

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Lúcio Cantarelli Noal

**SEQUENCIAMENTO DE TAREFAS EM
SISTEMAS DE PINTURA BALIZADO POR
HEURÍSTICAS DO TIPO ATC (*APPARENT
TARDINESS COST*)**

Porto Alegre

2015

Lúcio Cantarelli Noal

**Sequenciamento de tarefas em sistemas de pintura balizado por heurísticas do tipo
*ATC (Apparent Tardiness Cost)***

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, modalidade Profissional, na área de concentração em Sistemas de Produção.

Orientador: Prof. Michel José Anzanello, *PhD*.

Porto Alegre

2015

Lúcio Cantarelli Noal

**Sequenciamento de tarefas em sistemas de pintura balizado por heurísticas do tipo
ATC (*Apparent Tardiness Cost*)**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção na modalidade Profissional e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Michel José Anzanello, PhD

Orientador PPGEP / UFRGS

Prof. José Luis Duarte Ribeiro

Coordenador PPGEP / UFRGS

Banca Examinadora:

Prof. Flávio Sanson Fogliatto, *Ph.D.* (PPGEP / UFRGS)

Prof. Guilherme Tortorella, Dr. (PPGEP / UFSC)

Prof. Ricardo Augusto Cassel, *Ph.D.* (PPGEP / UFRGS)

*“A Matemática é o alfabeto com
o qual Deus escreveu o Universo”*
Galileu Galilei

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha esposa, Mileni Denardin Portella, pelo apoio durante todo o desenvolvimento desse trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Michel José Anzanello, pela dedicação, disponibilidade, pelos conselhos e pela orientação no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas Daniel Pottker, Rodrigo Santos e Reno Schmidt, pelas conversas e discussões realizadas no decorrer deste trabalho.

Por fim, à Bruning Tecnometal, pela disponibilidade de recursos e não restrição de informações para construção deste trabalho.

RESUMO

A sobrevivência das organizações em cenários altamente competitivos tem exigido a melhoria da eficiência, flexibilidade e qualidade dos sistemas de produção (DE RON, 1998). Neste âmbito, a programação de tarefas assume grande responsabilidade ao suportar o planejamento e controle da manufatura, garantindo que estes processos estejam alinhados com os objetivos estratégicos das organizações. Esta dissertação aborda a programação de tarefas em sistemas de pintura com tempos de setup dependentes da sequência do processamento. No primeiro artigo é proposta uma sistemática para liberação do tamanho de lote que minimiza a soma dos custos de setup e pintura. Na sequência, os lotes liberados são sequenciados utilizando as regras *Apparent Tardiness Cost* (ATC) e *Apparent Tardiness Cost with Setups* (ATCS). Quando aplicado em processo de pintura, o ganho de eficiência da instalação medido através do *Overall Equipment Effectiveness* (OEE) foi de 32,84%. O segundo artigo propõe uma modificação na regra ATCS através da inclusão de um parâmetro relativo à qualidade de execução do procedimento de pintura. Tal parâmetro é justificado pelo impacto decorrente de falhas no processo de pintura, gerando atrasos de entrega. Esta nova heurística, quando aplicada no mesmo processo de pintura, elevou o OEE em 2,74%, a precisão de entrega em 2,11% e o percentual de embalagens completas ao final do processo de pintura em 8%.

Palavras-chave: programação de tarefas, sistema de pintura, tempos de *setup*, eficiência.

ABSTRACT

The competitive industrial scenarios required companies to improve efficiency, flexibility and quality of production systems (RON, 1998). In this context, job scheduling is deemed important to support planning and control of manufacturing systems. This dissertation addresses the scheduling problem in painting systems where setups depend on the job sequence. The first paper proposes an approach to release batches aimed at minimizing the sum of setup and painting costs. The released lots are scheduled using the Apparent Tardiness Cost (ATC) and Apparent Tardiness Cost with Setups (ATCS) rules. When applied to a painting process, the proposed approach increased efficiency measured by the Overall Equipment Effectiveness 32.84%. The second article proposes a modification to the ATCS rule by including a quality related parameter. This parameter is tailored to reduce delivery delays due to quality problems. This new heuristic, when applied to the same painting process, increased the OEE 2.74%, the delivery accuracy 2.11% and the percentage of completed packages at the end of the painting process 8%.

KeyWords: *assignments scheduling, coating system, times of setup, efficiency.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fluxograma da metodologia proposta	24
Figura 2.2 - Representação de tarefa, lote e subgrupo.....	25
Figura 2.3 - Curvas que ilustram custos de pintura e setup de acordo com a área a ser pintada	27
Figura 2.4 - Formação dos subgrupos	29
Figura 2.5 - Gráfico desempenho eficiência sistema de pintura.....	34
Figura 3.1 - Fluxograma do método proposto	50
Figura 3.2 - Curvas que ilustram custos de pintura e setup de acordo com a área ser pintada	52
Figura 3.3 - Formação dos subgrupos	55
Figura 3.4 - Comparação da eficiência (OEE) para regras testadas	63
Figura 3.5 - Comparação precisão de entrega para regras testadas	64
Figura 3.6 - Comparação percentual embalagens completas para as regras testadas.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Regras de sequenciamento usuais	20
Quadro 2.2 - Autores / regras sequenciamento.....	23
Quadro 2.3 - Tempo de setup entre cores	27
Quadro 2.4 - Área desperdiçada na realização do setup (m ²).....	28
Quadro 2.5 - Comparação ATC e ATCS.....	33
Quadro 3.1 - Regras de sequenciamento tipicamente abordadas pela literatura	42
Quadro 3.2 - Regras de sequenciamento do tipo ATC	45
Quadro 3.3 - Tempo de setup entre cores	53
Quadro 3.4 - Área desperdiçada na realização do setup (m ²).....	53
Quadro 3.5 - Arranjo genérico das tarefas e subgrupos, incluindo índice de qualidade médio Q	57
Quadro 3.6 - Sequência de entrada dos subgrupos.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Base de dados	31
Tabela 2.2 - Cálculo Área * (m ²).....	32
Tabela 2.3 - Conversão da área A* em tempo de processamento (horas).....	32
Tabela 2.4 - Lista de subgrupos.....	33
Tabela 3.1 - Tempo setup horas	59
Tabela 3.2 - Área perdida por setup (m ²)	59
Tabela 3.3 - Índice de qualidade por tarefa	60
Tabela 3.4 - Média do índice de qualidade por subgrupo	61

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 Considerações Iniciais	12
1.2 Justificativa do Tema.....	13
1.3 Objetivos.....	13
1.4 Procedimentos Metodológicos	14
1.5 Delimitações do Trabalho.....	14
1.6 Estrutura da Dissertação	14
1.7 Referências	15
2 PRIMEIRO ARTIGO	16
2.1 Introdução.....	17
2.2 Referencial Teórico	18
2.2.1 Apparent Tardiness Cost (ATC) e suas derivações	20
2.3 Método.....	24
2.3.1 Coleta de dados.....	25
2.3.2 Estimativa da área que minimiza os custos para liberação do lote.....	25
2.3.3 Conversão da área A^* em P (tempo de processamento)	28
2.3.4 Agrupar produtos por cor e data de entrega criando subgrupos	28
2.3.5 Ordenamento dos subgrupos via regras ATC e ATCS.....	29
2.3.6 Análise comparativa dos resultados	29
2.4 Estudo de Caso.....	30
2.5 Conclusão.....	34
2.6 Referências.....	36
3 SEGUNDO ARTIGO	38
3.1 Introdução.....	39
3.2 Referencial Teórico.....	40
3.2.1 Definições básicas de sequenciamento.....	40
3.2.2 Regras de despacho do tipo ATC – derivações e aplicações.....	43
3.3 Método de trabalho	49
3.3.1 Coleta de dados.....	50
3.3.2 Estimativa da área que minimiza os custos para liberação do lote.....	51
3.3.3 Conversão da área A^* em P (tempo de processamento)	54
3.3.4 Cálculo do índice de qualidade.....	54
3.3.5 Agrupamento dos produtos por cor e data de entrega incluindo o índice de qualidade.....	55
3.3.6 Cálculo das médias dos índices de qualidade dentro dos subgrupos.....	56
3.3.7 Ordenamento dos subgrupos via regras ATCS e ATCSQ.....	57
3.3.8 Análise comparativa dos resultados	58

3.4	Estudo de Caso.....	58
3.5	Conclusão.....	66
3.6	Referências.....	67
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71

1. Introdução

1.1 Considerações Iniciais

Organizações que operam em cenários altamente competitivos têm sido desafiadas a aprimorarem seus sistemas de produção em termos de eficiência, flexibilidade e qualidade (DE RON, 1998). A cadeia de consumo exige rápida resposta junto aos responsáveis pelo suprimento, fazendo com que a flexibilidade nos processos de manufatura acompanhe tal expectativa. A demanda é impulsionada, dentre outros fatores, pela alta customização dos produtos e pelos seus reduzidos ciclos de vida. Além disso, percebe-se a disponibilização de um maior número de opções de produtos, fator esse visto como uma característica desejada pelos clientes (DA SILVEIRA et al., 2001).

Conforme Slack et al. (2002) na maioria dos cenários produtivos, a fabricação de um item é iniciada mediante a confirmação de pedido do cliente. Tal ação decorre do crescente número de opcionais de um mesmo modelo, tipicamente definidos pelo cliente. De tal forma, empresas de diversos segmentos necessitam de uma programação de tarefas (sequenciamento) que permita atender eficientemente às necessidades dos clientes sem, no entanto, comprometer custos e eficiência dos equipamentos. Sistemas de produção carentes de sistemáticas de sequenciamento estruturadas normalmente comprometem seus níveis de precisão de entrega, eficiência e custos do processo.

Ferramentas consolidadas na literatura têm sido amplamente utilizadas no sequenciamento de tarefas. Uma das sistemáticas mais simples consiste em considerar a sequência de ordens de chegada, ou seja, o primeiro a chegar é o primeiro a sair. Tal método, no entanto, pode não atender às necessidades dos clientes, podendo gerar atrasos nas entregas, bem como alternar períodos ociosos e de acúmulo de serviço. Limitações no sequenciamento de tarefas produtivas podem trazer dificuldades e prejuízos para empresas de diversos segmentos. O não atendimento dos prazos de entrega, custos dissonantes em relação ao planejado e a perda de eficiência dos equipamentos acarretam problemas de competitividade, justificando o elevado volume de estudos devotados à programação de tarefas em ambientes industriais. Tal situação não é diferente em empresas fornecedoras de peças metálicas a montadoras, onde o impacto dos custos de estoque de matéria-prima, operacionais e de armazenamento são tipicamente elevados e influenciados pelo sequenciamento adotado.

1.2 Justificativa do Tema

Em virtude dos elevados níveis competitivos, as organizações estão continuamente procurando novas ferramentas para redução de custos produtivos e aumento da eficiência operacional. Além disso, a cadeia de consumo exige rápida resposta junto aos responsáveis pelo suprimento, fazendo com que a flexibilidade nos processos de manufatura acompanhe tal expectativa. Essa demanda é impulsionada, dentre outros fatores, pela alta customização dos produtos e por seus reduzidos ciclos de vida. De tal forma, as empresas dependem de sistemáticas de sequenciamento precisas, que permitam atender às necessidades dos clientes sem, no entanto, comprometer custos e eficiência dos equipamentos.

No contexto prático, este estudo se justifica pelos impactos negativos decorrentes da ausência de sistemáticas estruturadas de sequenciamento no ambiente em análise. Tal situação acarreta grande índice de atraso nas entregas e constante necessidade de retrabalho. Verifica-se ainda discrepância entre a eficiência teórica planejada e a eficiência real do processo de pintura.

No âmbito teórico, o tema aqui abordado se justifica pela ausência de heurísticas para programação de tarefas que abordem aspectos de qualidade em suas formulações. Entende-se como fundamental, no sistema em questão, que fatores associados à qualidade de execução dos procedimentos influenciem na ordem de pintura dos lotes, visto que lotes problemáticos devem ser priorizados por conta do risco de atraso.

1.3 Objetivos

O objetivo geral desta dissertação consiste em sequenciar tarefas em sistemas de pintura através de heurísticas do tipo ATC (*Apparent Tardiness Cost*).

Os objetivos específicos desta dissertação são:

- (i) avaliar o estado da arte das regras do tipo ATC em termos de derivações e aplicações;
- (ii) propor uma modelagem analítica para definir um tamanho de lote que minimize os custos de setup e pintura; e
- (iii) propor uma modificação na tradicional regra ATC através da inclusão de um parâmetro de qualidade associado ao processo de pintura.

O desempenho da modificação proposta em (iii) é comparado com as regras de ATC e ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) em termos de pontualidade de entrega, eficiência da instalação e percentual de embalagens completas.

1.4 Procedimentos Metodológicos

A presente dissertação visa sequenciar tarefas em um sistema de pintura através das regras de despacho ATC e ATCS. A revisão bibliográfica tem por objetivo levantar a fundamentação teórica em relação ao tema assumido. Assim, foram pesquisadas publicações de periódicos nacionais e internacionais, bem como livros focados em sequenciamento de tarefas, dentre os quais Pinedo (2008) e Morton e Pentico (1993).

No primeiro artigo deriva-se uma relação para definição do tamanho de lote que minimiza os custos de setup e pintura. Uma vez liberados para pintura, tais lotes são sequenciados através das heurísticas ATC e ATCS.

O segundo artigo apresenta uma nova heurística de sequenciamento que insere um fator de qualidade na regra ATCS com vistas ao aprimoramento da programação de tarefas em sistemas de pintura. O desempenho desta nova regra foi validado através de 3 indicadores de processo: OEE, precisão de entrega e percentual de embalagens completas ao final do processo de pintura.

1.5 Delimitações do Trabalho

A sistemática proposta não aborda sistemas sujeitos a tempos estocásticos de processamento e setup. Além disso, as heurísticas utilizadas restringem-se a minimizar o tempo de atraso do sistema, não endereçando outras funções objetivo tipicamente analisadas em processos de sequenciamento.

1.6 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por quatro capítulos. O primeiro capítulo contém a introdução do tema, relevância, contribuição do trabalho, objetivos e justificativas, o método,

a estrutura e as limitações.

O segundo capítulo apresenta o primeiro artigo da dissertação, o qual desenvolve uma análise comparativa entre os métodos de programação de tarefas (ACT e ACTS) com intuito de minimizar o atraso total e analisar a eficiência da instalação. Também é derivada uma relação para definição do tamanho de lote que minimiza os custos de setup e pintura.

O terceiro capítulo compreende o segundo artigo da dissertação, o qual propõe a inserção de um parâmetro de qualidade na formulação da regra ATCS, originando a regra *Apparent Tardiness Costs with Setup and Quality Issues* (ATCSQ). Por fim, compara-se o desempenho das regras ATC, ATCS e ATCSQ no ambiente proposto em relação aos indicadores de precisão de entrega, eficiência da instalação e percentual de embalagens completas dentro do processo.

O quarto capítulo apresenta as conclusões e oportunidades de pesquisas futuras em continuidade ao trabalho atual.

1.7 Referências

DA SILVEIRA, G., BORESTEIN, D., FOGLIATTO, F. S Mass customization: Literature review and esearch direction. **International Journal of Production Economics**, v. 72, p. 1-13, 2001.

DE RON, A. J. Sustainable Production: the Ultimate Result of a Continuous Improvement. **International Journal of Production Economics**, v. 56-57, p. 99-110, 1998.

LEE, Y. H. & PINEDO, M. *Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times*. **European Journal of Operational Research** 100 464-474, 1997.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

2 PRIMEIRO ARTIGO

SISTEMÁTICA PARA SEQUENCIAMENTO DE PRODUÇÃO COM BASE NA HEURÍSTICA *APPARENT TARDINESS COST* (ATC)

Resumo

*Este artigo apresenta uma sistemática para sequenciamento de lotes de produção em uma linha de pintura líquida da empresa Bruning Tecnometal Ltda. Para tanto, inicialmente propõe-se uma formulação para liberação de lotes a serem sequenciados com vistas à minimização da soma dos custos de setup e pintura. Os lotes liberados são então sequenciados utilizando a heurística *Apparent Tardiness Cost (ATC)* e uma variação que inclui o tempo de setup na formulação (*ATCS – Apparent Tardiness Cost with Setups*). Os resultados obtidos mostram a regra *ATCS* como melhor alternativa para sequenciamento de lotes de produtos, a qual aumentou substancialmente o desempenho do sistema avaliado através do *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*.*

Palavras-chaves: *Sequenciamento; Sistema de pintura; ATC*

Abstract

This paper proposes an approach aimed at scheduling production batches in a liquid paint line company. For that matter, we initially propose a formulation for batches releasing tailored to minimize the sum of setup and painting costs. Lots released are then scheduled using the *Apparent Tardiness Cost (ATC)* heuristic and a variation that includes the setup time in the formulation (*ATCS - Apparent Tardiness Cost with Setups*). The results suggest the *ATCS* rule as the best alternative to schedule production batches given its superior performance assessed through the *Overall Equipment Effectiveness (OEE)*.

