

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E TRANSPORTES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE UM SISTEMA DE PLANEJAMENTO
AVANÇADO DE PRODUÇÃO (APS) E UMA HEURÍSTICA DE
SEQUENCIAMENTO BASEADA NO MÉTODO ATC**

EDUARDO ANTONIO TEIXEIRA DE OLIVEIRA

Orientador: MICHEL JOSÉ ANZANELLO, PhD

PORTO ALEGRE
SETEMBRO/2023

Resumo

O sequenciamento da produção visa determinar a sequência de execução das operações produtivas, com declarações de volumes, datas e horas planejadas, a fim de otimizar o desempenho do sistema produtivo. Para isso, existem alternativas como o Sistema de Planejamento Avançado de Produção (APS), que representa uma alternativa tecnológica avançada com alto custo de aquisição e implementação, e heurísticas de sequenciamento ATC (Apparent Tardiness Cost), alternativa considerada simplificada e mais acessível. Este artigo compara o desempenho dessas abordagens em um ambiente de produção real na indústria moveleira, introduzindo uma nova heurística denominada MATCSRTSC, baseada em princípios derivados da ATC e adaptada para minimizar setups, atrasos e considerar fatores relacionados à disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais. O APS demonstrou um desempenho sólido em termos de eficiência operacional, cumprimento de prazos e otimização de tempos de setup, superando a heurística MATCSRTSC. No entanto, o estudo também ressaltou que a heurística MATCSRTSC, apesar de sua simplicidade, ainda oferece eficiência significativa em cenários complexos, destacando seu potencial em situações mais simplificadas.

Paravras-chave: Sequenciamento da produção; heurística; ATC; APS; indústria.

1. Introdução

Atualmente, as empresas dos mais diversos setores estão sendo constantemente desafiadas a atender de forma rápida e eficaz às necessidades de seus clientes. Isso ocorre devido à crescente competitividade do mercado, que demanda redução da ineficiência, alta variedade de produtos e cadeias de suprimentos velozes. A elevada complexidade imposta pela competitividade direciona essas empresas a procurarem alternativas de soluções tecnológicas que otimizem seus processos produtivos, tornando-os mais eficazes (KRISHNAMURTI; GUPTA, 2021).

No âmbito industrial, o planejamento, programação e sequenciamento da produção consistem em atividades fundamentais devido à complexidade das operações e diversidade de produtos. Conseqüentemente, ineficácias e eventuais prejuízos no desempenho das empresas são gerados quando tais atividades são realizadas de forma manual ou empírica (AYTUG et al., 2005). Segundo Anton Huber, CEO da Siemens AG na Divisão de Fábrica Digital, a digitalização tornou-se o principal motor de crescimento da indústria e representa significativo ganhos de eficiência, que podem ser alcançados através da utilização de softwares que integram digitalmente a visão sistêmica dos processos produtivos e cadeias de suprimentos (SIEMENS ADVANCE, 2015).

A atividade de programação da produção se refere ao processo de atribuição de atividades a recursos ao longo do tempo, as quais geram impactos em diversos setores da organização. O sequenciamento das atividades busca otimizar um ou mais objetivos e, simultaneamente, satisfazer algumas restrições particulares impostas pelo cenário da empresa. Para definir cenários mais adequados a cada sistema, a literatura traz ampla gama de Heurísticas de Sequenciamento e Sistemas de Planejamento Avançado da Produção (APS) (LIU, 2010). Dentro deste contexto, o ordenamento adequado das operações de uma organização surge como oportunidade para redução da ineficiência e otimização da utilização da capacidade produtiva, conseqüentemente, atendendo a demanda e gerando vantagens competitivas.

A implantação de Sistemas APS (*Advanced Planning and Scheduling*) deixou de ser privilégio de poucas e grandes empresas. Com o aumento dos desafios no planejamento e programação da produção, o uso de APS se tornou uma ferramenta fundamental para empresas em suas tomadas de decisão estratégicas, graças à sua alta capacidade de análise e geração de cenários (SIEMENS, 2022). O software Opcenter APS da Siemens, solução de renome mundial para planejamento e programação com capacidade finita, tem sido utilizado com sucesso em inúmeros projetos de implementação, proporcionando resultados expressivos para as empresas (SIEMENS, 2022). Entretanto, para a realização do planejamento e sequenciamento da produção, existe uma alternativa ao sistema APS, simplificada e mais acessível, visto que não possui altos custos de implementação e manutenção como o APS.

A alternativa em questão seria a utilização de uma heurística de sequenciamento baseada na regra ATC (*Apparent Tardiness Cost*). Essa alternativa, apesar de mais viável em questões financeiras, pode enfrentar dificuldades em gerar soluções robustas em cenários mais complexos. Isso ocorre porque a regra ATC não leva em consideração os impactos do sequenciamento em relação as demais demandas que serão posteriormente sequenciadas. Em processos complexos, isso pode tornar o resultado menos eficaz, pois a heurística não contempla plenamente regras e especificidades dos itens a serem sequenciados.

Neste contexto, as vantagens e desvantagens inerentes a cada alternativa (software APS versus regra ATC) dificultam a identificação da metodologia mais benéfica a ser utilizada pelas empresas, dependendo do cenário de demanda e complexidade de processo

em que estão inseridas. Desta forma, este artigo tem como principal objetivo analisar e quantificar as principais diferenças da utilização de um dos principais sistemas avançados de planejamento e sequenciamento APS presentes no mercado quando comparado com a aplicação de uma nova heurística baseada na regra ATC em uma mesma organização. A nova heurística propõe uma adaptação das regras ATCSR – *Apparent Tardiness Cost with Setups and Ready Times* e *Modified ATCS – Modified Apparent Tardiness Cost with Setups*, conduzindo à *Modified Apparent Tardiness Cost with Setups, Ready Times, Supply and Constraints* (MATCSRTSC). Essa nova regra, contribuição original deste artigo, foi desenvolvida para atender a demanda por regras aprimoradas e acessíveis de sequenciamento que possam atender cenários complexos de produção. A heurística tem como função objetivo reduzir o tempo total de atraso, buscando considerar fatores como o custo de atraso, tempos de liberação, tempos de folga, restrições de recursos, disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais.

Com a realização deste estudo, objetiva-se quantificar e identificar vantagens, desvantagens e limitações dos modelos a partir da análise comparativa da demanda atendida em cada uma das alternativas, do tempo médio de atravessamento dos pedidos nos diferentes planejamentos e adequação a restrições e regras produtivas específicas da empresa em questão. Ademais, o estudo visa compreender o esforço demandado em cada uma das situações para desenvolvimento e aplicação diária da metodologia. Sob perspectiva prática, este estudo visa fornecer suporte e fundamentação às empresas do ramo industrial para uma análise objetiva das limitações e diferenças dos métodos, além de possíveis benefícios de migração de uma heurística ATC de planejamento e sequenciamento produtivo para um sistema avançado, como o APS. Em termos teóricos, outra contribuição do estudo está na proposição de uma heurística inédita de programação da produção que introduz aspectos relacionados a disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais.

Este artigo está organizado conforme segue. Após essa introdução, a seção seguinte apresenta um referencial teórico sobre Sequenciamento da Produção, Sistema de Planejamento e Sequenciamento Avançado de Produção (APS) e Regras ATC. Na terceira seção é detalhado o cenário de aplicação e a metodologia aplicada nesse estudo comparativo. A seção 4 traz os resultados provenientes da aplicação dos métodos e a comparação prática. Por fim, a seção 5 descreve as conclusões do artigo.

