)</b>	<b>Tempo (s)</b>	<b>Gap</b>
j9_k3_4	0.0	249.0	0.0
j9_k3_5	0.0	249.2	0.0
j9_k3_6	0.0	524.8	0.0
j9_k3_7	0.0	1119.6	0.0
j9_k3_8	0.0	89.6	0.0
j9_k3_9	0.0	157.1	0.0
j9_k3_10	0.0	568.3	0.0
j12_k4_1	0.1	3600.0	0.0
j12_k4_2	0.0	3600.0	0.0
j12_k4_3	0.0	3600.2	0.0
j12_k4_4	0.0	3600.1	0.0
j12_k4_5	0.0	3600.1	0.0
j12_k4_6	0.0	3600.2	0.0
j12_k4_7	0.0	3600.3	0.0
j12_k4_8	0.0	3600.2	0.0
j12_k4_9	0.0	3600.1	0.0
j12_k4_10	0.0	3600.1	0.0

---

Tabela 18 – Dados Gerenciais do Modelo de Períodos

<b>Instância</b>	<b>PCT (w)</b>	<b>PCF (w)</b>	<b>PCM (w)</b>	<b>Makespan (s)</b>
j6_k2_1	370535.3	63615.0	306920.4	55087.4
j6_k2_2	491286.5	101392.0	389894.4	69696.6
j6_k2_3	447695.1	110691.9	337003.2	74639.6
j6_k2_4	426833.3	74091.9	352741.4	77505.1
j6_k2_5	421781.6	82215.5	339566.1	62298.9
j6_k2_6	409018.3	99489.4	309528.8	58710.8
j6_k2_7	331167.8	61475.5	269692.2	48244.1
j6_k2_8	364449.0	68078.5	296370.6	64215.8
j6_k2_9	603990.5	123770.0	480220.4	104472.7
j6_k2_10	481909.0	87126.8	394782.2	69161.7
j8_k2_1	626717.8	103538.4	523179.4	119030.9
j8_k2_2	600232.1	98185.8	502046.1	113496.2
j8_k2_3	633679.8	113729.5	519950.4	93104.6
j8_k2_4	453820.9	81763.2	372057.5	82909.9
j8_k2_5	442023.6	73408.6	368614.9	84398.3
j8_k2_6	512607.1	84628.6	427978.5	75467.8
j8_k2_7	659817.9	130722.5	529095.3	91171.5
j8_k2_8	478634.2	94764.6	383869.6	69555.8
j8_k2_9	646953.1	110368.6	536584.5	94349.9
j8_k2_10	583950.2	132377.9	451572.3	79516.5
j10_k2_1	782820.5	212372.4	570448.1	132330.4
j10_k2_2	908296.0	192687.0	715609.0	125947.3
j10_k2_3	814774.1	172022.9	642751.3	113556.0
j10_k2_4	775690.0	118002.5	657687.5	144205.3
j10_k2_5	775164.2	135642.9	639521.2	112732.1
j10_k2_6	605540.2	101899.8	503640.3	119384.3
j10_k2_7	911828.1	190751.4	721076.7	125923.7
j10_k2_8	684279.1	139102.3	545176.9	120527.7
j10_k2_9	775665.6	154974.1	620691.3	110119.0
j10_k2_10	583003.8	82004.6	500999.0	91019.7
j20_k2_10	1521938.1	347582.5	1174356.2	261434.6
j9_k3_1	583969.2	94878.6	489090.7	70647.2
j9_k3_2	766269.8	135933.3	630336.5	86320.9
j9_k3_3	735580.8	122809.8	612771.0	73113.4

<b>Instância</b>	<b>PCT (w)</b>	<b>PCF (w)</b>	<b>PCM (w)</b>	<b>Makespan (s)</b>
j9_k3_4	682997.7	136518.0	546479.6	83827.3
j9_k3_5	713822.1	110288.9	603533.2	86516.2
j9_k3_6	575858.3	114276.5	461581.8	68642.9
j9_k3_7	639637.5	118072.1	521565.3	81161.0
j9_k3_8	680946.6	113324.4	567622.1	79900.1
j9_k3_9	524244.3	86137.2	438107.1	55760.8
j9_k3_10	488945.4	71580.0	417365.4	64337.4
j12_k4_1	808086.8	114761.1	693325.6	73867.1
j12_k4_2	985527.8	133697.3	851830.5	93106.5
j12_k4_3	708960.2	88181.1	620779.1	66950.7
j12_k4_4	999722.5	139015.3	860707.2	94022.4
j12_k4_5	867389.0	128974.5	738414.3	79952.4
j12_k4_6	739014.0	98787.6	640226.4	72373.9
j12_k4_7	898561.1	126727.4	771833.6	82343.3
j12_k4_8	898288.1	119836.4	778451.6	84048.4
j12_k4_9	788953.0	108600.1	680352.8	72477.5
j12_k4_10	851086.8	121653.6	729433.2	79362.1