Keywords: *Scheduling; coating system; ATC*

2.1 Introdução

Em virtude dos elevados níveis competitivos, as organizações estão continuamente procurando novas ferramentas para redução de custos produtivos e aumento da eficiência operacional. Além disso, a cadeia de consumo exige rápida resposta junto aos responsáveis pelo suprimento, fazendo com que a flexibilidade nos processos de manufatura acompanhe tal expectativa. Essa demanda é impulsionada, dentre outros fatores, pela alta customização dos produtos e por seus reduzidos ciclos de vida, os quais fazem com que o lançamento de novos modelos ocorra em um tempo menor impulsionadas por ações cada vez mais agressivas de marketing (TRAPERO et al.; 2013).

Em diversos cenários produtivos, a fabricação de um item é iniciada mediante a confirmação de pedido do cliente. Tal estratégia decorre do crescente número de opcionais e variáveis dentro de um mesmo modelo. De tal forma, as empresas dependem de uma programação de tarefas (sequenciamento) bastante precisa, a qual permita atender às necessidades dos clientes sem, no entanto, comprometer custos e eficiência dos equipamentos (MOON; MENTZER; SMITH, 2003).

Tipicamente, ferramentas consolidadas na literatura podem ser utilizadas para sequenciar tarefas. Uma das sistemáticas mais simples consiste em considerar a sequência de ordens de chegada, ou seja, o primeiro a chegar é o primeiro a sair – FIFO (*First in First out*). Tal sistemática, no entanto, pode não atender às necessidades dos clientes, podendo gerar atrasos nas entregas, bem como alternar períodos ociosos e de acúmulo de serviço. Limitações no sequenciamento de tarefas produtivas podem trazer dificuldades e prejuízos para empresas de diversos segmentos. O não atendimento dos prazos de entrega, custos dissonantes em relação ao planejado e a perda de eficiência dos equipamentos acarretam problemas de competitividade, justificando o elevado volume de estudos devotados à programação de tarefas em ambientes industriais. Tal situação não é diferente em empresas fornecedoras de peças metálicas a montadoras, onde o impacto dos custos de estoque de matéria-prima, operacionais e de armazenamento são tipicamente elevados e influenciados pelo sequenciamento adotado.

Este artigo propõe a aplicação de regras do tipo *Apparent Tardiness Cost* (ATC) para o sequenciamento da produção em linhas de pintura, e está fundamentado em duas etapas. Na primeira, estima-se a área mínima em cada cor de maneira a minimizar os custos decorrentes de setup; tal abordagem é operacionalizada através de uma relação analítica de custos e subsequente derivação. Na segunda etapa, os lotes liberados pela primeira etapa são

sequenciados utilizando a regra ATC e ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*). Para tanto, os parâmetros a serem coletados incluem data de entrega, priorização subjetiva de determinados pedidos e tempo de *setup* associado a trocas de cores. A metodologia proposta busca minimizar o atraso dos prazos de entrega.

Este artigo encontra-se estruturado em cinco seções, incluindo a presente introdução. A seção 2 traz uma revisão teórica sobre métodos de sequenciamento de produção. Na seção 3 descreve-se o método proposto para determinar o sequenciamento das tarefas produtivas, enquanto que a seção 4 apresenta um estudo de caso de sequenciamento onde busca-se a minimização do atraso de entrega em linhas de pintura de componentes. Na seção 5 são apresentados os resultados e considerações finais do trabalho.

2.2 Referencial Teórico

Chambers e Johnston (2002) afirmam que o planejamento e controle da produção deve garantir que os processos ocorram de forma eficaz e eficiente, gerando produtos e serviços conforme requisição dos consumidores. Dentre as diversas ferramentas utilizadas no controle de produção, destacam-se as sistemáticas para sequenciamento de tarefas produtivas.

Pinedo (2008) descreve o sequenciamento como um processo que visa definir a melhor sequência de processamento das tarefas, gerenciando a escassez de recursos ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de um processo de tomada de decisão com o objetivo de otimizar objetivos estabelecidos, os quais tipicamente incluem: (i) Makespan – tempo total da programação de tarefas; (ii) Mean flow-time – tempo médio de duração do fluxo; (iii) Total flow-time – tempo total de duração do fluxo; (iv) Mean tardiness – atraso médio do fluxo de tarefas; (v) Maximum tardiness – máximo do atraso na conclusão de tarefas; (vi) Tardiness – soma das penalidades de atraso, e (vii) Earliness – adiantamento. Pacheco e Santoro (1999) incluem aspectos tidos como fundamentais na elaboração do sequenciamento: atendimento aos prazos estabelecidos, redução do tempo de fluxo e otimização da utilização da capacidade disponível. Backer (1974) corrobora com a ideia de que o sequenciamento visa alocar recursos no tempo necessário para executar um conjunto de processos, enquanto Herrmann (1984) afirma que uma das etapas mais importantes do processo consiste em estabelecer qual tarefa deverá ser realizada primeiro e com quais recursos. Neste sentido, o sequenciamento de ordens é o processo de decisão associado à definição de prioridades acerca da entrada de itens em um centro de trabalho (TUBINO, 2007). Por fim, Slack et al. (2002) acrescentam que,

independentemente da abordagem de carregamento (finita ou infinita), quando os trabalhos chegam, decisões necessitam ser tomadas referentes ao ordenamento destes trabalhos no sistema. Tais decisões podem se tornar complexas, gerando lentidão junto ao processo de tomada de decisão.

Corrêa e Corrêa (2006) relatam que, por longo período, a pesquisa sobre sequenciamento de produção concentrou esforços em descobrir a regra de sequenciamento mais eficaz, ou seja, qual a regra mais eficiente para o tema e situação propostos. À medida que os estudos foram aprofundados, ficou claro que os problemas de sequenciamento têm mais de um objetivo, o que tornou a tarefa complexa e dificultou as avaliações. Os autores concluíram que não existe uma regra unânime que solucione todos os problemas de sequenciamento, maximizando o desempenho do sistema em todos os aspectos e objetivos. Pesquisas recentes sugerem a utilização de uma combinação de sistemas computacionais, a fim de solucionar problemas de sequenciamento que tenham mais de um objetivo (multiobjetivo).

No entanto, Herrmann (2006) aponta que nem todas as empresas aproveitam as vantagens dos avanços no sistema de sequenciamento. Esse fator pode ser facilmente relacionado à alta complexidade associada aos problemas e à dificuldade de operacionalização destas abordagens nas rotinas operacionais.

Os objetivos do sequenciamento normalmente estão associados a Regras de Priorização. Conforme Tubino (2007), essas regras pertencem a um procedimento simplificador que leva em consideração informações sobre tarefas e sobre as condições do sistema produtivo; visa-se então selecionar as tarefas que terão prioridade de processamento, assim como o recurso deste grupo encarregado de sua execução. Diversas regras de sequenciamento foram desenvolvidas com o intuito de minimizar a diferença de tempo entre o início e o término de uma sequência de trabalhos ou tarefas, como ilustrado no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Regras de sequenciamento tipicamente utilizadas em aplicações práticas

Regras de sequenciamento	
Sigla	Definição
CR	<i>Critical Ratio</i> - razão crítica, calculada como "tempo até a data prometida dividido pelo tempo total de operações restantes"
DS	<i>Dynamic Slack</i> - folga dinâmica, calculada como "folga estática dividida pelo número de operações por executar"
EDD	<i>Earliest Due Date</i> - a tarefa com a data prometida mais próxima é processada antes
FIFO	<i>First In First Out</i> - primeira tarefa a chegar ao centro de trabalho é a primeira a ser atendida
FSFO	<i>First in the System, First Out</i> - primeira tarefa a chegar à unidade produtiva é a primeira a ser atendida (FCFS - <i>First Come, First Served</i>)
LWKR	<i>Least Work Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a menor quantidade de tempo de operação remanescente para conclusão
MOPNR	<i>Most Operations Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a maior quantidade de operações sucessoras
MWKR	<i>Most Work Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a maior quantidade de tempo de operações remanescentes para conclusão
RANDOM	A priorização ocorre de modo aleatório
SPT	<i>Shortest Processing Time</i> - tarefa com o menor tempo de operação no centro de trabalho é a primeira a ser atendida
SPT1	Mesma SPT, mas com limitante de tempo de espera para evitar que ordens longas esperem muito
SS	<i>Static Slack</i> - folga estática, calculada como "tempo até a data prometida menos tempo de operação restante"

Fonte: Adaptado de Corrêa e Corrêa (2006)

Além das regras associadas à priorização, regras de despacho do tipo *Apparent Tardiness Cost* (ATC) são amplamente utilizadas em aplicações de sequenciamento. Tais regras são detalhadas na sequência.

2.2.1 Apparent Tardiness Cost (ATC) e suas derivações

Dentre as diversas formulações para sequenciamento de produção, destacam-se as do tipo “regra de despacho”. Segundo Sun e Noble (1999), esta família de regras possui grande aplicabilidade devido à simplicidade matemática e eficiência quando comparadas a outras técnicas (normalmente complexas e dependentes de grande processamento computacional).

Segundo Pinedo (1995), regras de despacho podem ser classificadas em dois grupos: (i) regras estáticas – não dependentes do tempo, e sim de outros fatores no processo, como características do trabalho ou máquina; nesta regra, a prioridade é a mesma desde a chegada até o encaminhamento ao posto de trabalho; e (ii) regras dinâmicas – dependem do fator

tempo, e o trabalho é baseado em prioridades diferenciadas, ou seja, trabalha com maior ou menor prioridade em relação às demais tarefas que necessitam ser executadas. O autor complementa ao classificar as regras de despacho em locais e globais. As regras locais são mais simples e definidas pelo ordenamento junto a uma fila de trabalho, enquanto que as regras globais são consideradas as próximas operações pelas quais as tarefas irão passar.

Como mencionado anteriormente, regras de despacho possuem boa aplicabilidade e resultados satisfatórios quando aplicadas em problemas com objetivo único - usualmente a minimização do atraso de um conjunto de tarefas (Pinedo, 2008). Para atender às demandas práticas, surgiram as regras de despacho compostas, as quais são definidas como formulações que concatenam regras de despacho elementares, sendo ponderadas através de parâmetros de escala (PINEDO, 2008). Dentro deste contexto, Vepsalainen e Morton (1987) criam uma regra de despacho composta chamada de ATC (*Apparent Tardiness Cost*), a qual é composta pela heurística WSPT (*Weighted Shortest Processing Time*, aplicada quando o objetivo é a priorização das atividades com menor tempo de processamento) e pela heurística MS (*Minimum Slack*), na qual o elemento principal é a priorização das atividades com menor folga. O ATC é apresentado na equação (1), onde I_j é o índice de priorização da tarefa j no tempo t .

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_p}\right) \quad (1)$$

Na equação (1), ω_j é o peso (subjetivo e definido pelo decisor) que descreve a priorização de uma tarefa j , p é o tempo de processamento da tarefa j e d o prazo de execução da tarefa j ; e K_p é um parâmetro de escala determinado empiricamente. Pinedo (1995) descreve que o peso ω_j pode representar, por exemplo, o custo de manter a tarefa no sistema ou o valor já adicionado a ele. Portanto, para atingir sequenciamentos satisfatórios, o valor de K_p deve ser ajustado a cada tipo de problema através de uma análise estatística.

Apesar da sua ampla utilização, a regra ATC não contempla processos sujeitos a tempos de setup (tempo de preparação), fazendo com que Lee (1997) propusesse a inserção do tempo de setup na formulação, gerando a regra ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*) na equação (2). Nesta combinação, o tempo de setup influencia no ordenamento das prioridades, priorizando as tarefas cujo tempo de setup seja mais reduzido.

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{lj}}{K_{2s}}\right) \quad (2)$$

Os parâmetros são os mesmos da equação (1), acrescentando-se o δ_{lj} , tempo de setup gerado pela transição da tarefa l à tarefa j , e K_{2s} , uma constante empiricamente definida. Na equação (2), o primeiro termo exponencial trata da folga de entrega das tarefas, enquanto que o segundo aborda os tempos de preparação.

Com base nesta proposição, outros desdobramentos e adaptações da regra ATCS a aplicações específicas foram propostos para customizar a formulação ao objetivo proposto. Yue e Jaejin (2012) propõem uma customização da regra ATCS a fim de minimizar o tempo total de atraso em máquinas idênticas paralelas com tempo de setup desiguais. Esta variação foi intitulada ATCSSR (*Apparent Tardiness Cost with Separable Setup and Ready time*), e visa abordar o problema de setups dependentes e contínuos [conforme a equação (3)]. Os resultados em Yue e Jaejin (2012) comprovam que, no caso de máquinas paralelas idênticas, a regra ATCSSR traz um ganho de desempenho se comparado às regras ATC e ATCS.

$$I_{ATCSSR(t,l,j)} = \frac{\omega_j}{p_j + \max(s_{ij}, r_j - t)} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - \max(r_j, t + s_{ij}), 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{lj}}{K_{2p}}\right) \exp\left(\frac{\max(r_j - t - s_{ij}, 0)}{K_{3p}}\right) \quad (3)$$

Por sua vez, Rene e Lars (2011) sugerem a regra ATCSR (*Apparent Tardiness Cost with Setups and Ready Times*) [equação (4)], com o objetivo de atender a demanda de sequenciamento de produção em máquinas paralelas idênticas, porém com sequência dependente do tempo de setup. Esta pesquisa aborda problemas de programação de máquinas paralelas com manuseio de material automatizado, nos quais os tempos de preparação são dependentes da sequência e verificam-se restrições de precedência.

$$I_j(t, l) = \frac{\omega_j}{\rho_j \cdot e^{\left\{-\frac{\max(d_j - \rho_j - t, 0)}{k_{1\rho}}\right\}} \cdot e^{\left\{-\frac{\max(D_j - \rho_j - t, 0)}{k_{2\rho}}\right\}} \cdot e^{\left\{-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k_{3\rho}}\right\}} \cdot \left\{\frac{\max(D_j - \rho_j - t + \varepsilon, 0)}{(D_j - \rho_j - t + \varepsilon)}\right\}} \quad (4)$$

As alterações acima, bem como proposições adicionais e seus contextos de aplicação, são resumidas no Quadro 2.2 e discutidas abaixo.

Quadro 2.2 - Autores / regras sequenciamento

Autores	Regras	Aplicação
Rachamadugu and Morton (1982)	ATC	Máquina única
Lee et al. (1997); Lee and Pinedo (1997)	ATCS	Máquina única / Máquinas Paralelas
Vepsäläinen and Morton (1987)	MATC	Fluxo fábrica
Pfund et al. (2008)	ATCSR	Máquinas Paralelas
Yue and Jang (2011)	MATCSR, ATCSSR	Máquina única

Fonte: Adaptado de Yue X., and Jang, J.J., 2012

Em termos de aplicações práticas, Driessel e Monch (2011) estudaram os problemas de sequenciamento via ATC e derivações em máquinas idênticas paralelas em uma fábrica de equipamentos eletrônicos semicondutores; tal sistema apresentava restrições de tempos de processamento diferentes entre as tarefas, tempos de setup variáveis e relações de precedência. Ceyda *et al.* (2010) propuseram uma sistemática para aceitação de pedidos de fabricação junto a decisões de sequenciamento de produção em um ambiente de máquina única. No mesmo estudo, apresenta-se uma variação da regra ATC com capacidade de receber até 15 ordens simultâneas, a qual conduz a um sequenciamento com resultados considerados satisfatórios pelos autores.

Bang e Kim (2011) sugeriram uma heurística de sequenciamento baseada em ATC na fabricação de semicondutores, os quais passam em várias máquinas com diferentes tempos de processamento. O objetivo deste trabalho é minimizar o tempo total de atraso dos pedidos programados. Com propósitos semelhantes, Kurz e Askin (2001) apresentaram uma programação inteira e um procedimento heurístico para minimizar a soma dos tempos de conclusão de todos os trabalhos em máquinas paralelas idênticas. Esta heurística primeiramente aloca as tarefas às máquinas, e após determina o sequenciamento ótimo dos trabalhos de cada uma das máquinas através do problema do mochileiro (salesman problem). Por sua vez, Munoz *et al.* (2005) propuseram uma heurística para atribuir tarefas de forma iterativa com o mínimo de ajustes nos tempos de processo (soma tempo de processo e tempo de setup).

Similarmente, Kim *et al.* (2003) testaram quatro variações do ATC: a primeira considerando o peso por data, o menor tempo de processamento, sequenciamento de dois níveis por batelada e o sequenciamento através da simulação do método de “annealing”; em

tais experimentos, a simulação de “annealing” se mostrou mais eficiente que as demais heurísticas. Com propósitos semelhantes, Chen (2009) propuseram um método híbrido de sequenciamento para máquinas paralelas não relacionadas. Primeiramente é utilizado o ATCS para gerar uma solução inicial; na sequência, aplica-se a simulação de “annealing” a fim de melhorar os resultados. O autor conclui que o método de “annealing” aprimora os resultados gerados pela ATCS. Por fim, Yue e Jaejin (2012) descrevem a aplicação da regra ATC a sistemas produtivos que possuem máquinas idênticas em paralelo. Neste experimento, são propostas as regras MATCSR (*Modified Apparent Tardiness Cost with Setup and Ready Time*) e ATCSSR (*Apparent Tardiness Cost with Separable Setup and Ready Time*); tais regras possuem melhor desempenho no sequenciamento de máquinas paralelas idênticas em relação à regra ATC básica.