2. Referencial Teórico

Esta seção apresenta os fundamentos de sequenciamento de operações/tarefas, principais objetivos do sequenciamento no controle da produção, regra ATC e suas variações e aplicações.

2.1 Sequenciamento da Produção

O Sequenciamento da Produção é uma técnica de planejamento e controle de produção que visa determinar a sequência de execução das operações produtivas, com declarações de volumes, datas e horas planejadas, a fim de otimizar o desempenho do sistema produtivo. Essa técnica envolve a alocação de recursos, a coordenação das atividades e a minimização de tempos de espera e de setups (SLACK, 2018).

Os princípios do Sequenciamento da Produção incluem o cumprimento das datas de entrega, a minimização do tempo de ciclo, a redução dos tempos de espera e de setup, a otimização da utilização de recursos e a minimização do estoque em processo (BAKER; TRIETSCH, 2009).

As principais variáveis associadas ao Sequenciamento da Produção incluem o tempo de processamento das tarefas, o tempo de setup, a capacidade dos recursos, a demanda dos clientes, as restrições de recursos e as datas de entrega dos pedidos (CHEN et al., 2013). As funções objetivo mais comuns incluem a minimização do tempo de ciclo, a maximização da utilização dos recursos, a minimização dos atrasos e a maximização da lucratividade (PFUND et al., 2008).

O Sequenciamento da Produção é amplamente utilizado em diversas empresas, como manufatura, serviços e saúde, e é considerado uma técnica fundamental para melhorar a eficiência e a eficácia do sistema produtivo (BAKER; TRIETSCH, 2009).

2.2 Sistemas APS

O Sistema APS (Advanced Planning and Scheduling) é uma ferramenta tecnológica para controle, planejamento e gerenciamento de produção que visa aumentar a eficiência produtiva e reduzir os custos por meio de uma melhor gestão do processo produtivo (SARI et al., 2019). O sistema fornece análises para orientar o fornecimento, as operações

de fabricação e logística e determinar o impacto das regras de negócios e das restrições de capacidade exclusivas na programação (SETIA; SAMBAMURTHY; CLOSS, 2008).

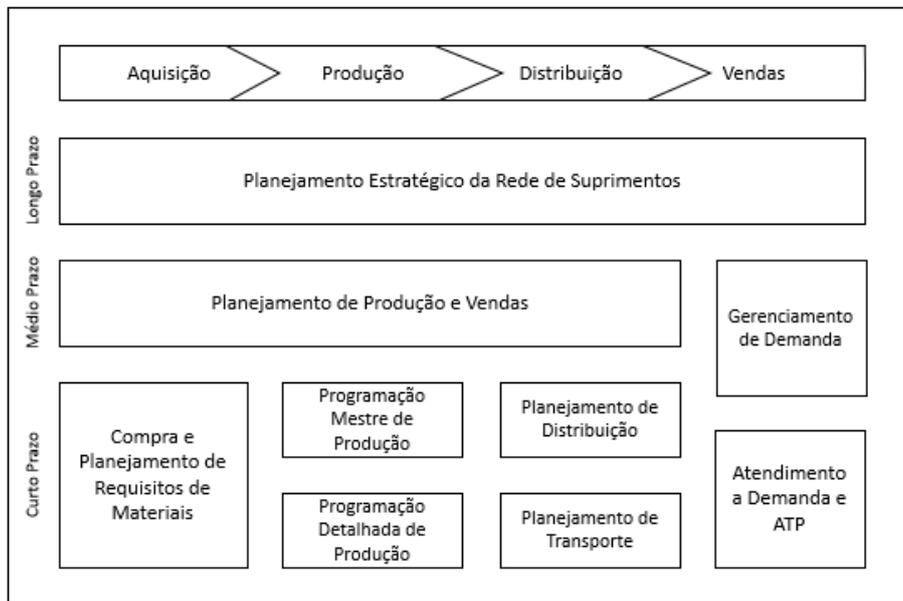
Tais sistemas aprimoraram a integração do planejamento de materiais e capacidade, preenchendo a lacuna entre a complexidade da cadeia de suprimentos e as decisões operacionais diárias (HVOLBY; STEGER-JENSEN, 2010). Dessa forma, a partir da coleta e processamento de informações sobre a produção (tais como disponibilidade de recursos, demanda do mercado e níveis de estoque), e com base nessas informações, o sistema é capaz de gerar um plano de produção otimizado, levando em consideração diversos fatores, como a capacidade produtiva, as restrições de recursos e as prioridades de produção (CHEN; HUANG; LAI, 2009). De acordo com Brun et al. (2006), o sistema APS representa a mais relevante inovação do mundo da manufatura desde a introdução do sistema MRP na década de 1970.

Conforme apontado por Stadtler (2005), o fundamento dos sistemas APS está nos princípios do planejamento hierárquico, empregando abordagens de solução tais como programação matemática e meta-heurísticas. O sistema simula diferentes cenários de planejamento a partir das informações de produção e estrutura fornecidos a ele (HVOLBY; STEGER-JENSEN, 2010). A principal funcionalidade dos sistemas APS está na capacidade de identificar a seleção ótima de recursos para as operações, a sequência de operações em cada recurso, alocação de lotes de transferência variáveis e cronogramas, considerando fluxos flexíveis, disponibilidade e capacidade dos recursos, restrições de precedência e equilíbrio de carga (GEN; LIN; ZHANG, 2009).

Ao contrário de outros sistemas de mesmo foco, os sistemas APS não consideram que as capacidades são infinitas, que todos os clientes, produtos e materiais possuem igual importância e que certos parâmetros, tais como lead times, são fixos (DAVID; PIERREVAL; CAUX, 2006). Por meio dos resultados e análises provenientes desses sistemas, as empresas podem otimizar suas cadeias de suprimentos, reduzir custos e níveis de inventário, melhorar as margens de produto e aumentar os rendimentos industriais (LEE; JEONG; MOON, 2002).

O funcionamento do Sistema APS, de acordo com Meyr et al. (2005), ocorre a partir de módulos divididos em três níveis da cadeia de suprimentos. A estrutura do sistema exemplificada por Meyr et al. (2005) é representada na Figura 1.

Figura 1 – Principais módulos constituintes do Sistema APS



Adaptado de Meyr et al. (2005)

No longo prazo, o planejamento estratégico da rede de suprimentos é o responsável por determinar a estrutura da cadeia de suprimentos de acordo com o horizonte de planejamento e incluindo considerações referentes a localização das fábricas e centros de distribuição (GIACON; MESQUITA, 2011).

Já no médio prazo e revisado de forma mais recorrente, de acordo com Stadler (2005), o planejamento de produção e vendas objetivam a eficiência na ocupação das capacidades da empresa e a realização das demandas previstas no horizonte de planejamento de médio prazo, planejando simultaneamente as funções de produção e compra. Além disso, o planejamento das vendas busca controlar e equilibrar as exigências dos clientes com as capacidades da cadeia de suprimentos (CROXTON et al., 2002).

O Programa Mestre de Produção (MPS) é responsável pela definição da quantidade de itens a serem concluídos em cada período do horizonte de planejamento de curto prazo, permitindo atualizar periodicamente os MPS após a coleta e reconhecimento das informações mais recentes (OMAR; BENNELL, 2009). O MRP (Planejamento de Recursos de Produção) apresenta as necessidades de material por meio das informações do MPS, gerando ordens de montagem, fabricação e compra, a fim de atender a demanda dos produtos finais (OMAR; BENNELL, 2009). O agendamento detalhado da produção,

por sua vez, é gerado levando em consideração a disponibilidade de capacidade e materiais, de acordo com as diretrizes do MPS (GIACON; MESQUITA, 2011).

