

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

VIVIANE JUNQUEIRA DE MORAES

**HEURÍSTICAS PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM
MÁQUINA CONTROLADA POR COMANDO NUMÉRICO
COMPUTADORIZADO**

Belo Horizonte

2016

Viviane Junqueira de Moraes

**HEURÍSTICAS PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM
MÁQUINA CONTROLADA POR COMANDO NUMÉRICO
COMPUTADORIZADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Minas Gerais, para a obtenção de Título de Mestre em Engenharia de Produção, na Área de Concentração Otimização de Sistemas Logísticos e de Grande Porte.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza.

Belo Horizonte

2016

M827h

Moraes, Viviane Junqueira de.

Heurísticas para programação da produção em máquina controlada por comando numérico computadorizado [recurso eletrônico] / Viviane Junqueira de Moraes. - 2016.

1 recurso online (89 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Maurício Cardoso de Souza.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 87-89.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de produção - Teses. 2. Heurística - Teses.
3. Planejamento da produção - Teses. 4. Tecnologia de grupo - Teses.
I. Souza, Maurício Cardoso de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 658.5(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UFMG

ATA DA DEFESA DA DISSERTAÇÃO DA ALUNA VIVIANE JUNQUEIRA DE MORAES

Realizou-se, no dia 14 de dezembro de 2016, às 14:30 horas, Sala T005, Escola de Engenharia, da Universidade Federal de Minas Gerais, a 312ª defesa de dissertação, intitulada *Heurísticas para Programação da Produção em Máquina Controlada por Comando Numérico Computadorizado*, apresentada por VIVIANE JUNQUEIRA DE MORAES, número de registro 2014722344, graduada no curso de ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, à seguinte Comissão Examinadora: Prof(a). Mauricio Cardoso de Souza - Orientador (UFMG), Prof(a). Horácio Hideki Yanasse (UNIFESP), Prof(a). Martin Gomez Ravetti (UFMG).

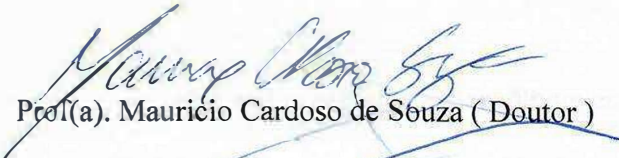
A Comissão considerou a dissertação:

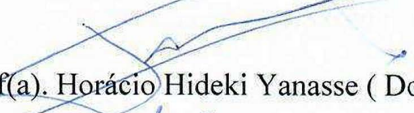
Aprovada

Reprovada

Finalizados os trabalhos, lavrei a presente ata que, lida e aprovada, vai assinada por mim e pelos membros da Comissão.

Belo Horizonte, 14 de dezembro de 2016.


Prof(a). Mauricio Cardoso de Souza (Doutor)


Prof(a). Horácio Hideki Yanasse (Doutor)


Prof(a). Martin Gomez Ravetti (Doutor)

*Ao meu avô Rui, meu anjo protetor, que sempre se
orgulhou das minhas conquistas.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a Nossa Senhora por todas as bênçãos e graças alcançadas. Ao Professor e orientador Maurício de Souza, pelo aprendizado, ensinamentos, dedicação e paciência. À minha mãe Beatriz, pela força, amor e dedicação incondicionais. À minha avó Tonha pelas orações. Aos meus irmãos Vinícius e Filipe, os melhores do mundo, e à minha cunhada Cíntia pela união e amizade. Ao meu noivo Daniel, pelo carinho, paciência e compreensão em todos os momentos. Ao meu grande amigo Marco Túlio, pela colaboração, incentivo, apoio e disposição em ajudar sempre. Você é incrível! À minha família, pelo incentivo e torcida, em especial meu primo Arthur e minha amiga Soraya. Aos amigos da Escola de Farmácia e da Coordenadoria de Suprimentos da UFOP. Agradeço a todas as escolas e professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao Prof. Gustavo Peixoto do DECOM/UFOP. À UFMG, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção e ao Secretário Marcos Leão pela oportunidade e apoio. Agradeço a convivência e colaboração dos amigos do mestrado Alexandre Martins, Michael David e Guilherme Batista. Agradeço ao Joaquim Cunha pela colaboração e disposição em ajudar, e aos Professores Carlos Venâncio, Martin Ravetti e Horácio Yanasse pelas contribuições significativas. Não foi nada fácil, chegou a parecer impossível, e eu não teria conseguido sem o apoio de todos vocês! Muito obrigada! Fica sempre o aprendizado: *“Vivendo e aprendendo a jogar. Nem sempre ganhando, nem sempre perdendo. Aprendendo a jogar!”*.