2.3 Método

O método proposto visa inicialmente definir um tamanho de lote (representado pela área total a ser pintada) que minimize a soma dos custos de setup e pintura; na sequência, objetiva sequenciar as tarefas (lotes) com vistas à minimização do atraso total. A Figura 2.1 apresenta as etapas propostas, as quais são detalhadas na sequência.

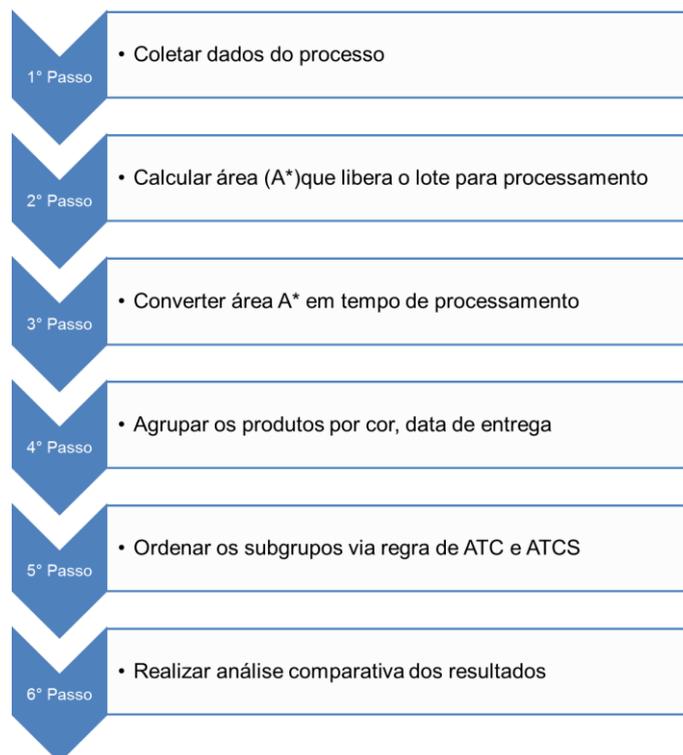


Figura 2.1 - Fluxograma dos passos propostos

2.3.1 Coleta de dados

A etapa inicial consiste em coletar e organizar os dados necessários para aplicação da heurística de sequenciamento. Esses dados são: (i) custo do metro quadrado (m^2) para cada uma das tintas, (ii) custo do setup da instalação, (iii) tempos de processamento e tempos de setup, (iv) lista de tarefas a serem processadas, (v) data de entrega de cada tarefa, e (vi) custo da mão de obra envolvida no processo. Define-se como tarefa o processamento individual de cada peça pelo sistema de pintura, lote como o agrupamento de tarefas de mesma cor e subgrupo como o agrupamento de vários lotes. Essas definições estão ilustradas na Figura 2.2.

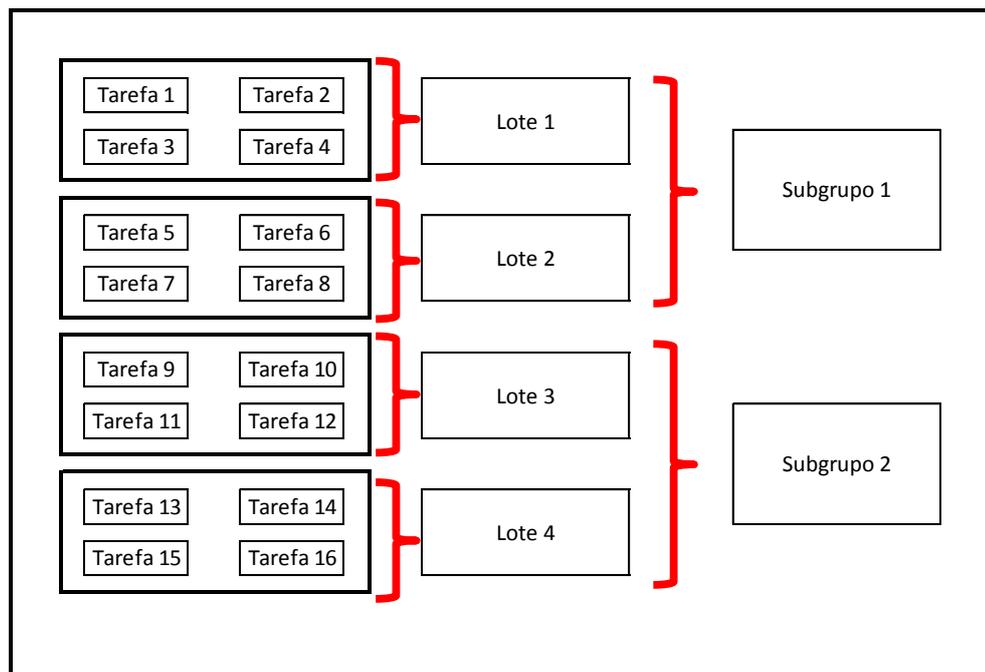


Figura 2.2 - Representação de tarefa, lote e subgrupo

2.3.2 Estimativa da área que minimiza os custos para liberação do lote

O critério para liberação de um lote de tarefas para processamento é definido pela obtenção da área que minimiza a soma dos custos de pintura e setup. Para realizar a estimativa de tal área em metros quadrados (m^2), é necessário calcular o custo total do m^2 pintado (C) e comparar com o custo de setup dessa determinada cor (S). Cada uma das cores possui uma área diferente de liberação devido à diferença de custo entre as tintas e às distintas demandas em termos de setup.

O custo total pintado é apresentado através da equação (5), na qual cf corresponde ao custo industrial fixo da instalação, contemplando os gastos gerais de fabricação mão de obra, h o custo da tinta e A o número de metros quadrados (m^2) a serem processados.

$$C = (cf) + (h * A) \quad (5)$$

O custo do setup (S) é o produto do custo da instalação no tempo em que a mesma fica parada pelo custo do m^2 que deixou de ser produzido no tempo do setup, dividido pelo número de m^2 processados. A equação (6) traz o custo do setup, onde μ é o custo da instalação no tempo da parada, δ é o custo da pintura por m^2 a ser pintado e A é a quantidade de m^2 processados. Logo, quanto maior o número de m^2 a ser processado menor será a incidência de custo do setup em cada uma das tarefas processadas.

$$S = \frac{(\mu * \delta)}{A} \quad (6)$$

A Figura 3.3 representa o perfil genérico de variação dos custos de pintura e de setup, no qual o eixo Y representa a área processada e o X o custo da pintura. A reta (C) apresenta o custo total do m^2 pintado, abordado através da equação (5), e a curva S é o custo de setup representado pela equação (6). O custo do setup é diretamente proporcional ao número de m^2 pintados. A interseção dessas linhas aponta área A^* , que representa o critério de liberação do lote para processamento. Nesse momento, os custos planejados para a realização do setup estão equilibrados e coerentes com o custo orçado. É importante enfatizar que, nas proposições desse artigo, cada cor possui um conjunto próprio de curvas de custo e setup, visto que cada tinta tem seu custo próprio, bem como demanda específica de tempo de preparo.

A equação (7) apresenta a formulação matemática da equação de A^* , obtida através da soma e derivação em A das equações (5) e (6).

$$A^* = \sqrt{\frac{(\mu * \delta)}{(cf + h)}} \quad (7)$$

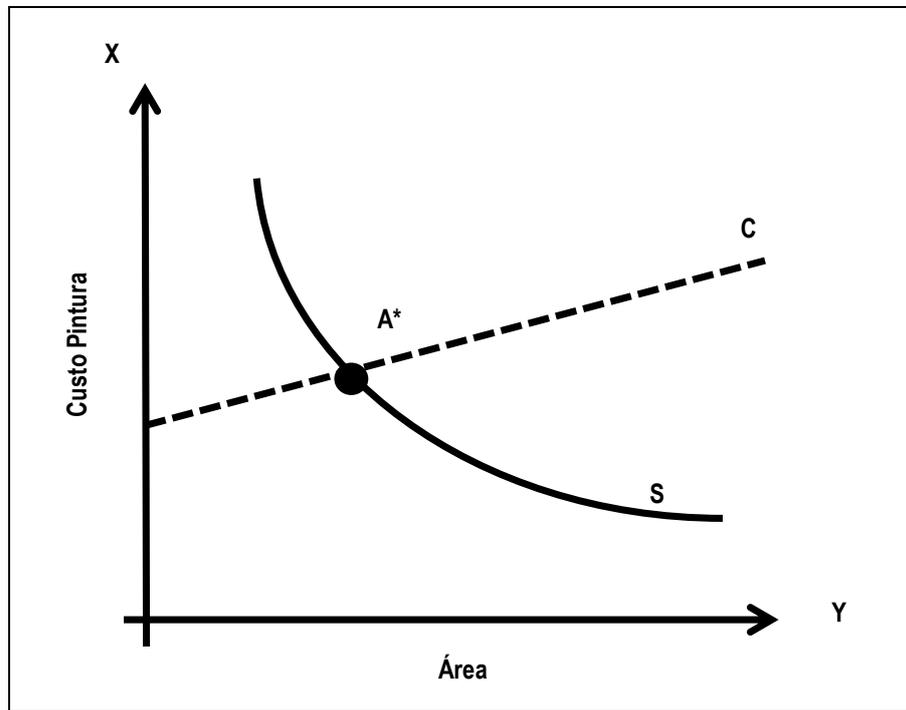


Figura 2.3 - Curvas que ilustram custos de pintura e setup de acordo com a área a ser pintada

Tendo em vista que o setup depende da sequência de cores, é necessária a elaboração de uma matriz de setup que apresente o tempo para realização do procedimento de acordo com a cor de partida e chegada (Quadro 2.3); tais valores equivalem ao μ da equação (6).

Quadro 2.3 - Tempo de setup entre cores

<i>Tempo Necessário para Set Up (horas)</i>						
	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Cor 5	Cor 6
Cor 1		t1	t1	t1	t1	t1
Cor 2	t2		t2	t2	t2	t2
Cor 3	t3	t3		t3	t3	t3
Cor 4	t4	t4	t4		t4	t4
Cor 5	t5	t5	t5	t5		t5
Cor 6	t6	t6	t6	t6	t6	

O Quadro 2.4 refere-se à quantidade de m² necessários para realização do setup entre cores. Em termos práticos, tal área representa o número de m² desperdiçados no processo,

tendo-se em vista que o processo de setup na pintura é interno, ou seja, realizado com a instalação parada. Dentre as atividades realizadas no processo estão limpeza da cabine, troca de mangueiras de tinta e preparação da próxima tinta. Tal área é estimada em m^2 através da equação (8), onde t_1 representa o tempo para realização do setup entre as cores 1 e 2, e δ representa a constante de capacidade de pintura.

$$m^2 = t * \delta \quad (8)$$

Quadro 2.4 - Área desperdiçada na realização do setup (m^2)

<i>m^2 necessários para Set Up (m^2)</i>						
	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Cor 5	Cor 6
Cor 1		m^2_1	m^2_1	m^2_1	m^2_1	m^2_1
Cor 2	m^2_2		m^2_2	m^2_2	m^2_2	m^2_2
Cor 3	m^2_3	m^2_3		m^2_3	m^2_3	m^2_3
Cor 4	m^2_4	m^2_4	m^2_4		m^2_4	m^2_4
Cor 5	m^2_5	m^2_5	m^2_5	m^2_5		m^2_5
Cor 6	m^2_6	m^2_6	m^2_6	m^2_6	m^2_6	

2.3.3 Conversão da área A^* em P (tempo de processamento)

Com a estimativa da área que libera o lote de cada cor para processamento, faz-se a conversão da área para tempo de processamento (em horas); tais tempos são inseridos nas equações do ATC e ATCS. É importante enfatizar que cada área servirá como critério de liberação para início da atividade de pintura e para os conjuntos de tarefas pertencentes a cada cor.

2.3.4 Agrupar produtos por cor e data de entrega criando subgrupos

A Figura 2.4 ilustra o procedimento de formação dos subgrupos: primeiramente são agrupadas tarefas de acordo com a cor da tinta, seguido pela data de entrega, dando origem aos lotes e subgrupos. Tendo em vista que a sistemática proposta visa sequenciar subgrupos de lotes, é necessário transcrever as informações dos dados das tarefas até os subgrupos. A formação dos subgrupos é importante para que se respeite a área mínima de liberação do lote, que visa reduzir o número de setups realizados junto à pintura e também mantém os custos dentro do planejado.

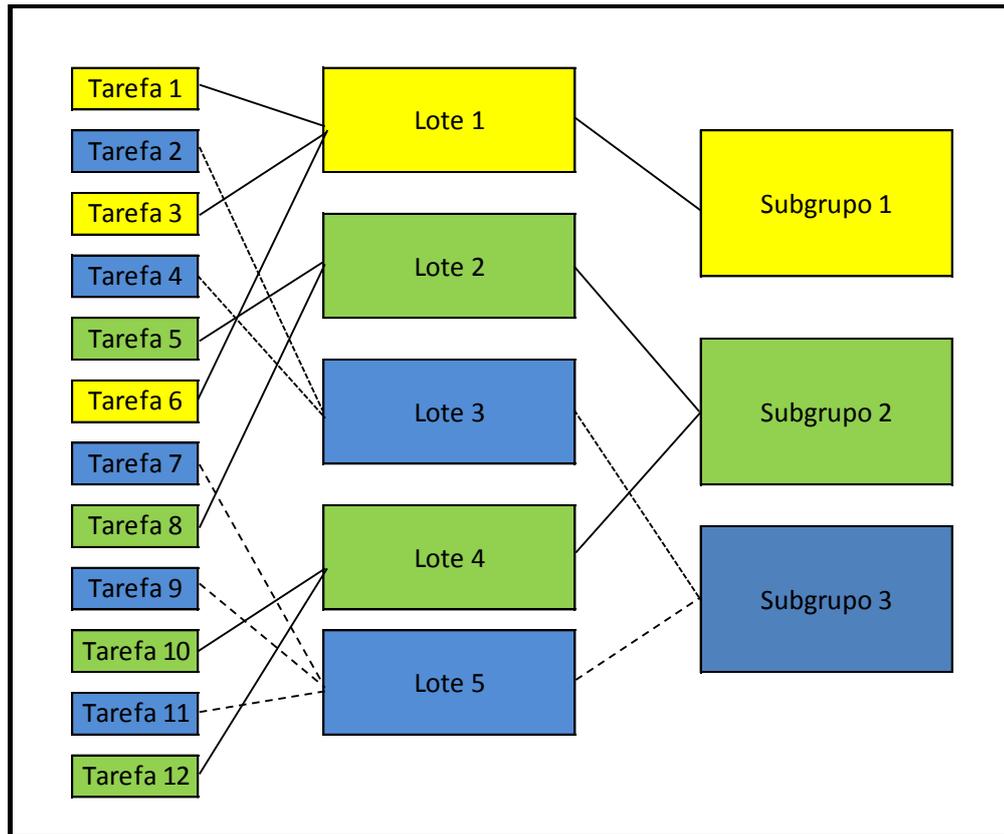


Figura 2.4 - Formação dos subgrupos

2.3.5 Ordenamento dos subgrupos via regras ATC e ATCS

O quinto passo da metodologia consiste na aplicação das regras ATC e ATCS em todos os subgrupos. Obtém-se como resultado a ordem sugerida de processamento dos subgrupos, bem como o valor da função-objetivo gerada. Quanto maior o valor do indicador $I_j(t)$ do subgrupo [ver equações (1) e (2)], maior sua priorização para processamento.

2.3.6 Análise comparativa dos resultados

Por fim, realiza-se a comparação dos resultados obtidos pelas heurísticas ATC e ATCS com a sistemática atualmente utilizada pela empresa para sequenciamento dos

subgrupos. Para tanto, será utilizado o indicador de OEE (*Overall Equipment Effectiveness*) referente à eficiência da instalação frente à utilização de cada uma das regras testadas. Este indicador é definido como o produto da disponibilidade, desempenho e qualidade das tarefas as quais estão sendo produzidas.

2.4 Estudo de Caso

O estudo de caso foi conduzido na empresa Bruning Tecnometal, cuja principal atividade consiste na fabricação de componentes para os mercados automotivo, rodoviário, agrícola e construção civil. Em um primeiro momento, os produtos são desenvolvidos e projetados pelos clientes. Depois, a empresa elabora o processo de fabricação desses produtos, definindo os meios necessários para tal. Toda a tecnologia da empresa está voltada para o desenvolvimento do processo de fabricação e não para o desenvolvimento de novos produtos.

A sistemática proposta foi aplicada em uma linha de pintura líquida, na qual são pintados 183 produtos dos mais variados clientes e mercados de atuação, fazendo com que os volumes de cada tarefa possuam grande variação na forma de programação. Neste sistema são utilizadas cinco tipos de tinta e a jornada de trabalho é de 17 horas diárias. No cenário anterior à realização deste trabalho, o sistema obtinha OEE de menos de 45% e sua programação de tarefas era realizada pelos operadores de forma empírica. A Tabela 2.1 traz o conjunto de tarefas a serem agrupadas e sequenciadas em termos dos códigos dos produtos, cor, volume, tempo de processamento e área de pintura.