Na prática, em um cenário exemplificando a utilização do sistema APS, os dados de entrada no APS incluiriam o tipo de produto, o tamanho do pedido, a data de entrega do pedido, a capacidade e os recursos disponíveis, a rotina de processamento, o tempo de processamento e de ciclo, o tempo de configuração, o rendimento, as manutenções preventivas previstas e o trabalho em andamento; enquanto as saídas incluiriam a carga alocada em cada equipamento, dados relativos a utilização da fábrica e da linha, horário de início e término de cada pedido e informações de tempos utilizados para cada atividade (CHEN et al., 2013).

Günther e Meyr (2009) destacam que os sistemas APS representam aplicações de sucesso quanto ao gerenciamento da cadeia de suprimentos e estão relacionados a atividades de suporte e tomada de decisões nos níveis estratégico, tático e operacional. São diversos os autores que estudam o Sistema APS e seus benefícios. Dentre eles, Zhang et al. (2021) destacam que a implementação do sistema pode trazer melhorias significativas na eficiência da produção e na redução de custos, além de melhorar a tomada de decisões e a flexibilidade da empresa. Ainda de acordo com Zhang et al. (2021), a utilização desse sistema também pode levar a uma maior transparência no processo produtivo, já que os dados sobre a produção ficam centralizados em uma única plataforma e são acessíveis a todos os envolvidos no processo produtivo.

2.3 Regras ATC

O Método ATC (Custo Aparente do Atraso) é uma regra de despacho composta que leva em consideração a regra de tempo de processamento mais curto ponderado e a regra de menor folga para otimizar a sequência de produção em ambientes de manufatura complexos (CHEN, 2012). Pinedo (2008) divide as regras de despacho em dois tipos: estáticas e dinâmicas. De acordo com o autor, regras estáticas dependem de características do processo, como aspectos da tarefa ou máquina que irá realizar o processamento, e a prioridade permanece constante desde a chegada até o direcionamento ao local de execução da atividade. Já em relação as regras dinâmicas, o mesmo autor afirma que possuem prioridades variáveis e as tarefas de maior prioridade são executadas antes das que possuem menos importância.

Além disso, Pinedo (2008) classifica as regras de despacho em locais e globais, onde as regras locais são determinadas pelo arranjo de uma fila de tarefas, enquanto as regras globais repercutem as operações posteriores às quais as tarefas serão submetidas. De acordo com Chen (2012), as regras de despacho são recursos importantes na solução de problemas de sequenciamento, já que são facilmente aplicáveis em funções-objetivo complexas.

Rachamadugo e Morton (1982), visando a minimização do tempo total de atraso em um grupo de tarefas com datas de entrega e tempos de processo definidos, propuseram a regra de despacho conhecida por Custo Aparente do Atraso (ATC). A regra, originalmente elaborada para arranjos de máquinas únicas, mescla as regras de despacho WSPT – *Weighted Shortest Processing Time First* (trabalhos com menores tempos de processamento ponderados antes) e MS – *Minimum Slack First* (prioriza os trabalhos com menores folgas). A equação (1) apresenta a base do ATC utilizada para calcular a prioridade para cada tarefa ainda não processada.

$$I(t, j) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{(d_j - r_j - t, 0)}{K\bar{p}}\right) \quad (1)$$

Na equação (1), a prioridade de cada tarefa j é dada pelo peso w_j atribuído à tarefa, multiplicado pelo tempo de processamento p_j e escalonado pelo prazo de entrega d_j . Além disso, é levado em conta o tempo de espera r_j que a tarefa deve aguardar antes de ser processada. O parâmetro de escala K é determinado empiricamente de acordo com o sistema em análise e \bar{p} é o tempo médio de processamento das tarefas. Devem ser alocadas prioritariamente as tarefas com maior I_j , onde o dado representa a priorização da tarefa j no tempo t .

Para lidar com a necessidade de considerar tempos de preparação na programação de tarefas, Lee e Pinedo (1997) propuseram uma adaptação da regra ATC chamada Custo Aparente do Atraso com Setups (ATCS). De acordo com os autores, essa modificação foi necessária porque a regra ATC não considera o tempo de preparação, o que poderia prejudicar a eficiência do sistema em algumas situações. Sendo assim, ao incorporar o tempo necessário para realizar as preparações antes do processamento das tarefas, a regra prioriza as tarefas que demandam o menor tempo de preparação. A equação (2) descreve a regra ATCS, onde as variáveis do primeiro termo exponencial são idênticas às da equação (1) e, na segunda parte, traz o termo S_{ij} , que representa o tempo necessário para

preparações entre tarefas (*setup*), e \bar{s} representa o tempo médio de *setup* de todas as tarefas.

$$ATCS(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{K1\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ij}}{K2\bar{s}}\right) \quad (2)$$

Embasados na regra do ATCS, Pfund et al. (2008) propuseram a regra ATCSR - *Apparent Tardiness Cost with Setups and Ready Times*, a fim de solucionar o problema de sequenciamento, considerando os tempos de liberação de tarefas em máquinas paralelas idênticas com setups dependentes da sequência. Esta abordagem permite solucionar problemas dinâmicos com setup dependente da sequência e do instante de liberação de acordo com o apresentado na equação (3).

$$ATCSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{K1\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ij}}{K2\bar{s}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{K3\bar{p}}\right) \quad (3)$$

Xi e Jang (2012), posteriormente, propõem duas novas extensões da regra ATC. Primeiramente, o MATCSR - *Modified Apparent Tardiness Cost whit Setups and Ready times*, foi elaborado para situações onde os *setups* são dependentes de sequência contínua, ou seja, na qual é necessário ter a peça para realizar o preparo. Este arranjo tem por objetivo dar preferência no sequenciamento para tarefas com menor instante de liberação, conforme descrito na equação (4) a seguir:

$$MATCSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j + s_{ij} + \max(r_j - t, 0)} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - s_{ij} - \max(r_j, t), 0)}{K1\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ij}}{K2\bar{s}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{K3\bar{p}}\right) \quad (4)$$

A segunda regra proposta por Xi e Jang (2012), ATCSSR - *Apparent Tardiness Cost whit Separable Setups and Ready times*, consiste em liberar uma tarefa depois da realização do *setup*. As regras anteriores mantinham a máquina disponível antes da realização do *setup*, ao passo que o ATCSSR torna a máquina disponível somente após a conclusão do *setup*. A equação (5) descreve o modelo matemático citado:

$$ATCSSR(t, i, j) = \frac{w_j}{p_j + \max(s_{ij}, r_j - t)} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - \max(r_j, t + s_{ij}), 0)}{K1\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{s_{ij}}{K2\bar{s}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t - s_{ij}, 0)}{K3\bar{p}}\right) \quad (5)$$

Visando atribuir um critério ergonômico associado às famílias de produtos, Serafini et al. (2016) propuseram uma adaptação da heurística ATC, proposta por Rachamadugo e Morton (1982), denominada de ATCE (*Apparent Tardiness Cost with Ergonomic Factors*), apresentada na equação (6). Na equação, o último termo exponencial representa o fator ergonômico, onde N_f indica o somatório do número de

tarefas já processadas pela família f , \bar{p}_f representa a média dos tempos de processamento das tarefas da família f ainda não processadas e \bar{N} consiste na média de N_f .

$$l_j(t) = \frac{w_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{\bar{p}}\right) \exp\left(-\frac{tN_f}{\bar{p}_f\bar{N}}\right) \quad (6)$$

De acordo com Serafini et al. (2016), a operacionalização do termo ergonômico apresentado na equação (6) consiste em somar os tempos de execução de tarefas em famílias com diferentes níveis de complexidade, promovendo a alternância de tarefas à medida que são alocadas. Assim, o método permite reduzir a acumulação sucessiva de tarefas com o mesmo nível de complexidade em uma única equipe, evitando o agravamento dos fatores de risco ergonômicos.