Resumo

Este trabalho aborda a programação da produção em um sistema de manufatura flexível de indústria metal-mecânica de pequeno porte, que utiliza uma máquina controlada por Comando Numérico Computadorizado para o processamento de peças de precisão. A máquina executa diversos *jobs*, que compõem produtos, e que demandam um conjunto de ferramentas que devem estar na máquina no momento do seu processamento. Como a caixa de ferramentas da máquina tem capacidade limitada e inferior ao total de ferramentas necessárias para processar todos os *jobs*, são necessárias trocas de ferramentas. A programação da produção é feita em períodos semanais, a empresa possui turnos de trabalhos diários e limites máximos para a execução de horas extras, e os produtos possuem prazos estabelecidos para serem entregues. Como a quantidade de horas extras é limitada, podem ocorrer custos de atraso pela não entrega dos produtos no prazo. Assim, o problema consiste em determinar quais *jobs* deverão ser processados em cada dia do horizonte de planejamento, a sequência desses *jobs* e a associada sequência de carregamento de ferramentas na máquina de forma a minimizar o custo total da produção: custos com horas extras e com atrasos dos produtos. Esse objetivo está relacionado com reduzir o tempo gasto com interrupções da máquina para trocas de ferramentas. Para resolver o problema utilizam-se métodos heurísticos para o particionamento e agrupamento dos *jobs*, para o sequenciamento dos grupos de *jobs* e um método de busca, capaz de refinar os custos da produção. Os métodos desenvolvidos são testados em instâncias com dados reais e os resultados são comparados com a prática da empresa e com um modelo de programação inteira. Os resultados encontrados, em um tempo computacional desprezível, apresentam custos de produção menores do que todos os custos da prática e, para alguns casos, melhores do que aqueles obtidos pelo modelo de programação inteira.

Palavras-chave: Sistema de Manufatura Flexível. Comando Numérico Computadorizado. Programação da Produção. Problema de Sequenciamento de *Jobs* e de Trocas de Ferramentas. Tecnologia de Grupos. Heurísticas.

Abstract

In this study we treat the production scheduling in a flexible manufacturing system of a small metalworking industry that uses a Computer Numeric Control machine for processing precision parts. The machine performs several jobs that produce products using a set of tools that must be in the magazine so that processing is performed. The magazine of the machine has limited capacity that is lower than the total number of tools required to process all jobs. When a job requires a tool that is not available in the magazine, tool switches are required. The production scheduling is done on a weekly basis, the company has daily work shifts and upper limits for the execution of overtime, and the products have due dates for delivery. Since the overtime is limited, all products may not be delivered within their due dates, incurring late costs. The problem is to determine which jobs should be processed on each day of the planning horizon, the sequence of these jobs and the associated tools loading sequence on the magazine in order to minimize overtime costs and delays costs. This objective is related to reducing the time spent with the setup activities, that is, with the total number of interruptions of the machine and the total number of tool switches. To solve the problem heuristic methods are used for the partitioning of jobs and grouping of the jobs, for the sequencing of the groups of jobs and a search method, capable of refining the costs of the production. The methods developed are tested in instances with real data and the results are compared to the company practice and with an integer programming model. The results obtained, in a reduced computational time, present lower production costs than all the costs of the company practice and for some instances, the costs are lower than those obtained by the integer programming model.

Key-works: *Flexible Manufacturing System. Computer Numeric Control. Production Scheduling. Job Sequencing and Tool Switching Problem. Group Technology. Heuristics.*

Lista de Figuras

Figura 1 - Modelo da Puncionadeira CNC	29
Figura 2 - Modelo da Caixa de Ferramentas da Puncionadeira.....	30
Figura 3 - Objetivo na Programação da Puncionadeira CNC.....	32
Figura 4 - Comparação entre o total de <i>jobs</i> necessários para a produção de todos os produtos em uma semana e o total de instantes de <i>setup</i>	35
Figura 5 - Exemplo do método de particionamento de <i>jobs</i>	43
Figura 6 - Tecnologia de Grupos: exemplo de matriz de incidência e decomposição em blocos	44
Figura 7 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de <i>jobs</i> - matriz de incidência	49
Figura 8 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de <i>jobs</i> - 1ª iteração.....	50
Figura 9 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de <i>jobs</i> - 2ª iteração.....	50
Figura 10 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de <i>jobs</i> - 3ª iteração.....	51
Figura 11 - Exemplo aplicação consecutiva do método de particionamento de <i>jobs</i> e da heurística de agrupamento	51
Figura 12 - Relação entre grupos não sequenciados e produtos em atraso	55
Figura 13 - Exemplo de custos com horas extras dos tipos 1 e 2	58
Figura 14 - Exemplo de custos com horas extras do tipo 1	58
Figura 15 - Comparação entre o total de <i>jobs</i> e o total de grupos gerados pela heurística de agrupamento para as 20 semanas.....	82
Figura 16 - Comparação entre o número total de <i>setups</i> do resultado do Contexto Industrial, do Método Heurístico e do Modelo MHA.....	83