Tabela 2.1 - Base de dados

Nº	Cor	Código	Tempo / peça (segundos)	Lote mensal (peças)	Área (m²)
1	Cinza Fumaça	0200047162S16	83,1	1270,0	6,20
2	Cinza Fumaça	0200055756S19	96,9	19,0	6,00
3	Cinza Fumaça	0200036302S16	96,9	5,0	5,29
4	Cinza Fumaça	0206209034M13	10,4	36,0	0,29
5	Cinza Fumaça	0202800991M30	5,5	12,0	0,06
6	Cinza Fumaça	0200044808P10	1,4	2528,0	0,03
7	Cinza Escuro	4700841505868	152,3	5,0	7,90
8	Cinza Escuro	0300876223160	124,6	56,0	4,32
9	Cinza Escuro	4700358910A17	48,0	5,0	4,28
10	Cinza Escuro	4700358910A17	24,0	10,0	4,28
11	Cinza Escuro	1900874129365	124,6	3,0	4,20
.
.
.
170	Azul	1900875698029	27,7	182,0	1,80
171	Azul	1900734012740	9,2	5,0	0,83
172	Azul	1900734013569	9,2	5,0	0,42
173	Azul	1900820209921	5,2	2,0	0,08
174	Azul	1900820209930	5,2	2,0	0,08
175	Azul	1900875799763	41,5	43,0	3,71
176	Azul	1900734016371	55,4	9,0	1,60
177	Azul	1900734016380	55,4	9,0	1,60
178	Azul	1900841821251	13,8	8,0	0,58
179	Azul	1900875914996	13,8	1,0	0,54
180	Azul	1900875915046	13,8	3,0	0,52
181	Branco	1900876126762	96,9	2,0	6,40
182	Branco	1900876126789	96,9	5,0	6,40
183	Branco	1900051775495	3,1	322,0	0,66

Na sequência, definiu-se a área que minimiza os custos de setup e pintura para cada cor, gerando os resultados apresentados na Tabela 2.2. O cálculo foi realizado de forma individual para cada cor de tinta, visto que os custos e rendimentos de área pintada são independentes para cada cor. Desta forma, cada cor somente tem um lote liberado para pintura quando atingida a área recomendada.

Tabela 2.2 - Área para liberação do lote (A*), em m²

Lista de Cores	Custo Tinta	Custo SetUp	Custo CT	Rendimento Tinta p/ m ²	Custo Tinta p / m ²	Custo Tinta + Custo Set Up	Área A* (m ²) pintura liberação lote
03 (Cinza Fumaça)	24,40	582,83	4,51	8,10	3,012	7,52	77,48
23 (Cinza Escuro)	19,98	569,57	4,51	6,28	3,182	7,69	74,05
24 (Cinza Escuro)	19,15	567,08	4,51	6,28	3,049	7,56	75,02
27 (PU Azul)	22,60	577,43	4,51	6,90	3,275	7,79	74,17
29 (PU Branco)	23,28	579,47	4,51	4,09	5,692	10,20	56,80

A Tabela 2.3 traz a conversão da área (em m²) para tempo de processo (em horas), visando sua posterior inserção nas equações do ATC e ATCS.

Tabela 2.3 - Conversão da área A* em tempo de processamento (horas)

Lista de Cores	Conversão da Área A* (m ²) em tempo (horas)
03 (Cinza Fumaça)	0,26
23 (Cinza Escuro)	0,25
24 (Cinza Escuro)	0,25
27 (PU Azul)	0,25
29 (PU Branco)	0,19

No passo seguinte, os produtos foram agrupados em subgrupos, ordenados por data de entrega e cor da tinta. Em um período padrão de análise de uma semana, foram criados 22 subgrupos, apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Lista de subgrupos (conjuntos de lotes)

Subgrupos	Tempo (seg)	Área (m ²)	Data entrega	Cor
G1	9301,15	638,23	Segunda	Cinza Fumaça
G2	17003,09	625,95	Segunda	Cinza Escuro
G3	4338,46	136,24	Segunda	Cinza Escuro 2
G4	18537,12	1481,85	Segunda	Azul
G5	2030,77	147,74	Segunda	Branco
G6	7629,23	563,88	Terça	Cinza Fumaça
G7	15072,62	563,63	Terça	Cinza Escuro
G8	4770,46	141,32	Terça	Cinza Escuro 2
G9	20704,61	1650,15	Terça	Azul
G10	9789,23	691,36	Quarta	Cinza Fumaça
G11	13720,98	498,12	Quarta	Cinza Escuro
G12	5419,85	157,13	Quarta	Cinza Escuro 2
G13	16160,19	1317,85	Quarta	Azul
G14	2525,38	179,74	Quarta	Branco
G15	10578,46	736,6	Quinta	Cinza Fumaça
G16	15307,78	664,76	Quinta	Cinza Escuro
G17	4928,08	164,96	Quinta	Cinza Escuro 2
G18	13824,23	1021,67	Quinta	Azul
G19	1460,77	994,05	Sexta	Cinza Fumaça
G20	14578,13	573,43	Sexta	Cinza Escuro
G21	14640,01	1126,48	Sexta	Azul
G22	1546,15	115,74	Sexta	Branco

Após a formação dos subgrupos, os dados de tempo de processamento, setup e escala de preferência foram inseridos nas regras ATC e ATCS. As sequências geradas pelas regras são apresentadas no Quadro 2.5. Percebem-se sequências idênticas, com exceção da alteração de ordem dos grupos 19 e 22 na 19^o e 20^o posições. Tal resultado mostra que o setup, no caso estudado, não impacta substancialmente na ordem de pintura dos grupos.

Quadro 2.5 - Comparação ATC e ATCS

ATC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
		G5	G3	G1	G2	G4	G8	G6	G7	G9	G14	G12	G10	G11	G13	G17	G15	G18	G16	G19	G22	G20

ATCS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
		G5	G3	G1	G2	G4	G8	G6	G7	G9	G14	G12	G10	G11	G13	G17	G15	G18	G16	G22	G19	G20

Por conta da semelhança entre as sequências sugeridas pelas regras ATC e ATCS, comparou-se apenas a segunda ao sequenciamento empírico realizado na empresa. Utilizou-se o indicador de eficiência OEE em uma escala diária de produção, conforme apresentado na

Figura 2.5. Percebe-se um ganho de eficiência 32,84%, partindo de uma média de 42,35% do cenário contendo opinião do especialista como fator ponderador para programação para uma média de 75,19% gerada pela metodologia de ATCS. Os demais 24,81% da OEE foram perdidos na ineficiência do processo, características das peças e também rejeição no processo de pintura.

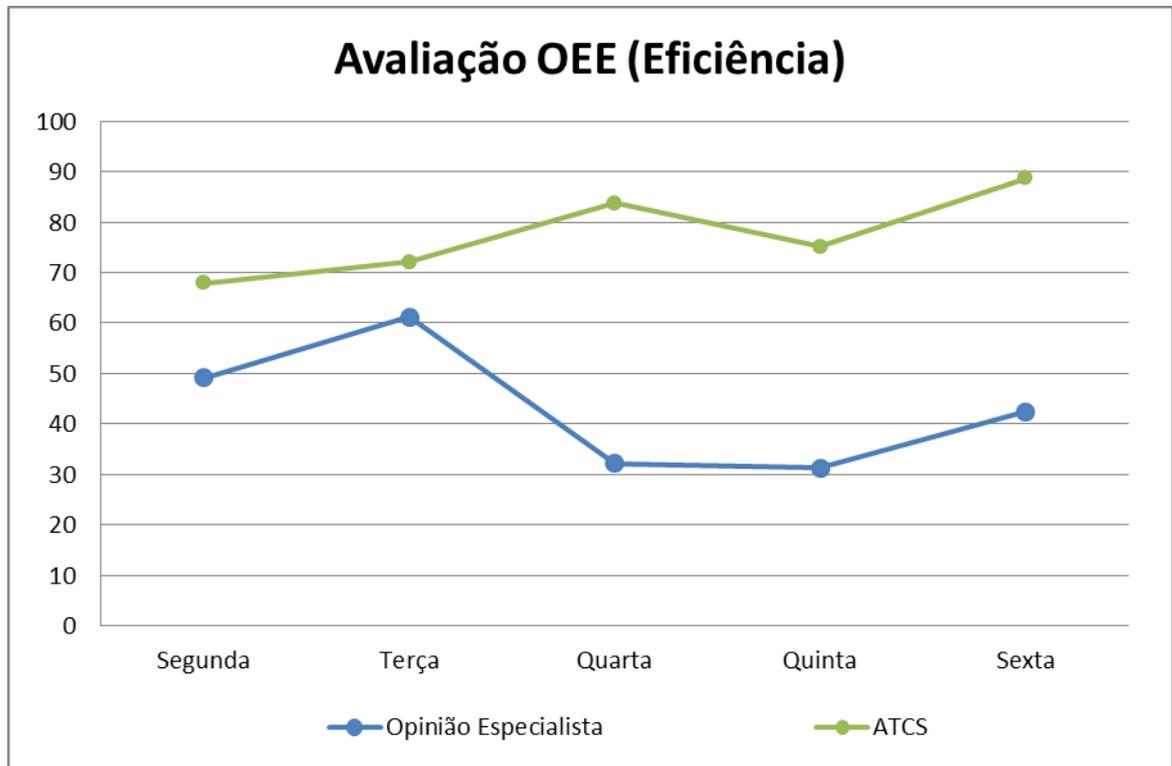


Figura 2.5 - Gráfico desempenho eficiência sistema de pintura

2.5 Conclusão

A tendência do mercado consumidor em buscar produtos diferenciados obrigou as empresas de manufatura a adotarem estratégias para atender a estas demandas. Os pedidos precisam ser atendidos em prazos cada vez menores, são demandados lotes com quantidades variadas e entregas quase que diárias a baixos custos de produção e com patamares elevados de qualidade. Dentro deste contexto, as ferramentas de sequenciamento aparecem como importante subsídio para programação de produção.

Este artigo teve como objetivo apresentar uma metodologia para sequenciamento de produção em um sistema de pintura. Inicialmente, define-se a área mínima para que um grupo de modelos de mesma cor seja liberado para sequenciamento. Tal área é convertida em tempo

de processo, o qual, aliado a outras variáveis peculiares de cada grupo de produtos (como setup de data de entrega), são inseridos em regras de sequenciamento do tipo ATC e ATCS. Ao ser aplicada em um sistema de pintura, a sistemática proposta aumentou a eficiência do sistema em análise em 32,84%, medido através do OEE, frente ao sequenciamento baseado estritamente no conhecimento dos especialistas de processo.

Desdobramentos futuros desta pesquisa incluem o teste de regras mais robustas do tipo ATC, bem como o aprimoramento da determinação da área mínima a ser pintada através da inclusão de outros fatores na equação de equilíbrio. A análise da robustez da sistemática proposta frente a tempos estocásticos também será avaliada.

2.6 Referências

BANG J-Y; KIM Y-D; Scheduling algorithms for a semiconductor probing facility. **Computers & Operations Research** 38, 666-673, 2011.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações – manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2004.

CHEN, J.F., Scheduling on unrelated parallel machines with sequence-and machine dependent setup times and due date constraints. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 44, 1204-1212, 2009.

DAVIS, M. M., AQUILANO, N. J., CHASE, R. B. **Fundamentos da Administração da produção**. Porto Alegre: Bookman, 1999.

DRIESSEL, R.; MONCH, L., Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times, precedence constraints, and ready times. **Computers & Industrial Engineering** 61 (2011) 336-345, 2011.

ELSAYED, E. A; BOUCHER, T. O. **Analysis and Control of Production Systems**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

HERRMANN, J. W. **Handbook of production scheduling**. New York: Springer, 2006. 318 p.

KIM, D.W., Na, D.G, CHEN, F.F., Unrelated parallel machine scheduling with setup times and a total weighted tardiness objective. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing** 19, 173-181, 2003.

KURT, M.E., ASKIN., R.G., Heuristic scheduling of parallel machines with sequence dependent set-up times. **International Journal of Production Research** 39, 3747-3769, 2001.

MOON, M. A., MENTZER, J. T., SMITH, C. D. Conducting a sales forecasting audit. **International Journal of Forecasting**, v. 19, 5–25, 2003.

MUNOZ, F.T., MORAGE, R.J., and BAESTER, F.F., Look-ahead constructive heuristic for the unrelated parallel machine problem with sequence dependent setup time. **IIE Annual Conference and Exposition**, 2005.

OGUZ, C.; SALMAN F.S.; YALÇIN, Z.B. Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems. **International Journal Productions Economics** 125 200-211, 2010.

OVACIK, I. M.; UZSOY, R. Decomposition methods for complex factory scheduling problems. **Norwell: Kluwer Academic Publishers**, 232 p, 1997.

PINEDO, M.L. **Scheduling – Theory, Algorithms, and Systems**, 3^a Ed. New York: Springer, 2008.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

TRAPERO, J. R.; PEDREGAL, D. J.; FILDES, R., KOURENTZES, N. Analysis of judgmental adjustments in the presence of promotions. **International Journal of Forecasting**, v. 29, 234–243, 2013.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da Produção: teoria e prática**. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

VEPSALAINEN, A. P. J.; MORTON, T. E. **Priority Rules for Job Shops with Eeighted Tardiness Costs**. **Manegement Science**, v. 33, n. 8, p. 1035-1047, 1987.

WIGHT, O. W. **Production and Inventory Management in the Computer Age**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc., 1984.

WISNER, J.D., SIFERD, S.P., A survey of LIS manufacturing pratices in make-to-order machines shops. **Production and Inventory Management Journal** 1, 1-7, 1995.

YUE, X.; JANG, J.J., Scheduling jobs on identical parallel machines with unequal future ready time and sequence dependent setup: An experimental study. **International Journal Productions Economics** 137 (2012) 1-10, 2012.

3 SEGUNDO ARTIGO

HEURÍSTICA DE SEQUENCIAMENTO PARA SISTEMAS DE PINTURA BALIZADA POR ÍNDICES DE QUALIDADE

Resumo

Empresas dos mais diversos segmentos necessitam de uma programação de tarefas (sequenciamento) bastante precisa e que permita atender às necessidades dos clientes sem comprometer custos e eficiência dos equipamentos. Grande parte das sistemáticas de sequenciamento, no entanto, não consideram aspectos de qualidade na geração de suas programações. Este artigo apresenta uma heurística de sequenciamento para sistemas de pintura contemplando aspectos de qualidade com base na regra ATCS (Apparent Tardiness Cost with Setups), incluindo na formulação proposta um índice relativo à qualidade de pintura. O método proposto foi aplicado em um sistema de pintura na empresa Bruning Tecnometal Ltda. Os resultados obtidos pela nova regra superaram aqueles gerados pelo sequenciamento realizado através da regra ATCS.

Palavras-chaves: Sequenciamento; Sistema de pintura; ATCS; Índice de qualidade

Abstract

Companies of several segments require precise scheduling approaches in order to meet customer's needs without compromising costs and efficiency. Most scheduling approaches do not consider quality aspects in their formulation. This paper presents a new scheduling heuristic applied to coating systems that contemplates quality aspects based on the rule ATCS (Apparent Tardiness Cost with Setups). For that matter, it, includes an quality index into the ATCS original formulation. The proposed method was applied to a coating system at Bruning Tecnometal Ltda. The results outperformed those yielded by the traditional ATCS rule.

Keywords: Sequencing; coating system; ATCS; quality index

3.1 Introdução

A sobrevivência das organizações em um cenário altamente competitivo tem exigido a melhoria de eficiência, flexibilidade e qualidade dos sistemas de produção (DE RON, 1998). Além disso, a cadeia de consumo exige rápida resposta junto aos responsáveis pelo suprimento, fazendo com que a flexibilidade nos processos de manufatura acompanhe tal expectativa. A demanda é impulsionada, dentre outros fatores, pela alta customização dos produtos e pelos seus reduzidos ciclos de vida, fazendo com que o lançamento de novos modelos ocorra em um tempo menor. A possibilidade de escolha de um maior número de opções de produtos passou a ser encarada como uma característica desejada pelos clientes (DA SILVEIRA et al., 2001), exigindo constantes adaptações dos sistemas produtivos.

Na maioria dos cenários industriais, a fabricação de um item somente é iniciada mediante a confirmação de pedido do cliente. Tal ação é decorrente do crescente número de opcionais e variáveis dentro de um mesmo modelo, os quais são definidos pelo cliente. De tal forma, empresas de diversos segmentos necessitam de uma programação de tarefas (sequenciamento) que permita atender eficientemente às necessidades dos clientes sem, no entanto, comprometer custos e eficiência dos equipamentos. Sistemas de produção que não possuem sistemáticas de sequenciamento estruturadas tipicamente comprometem seus níveis de precisão de entrega, eficiência e custos do processo.

Diversas ferramentas consolidadas na literatura podem ser utilizadas para sequenciar tarefas, merecendo destaque a regra FIFO (First in First out), na qual a primeira tarefa a chegar é a primeira a sair. Tal método de sequenciamento, contudo, tipicamente não atende às necessidades dos clientes, contrastando atrasos nas entregas com períodos ociosos. Tal situação é usualmente verificada em empresas fornecedoras de peças metálicas a montadoras, onde o impacto dos custos de estoque de matéria-prima, operacionais e armazenamento são elevados pela inexistência de abordagens estruturadas para sequenciamento. Além disso, verifica-se que aspectos ligados à qualidade dos produtos manufaturados tipicamente não são considerados quando da elaboração de novas abordagens de sequenciamento.