Para lidar com restrições de elegibilidade de máquinas e compartilhamento de recurso humano (operador) em máquinas paralelas, Bektur e Saraç (2019) propuseram uma modificação na regra ATCS onde, de acordo com a equação (7) o operador comum pode processar apenas uma configuração em qualquer momento dado.

$$l(i^*, j) = \frac{w_j}{p_{i^*j}} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_{i^*j} - \max(t_{i^*}, CST), 0)}{K1\bar{p}_{i^*}}\right) \exp\left(-\frac{S_{hj}}{K2\bar{s}}\right) \quad (7)$$

Na equação (7), i^* representa a máquina selecionada, h denota o índice do trabalho concluído imediatamente antes do trabalho j na máquina i^* . Além disso, enquanto t_{i^*} denota o tempo em que a máquina i aguarda o processamento, o tempo do servidor comum (CST) é o tempo em que o servidor comum aguarda a operação de configuração, \bar{p}_{i^*} é o tempo médio de processamento de trabalhos não programados na máquina i^* e \bar{s} denota o tempo médio de configuração.

As Tabelas 1 e 2 a seguir apresentam compiladas as equações das regras ATC apresentadas na revisão teórica deste artigo. As tabelas apresentam os termos de cada equação dispostos nas colunas da tabela e as linhas apresentam cada modelo matemático em ordem cronológica de desenvolvimento.

Tabela 1 – Compilado regras baseadas no ATC

Regra	Priorização	Folga	Setup	Liberção
ATC (1987)	$\frac{w_j}{p_j}$	$\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{K1\bar{p}}\right)$	-	-
ATCS (1997)	$\frac{w_j}{p_j}$	$\exp\left(-\frac{\max(d_j - r_j - t, 0)}{K1\bar{p}}\right)$	$\exp\left(-\frac{s_{ij}}{K2\bar{s}}\right)$	-

ATCSR (2008)	$\frac{wj}{pj}$	$\exp\left(-\frac{\max(dj - rj - t, 0)}{K1\bar{p}}\right)$	$\exp\left(-\frac{sjj}{K2\bar{s}}\right)$	$\exp\left(-\frac{\max(rj - t, 0)}{K3\bar{p}}\right)$
MATCSR (2012)	$\frac{wj}{pj + sjj + \max(rj - t, 0)}$	$\exp\left(-\frac{\max(dj - pj - sjj - \max(rj, t), 0)}{K1\bar{p}}\right)$	$\exp\left(-\frac{sjj}{K2\bar{s}}\right)$	$\exp\left(-\frac{\max(rj - t, 0)}{K3\bar{p}}\right)$
ATCSSR (2012)	$\frac{wj}{pj + \max(sjj, rj - t)}$	$\exp\left(-\frac{\max(dj - pj - \max(rj, t + sjj), 0)}{K1\bar{p}}\right)$	$\exp\left(-\frac{sjj}{K2\bar{s}}\right)$	$\exp\left(-\frac{\max(rj - t - sjj, 0)}{K3\bar{p}}\right)$

Tabela 2 – Compilado regras baseadas no ATC

Regra	Priorização	Folga	Setup	Fator Ergonômico
ATCE (2016)	$\frac{wj}{pj}$	$\exp\left(-\frac{\max(dj - pj - t, 0)}{\bar{p}}\right)$	-	$\exp\left(-\frac{t \times N_f}{\bar{p}_f \times \bar{N}}\right)$
ATCS Modificada (2019)	$\frac{wj}{p_i \cdot j}$	$\exp\left(-\frac{\max(dj - p_i \cdot j - \max(t_i, CST), 0)}{K1\bar{p}_i}\right)$	$\exp\left(-\frac{S_{hj}}{K2\bar{s}}\right)$	-

As regras ATC e suas variações apresentam ampla aplicação prática em diversas organizações. Por exemplo, Noal (2015) utilizou a regra ATC para balizar o sequenciamento de tarefas em sistema de pintura, onde foi utilizado para definir o tamanho do lote ideal para minimizar os custos de setup e pintura, observados incrementos de 32,84% nos ganhos em eficiência da instalação. Além disso, é possível empregar essas regras na otimização da linha produtiva, buscando reduzir fatores como fadiga, estresse e monotonia do trabalhador, por meio da alternância de atividades de diferentes níveis de complexidade na sequência indicada (SERAFINI; ANZANELLO; KAHMANN, 2016).

Já o estudo conduzido por Cubides et al. (2019) apresenta uma aplicação de sucesso da regra de despacho ATC em uma torrefadora de café. A empresa em questão enfrentava problemas com a falta de programação de produção, devido à demanda dinâmica. Com a implementação do Sistema de Suporte à Decisão, utilizando a meta-heurística Tabu Search e a regra de despacho ATC, foi possível obter uma sequência de programação de pedidos que minimizou o atraso ponderado total. Os mesmos autores desenvolveram dois modelos experimentais através dos quais demonstraram que a regra de despacho ATC teve o melhor desempenho, fornecendo o menor atraso ponderado total. No caso em questão, a regra de despacho ATC se destacou dentre as oito alternativas estudadas e proporcionou uma redução de 31,32% em comparação com a regra anteriormente adotada, demonstrando seu impacto significativo na solução do problema de falta de programação de produção na empresa.

3. Procedimentos Metodológicos

3.1. Descrição do Cenário

A empresa foco do estudo é uma indústria de móveis de médio porte especializada na produção de guarda-roupas e outros móveis de madeira. Localizada no estado do Espírito Santo, Brasil, a empresa possui quase 25 anos de história e tem sua estrutura e processos bem consolidados.

Este estudo utiliza um cenário de produção da empresa, analisando todas as etapas do fluxo produtivo considerando restrições de recursos e tempos de setup para compreender os impactos da implementação de um Sistema APS quando comparado com uma Heurística de sequenciamento baseada na Regra ATC.

O processo produtivo da empresa é dividido em seis setores distintos, que se inicia no setor de corte, utilizando como matéria-prima principal chapas de madeira MDF e MDP. Nessa etapa, cada produto acabado é submetido a planos de corte específicos, visando otimizar o aproveitamento das chapas. Em seguida, o setor de coladeiras é responsável por aplicar fitas de acabamento nas bordas das peças, de acordo com as variações específicas de cada peça e produto.

Posteriormente, as peças são encaminhadas ao setor de furadeiras, onde são realizadas as furações necessárias para a montagem do produto. Após essa etapa, seguem para o setor de usinagem, onde são moldadas e lixadas, garantindo a obtenção do formato e dos detalhes finais das peças.

Na sequência, as peças passam pelo processo de pintura no setor de Pintura UV, onde são pintadas tanto interna quanto externamente, conferindo o acabamento desejado. Por fim, o último processo produtivo consiste na embalagem, em que as peças são cuidadosamente acondicionadas em conjunto, formando um volume que representa o produto final que será armazenado e, ao completar o lote, enviado ao cliente.

3.2. Classificação do Método de Pesquisa

O presente estudo pode ser classificado como uma pesquisa de abordagem comparativa e quantitativa. De acordo com Fachin (2001), a pesquisa comparativa visa comparar dois ou mais métodos, abordagens ou técnicas a partir de suas semelhanças e

diferenças para determinar qual é mais eficaz ou adequado para uma determinada tarefa. Além disso, o caráter quantitativo da pesquisa está na análise dos resultados e impactos da aplicação dos métodos.