**ANEXOS**

*Certificado de Calibração*

Página 01/02

Certificado N° 12104/23 Data Emissão: 23/08/2023 Solicitação N° 6812-1

Contratante: INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO  
Endereço: ESTRADA DO ALTO DO MOURA, S/N - KM 3,8 - ALTO DO MOURA - CARUARU - PE  
Solicitante: O MESMO

**Instrumento Calibrado :** ANALISADOR DE ENERGIA

Identificação: 209237 Faixa de Indicação: MULTIFAIXA  
Fabricante: MINIPA Divisão: MULTIFAIXA Data de Calibração: 23/08/2023  
Modelo: ET-5051C Série: AE00100000021M

**Condição de Calibração:**

A calibração foi realizada conforme procedimento técnico de calibração PTC-008, pelo método de comparação contra padrão de referência.

Na condição ambiental de temperatura de  $(20 \pm 2)$  °C, e umidade relativa de  $(50 \pm 10)$  %UR

**Padrão Utilizado:**

Multímetro Digital, Identificação: 1889002, Certificado N° RI5338/22A - SOCINTEC-RBC e Validade -20/10/2024  
Termohigrômetro, Identificação: VA-06, Certificado N° RI 0074/22 - SOCINTEC-RBC e Validade - 10/01/2024

**Observação:**

A calibração foi realizada 3(três) medições por ponto no Multímetro Digital

A incerteza expandida (medição)  $U_{95,45\%}$  relatada é baseada em uma incerteza padronizada combinada, multiplicada por um fator de abrangência k, para um nível de confiança de aproximadamente 95,45 %.

A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02

Esta calibração foi realizada com padrões de referências rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidades (SI), estando de acordo com requisitos da norma ABNT NBR ISO/IEC 17025/2017.

O presente certificado refere-se exclusivamente ao instrumento calibrado, sendo proibida sua reprodução parcial.

Raniel Assis Setoue, Gerente Técnico, CFT-PE 05212318416

*Certificado de Calibração*

Página 02/02

Certificado N° 12104/23

Data Emissão: 23/08/2023

Solicitação N° 6812-1

**Resultado de Calibração:**

Valor Nominal	Valor Referência	Indicação no Mensurando	Erro	Incerteza de Medição(±)	(k)-Fator de Abrangência
<i>Tensão AC</i>					
<i>V1PE - Escala: 600 V - Menor Divisão: 0,1 V</i>					
44,0	44,3	44,4	-0,1	0,1	2,00
113,0	113,1	113,2	-0,1	0,1	2,00
227,0	227,1	226,8	0,3	0,1	2,00
<i>V2PE - Escala: 600 V - Menor Divisão: 0,1 V</i>					
44,0	44,3	44,4	-0,1	0,1	2,00
113,0	112,8	113,3	-0,5	0,1	2,00
227,0	226,7	227,1	-0,4	0,1	2,00
<i>V3PE - Escala: 600 V - Menor Divisão: 0,1 V</i>					
44,0	44,3	44,5	-0,2	0,1	2,00
113,0	113,1	113,4	-0,3	0,1	2,00
226,0	225,9	226,6	-0,7	0,1	2,00
<i>Corrente AC</i>					
<i>I1 - Escala: 3000 A - Menor Divisão: 0,1 A</i>					
100,0	100,4	98,5	1,9	0,1	2,00
251,0	250,5	245,7	4,8	0,1	2,00
400,0	400,2	393,7	6,5	0,1	2,00
<i>I2 - Escala: 3000 A - Menor Divisão: 0,1 A</i>					
100,0	100,3	98,4	1,9	0,1	2,00
250,0	250,4	246,2	4,2	0,1	2,00
400,0	400,4	393,3	7,1	0,1	2,00
<i>I3 - Escala: 3000 A - Menor Divisão: 0,1 A</i>					
101,0	100,5	98,5	2,0	0,1	2,00
251,0	250,7	246,1	4,6	0,1	2,00
401,0	400,5	393,3	7,2	0,1	2,00