Este artigo propõe uma nova heurística para sequenciar lotes de produção customizada em processos de pintura através da inserção de um índice de qualidade na regra ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Set Up*). Tal proposição, denominada ATCSQ (*Apparent Tardiness Cost with Set Up and Quality Issues*), apoia-se em duas etapas. Na primeira etapa,

estima-se a área superficial mínima de cada cor de produto a ser pintado de maneira a minimizar os custos de setup e pintura. A abordagem é baseada no desenvolvimento de uma relação analítica de custos e subsequente derivação. Na segunda etapa, os lotes liberados pela primeira etapa são sequenciados pela ATCSQ composta por parâmetros de data de entrega, tempo de setup associado a trocas de cores e histórico de qualidade no processo de pintura (que dá origem ao índice de qualidade anteriormente referido). A metodologia proposta busca minimizar o atraso nos prazos de entrega, incluindo os níveis de qualidade dentro do processo de pintura.

Este artigo está estruturado em cinco seções, incluindo a presente introdução. A seção 2 traz uma revisão teórica sobre métodos de sequenciamento de produção. Na seção 3, descreve-se o método proposto para sequenciar os lotes. A seção 4 apresenta um estudo de caso com vistas à minimização do atraso de entrega em linhas de pintura de componentes. Na seção 5 são apresentados os resultados e considerações finais do trabalho.

3.2 Referencial Teórico

Esta seção reporta os fundamentos de sequenciamento e regras de despacho do tipo ATC.

3.2.1 Definições básicas de sequenciamento

Chambers e Johnston (2002) afirmam que ferramentas voltadas ao planejamento e controle da produção, dentre as quais técnicas de sequenciamento, devem garantir que os processos ocorram de forma eficiente, gerando produtos e serviços conforme requeridos pelos consumidores. No entanto, Herrmann (2006) explica que nem todas as empresas aproveitam as vantagens dos sistemas de sequenciamento, visto que a complexidade de operacionalização do sistema aumenta conforme aumentos nos níveis de customização dos produtos. Para Joo et al. (2013), o sequenciamento de tarefas é muito importante no processo de fabricação, pois trata-se de uma série de atividades que tornam disponíveis os recursos para os trabalhos, determinando horários e datas para a produção.

Para Monks (1987) e Davis et al. (2001), o sequenciamento consiste na determinação das máquinas e centros de trabalho a serem utilizados nos processamentos de determinada

encomenda (também definida como tarefa). Técnicas de sequenciamento são amplamente utilizadas e possuem correlação direta com a produtividade, visto que atuam na maximização dos recursos. Reid e Sanders (2005) corroboram com as definições acima, afirmando que um centro de trabalho ou máquina necessita de regras de prioridade quando existe mais de uma tarefa alocada ao mesmo equipamento. Segundo Joo et al. (2013), um sistema de sequenciamento de produção é extremamente complexo devido à dinâmica dos processos produtivos, os quais incluem variáveis como chegada de pedidos inesperados, flexibilidade de entrega, taxas de defeitos aleatórias no processo e alterações nas prioridades de entrega.

Pinedo (2008) descreve o sequenciamento como um processo que visa definir a melhor sequência de processamento das tarefas, gerenciando a escassez de recursos ao longo do tempo. Trata-se, portanto, de um processo de tomada de decisão com o objetivo de otimizar objetivos estabelecidos, os quais incluem: (i) Makespan – tempo total da programação de tarefas; (ii) Mean flow-time – tempo médio de duração do fluxo; (iii) Total flow-time – tempo total de duração do fluxo; (iv) Mean tardiness – atraso médio do fluxo de tarefas; (v) Maximum tardiness – máximo do atraso na conclusão de tarefas; (vi) Tardiness – soma das penalidades de atraso, e (vii) Earliness – soma das penalidades de adiantamento. Por sua vez, Pacheco e Santoro (1999) consideram o atendimento aos prazos estabelecidos, redução do tempo de fluxo e otimização da utilização da capacidade disponível como os principais benefícios do sequenciamento. Slack et al. (2002) acrescentam que, independentemente da abordagem de carregamento (finita ou infinita), quando as tarefas tornam-se aptas ao processamento, decisões necessitam ser tomadas acerca do ordenamento destas tarefas no sistema. Tais decisões podem se tornar complexas, gerando lentidão no processo de tomada de decisão.

Os objetivos do sequenciamento normalmente estão associados a Regras de Priorização. Conforme Tubino (2007), essas regras pertencem a um procedimento simplificador que leva em consideração informações sobre tarefas e condições do sistema produtivo, visando selecionar as tarefas que terão prioridade de processamento, assim como o recurso deste grupo encarregado de sua execução. Diversas regras de sequenciamento foram propostas com o intuito de minimizar o tempo transcorrido entre o início e o término de uma sequência de tarefas, como ilustrado no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Regras de sequenciamento tipicamente abordadas pela literatura

Regras de sequenciamento	
Sigla	Definição
CR	<i>Critical Ratio</i> - razão crítica, calculada como "tempo até a data prometida dividido pelo tempo total de operações restantes"
DS	<i>Dynamic Slack</i> - folga dinâmica, calculada como "folga estática dividida pelo número de operações por executar"
EDD	<i>Earliest Due Date</i> - a tarefa com a data prometida mais próxima é processada antes
FIFO	<i>First In First Out</i> - primeira tarefa a chegar ao centro de trabalho é a primeira a ser atendida
FSFO	<i>First in the System, First Out</i> - primeira tarefa a chegar à unidade produtiva é a primeira a ser atendida (FCFS - <i>First Come, First Served</i>)
LWKR	<i>Least Work Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a menor quantidade de tempo de operação remanescente para conclusão
MOPNR	<i>Most Operations Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a maior quantidade de operações sucessoras
MWKR	<i>Most Work Remaining</i> - prioriza a tarefa que tem a maior quantidade de tempo de operações remanescentes para conclusão
RANDOM	A priorização ocorre de modo aleatório
SPT	<i>Shortest Processing Time</i> - tarefa com o menor tempo de operação no centro de trabalho é a primeira a ser atendida
SPT1	Mesma SPT, mas com limitante de tempo de espera para evitar que ordens longas esperem muito
SS	<i>Static Slack</i> - folga estática, calculada como "tempo até a data prometida menos tempo de operação restante"

Fonte: Adaptado de Corrêa e Corrêa (2006)

Corrêa e Corrêa (2006) relatam que, por um longo período, a pesquisa sobre sequenciamento da produção concentrou esforços em descobrir a regra mais eficaz e generalista para diversos cenários. À medida que os estudos foram aprofundados, ficou claro que os problemas de sequenciamento apresentam mais de um objetivo, o que tornou a tarefa complexa, dificultou as avaliações e levou autores a concluir que não existe uma regra unânime para solução de problemas de sequenciamento.

Além das regras básicas associadas à priorização, regras de despacho do tipo ATC (Apparent Tardiness Cost) são vastamente utilizadas em aplicações de sequenciamento. Tais regras são detalhadas na sequência.

3.2.2 Regras de despacho do tipo ATC – derivações e aplicações

Dentre as diversas formulações para sequenciamento de produção, destacam-se as do tipo “regra de despacho”. Segundo Sun e Noble (1999), esta família de regras possui grande aplicabilidade por conta de sua simplicidade matemática e eficiência quando comparada a outras abordagens (normalmente complexas e dependentes de grande processamento computacional).

Segundo Pinedo (1995), regras de despacho podem ser classificadas em dois grupos: (i) regras estáticas – não dependentes do tempo, mas de outros fatores no processo, como características de tarefa ou máquina; nesta regra, a prioridade é a mesma desde a chegada até o encaminhamento ao posto de trabalho; e (ii) regras dinâmicas – dependem do fator tempo, e a tarefa é baseada em prioridades diferenciadas (ou seja, trabalha com maior ou menor prioridade em relação às demais tarefas que necessitam ser executadas). O mesmo autor classifica as regras de despacho em locais e globais; as regras locais são mais simples e definidas pelo ordenamento junto a uma fila de trabalho, enquanto que as regras globais consideram as operações subsequentes pelas quais as tarefas irão passar.

Regras de despacho possuem vasta aplicação e geram resultados satisfatórios quando aplicadas em problemas com função de objetivo único, usualmente associados à minimização do atraso de um conjunto de tarefas (Pinedo, 2008). Para atender às demandas práticas, surgiram as regras de despacho compostas, que são geradas pela concatenação das regras de despacho elementares, sendo ponderadas através de parâmetros de escala (Pinedo, 2008). Dentro deste contexto, Vepsalainen e Morton (1987) propuseram a regra ATC (Apparent Tardiness Cost), composta pelas heurísticas WSPT (Weighted Shortest Processing Time, aplicada quando o objetivo é a priorização das tarefas com menor tempo de processamento) e pela regra MS (Minimum Slack), na qual o elemento principal é a priorização das tarefas com menor folga. O ATC é apresentado na equação (1), onde I_j é o índice de priorização da tarefa j no tempo t .

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_p}\right) \quad (1)$$

Na equação (1), ω_j é o peso que descreve a priorização de uma tarefa j , p_j é o tempo de processamento, d_j o prazo de execução da tarefa j e K_p é um parâmetro de escala determinado empiricamente. Pinedo (1995) descreve que o peso ω pode representar, por exemplo, o custo de manter a tarefa no sistema ou o valor já adicionado a ele. Portanto, para atingir sequenciamentos satisfatórios, o valor de K_p deve ser ajustado a cada tipo de problema com base em informações empíricas da natureza das atividades.

Raman et al. (1989) propõem uma primeira modificação na regra de ATC para inclusão de tempos de preparação na formação das lista de prioridades; a alteração é realizada para que os impactos da última tarefa processada sejam considerados na análise. A inserção deste parâmetro é relevante em termos práticos, visto que usualmente se busca reduzir os tempos de setup. A formulação matemática é apresentada na equação (2), onde s_{lj} descreve o tempo de preparação entre a conclusão da tarefa l e início da tarefa j . Os demais parâmetros já foram apresentados anteriormente.

$$I_{j(t,t,l)} = \frac{\omega_j}{s_{lj} + p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - s_{lj} - t, 0)}{K_p}\right) \quad (2)$$

Na sequência, Lee (1997) propõe uma segunda modificação na regra ATC, incluindo o tempo de setup na formulação, gerando assim a regra ATCS (*Apparent Tardiness Cost with Setups*), conforme equação (3). Nesta combinação, tarefas com tempos de setup elevados são preteridas frente àquelas com preparo mais rápido.

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{lj}}{K_{2s}}\right) \quad (3)$$

Onde δ_{lj} é o tempo de setup gerado pela transição da tarefa l à tarefa j e K_{2s} é uma constante empiricamente definida; os demais parâmetros são como acima definidos. Na equação (3), o

primeiro termo exponencial trata da folga de entrega das tarefas (priorizando tarefas mais próximas à data de entrega), enquanto que a segunda aborda os tempos de preparação (priorizando tarefas com menores tempos de preparo). O Quadro 3.2 compila alguns dos cenários de aplicação do ATC e suas derivações; tais derivações são discutidas nesta mesma seção.

Quadro 3.2 - Regras de sequenciamento do tipo ATC

Autores	Regras	Aplicação
Rachamadugu and Morton (1982)	ATC	Máquina única
Lee et al. (1997); Lee and Pinedo (1997)	ATCS	Máquina única / Máquinas Paralelas
Vepsalaimen and Morton (1987)	MATC	Fluxo fábrica
Pfund et al. (2008)	ATCSR	Máquinas Paralelas
Yue and Jang (2011)	MATCSR, ATCSSR	Máquina única

Fonte: Adaptado de Yue X., and Jang, J.J., 2012

Xi e Jang (2012) realizaram um estudo com objetivo de avaliar a eficiência da regra de despacho ATC aplicada em um cenário de problemas de sequenciamento contendo tarefas com tempos distintos de processamento, sequência de operação dependendo do tempo de setup e processamento em máquinas em paralelo. Neste experimento, a sequência dependente do tempo de setup é dividida em duas categorias: sequência contínua dependente do setup ($S_{ij,com}$), na qual é necessário ter a peça para realizar o procedimento de setup, e sequência separada do tempo de setup ($S_{ij,sep}$), em que não é necessária a peça para realizar o setup (fazendo com que o fluxo de produção não seja interrompido). Neste mesmo estudo foram propostas duas novas heurísticas: MATCRS (Modified Apparent Tardiness Cost with Setup and Ready time) e ATCSSR (Apparent Tardiness Cost with Separable Setup and Ready time). Elas proporcionam melhor desempenho que a regra ATC, reduzindo o tempo total de atraso tanto quando o setup é realizado de forma contínua como quando o setup é realizado de forma separada. As formulações matemáticas destas duas novas regras de despacho estão apresentadas nas equações (4) e (5).

$$I_{\text{MATCSR}}(t, i, j) = \frac{\omega_j}{p_j + S_{ij} + \max(r_j - t, 0)} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - s_{ij} - \max(r_j, t), 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{ij}}{K_{2p}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{K_{3p}}\right) \quad (4)$$

$$I_{\text{ATCSSR}}(t, i, j) = \frac{\omega_j}{p_j + \max(r_j - t, 0)} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - \max(r_j, t + S_{ij}), 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{ij}}{K_{2p}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t - S_{ij}, 0)}{K_{3p}}\right) \quad (5)$$

Em ambas as formulações, k_1 , k_2 e k_3 são os parâmetros de escala, p representa a média do tempo de processamento e s representa a média dos tempos de setup. Os demais termos foram apresentados nas equações anteriores.

Por sua vez, Driessel e Mönch (2011) sugerem a variação da regra ATCS para problemas de sequenciamento que envolvem restrição de precedência entre as tarefas, máquinas paralelas idênticas e sequência dependente do tempo de setup. O objetivo desta nova regra é reduzir o tempo total de atraso e melhorar a precisão de entrega das tarefas. Problemas deste tipo são tipicamente encontrados em fluxo e processos de manufatura de semicondutores. A nova regra é descrita como ATCSR (*Apparent Tardiness Cost with Setups and Ready Times*). Tal pesquisa aborda problemas de programação em ambientes específicos, onde existe manuseio de material de forma automatizada, os tempos de preparação são dependentes da sequência e verificam-se restrições de precedência. A formulação matemática desta nova regra é apresentada na equação (6).

$$I_j(t, l) = \frac{\omega_j}{\rho_j \cdot e^{\left\{-\frac{\max(d_j - \rho_j - t, 0)}{k_{1\rho}}\right\}} \cdot e^{\left\{-\frac{\max(D_j - \rho_j - t, 0)}{k_{2\rho}}\right\}} \cdot e^{\left\{-\frac{\max(r_j - t, 0)}{k_{3\rho}}\right\}} \cdot \left\{\frac{\max(D_j - \rho_j - t + \varepsilon, 0)}{(D_j - \rho_j - t + \varepsilon)}\right\}} \quad (6)$$

na qual p_j refere-se ao tempo de processamento da tarefa, t é o tempo corrente da tarefa, s_{ij} é o tempo de setup, p é a média do tempo de processamento das tarefas remanescentes e s é a média do tempo de setup. Similarmente, Bang e Kim (2011) sugerem uma heurística de sequenciamento baseada em ATC na fabricação de semicondutores, os quais passam em várias máquinas com diferentes tempos de processamento, com vistas à minimização do tempo total de atraso dos pedidos programados.

Similarmente, Lee e Pinedo (1997) descrevem uma metodologia de sequenciamento de produção aplicada em sistemas de máquinas paralelas idênticas, com tempos de setup dependentes da entrada das tarefas. A heurística proposta é dividida em três etapas; na primeira etapa, são agrupados os dados estatísticos das tarefas a serem processadas. A segunda etapa é a construção da sequência de despacho, tomando como base os parâmetros de data de entrega, tempo de processamento e peso da tarefa utilizando as regras ATC e ATCS. Na terceira etapa é aplicado o método de simulação de annealing. O tempo de setup afeta consideravelmente os resultados do sequenciamento, sendo este um fator relevante a ser considerado. O objetivo do trabalho é minimizar o tempo total de atraso em uma fábrica de semicondutores.

Com propósitos semelhantes, Ceyda et al. (2010) propõem uma sistemática para aceitação de pedidos de fabricação simultaneamente a decisões de sequenciamento em um ambiente de produção com máquina única. O objetivo é receber ordens de fabricação e definir o sequenciamento de forma simultânea; testes computacionais realizados no estudo comprovam que a heurística apresenta resultados eficientes para até 300 pedidos. São testadas três heurísticas (ISFAN, d-RFSB e m-ATCS); o ISFAN produz bons resultados em cenários de recebimento até 50 ordens, já as heurísticas de d-RFSB e m-ATCS produzem resultados de forma rápida para problemas de sequenciamento de até 300 ordens.