Dessa forma, o estudo desenvolvido busca comparar, de forma embasada em diferentes métricas de desempenho, a aplicação de um sistema de planejamento avançado de produção (APS) com uma heurística de sequenciamento baseada no método ATC (Custo Aparente do atraso).

3.3. Etapas do Trabalho

O método utilizado neste trabalho foi desenvolvido em quatro etapas: (i) coleta de dados da empresa que serviu de base para a realização do estudo, (ii) proposição e aplicação de uma nova heurística baseada no método ATC, (iii) desenvolvimento de um modelo de simulação utilizando um sistema APS e (iv) análise quantitativa dos resultados gerados pelas abordagens.

3.3.1 Coleta de Dados

Inicialmente, na etapa (i), foram coletados junto a empresa, dados de produção, de infraestrutura e regras operacionais seguidas pela produção, os quais foram utilizados como base nos modelos de simulação tratados no estudo. Os dados coletados contaram com informações sobre demanda, capacidade de produção, disponibilidade de recursos, particularidades da manufatura em questão e informações referentes a tempos de espera e produção.

O tratamento e a manipulação do banco de dados foram conduzidos utilizando o *software* SQL (*Structured Query Language*). O *software*, foi escolhido devido à sua capacidade de gerenciar eficientemente grandes volumes de dados e realizar consultas complexas de maneira eficaz.

3.3.2 Proposição e Aplicação de Heurística ATC

A etapa (ii) consistiu na proposição, validação e aplicação de uma heurística inédita baseada no método ATCSR, visto que considera os tempos de liberação de tarefas

em máquinas paralelas idênticas com setups dependentes da sequência, combinado com o método ATCS Modificado desenvolvido por Bektur e Seraç (2019), o qual viabiliza lidar com restrições de elegibilidade de máquinas.

A escolha dessas heurísticas como base para a proposição de um novo método se deve às características e restrições específicas da empresa de manufatura base do estudo. Além disso, foi incorporado um novo termo à heurística com o objetivo de considerar a disponibilidade e tempo de ressuprimento de matéria prima.

Essa proposição se deu, inicialmente, devido à importância e impactos da disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais para o cenário da empresa de manufatura que serviu de base para esse estudo. Porém, como anteriormente destacado neste artigo, de acordo com Krishnamurt e Gupta (2021), o atual cenário de demanda imediatista e personalizada do mercado tornam ineficiente o acúmulo de grandes estoques. Devido a esse contexto, pode-se afirmar que a proposição apresenta relevância para o contexto produtivo como um todo.

A nova regra, nomeada de Modified Apparent Tardiness Cost with Setups, Ready Times, Supply and Constraints (MATCSRTSC), foi desenvolvida para atender a demanda por regras aprimoradas e acessíveis de sequenciamento que possam atender cenários complexos de produção. A heurística tem como função objetivo reduzir o tempo total de atraso, buscando considerar fatores como o custo de atraso, tempos de liberação, tempos de folga, restrições de recursos, disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais, conforme descrito na equação (8).

$$\text{MATCSRTSC}(t, i, j) = \frac{w_j}{p_{i^*}^j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_{i^*}^j - \max(t_{i^*}, CST), 0)}{K1\bar{p}_{i^*}}\right) \exp\left(-\frac{sh_j}{K2\bar{s}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_{i^*}^j - t_{i^*}, 0)}{K3\bar{p}_{i^*}}\right) \exp\left(-\frac{\max(Am, 0)}{K4dj}\right)$$

(8)

O primeiro termo a ser adicionado na composição da regra é o termo de priorização $\frac{w_j}{p_{i^*}^j}$. Em seguida, baseando-se na regra do ATCS Modificado é adicionado o termo relativo a folga $\exp\left(-\frac{\max(d_j - p_{i^*}^j - \max(t_{i^*}, CST), 0)}{K1\bar{p}_{i^*}}\right)$. Após, adiciona-se o termo de setup $\exp\left(-\frac{sh_j}{K2\bar{s}}\right)$ e o termo referente ao momento de liberação $\exp\left(-\frac{\max(r_{i^*}^j - t_{i^*}, 0)}{K3\bar{p}_{i^*}}\right)$.

Por fim, para lidar com a necessidade de considerar disponibilidade e tempos de ressurgimento de materiais requeridos pela tarefa na programação, e as demais características do cenário conforme citado anteriormente, a equação inclui um novo termo relativo à disponibilidade de materiais, $\exp\left(-\frac{\max(Am,0)}{K4dj}\right)$, o qual constitui uma contribuição original da pesquisa.

Para isso, considera-se a variável Am , a qual representa a data de disponibilidade do material, sendo atribuído o valor (em dias) do momento em que o material ficou disponível, relativo ao momento de aplicação da heurística, ou o tempo até a data prevista de ressurgimento para os casos em que o material está em falta no momento de aplicação da heurística. Além disso, o novo termo conta com o parâmetro empírico de $K4$ e a variável dj relativa à data de entrega da tarefa j .

Este novo termo tem como principal objetivo priorizar o sequenciamento de tarefas que já possuem disponibilidade de material conforme alocação de materiais nas operações previamente realizada. Quanto maior o intervalo de dias até o momento de ressurgimento do material requerido, menor será o resultado do termo por conta da função exponencial e, conseqüentemente, menor será o efeito na multiplicação dos termos que definem a prioridade de sequenciamento da tarefa. Dessa forma, o termo visa impedir a ociosidade dos recursos no sequenciamento, adiando o sequenciamento de tarefas que ainda não podem ser sequenciadas devido à indisponibilidade de material.

Por fim, ainda na etapa (ii), aplicou-se a nova heurística proposta (MATCSRSTSC), através de rotinas programadas no software SQL, em um cenário de demanda da empresa para definição de um sequenciamento ideal de acordo com o algoritmo desenvolvido. Os resultados gerados pela nova heurística serão posteriormente comparados com aqueles gerados pelo software APS, explicado na seqüência.

3.3.3 Modelagem em Software APS

A etapa (iii) foi dedicada ao desenvolvimento de uma modelagem de simulação de sequenciamento utilizando um sistema APS. O *software* utilizado neste estudo é considerado um dos principais sistemas avançados de planejamento e sequenciamento APS presentes no mercado. A modelagem no sistema APS utilizou o mesmo cenário de demanda utilizado na heurística desenvolvida na etapa (ii), levando em consideração as

mesmas regras e restrições de recurso e roteiro. O software possui uma heurística interna de sequenciamento própria que permite a personalização por parte do usuário. Para este estudo, foi utilizada a regra APS de sequenciamento denominada de Sequência Preferida.

A regra é denominada de sequência preferida pois, além de considerar todas as características e necessidades da ordem, permite ao usuário determinar como propriedades da operação devem ser priorizadas no sequenciamento individualmente em cada um dos recursos produtivos. Para fins comparativos do estudo, buscando alinhar com o objetivo da heurística utilizada na etapa (ii), foi utilizada a sequência preferida considerando a priorização por data de entrega do processo e redução dos tempos de *setup*. A partir da utilização da regra, foi possível simular o sequenciamento ideal de acordo com o sistema APS.

3.3.3 Comparação e Análise dos Resultados

Por fim, na etapa (iv), de posse dos resultados das etapas (ii) e (iii), realizou-se a compilação e análise dos resultados utilizando métricas de comparação quantitativas. Em termos quantitativos, a comparação se apoiou nos indicadores tempo de ciclo, produtividade, tempo de setup e nível de serviço. Em termos qualitativos, buscou-se identificar as principais diferenças, vantagens e desvantagens oferecidas por cada abordagem, bem como as limitações de cada um dos métodos.