Monch et al. (2006) apresentam uma aplicação da regra ATC no sequenciamento em máquinas em paralelo no processo de fabricação de semicondutores do tipo *waffer*. Tal estudo explora um processo de produção distinto dos demais apresentados até este momento, visto que a regra ATC é aplicada a processos de batelada com tempos de processo extremamente longos (cerca de 10 horas). A pesquisa aborda ainda a influência do parâmetro K na regra de despacho através de abordagens. A primeira utiliza redes neurais para escolha do parâmetro mais apropriado, ao passo que a segunda utiliza árvores de decisão indutivas. As simulações realizadas demonstram que 80% dos testes utilizando as abordagens descritas apresentam resultados iguais ou superiores à regra de despacho com parâmetro K fixo. Na mesma linha de pesquisa, Valente (2007) apresenta um aprimoramento da regra de despacho ATC utilizando valores de antecipação da carga de trabalho para determinação do parâmetro K. Segundo Chambers et al. (1991), a definição do parâmetro K pode influenciar no desempenho da heurística. O estudo propõe duas sistemáticas para definição do valor deste parâmetro: a primeira leva em consideração os valores estatísticos para determinação do parâmetro, ao passo que a segunda forma considera fatores como número de etapas do processo,

variabilidade de datas de entrega, fator de atraso e tempo de processamento.

Kaplan e Rabadi (2012) propuseram alterações na regra ATC com o intuito de solucionar o problema de sequenciamento no abastecimento de aviões no ar; Tal operação é muito utilizada em procedimentos militares. A regra desenvolvida é chamada de MATC (Modifield Apparent Tardiness Cost) e, segundo resultados apresentados no estudo, possui desempenho superior à regra original, com fácil e rápida aplicação. A formulação matemática é apresentada na equação (7); todos os termos desta equação foram anteriormente definidos.

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\max(D_j - p_j - t, 0)}{K_{2p}}\right) \exp\left(-\frac{\max(r_j - t, 0)}{K_{3p}}\right) \left(-\frac{\max(D_j - p_j - t + \varepsilon, 0)}{(D_j - p_j - t + \varepsilon)}\right) \quad (7)$$

Lamothe et al. (2012) apresentam uma proposta de resolução de problemas de sequenciamento em indústria farmacêutica e de cosméticos baseada em aplicação das regras de ATC, ATCS e método de annealing. Os autores enfatizam que os maiores atrasos nos processos das indústrias farmacêuticas decorrem dos lentos setups e também do nível de controle de qualidade entre as operações. Com vistas ao endereçamento de tais características, foram propostas as regras ATCOEE (*Apparent Tardiness Cost Overall Equipment Effectiveness*) e ACTOEEF (*Apparent Tardiness Cost Overall Equipment Effectiveness Flexibility*), testadas em ambiente experimental. Os resultados apontaram que a regra ATCOEE possui desempenho superior às demais; as formulações matemáticas destas duas novas propostas são apresentadas nas equações (8) e (9). Estas regras levam em conta a OEE dos equipamentos e dos processos bem como a flexibilidade da tomada de decisão no processo de ordem de entrada das tarefas para produção.

$$\text{ATCOOE}(i, j, m) = \frac{1}{p_{ij}} e^{-\frac{\text{Atc}_{i,j,m}}{k_1 p}} e^{-\frac{\text{OEE}_{i,j,m}}{k_2}} \quad (8)$$

$$\text{ATCOOEF}(i, j, m) = \frac{1}{p_{ij}} e^{-\frac{\text{Atc}_{i,j,m}}{k_1 p}} e^{-\frac{\text{OEE}_{i,j,m}}{k_2}} e^{-\frac{\text{Fl}_{i,j}}{k_3}} \quad (9)$$

Os termos apresentados nestas equações já foram apresentados nas equações anteriores.

Por fim, Joo et al. (2013) apresentam uma variação da regra de ATCS, incluindo fator de qualidade na regra de despacho. O estudo é realizado em um fluxo de produção flexível com três estágios de processamento. A inserção do fator qualidade é realizada através de inspeção realizada posteriormente à operação; no momento em que o número de defeitos produzidos na operação atinge seu limite, é disparada a comunicação e o processo é reorganizado. A taxa de defeito de cada trabalho segue uma distribuição normal, com o tempo decorrente de operação; se o tempo de operação torna-se mais longo, a taxa de defeitos torna-se maior e mais instável. Estes problemas de qualidade geralmente ocorrem em processos de fabricação sensíveis a fatores não controlados e com alta variabilidade, os quais incluem temperatura, vibrações e impurezas, dentre outros. A formulação matemática proposta é apresentada na equação (10).

$$TQ_{f,t}^2 = A_{f,t} \frac{|n_{f,t}|}{|n_t|} - \omega \cdot \frac{|G_{f,t}|}{M} \quad (10)$$

onde $G_{f,t}$, $n_{f,t}$ e n_t indicam o conjunto de todos os trabalhos na fila de espera, A_f representa a média dos valores de ATCS e ω é o parâmetro de escala de 0 a 1.

3.3 Método proposto

O método proposto nesse artigo visa sequenciar tarefas em um sistema de pintura com vistas à minimização do atraso total, levando em consideração aspectos associados à qualidade das tarefas. A Figura 3.1 apresenta as etapas propostas, as quais são detalhadas na sequência.

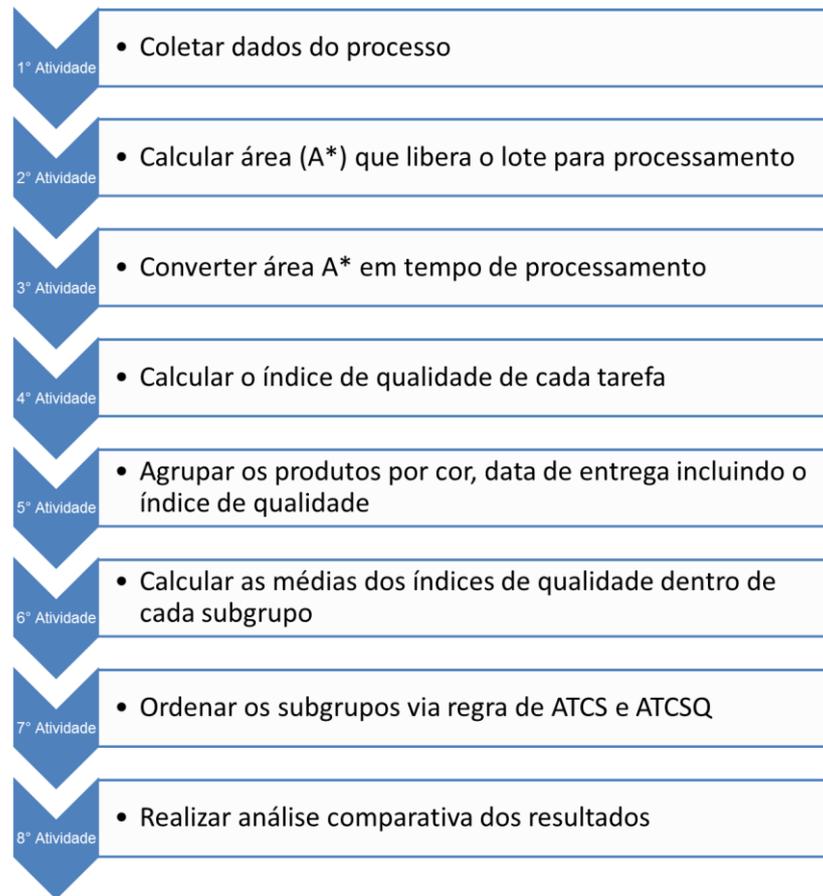


Figura 3.1 - Fluxograma do método proposto

3.3.1 Coleta de dados

Nesta etapa coletam-se e organizam-se as informações necessárias, as quais incluem: (i) custo do metro quadrado (m^2) para cada uma das tintas, (ii) custo do setup da instalação, (iii) tempos de processamento e tempos de setup, (iv) índice de qualidade de cada tarefa, (v) lista de tarefas a serem processadas, (vi) data de entrega de cada tarefa, e (vii) custo da mão de obra envolvida no processo. Define-se como tarefa o processamento individual de cada peça pelo sistema de pintura, lote como o agrupamento de tarefas de mesma cor e subgrupo como o agrupamento de vários lotes.

3.3.2 Estimativa da área que minimiza os custos para liberação do lote

O critério para liberação de um lote de tarefas para processamento é definido pela obtenção da área a ser pintada que minimiza a soma dos custos de setup e pintura, viabilizando assim o processamento. Para realizar a estimativa da área em metros quadrados (m^2) que minimiza os custos, é necessário calcular o custo total do m^2 pintado (C) e comparar com o custo de setup dessa determinada cor (S). Cada uma das cores possui um parâmetro diferente de liberação devido à diferença de custo entre as tintas e por suas distintas demandas em termos de setup.

O custo total pintado é apresentado através da equação (11), na qual cf corresponde ao custo industrial fixo da instalação, contemplando os gastos gerais de fabricação mão de obra, h o custo da tinta e A o número de metros quadrados (m^2) a serem processados.

$$C = (cf) + (h * A) \quad (11)$$

O custo do setup (S) é o produto do custo da instalação no tempo em que a mesma fica parada pelo custo do m^2 que deixou de ser produzido no tempo do setup, dividido pelo número de m^2 processados. A equação (12) traz o custo do setup, onde μ é o custo da instalação no tempo da parada, δ é o custo da pintura por m^2 a ser pintado e A é a quantidade de m^2 processados. Logo, quanto maior o número de m^2 a ser processado menor será a incidência de custo do setup em cada uma das tarefas processadas.

$$S = \frac{(\mu * \delta)}{A} \quad (12)$$

A Figura 3.3 representa o perfil genérico de variação dos custos de pintura e de setup, no qual o eixo Y representa a área processada e o X o custo da pintura. A reta (C) apresenta o custo total do m^2 pintado, abordado através da equação (11), e a curva S é o custo de setup representado pela equação (12). O custo do setup é diretamente proporcional ao número de m^2 pintados. A interseção dessas linhas aponta área A^* , que representa o critério de liberação do lote para processamento. Nesse momento, os custos planejados para a realização do setup

estão equilibrados e coerentes com o custo orçado. É importante enfatizar que, nas proposições desse artigo, cada cor possui um conjunto próprio de curvas de custo e setup, visto que cada tinta tem seu custo próprio, bem como demanda específica de tempo de preparo.

A equação (13) apresenta a formulação matemática da equação de A^* , obtida através da soma e derivação em A das equações (11) e (12).

$$A^* = \sqrt{\frac{(\mu * \delta)}{(cf + h)}} \quad (13)$$

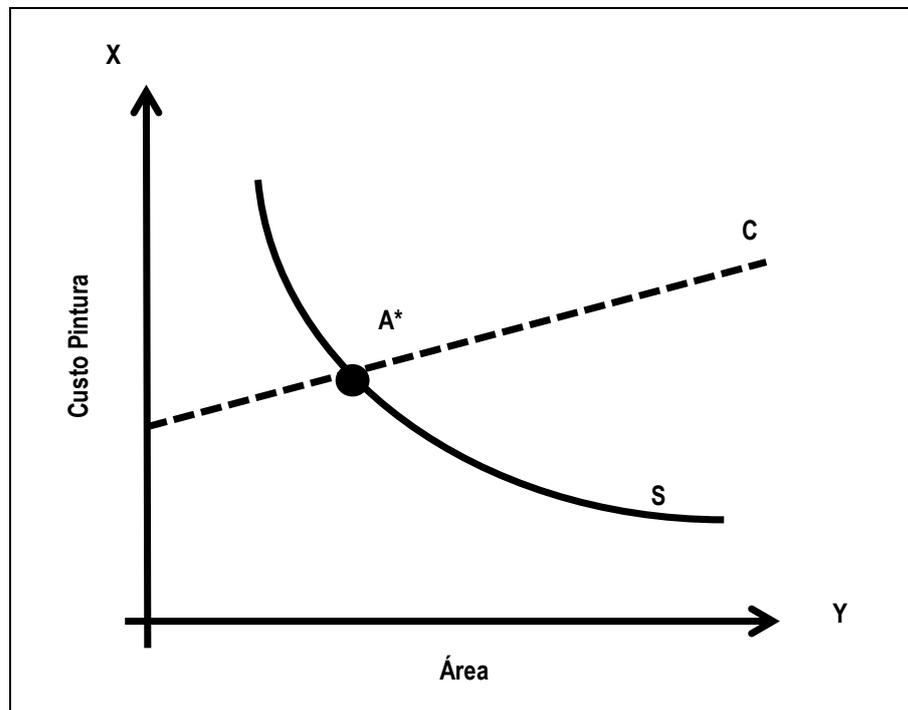


Figura 3.2 - Curvas que ilustram custos de pintura e setup de acordo com a área a ser pintada

Tendo em vista que o setup depende da sequência de cores, é necessária a elaboração de uma matriz de setup que apresenta o tempo para realização do procedimento de acordo com a cor de partida e chegada (Quadro 3.3); tais valores equivalem ao μ da equação (12).

Quadro 3.3 - Tempo de setup entre cores

Tempo Necessário para Set Up (horas)						
	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Cor 5	Cor 6
Cor 1		t1	t1	t1	t1	t1
Cor 2	t2		t2	t2	t2	t2
Cor 3	t3	t3		t3	t3	t3
Cor 4	t4	t4	t4		t4	t4
Cor 5	t5	t5	t5	t5		t5
Cor 6	t6	t6	t6	t6	t6	

O Quadro 3.4 refere-se à quantidade de m² necessários para realização do setup entre cores. Em termos práticos, tal área representa o número de m² desperdiçados no processo, tendo em vista que o processo de setup na pintura é interno, ou seja, realizado com a instalação parada. Dentre as atividades realizadas no processo estão limpeza da cabine, troca de mangueiras de tinta e preparação da próxima tinta, dentre outros. Tal área é estimada em m² através da equação (14), na qual $t1$ representa o tempo para realização do setup, entre as cores 1 e 2, e δ representa a constante de capacidade de pintura.

$$m^2(n) = t(n) * \delta \quad (14)$$

Quadro 3.4 - Área desperdiçada na realização do setup (m²)

m² necessários para Set Up (m²)						
	Cor 1	Cor 2	Cor 3	Cor 4	Cor 5	Cor 6
Cor 1		m ² 1				
Cor 2	m ² 2		m ² 2	m ² 2	m ² 2	m ² 2
Cor 3	m ² 3	m ² 3		m ² 3	m ² 3	m ² 3
Cor 4	m ² 4	m ² 4	m ² 4		m ² 4	m ² 4
Cor 5	m ² 5	m ² 5	m ² 5	m ² 5		m ² 5
Cor 6	m ² 6					

3.3.3 Conversão da área A* em P (tempo de processamento)

Com a estimativa da área que libera o lote de cada cor para processamento, faz-se a conversão da área para tempo de processamento em horas, os quais são inseridos nas equações do ATCS e ATCSQ. É importante enfatizar que cada área servirá como critério de liberação para início da atividade de pintura e para os conjuntos de tarefas pertencentes a cada cor.

3.3.4 Cálculo do índice de qualidade

O índice da qualidade é gerado com base nos dados históricos de não conformidades do processo de pintura das peças. Como tal processo é manual e possui variações inerentes a treinamentos e qualificação, percebe-se a existência de condições não reguladas que podem interferir na qualidade final da peça. Tais defeitos decorrem da impossibilidade de controlar todos os meios de fabricação e realizar checagens intermediárias para garantir a qualidade final do produto (por exemplo, defeitos decorrentes do processo de secagem tipicamente são percebidos na inspeção final). Outros defeitos incluem escorrimento, sujeira, falta de cobertura e camada baixa ou camada alta de tinta.

A formulação matemática para definição do índice proposto é apresentada na equação (15), onde \mathcal{U} representa o número de tarefas rejeitadas e β o número de tarefas processadas no lote. O resultado é o percentual de qualidade individual de cada uma das tarefas.

$$\mathcal{E} = \frac{\mathcal{U}}{\beta} \quad (15)$$

O índice de qualidade é calculado individualmente tarefa a tarefa após cada processamento. Esses dados atualizam a média do índice de qualidade individual de cada tarefa, a qual é atualizada na base de dados. Como o processamento das tarefas durante o processo de pintura é realizado em lotes, o índice de qualidade do lote é composto pela média do índice de qualidade das tarefas que compõem cada lote. Com esta premissa, cada lote terá seu índice de qualidade de acordo com a composição de tarefas nele existentes, podendo

assim existir lotes de mesma cor com índices de qualidades diferentes.

3.3.5 Agrupamento dos produtos por cor, data de entrega e índice de qualidade

A Figura 3.4 ilustra o procedimento de formação dos grupos: primeiramente são agrupadas tarefas de acordo com a cor da tinta, seguido pela data de entrega, dando origem aos lotes e subgrupos. Tendo em vista que a sistemática proposta visa sequenciar subgrupos de lotes, é necessário transcrever as informações de qualidade desde as tarefas até os subgrupos (ou seja, o índice de qualidade é característica individual de cada tarefa, devendo então ser operado para gerar o indicador “média Q” dos subgrupos, conforme a última coluna do Quadro 3.5). A formação dos subgrupos é necessária para que se respeite a área mínima de liberação do lote, que visa reduzir o número de setups realizados junto à pintura.