4. Resultados Numéricos

Nesta seção, evidencia-se os resultados do estudo comparativo entre um APS e o método MATCSRTSC aplicados no contexto de produção da indústria moveleira que serviu como base para este artigo. A empresa em questão é especializada na fabricação de guarda-roupas e outros móveis de madeira. Para uma análise representativa, considerando que a categoria de guarda-roupas representa cerca de 80% da produção mensal, os métodos foram aplicados considerando especificamente os setores envolvidos na produção desta categoria.

A categoria de guarda-roupas foi escolhida para este estudo por conta da complexidade de sequenciamento que ela representa para a equipe de Planejamento e Controle de Produção (PCP) da empresa. Isso ocorre porque um único produto pode

requerer diversas outras ordens de produção que também se relacionam. Por exemplo, uma ordem de produção do setor de corte pode fornecer material para a produção de diversos produtos e pedidos diferentes. Além disso, as ordens de produção precisam ser sincronizadas em determinados setores. Por exemplo, no setor de furação, todas as partes do produto precisam estar simultaneamente disponíveis para montagem e furação correta das peças.

O processo produtivo é dividido em seis setores: corte, coladeiras, furação, usinagem, pintura UV e embalagem. O setor de corte corta chapas de madeira MDF e MDP para maximizar o aproveitamento do material. O setor de coladeiras aplica fitas de acabamento nas peças de acordo com suas variações específicas. As etapas subsequentes envolvem furações, usinagem e pintura UV para dar forma, detalhes e acabamento ao produto. Por fim, o processo de embalagem reúne as peças em lotes que representam o produto final, pronto para ser armazenado e enviado ao cliente.

Dessa forma, os resultados expostos a seguir abrangem todas as etapas do fluxo produtivo da empresa relacionadas a produção de Guarda Roupas, levando em consideração as restrições de recursos e os tempos de setup. Este cenário complexo é crucial para compreender dos impactos da implementação dos métodos em destaque neste artigo. É relevante destacar que a empresa em questão utiliza o APS e, devido aos resultados alcançados por meio da maturidade da utilização desse software, possui uma métrica para definir prazos para cada etapa produtiva com base em tempos de atravessamento alcançados por meio do sequenciamento gerado pelo APS.

O sequenciamento resultante de cada um dos métodos utilizados é representado por meio de gráficos de Gantt, que oferecem uma visualização clara da programação das operações nos recursos ao longo da linha do tempo. No gráfico, cada barra horizontal representa uma operação específica, com a posição horizontal indicando o início e o comprimento da barra representando a duração da operação. Os gráficos de Gantt utilizados no estudo possuem padrão de cores para identificar operações de uma mesma ordem de produção e destacam o tempo de setup entre operações utilizando de barras horizontais mais finas do que as utilizadas para representar as operações, em cor sólida preta.

Além disso, para compreensão do gráfico, vale destacar que o eixo vertical do gráfico delimita os recursos produtivos nos quais estão alocadas as operações, as barras

de cor vermelha acima de algumas operações destacam aquelas que estão atrasadas em relação a data de entrega da operação determinada pela empresa e as áreas hachuradas no gráfico representam horários não produtivos, como, neste caso, os finais de semana. Em cada uma das operações, está descrito o código da Ordem de Produção a qual pertence e a descrição da operação.

As Figuras 2 e 3 exibem os Gráficos de Gantt para os resultados obtidos pelo método MATCSRTSC e pelo APS, respectivamente:

Figura 2 – Gráfico de Gantt – Sequenciamento MATCSRTSC

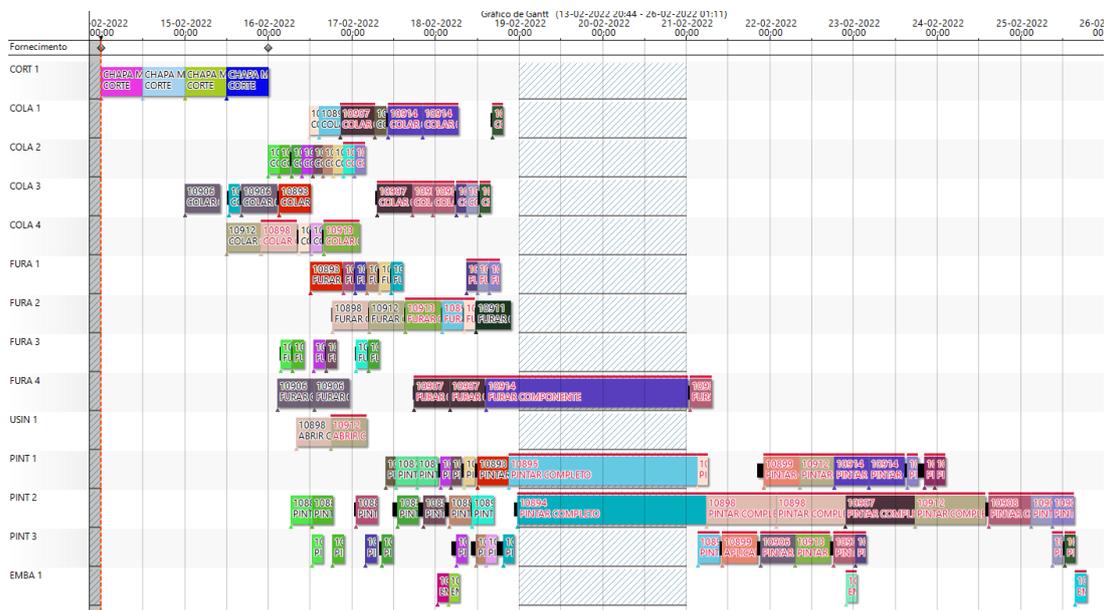
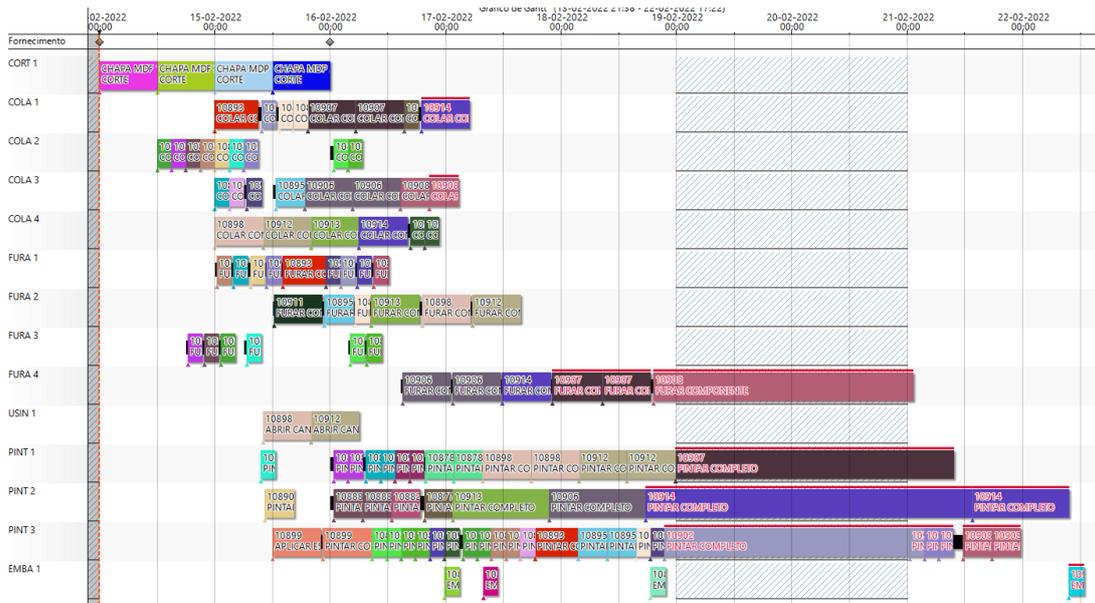


Figura 3 – Gráfico de Gantt – Sequenciamento Sistema APS



A Tabela 3 apresenta um quadro comparativo dos resultados da programação de cada um dos métodos observados nos Gráficos de Gantt apresentados. Nesta tabela, destaca-se o número de ordens de produção sequenciadas, a quantidade de operações (sendo consideradas as operações as operações produtivas – previstas em roteiro – e as operações de setup), a quantidade total de itens produzidos, o total em horas previsto a ser realizado em setup e em processo, a representatividade percentual do setup no cenário e, por fim, o percentual de operações realizadas no prazo determinado pela data de entrega dos processos.