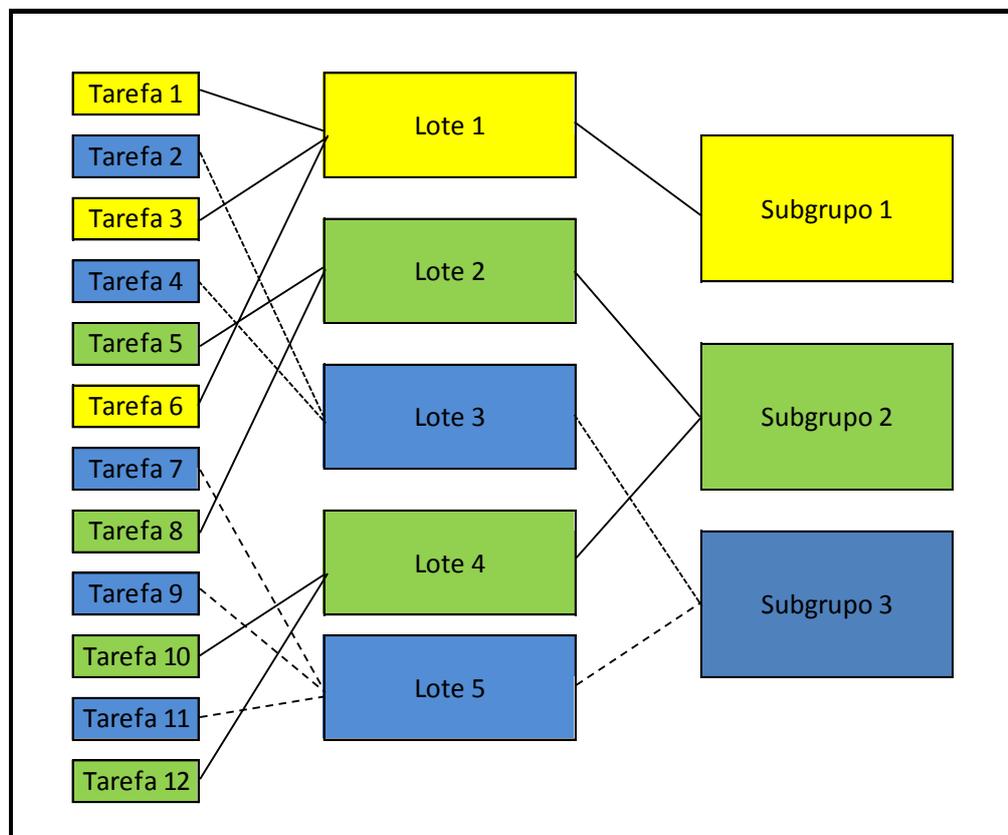


Figura 3.3 - Formação dos subgrupos

3.3.6 Cálculo das médias dos índices de qualidade dentro dos subgrupos

Com a formação dos subgrupos, é necessário realizar o cálculo da média dos índices de qualidade de cada tarefa pertencente a cada subgrupo. A média assume o valor do índice de qualidade para o subgrupo. O cálculo do índice de qualidade de cada subgrupo leva em consideração a média do índice de qualidade das tarefas que compõem cada subgrupo [ver equação (16)], onde H representa o índice de qualidade dentro de cada tarefa dos subgrupos e U o número de subgrupos.

$$Q_{\text{média}} = \left(\frac{\sum H}{\sum U} \right) \quad (16)$$

O Quadro 3.5 sumariza o agrupamento das tarefas até subgrupos, apontado para cada subgrupo gerado o seu índice de qualidade médio Q para posterior inserção na ATCSQ.

Quadro 3.5 - Arranjo genérico das tarefas e subgrupos, incluindo índice de qualidade médio Q

Código Cor	Tarefa	Data Entrega	Subgrupo	Q	Média Q
Cor 1	Tarefa 2	data 1	Subgrupo 1	Q2	Qmédia 1
Cor 1	Tarefa 4	data 2	Subgrupo 1	Q4	
Cor 1	Tarefa 1	data 3	Subgrupo 1	Q1	
Cor 1	Tarefa 6	data 4	Subgrupo 1	Q6	
Cor 1	Tarefa 5	data 5	Subgrupo 1	Q5	
Cor 1	Tarefa 3	data 6	Subgrupo 1	Q3	
Cor 2	Tarefa 4	data 7	Subgrupo 2	Q4	Qmédia 2
Cor 2	Tarefa 12	data 8	Subgrupo 2	Q12	
Cor 2	Tarefa 11	data 9	Subgrupo 2	Q11	
Cor 2	Tarefa 34	data 10	Subgrupo 2	Q34	
Cor 2	Tarefa 76	data 11	Subgrupo 2	Q76	
Cor 2	Tarefa 87	data 12	Subgrupo 2	Q87	
Cor 2	Tarefa 90	data 13	Subgrupo 2	Q90	
...
...
...
Cor 2	Tarefa 111	data 5	Subgrupo 23	Q111	Qmédia3
Cor 2	Tarefa 12	data 5	Subgrupo 23	Q12	
Cor 2	Tarefa 86	data 5	Subgrupo 23	Q86	
Cor 2	Tarefa 45	data 5	Subgrupo 23	Q45	
Cor 2	Tarefa 23	data 5	Subgrupo 23	Q23	
Cor 2	Tarefa 54	data 5	Subgrupo 23	Q54	
Cor 2	Tarefa 76	data 5	Subgrupo 23	Q76	
Cor 2	Tarefa 56	data 5	Subgrupo 23	Q56	
Cor 2	Tarefa 76	data 5	Subgrupo 23	Q76	
Cor 2	Tarefa 43	data 5	Subgrupo 23	Q43	
Cor 2	Tarefa 31	data 5	Subgrupo 23	Q31	
Cor 3	Tarefa 29	data 5	Subgrupo 24	Q29	Qmédia4
Cor 3	Tarefa 83	data 5	Subgrupo 24	Q83	
Cor 3	Tarefa 42	data 5	Subgrupo 24	Q42	
Cor 3	Tarefa 56	data 5	Subgrupo 24	Q56	
Cor 3	Tarefa 67	data 5	Subgrupo 24	Q67	
Cor 4	Tarefa 99	data 5	Subgrupo 25	Q99	Qmédia5
Cor 4	Tarefa 115	data 5	Subgrupo 25	Q115	

3.3.7 Sequenciamento dos subgrupos via regras ATCS e ATCSQ

A sétima etapa da sistemática consiste na aplicação das regras ATCS e ATCSQ em todos os subgrupos. Obtém-se como resultado a ordem sugerida de processamento dos subgrupos, bem como o valor da função-objetivo gerada. A equação (17) traz a formulação do ATCSQ com inclusão da variável de qualidade (último termo exponencial); quanto maior o

valor de $I_j(t)$ do subgrupo, maior sua priorização para processamento, tendo em vista que se trata de subgrupo com baixa folga, baixo setup e elevado nível de problemas de qualidade. Os lotes com elevado nível de problemas de qualidade necessitam ser priorizados devido à grande incerteza do processo de fabricação quanto à quantidade de tarefas planejadas e quantidades de tarefas aprovadas após inspeção. Caso sejam verificados índices elevados de reprovação, tem-se tempo hábil para retrabalho e correção das falhas verificadas.

$$I_j(t) = \frac{\omega_j}{p_j} \exp\left(-\frac{\max(d_j - p_j - t, 0)}{K_{1p}}\right) \exp\left(-\frac{\delta_{lj}}{K_{2s}}\right) \exp(\epsilon) \quad (17)$$

3.3.8 Análise comparativa dos resultados

Por fim, realiza-se a comparação dos resultados obtidos pela heurística ATCSQ com as regras ATC e ATCS. Para tanto, serão utilizados três indicadores: (i) OEE eficiência da instalação frente à utilização de cada uma das regras testadas, (ii) precisão de entrega, onde analisa-se o atendimento às datas das solicitações dos clientes, e (iii) percentual de embalagens incompletas após processamento (havendo, nesse ponto, monitoramento dos custos de eficiência de transporte).

3.4 Estudo de Caso

Esta seção descreve a aplicação da sistemática proposta em uma empresa metalúrgica fabricante de componentes e conjuntos de peças estampadas, soldadas e pintadas para montadoras automotivas, rodoviárias e agrícolas. O processo de fabricação das peças é composto por diversas operações, alternando atividades manuais e automatizadas, podendo ser dividido em três setores: estamparia, solda e pintura.

O processo de pintura foi selecionado para elaboração desse estudo de caso. O setor de estamparia é responsável pelo desbobinamento do aço, corte, dobra, estampo, repuxo e usinagem de componentes. A solda é responsável por agrupar as peças, formando conjuntos

que posteriormente serão pintados. No setor de pintura, o processo é dividido em cinco etapas: (i) preparação da superfície da peça, (ii) carregamento das peças nas esteiras da pintura, (iii) aplicação da tinta, (iv) inspeção de qualidade individual de cada peça e (v) descarregamento das peças e embalagem.

O primeiro passo da sistemática proposta tem como objetivo estimar a área em metros quadrados (m^2), que iguala os custos de setup aos custos de pintura e, assim, libera o lote para pintura. As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam as informações sobre tempo de setup e área perdida no setup dentro do processo de pintura. Tais valores foram obtidos através de informações dos roteiros de processo produtivo da empresa, e são necessários para o cálculo da área de liberação de lote A^* para cada cor. Na sequência, converte-se a área em m^2 [Tabela 3.2], em tempo de processamento. Esta conversão permite que os tempos sejam incluídos nas formulações ATCS e ATCSQ.

Tabela 3.1 - Tempo setup horas

<i>Tempo Necessário para Set Up (Horas)</i>					
	03 (Cinza Fumaça)	23 (Cinza Escuro)	24 (Cinza Escuro)	27 (PU Azul)	29 (PU Branco)
03 (Cinza Fumaça)		0,40	0,40	0,40	0,40
23 (Cinza Escuro)	0,49		0,49	0,49	0,49
24 (Cinza Escuro)	0,47	0,47		0,47	0,47
27 (PU Azul)	0,40	0,40	0,40		0,40
29 (PU Branco)	0,53	0,53	0,53	0,53	

Tabela 3.2 - Área perdida por setup (m^2)

<i>Área Perdida por Set Up (m^2)</i>					
	03 (Cinza Fumaça)	23 (Cinza Escuro)	24 (Cinza Escuro)	27 (PU Azul)	29 (PU Branco)
03 (Cinza Fumaça)		56,80	56,80	56,80	56,80
23 (Cinza Escuro)	70,05		70,05	70,05	70,05
24 (Cinza Escuro)	66,27	66,27		66,27	66,27
27 (PU Azul)	56,80	56,80	56,80		56,8
29 (PU Branco)	75,73	75,73	75,73	75,73	

Na etapa seguinte, é calculado o índice de qualidade de cada tarefa. Os dados foram retirados da base de dados de qualidade da empresa (tal dado é usualmente coletado com vistas ao desenvolvimento de ações voltadas à redução de rejeição, dentro do processo de pintura, para diminuição de custo). O cálculo do índice de qualidade é apresentado pela equação (15), conforme mencionado na metodologia. O índice \bar{q} representa uma média de 12

meses de monitoramento das peças dentro do processo.

A Tabela 3.3 identifica o índice de qualidade de cada uma das tarefas. As diferenças em tais índices decorrem das características de cada tarefa, incluindo complexidade geométrica, espessura da chapa, número de acessórios, quantidade de componentes e liberdade de acesso.

Tabela 3.3 - Índice de qualidade por tarefa

Nº	Cor	Código	Tempo / peça (segundos)	Lote médio mensal (peças)	Área (m²)	Índice de Não Qualidade
1	Cinza Fumaça	0200047162S16	83,08	1270	6,2000	5%
2	Cinza Fumaça	0200055756S19	96,92	19	6,0000	4%
3	Cinza Fumaça	0200036302S16	96,92	5	5,2860	3%
4	Cinza Fumaça	0206209034M13	10,38	36	0,2910	3%
5	Cinza Fumaça	0202800991M30	5,54	12	0,0600	2%
6	Cinza Fumaça	0200044808P10	1,38	2528	0,0320	12%
7	Cinza Escuro	4700841505868	152,31	5	7,9000	8%
8	Cinza Escuro	0300876223160	124,62	56	4,3200	7%
9	Cinza Escuro	4700358910A17	48,00	5	4,2800	5%
10	Cinza Escuro	4700358910A17	24,00	10	4,2800	6%
....
....
....
....
....
170	Azul	1900875698029	27,69	182	1,80	1%
171	Azul	1900734012740	9,23	5	0,83	1%
172	Azul	1900734013569	9,23	5	0,42	1%
173	Azul	1900820209921	5,19	2	0,08	1%
174	Azul	1900820209930	5,19	2	0,08	1%
175	Azul	1900875799763	41,54	43	3,71	1%
176	Azul	1900734016371	55,38	9	1,60	1%
177	Azul	1900734016380	55,38	9	1,60	1%
178	Azul	1900841821251	13,85	8	0,58	12%
179	Azul	1900875914996	13,85	1	0,54	1%
180	Azul	1900875915046	13,85	3	0,52	1%
181	Branco	1900876126762	96,92	2	6,40	1%
182	Branco	1900876126789	96,92	5	6,40	9%
183	Branco	1900051775495	3,08	322	0,66	12%

Na sequência são agrupados os produtos a serem processados de acordo com data de entrega, cor da tinta e índice de qualidade. Neste momento, o índice de qualidade ainda está vinculado a cada tarefa; posteriormente, é necessário transformar o índice de cada tarefa no índice de cada subgrupo, conforme descrito na seção 3.6.

Na quinta etapa ocorre a formação dos subgrupos; foram gerados 25 subgrupos utilizando a sistemática descrita na seção 3.5.

No passo seguinte, calcula-se a média do índice de qualidade referente a cada subgrupo. Como as tarefas posteriormente serão processadas em subgrupos, é necessário que cada subgrupo tenha uma composição do índice de qualidade das tarefas que foram a ele alocadas. Na última coluna da Tabela 3.4 é apresentada a média do índice de qualidade para cada subgrupo.

Tabela 3.4 - Média do índice de qualidade

Código Cor	Tarefa	Data	Subgrupo	Q	Média Q
Cinza Fumaça	0200047162S16	Segunda	Subgrupo 1	0,5%	3,4%
Cinza Fumaça	0200055756S19	Segunda	Subgrupo 1	0,4%	
Cinza Fumaça	0200036302S16	Segunda	Subgrupo 1	0,2%	
Cinza Fumaça	0206209034M13	Segunda	Subgrupo 1	12,0%	
Cinza Fumaça	0202800991M30	Segunda	Subgrupo 1	5,0%	
Cinza Fumaça	0200044808P10	Segunda	Subgrupo 1	2,0%	
Cinza Escuro	0300876223160	Segunda	Subgrupo 2	0,1%	7,4%
Cinza Escuro	4800363279A24	Segunda	Subgrupo 2	8,3%	
Cinza Escuro	0300849941937	Segunda	Subgrupo 2	0,9%	
Cinza Escuro	0300876223179	Segunda	Subgrupo 2	0,7%	
Cinza Escuro	0300876223152	Segunda	Subgrupo 2	0,5%	
Cinza Escuro	0300840750934	Segunda	Subgrupo 2	27,3%	
Cinza Escuro	0300876515935	Segunda	Subgrupo 2	14,0%	
...
...
...
Cinza Escuro 2	190E0NN8N2025	Sexta	Subgrupo 23	3,8%	4,8%
Cinza Escuro 2	1900734029201	Sexta	Subgrupo 23	0,1%	
Cinza Escuro 2	0300849936330	Sexta	Subgrupo 23	2,5%	
Cinza Escuro 2	1900820236180	Sexta	Subgrupo 23	7,5%	
Cinza Escuro 2	1900820074112	Sexta	Subgrupo 23	15,2%	
Cinza Escuro 2	1900875766113	Sexta	Subgrupo 23	1,0%	
Cinza Escuro 2	1900875698118	Sexta	Subgrupo 23	0,6%	
Cinza Escuro 2	0300849936003	Sexta	Subgrupo 23	0,7%	
Cinza Escuro 2	0300844322295	Sexta	Subgrupo 23	9,3%	
Cinza Escuro 2	0300849936003	Sexta	Subgrupo 23	0,7%	
Cinza Escuro 2	1900734016169	Sexta	Subgrupo 23	11,2%	
Azul	1900734033861	Sexta	Subgrupo 24	0,2%	3,3%
Azul	1900829920482	Sexta	Subgrupo 24	0,2%	
Azul	1900875698029	Sexta	Subgrupo 24	0,7%	
Azul	1900734012740	Sexta	Subgrupo 24	13,2%	
Azul	1900875799763	Sexta	Subgrupo 24	2,1%	
Branco	1900876126789	Sexta	Subgrupo 25	3,8%	2,0%
Branco	1900051775495	Sexta	Subgrupo 25	0,1%	

subgrupo

por

Os índices de qualidade são então inseridos nas regras ATC, ATCS e ATCSQ, conforme equações (2), (3) e (17), respectivamente. O Quadro 3.6 apresenta a sequência recomendada pelas regras. Percebe-se que as heurísticas ATC e ATCS conduzem a sequências similares, porém a heurística ATCSQ gera uma sequência distinta em relação à ordem de entrada sugerida pelas regras anteriores.

Quadro 3.6 - Sequência de entrada dos subgrupos

ATC	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	G5	G3	G1	G2	G4	G8	G6	G7	G9	G14	G12	G10	G11	G13	G17	G15	G18	G16	G19	G22	G20	G21
ATCS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	G5	G3	G1	G2	G4	G8	G6	G7	G9	G14	G12	G10	G11	G13	G17	G15	G18	G16	G22	G19	G20	G21
ATCSQ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
	G10	G6	G1	G2	G4	G3	G5	G7	9	G12	G15	G16	G8	G20	G13	G11	G14	G17	G21	G18	G19	G22

Os indicadores adotados para comparar as ATCS e ATCSQ são: (i) eficiência do sistema de pintura (medido através do OEE), (ii) minimização dos atrasos de entrega e (iii) percentual de embalagens incompletas. A regra ATC não é considerada nesta etapa, visto que seus resultados são muito semelhantes aos gerados pela ATCS. As diferentes regras de sequenciamento foram avaliadas durante uma semana de operação (de segunda-feira a sexta-feira). A análise dos três critérios permite selecionar a regra de sequenciamento mais adequada para a linha de pintura. Os valores apresentados através dos resultados descritos abaixo são valores médios dos cinco dias de análise.

Eficiência do sistema de pintura (medido através do OEE)

A Figura 3.5 compara o OEE gerado por três cenários decorrentes da aplicação de ATCS, ATCSQ e opinião do especialista (situação atual da empresa). O cenário contendo a opinião do especialista possui uma eficiência média de 42,35%, o cenário da regra ATCS obteve uma eficiência média de 75,19% e o cenário da regra ACTSQ apresentou uma eficiência média de 77,93%.

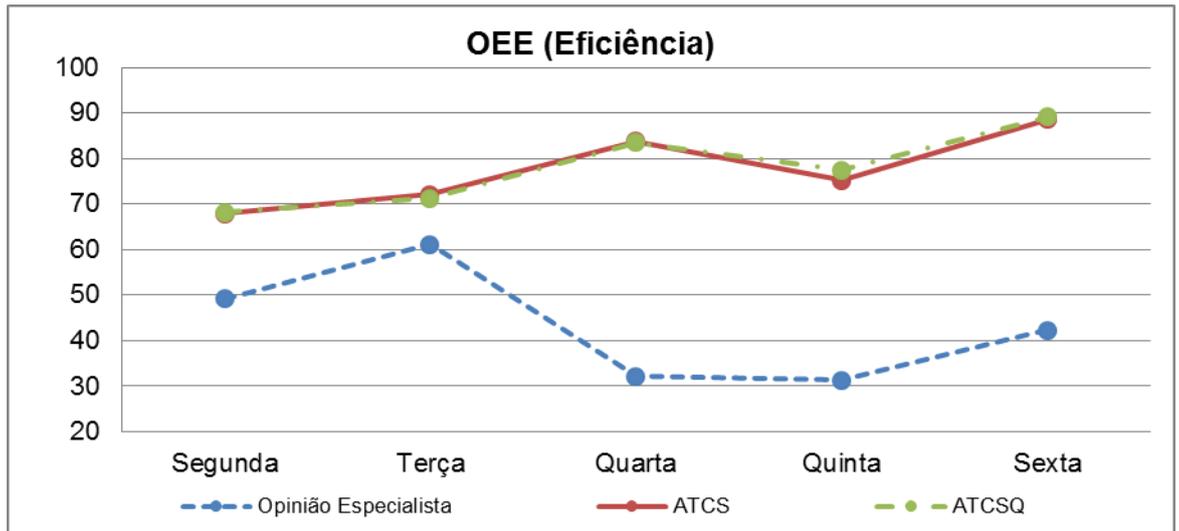


Figura 3.4 - Comparação da eficiência (OEE) para as regras testadas

Resultados financeiros

Como resultados financeiros alcançados obteve-se uma potencial redução mensal estimada em R\$ 67.320,00 por mês em cada instalação de pintura onde a metodologia de ATCSQ for adotada em relação à condição da opinião do especialista na programação de entrada de tarefas.

Minimização dos atrasos de entrega (Precisão de entrega)

Na Figura 3.6 são apresentados os resultados das regras sobre o indicador de minimização dos atrasos de entrega. A regra ATCSQ obteve uma precisão média de 97,89% (ou seja, apenas 2,11% dos pedidos apresentaram atrasos incluindo reprocessamentos decorrentes dos problemas de qualidade). Já a regra ATCS obteve 92,26% e a condição anteriormente aplicada na empresa sob opinião do especialista, gerou precisão de entrega média no período de análise de 78,90%.

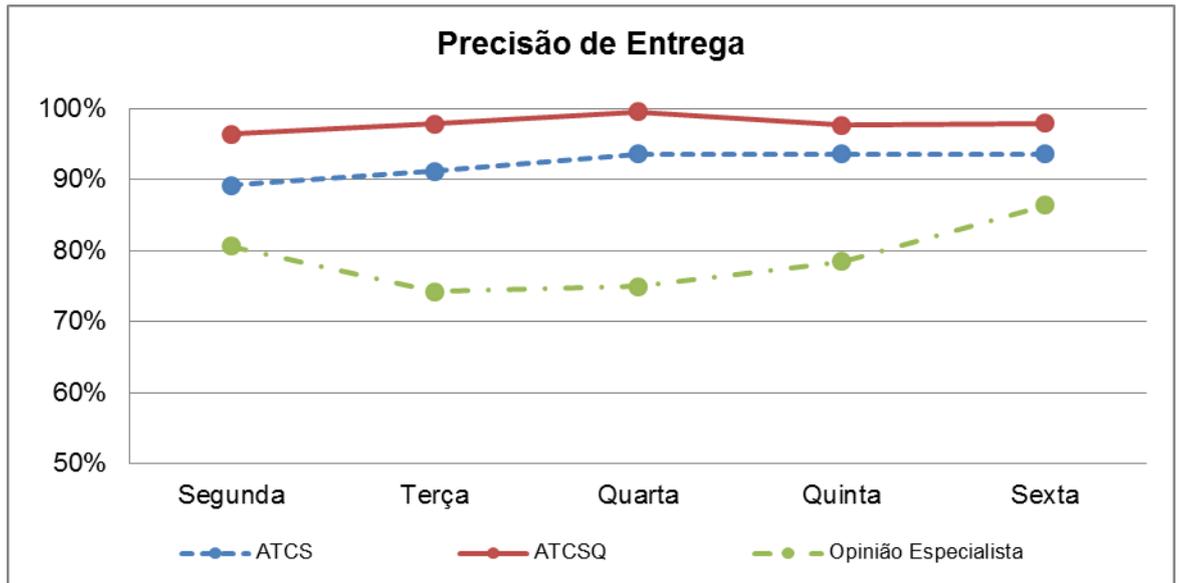


Figura 3.5 - Comparação precisão de entrega para as regras testadas

Percentual de embalagens completas

Por fim, a Figura 3.7 compara as regras com relação ao percentual de embalagens completas produzidas no processo de pintura. A regra ATCSQ possui uma média de 90% de embalagens completas, já a regra ATCS e a opinião do especialista geraram 82% de embalagens completas. O indicador de percentual de embalagens completas retrata o percentual de otimização do processo de carregamento de peças até o cliente, visto que no momento de formação do custo este contempla a embalagem com sua totalidade de peças para cálculo de frete. Cada momento que o envio de peças é concebido de forma parcial, ou seja, com um número parcial de peças este leva consigo automaticamente um demérito de custo visto que no passar de meses uma nova carga deverá ser enviada somente para completar as quantidades de peças que deixaram de ser enviadas no primeiro momento.

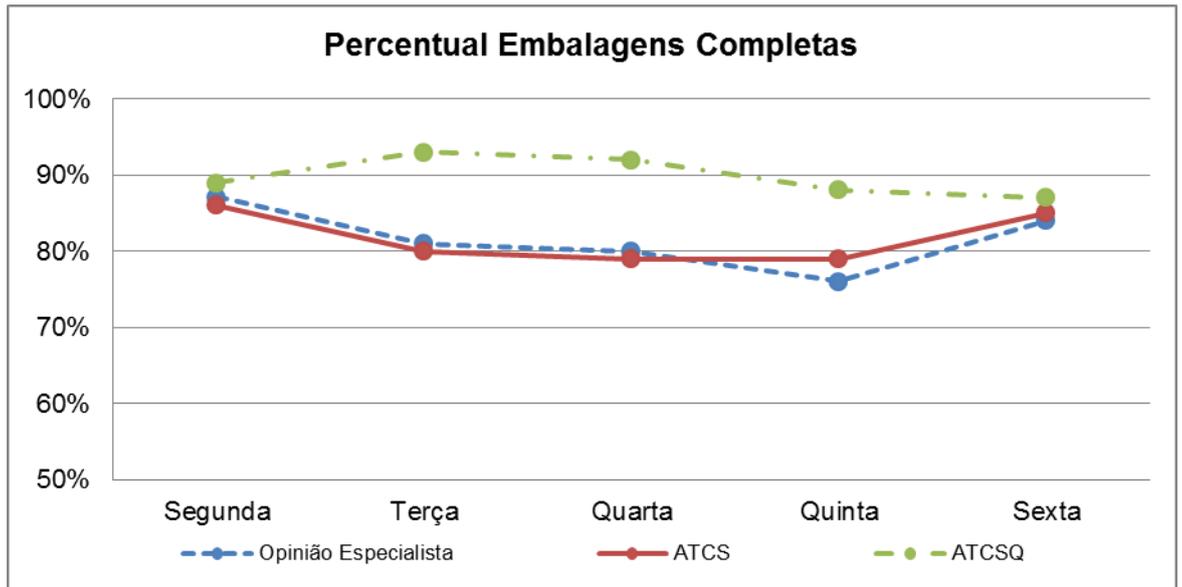


Figura 3.6 - Comparação percentual embalagens completas para as regras testadas

3.5 Conclusão

A realização deste estudo permitiu analisar o desempenho de uma nova heurística de sequenciamento aplicada a uma linha de pintura. A nova heurística apoia-se na regra ATCS, e traz como diferencial a inserção de critérios de qualidade na regra de sequenciamento, gerando a ATCSQ. A consideração de fatores de qualidade na regra de sequenciamento permite reduzir consideravelmente os problemas de processo associados à eficiência da instalação de pintura, precisão de entrega e percentual de embalagens incompletas.

A sistemática proposta foi ilustrada através de um estudo de caso aplicado no processo de produção da empresa Bruning Tecnometal Ltda. A ATCSQ gerou uma sequência de produção considerada coerente pelos especialistas de processo da empresa. Além disso, seus resultados analisados através dos indicadores pré-estabelecidos foram considerados satisfatórios, conforme descrito na seção 3.4.

A proposição dessa heurística também contribui academicamente, pois o levantamento bibliográfico realizado não apontou regras de sequenciamento que abordassem aspectos de qualidade como a apresentada neste artigo.

Para futuros trabalhos na área de sequenciamento de pintura, sugerem-se novas adaptações da regra de despacho ATCS, dada sua simplicidade e eficiência. A aplicação de abordagens de sequenciamento focadas em outras funções-objetivo, como a minimização simultânea do atraso e adiantamento (PINEDO, 2008), também são de interesse.

3.6 Referências

AKTURK, M.S., YILDIRIN, M.B., A new bounding scheme for the total weighted tardiness problem. **Computer & Operations Research** 25, 265-278, 1998.

BYUNG J.J., YOUNG C.C., PAUL X., Dispatching rule-based algorithms for a dynamic flexible flow shop scheduling problem with time-dependent process defect rate and quality feedback. **Procedia CIRP** 7 (2013) 163-168, 2013.

CHAMBERS R.J., CARRAWAY R.L., LOWE T.J., MORIN T.L., Dominance and decomposition heuristics for single machine scheduling. **Operations Research** 39, 639-647, 1991.

CORRÊA, H. L.; CORRÊA, C. A. **Administração de produção e operações – manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. São Paulo: Atlas, 2004.

DAVIS, M. M., AQUILANO, N. J., CHASE, R. B. **Fundamentos de Administração da produção**. 3. Ed. São Paulo: Bookman. Porto Alegre, 2001.

DA SILVEIRA, G., BORESTEIN, D., FOGLIATTO, F. S Mass customization: Literature review and research direction. **International Journal of Production Economics**, v. 72, p. 1-13, 2001.

DE RON, A. J. Sustainable Production: the Ultimate Result of a Continuous Improvement. **International Journal of Production Economics**, v. 56-57, p. 99-110, 1998.

DRIESSEL, R.; MONCH, L., 2011. Variable neighborhood search approaches for scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times, precedence constraints, and ready times. **Computers & Industrial Engineering** 61 336-345, 2011.

ELSAYED, E. A; BOUCHER, T. O. **Analysis and Control of Production Systems**. 2.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1994.

HERRMANN, J. W. **Handbook of production scheduling**. NewYork: Springer, 318 p, 2006.

LAMOTHE J., MARMIER F., DUPUY M., GABORIT P., DUPONT L., Scheduling rules to minimize total tardiness in a parallel machine problem with setup and calendar constraints. **Computer & Operations Research** 39 1236-1244, 2012.

LARS MÖNCH, JENS ZIMMERMANN, PETER OTTO., Machine learning techniques jobs with incompatible families and unequal ready times on parallel batch machines. **Engineering Applications of Artificial Intelligence** 19 235-245, 2006.

OGUZ, C.; SALMAN F.S.; YALÇIN, Z.B; Order acceptance and scheduling decisions in make-to-order systems. **International Journal of Production Economics** 125 200-211, 2010.

OVACIK, I. M.; UZSOY, R. Decomposition methods for complex factory scheduling problems. **Norwell: Kluwer Academic Publishers**, 232 p, 1997.

PANWALKAR S.S., DUDEK R.A., SMITH M.L., Sequence research and the industrial scheduling problem. **Proceeding of the Symposium on the theory of scheduling and it applications**, p. 29-38, 1973.

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

REID, R. D.; SANDERS, N. R. **Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

SEZGIN KAPLAN, GHAITH RABADI, Exact and heuristic algorithms for the aerial refueling parallel machine scheduling problem with due date-to-deadline window and ready times. **Computers & Industrial Engineering** 62 276-285, 2012.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

TUBINO, Dalvio Ferrari. **Planejamento e controle da Produção: teoria e prática**. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

VALENTE M.S.J., Improving the performance of the ATC dispatch rule by using workload data to determine the lookahead parameter value. **International Journal of Production Economics** 106 563-573, 2007.

VEPSALAINEN, A. P. J.; MORTON, T. E. Priority Rules for Job Shops with Weighted Tardiness Costs. **Management Science**, v. 33, n. 8, p. 1035-1047, 1987.

WIGHT, O. W. **Production and Inventory Management in the Computer Age**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, Inc., 1984.

WISNER, J.D., SIFERD, S.P., A survey of LIS manufacturing practices in make-to-order machines shops. **Production and Inventory Management Journal** 1, 1-7, 1995.

YOUNG HOON LEE, MICHAEL PINEDO, Scheduling jobs on parallel machines with sequence-dependent setup times. **European Journal of Operational Research** 100 464-474, 1997.

YUE, X.; JANG, J.J., Scheduling jobs on identical parallel machines with unequal future ready time and sequence dependent setup: An experimental study. **International Journal of Production Economics** 137 (2012) 1-10, 2012.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A tendência do mercado consumidor em buscar produtos diferenciados obriga as empresas de manufatura a adotarem estratégias para atender a estas demandas. Os pedidos, sujeitos a lotes com quantidades variadas e entregas quase que diárias, precisam ser atendidos em prazos cada vez mais curtos (porém com manutenção dos índices de qualidade e custo). Com esta premissa, as ferramentas de sequenciamento aparecem como subsídio com vistas à programação de produção.

O primeiro artigo que compõe essa dissertação teve como objetivo apresentar uma sistemática de utilização de regras de sequenciamento de produção em um sistema de pintura. Inicialmente, definiu-se a área mínima para que um grupo de modelos de mesma cor fosse liberado para sequenciamento. Tal área foi então convertida em tempo de processo, o qual, aliado a outras variáveis peculiares de cada grupo de produtos (como setup de data de entrega), foi inserido em regras de sequenciamento do tipo ATC e ATCS. Ao ser aplicado em um sistema de pintura, a sistemática proposta aumentou a eficiência do sistema em análise em 32,84%, medido através do OEE, frente ao sequenciamento baseado estritamente no conhecimento dos especialistas de processo.

O segundo artigo apresenta uma nova heurística apoiada na regra ATCS, a qual faz a inserção de um parâmetro de qualidade na regra tradicional. A inserção de aspectos de qualidade na regra de sequenciamento permite reduzir os problemas de processo associados à ineficiência da instalação de pintura, precisão de entrega e percentual de embalagens incompletas. Tal abordagem foi ilustrada através de um estudo de caso na empresa Bruning Tecnometal Ltda, a qual gerou uma sequência de produção considerada coerente pelos especialistas de processo da empresa.

A proposição dessa heurística também contribui academicamente, pois nas pesquisas realizadas verificou-se carência de abordagens de sequenciamento apoiadas em fatores de qualidade.

Para futuros trabalhos na área de sequenciamento de pintura, sugerem-se novas adaptações da regra de despacho ATCS. Objetiva-se ainda avaliar o impacto de tempos estocásticos de processamento e setup nas abordagens propostas. Discute-se ainda endereçar outras funções objetivo tipicamente analisadas em processos de sequenciamento, além da minimização do atraso tratada neste estudo.