Tabela 3 – Resultados Sequenciamentos

Comparação de Cenários

CENÁRIO	ORDENS	OPERAÇÕES	QTD	TOTAL SETUP	TOTAL PROCESSO	SETUP %	NO PRAZO
Advanced Planning and Scheduling (APS)	42	209	36.064	22,9 h.	704,0 h.	3,15%	85,71%
MATCSRTSC (Heurística ATC)	42	219	36.064	44,6 h.	725,0 h.	5,79%	50,00%

Ao comparar os resultados entre o Sistema de Planejamento Avançado de Produção (APS), e a heurística de sequenciamento MATCSRTSC proposta pelo artigo, é possível identificar diferenças marcantes que afetam o desempenho e a eficiência do sequenciamento proposto por cada um dos métodos.

Em termos de quantidade de operações, o APS se mostrou mais eficaz ao programar todas as ordens do cenário em 209 operações, enquanto a heurística MATCSRTSC proposta resultou em 219 operações, sendo essa diferença representada exclusivamente por operações de setup. Conseqüentemente, a representatividade do tempo de setup se demonstrou mais eficaz no APS, onde 3,15% do tempo total de produção são atividades de setup (22,9 horas), comparada ao resultado do método MATCSRTSC, onde o setup correspondeu a 5,79% do tempo total.

Apesar de ambos os métodos realizarem a otimização em relação aos tempos de setup de cada um dos recursos, levando em consideração as características das operações, o APS demonstra maior eficácia devido ao horizonte de otimização considerado. Isso é justificado pelo fato de o APS analisar a operação imediatamente anterior, já sequenciada no recurso, e também as conseqüências futuras das operações restantes que serão sequenciadas. Desta forma, o APS realiza diversas iterações, combinando e testando as possibilidades das operações que serão posteriormente sequenciadas, para identificar possíveis otimizações de setup dentro do horizonte definido pelo usuário. Por sua vez, a heurística MATCSRTSC, no que se refere a setup, considera apenas a operação imediatamente anterior a ela em seu termo de setup, definindo a operação seguinte mais prioritária a ser sequenciada sem considerar os impactos posteriores da definição. Como conseqüência, além do tempo de setup superior ao APS, destaca-se a maior quantidade de períodos ociosos (sem operações sequenciadas) nos recursos para o cenário de sequenciamento sugerido pelo método MATCSRTSC.

Quanto ao tempo total produtivo resultante da aplicação de cada um dos métodos, o APS também demonstrou melhor desempenho: 704 horas de processo, sendo 21 horas mais eficaz do que o total resultante da aplicação do MATCSRTSC. Essa diferença ocorre devido à velocidade de produção dos recursos que podem realizar as mesmas operações diferirem, afetando diretamente a duração da operação no recurso. A heurística própria utilizada pelo APS leva vantagem ao considerar essa diferença durante as iterações realizadas também como critério de otimização, visto que sua função objetivo busca reduzir o tempo de produção, as ineficiências e aumentar as entregas dentro do prazo.

Já no método MATCSRTSC, o cálculo e definição da próxima operação a ser sequenciada, sempre ocorre no recurso que primeiro ficar disponível dentre os recursos do setor que está sendo sequenciado. Dessa forma, ocorre sem levar em consideração a diferença de tempo de processamento da operação nos demais recursos alternativos, e

potencial otimização que poderia ser realizada, como critério decisivo para a alocação da operação.

Ao considerar a porcentagem de operações atendidas dentro do prazo estabelecido, o APS superou significativamente o método MATCSRTSC ao sequenciar todas as operações em um intervalo de 8,5 dias corridos e com uma taxa de 85,71% de operações concluídas no prazo, em comparação com 50,00% de operações concluídas dentro do prazo no método MATCSRTSC (que demandou um intervalo de 11,8 dias corridos para concluir todas as operações do cenário analisado).

As diferenças observadas nos resultados podem ser atribuídas a uma série de fatores, a exemplo dos comentados anteriormente. Porém, dentre eles, destaca-se a simplicidade da heurística e aplicação do método MATCSRTSC quando comparado a um APS e, principalmente, ao fato de o MATCSRTSC não considerar impactos posteriores do sequenciamento que está sendo realizado por resultar em sua aplicação apenas a prioridade dentre as operações disponíveis.

Já no APS, o desempenho mais eficaz em atender aos prazos pode ser explicado pela diversidade de aspectos considerados em sua heurística interna, resultando em um algoritmo mais complexo e sofisticado, e a grande quantidade de iterações realizadas para analisar a influência do sequenciamento de uma operação em operações que serão posteriormente sequenciadas. A análise detalhada dos recursos, tempos produtivos de acordo com roteiros alternativos da ordem e tempos de setup no APS permite um planejamento mais preciso. Assim, contribui diretamente para a programação mais eficiente das operações, resultando em um melhor cumprimento dos prazos estabelecidos.

Apesar de o APS se destacar em relação ao método MATCSRTSC em todos os parâmetros quantitativos analisados, vale destacar que a indústria moveleira utilizada como base para este artigo possui uma métrica rigorosa de determinação de prazos, com referência em resultados atingidos pela implementação de um sistema APS e complementada pelas regras de sequenciamento APS personalizadas, desenvolvidas por uma consultoria especializada.

Essas condições contribuem para a idealização desse prazo de referência, tornando-o ainda mais alinhado com os parâmetros e necessidades atuais da empresa. No entanto, mesmo considerando essa abordagem mais ajustada, os resultados alcançados pelo método MATCSRTSC demonstram uma eficiência positivamente expressiva,

especialmente em um cenário complexo e de alta interdependência entre as ordens de produção. Isso reforça o potencial do método MATCSRTSC para aplicação em cenários complexos e, principalmente, em cenários mais simplificados, onde sua agilidade e simplicidade podem trazer benefícios significativos para otimização do sequenciamento produtivo.

5. Conclusão do Estudo

A fim de fornecer suporte e fundamentação para uma análise objetiva das limitações e diferenças de uma heurística do tipo ATC de sequenciamento produtivo para um sistema avançado, como o APS, este estudo realizou uma comparação prática aplicada a um cenário produtivo real. Além disso, para essa comparação, e buscando fornecer uma alternativa de método de sequenciamento simplificado e acessível, o estudo propôs uma nova heurística, MATCSRTSC, derivação dos métodos ATCSR e ATC Modificado, que introduz aspectos relacionados à disponibilidade e tempo de ressuprimento de materiais.

Os resultados desta análise comparativa têm implicações importantes para a tomada de decisões no planejamento e sequenciamento de produção em indústrias. A escolha entre o APS de Produção e o método MATCSRTSC deve considerar não apenas a eficiência operacional, mas também as necessidades específicas da empresa, recursos disponíveis, objetivos de produção e complexidade dos processos produtivos. Compreender as diferenças detalhadas pelos resultados podem guiar os profissionais na seleção da abordagem mais apropriada para otimizar o desempenho da produção.

A análise comparativa dos resultados indica que o APS apresentou um desempenho mais sólido em relação à eficiência do sequenciamento, cumprimento de prazos e otimização de tempos de *setup*. Além disso, o estudo evidenciou que o APS mostrou-se mais eficaz na gestão do tempo de setup e na programação de operações dentro do prazo para um cenário produtivo complexo.

Como desdobramento futuro deste estudo, sugere-se a realização de uma análise de viabilidade econômica, considerando não apenas a eficiência operacional, mas também os aspectos financeiros da implementação dos métodos de sequenciamento. Essa análise poderia avaliar o custo de implementação dos sistemas APS em relação às faixas de lucro mensal das empresas, buscando identificar o tempo médio necessário para recuperar o

investimento inicial e a representatividade dos ganhos financeiros oferecido pelos métodos.

A combinação dessas abordagens forneceria uma base sólida para a tomada de decisões estratégicas, auxiliando as empresas a escolherem o método de sequenciamento mais adequado não apenas em termos de desempenho operacional, mas também considerando as implicações financeiras e de retorno sobre o investimento.

Referências

AYTUG, H.; LAWLEY, M. A.; MCKAY, K.; MOHAN, S.; UZSOY, R. Executing Production Schedules in the Face of Uncertainties: A Review and Some Future Directions. **European Journal of Operational Research**, [S. l.], v. 161, p. 86 – 110, 2005.

BAKER, K.R.; TRIETSCH, D. **Principles of sequencing and scheduling**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.

BEKTUR, G.; SARAÇ, T. **A mathematical model and heuristic algorithms for an unrelated parallel machine scheduling problem with sequence-dependent setup times, machine eligibility restrictions and a common server**. *Computers & Operations Research*, v. 103, p. 46–63, mar. 2019.

BRUN, A. et al. (2006) Value and risk assessment of supply chain management improvement projects. **International Journal of Production Economics**, v. 99, n. 1/2, p. 186-201.

CHEN, C. J. et al. (2013) Advanced planning and scheduling for TFT-LCD color filter fab with multiple lines. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 67, n. 1/4, p. 101-110.

CHEN, W-L.; HUANG, C-Y.; LAI, Y-C. (2009) Multi-tier and multi-site collaborative production: illustrated by a case example of TFT-LCD manufacturing. **Computers & Industrial Engineering**, v. 57, n. 1, p. 61-72

CHEN, Y. Impact assessment of job machine factors on scaling parameters. **Advanced materials Research**, v. 340, p. 23 – 29, 2012.

CROXTON, K. L. et al. (2002) The demand management process. **International Journal of Logistics Management**, v. 13, n. 2, p. 51-66.

CUBIDES, Á. M. J. et al. **Sistema de soporte de decisiones para la programación de producción de la empresa Café Ruta 45**. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, CO, 2019.

DAVID, F.; PIERREVAL, H.; CAUX, C. (2006) Advanced planning and scheduling systems in aluminium conversion industry. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 19, n. 7, p. 705-715.

- FACHIN, O. **Fundamentos de metodologia**. São Paulo: Saraiva. 2001.
- GEN, M.; LIN, L.; ZHANG, H. (2009) Evolutionary techniques for optimization problems in integrated manufacturing system: state-of-the-art-survey. **Computers & Industrial Engineering**, v. 56, n. 3, p. 779-808.
- GIACON, E.; MESQUITA, M. A. (2011) Levantamento das práticas de programação detalhada da produção: um survey na indústria paulista. *Gestão & Produção*, v. 18, n. 3, p. 487-498.
- KANG, P. S.; ERHART, A.; TODESCHINI, V.; DUFFY, A. Comparative Study of Two Scheduling Approaches to Resolve Scheduling: Problem for a Wire and Cable Manufacturing Process. **Advanced Manufacturing Processes and Mechatronics**, Centre Faculty of Technology, De Montfort University, UK, 2015.
- KRISHNAMURTI, Chandrasekhar; GUPTA, Kartick. Corporate social responsibility, competition, and firm value. *Pacific-Basin Finance Journal*, [S. l.], 2021.
- LEE, Y. H.; JEONG, C. S.; MOON, C. (2002) Advanced planning and scheduling with outsourcing in manufacturing supply chain. **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, n. 1/2, p. 351-374.
- LEE Y. H.; PINEDO M. Scheduling jobs on parallel machines with sequence- dependente setup times. **European Journal of Operational Research**, n. 100, p. 464–74, 1997.
- LIU, M. Design and Evaluation of Algorithms for Online Machine Scheduling Problems. **Ecole Centrale Paris** , [S. l.], 2010.
- MEYR, H.; WAGNER, M.; ROHDE, J. (2005) Structure of Advanced Planning Systems. In: STADTLER, H.; KILGER, C. (Eds.). *Supply Chain Management and Advanced Planning: concepts, models software and case studies*. **Third Edition. Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg New York**.
- NOAL, L. C. Sequenciamento de tarefas em sistemas de pintura balizado por heurísticas do tipo ATC. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2015.
- PFUND, M.; FOWLER, J. W.; GADKARI, A.; CHEN, Y. Scheduling jobs on parallel machines with *setup* times and ready times. **Computers & Industrial Engineering**, v. 54, n. 4, p. 764-782, 2008.

PINEDO, M. L. **Scheduling: Theory, Algorithms and Systems**. 3 ed. New York: Springer, 2008.

RACHAMADUGU, R.V., AND MORTON, T.E. Myopic heuristics for the single machine weighted tardiness problem. **Working Paper, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA**, v. 30, p. 82-83, 1982.

SARI, T., et al. Production planning and control in Industry 4.0: A review of recent advances in Industry 4.0, lean manufacturing, and computer-integrated manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 103, p. 4451–4467, 2019.

SERAFINI, L.; ANZANELLO, M. J.; KAHMANN, A. Heurística para minimização do atraso total de tarefas baseada em curvas de aprendizado e aspectos ergonômicos. **Revista Produção Online**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 550–574, 2016.

SETIA, P.; SAMBAMURTHY, V.; CLOSS, D. J. (2008) Realizing business value of agile IT applications: antecedents in the supply chain networks. **Information Technology and Management**, v. 9, n. 1, p. 5-19.

SIEMENS ADVANCE: Digital Enterprise - on the way to Industry 4.0. Revista Siemens: [s. n.], 2015.

SIEMENS. **Production planning in a complex supply chain: How advanced planning and scheduling can improve the performance of your supply chain**. E-book Siemens, 2022. Disponível em: <https://resources.sw.siemens.com/pt-BR/e-book-production-planning-in-a-complex-supply-chain>. Acesso em: 30 mar. 2023.

SLACK, N., et al. **Administração da Produção**. São Paulo, Atlas, 8 ed. 2018.

STADTLER, H. (2005) Supply chain management and advanced planning - basics, overview and challenges. **European Journal of Operational Research**, v. 163, n. 3, p. 575-588.

HVOLBY, H-H.; STEGER-JENSEN, K. (2010) Technical and industrial issues of Advanced Planning and Scheduling (APS) systems. **Computers in Industry**, v. 61, n. 9, p. 845-851.

XI, Y.; JANG, J. Scheduling jobs on identical parallel machines with unequal future ready time and sequence dependent setup: An experimental study. **International Journal of Production Economics**, v. 137, n. 1, p. 1-10, 2012.

ZHANG, Y., et al. An advanced planning and scheduling (APS) system for production optimization in manufacturing industry: A literature review. **Robotics and Computer - Integrated Manufacturing**, v. 68, p. 101976, 2021.