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Valores dos Parâmetros da Programação de Puncionadeira na prática.....	31
Tabela 2 - Sequência de execução dos <i>jobs</i> e configuração da caixa de ferramentas da máquina	33
Tabela 3 - Aplicação da política KTNS à sequência de produção	34
Tabela 4 - Aplicação do modelo MHA à sequência de produção	41
Tabela 5 - Características das semanas usadas como base para as instâncias.....	62
Tabela 6 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 1	66
Tabela 7 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 2	66
Tabela 8 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 3	67
Tabela 9 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 4	67
Tabela 10 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 5	68
Tabela 11 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 6	68
Tabela 12 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 7	69
Tabela 13 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 8	69

Tabela 14 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 9	70
Tabela 15 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 10	70
Tabela 16 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 11	71
Tabela 17 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 12	71
Tabela 18 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 13	72
Tabela 19 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 14	72
Tabela 20 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 15	73
Tabela 21 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 16	73
Tabela 22 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 17	74
Tabela 23 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 18	74
Tabela 24 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 19	75
Tabela 25 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 20	75
Tabela 26 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 1	77

Tabela 27 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 2	77
Tabela 28 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 3	77
Tabela 29 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 4	78
Tabela 30 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 5	78
Tabela 31 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 6	78
Tabela 32 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 7	78
Tabela 33 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 8	79
Tabela 34 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 9	79
Tabela 35 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 10	79
Tabela 36 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 11	79
Tabela 37 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 12	80
Tabela 38 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 13	80
Tabela 39 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 14	80

Tabela 40 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 15	80
Tabela 41 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 16	81
Tabela 42 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 17	81
Tabela 43 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 18	81
Tabela 44 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 19	81
Tabela 45 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 20	82

Lista de Abreviaturas

CNC	: <i>Computer Numeric Control</i> - Máquinas de Controle Numérico Computadorizado
FMS	: <i>Flexible Manufacturing System</i> - Sistemas de Manufatura Flexíveis
KTNS	: <i>Keep Tool Needed Soonest</i>
MCHEAAPTF	: Modelo de Minimização de Custos com Horas Extras e Atrasos Agrupado por Produtos com Tempos Fixos de Parada
MHA	: Denominação utilizada neste trabalho para o modelo MCHEAAPTF
SP	: <i>job Sequencing Problem</i> - Problema de Sequenciamento de <i>Jobs</i>
SSP	: <i>job Sequencing and tool Switching Problem</i> - Problema de Sequenciamento de <i>Jobs</i> e de Trocas de Ferramentas
TG	: Tecnologia de Grupos
TP	: <i>Tool Problem</i> - Problema de Ferramentas

Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 - Algoritmo para agrupamento de <i>jobs</i>	47
Algoritmo 2 - Método para refinamento da solução.....	59

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 OBJETIVOS	16
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2. SISTEMAS DE MANUFATURA FLEXÍVEL	18
2.1 PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DE <i>JOBS</i> E DE TROCAS DE FERRAMENTAS.....	19
2.2 EXAME DE LITERATURA SOBRE O SSP	20
3. PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM MÁQUINA CNC	29
3.1 CONTEXTO INDUSTRIAL.....	29
3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	35
4. HEURÍSTICA PARA A PROGRAMAÇÃO DA PUNCIÓNADEIRA CNC	42
4.1 PARTICIONAMENTO DOS <i>JOBS</i>	43
4.2 HEURÍSTICA DE AGRUPAMENTO	43
4.3 SEQUENCIAMENTO DOS GRUPOS DE <i>JOBS</i>	51
4.4 MÉTODO DE REFINAMENTO DA SOLUÇÃO.....	54
5. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS	61
5.1 DESCRIÇÃO DAS INSTÂNCIAS.....	61
5.2 APLICAÇÃO DO MODELO MHA	63
5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO HEURÍSTICO.....	76
6. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

Capítulo 1

Introdução

Sistemas de Manufatura Flexíveis (do inglês, *Flexible Manufacturing System* – FMS) podem ser definidos, de uma forma geral, como sistemas de produção altamente automatizados, capazes de produzir uma grande variedade de peças e produtos, usando o mesmo equipamento e o mesmo sistema de controle.

Nesses sistemas, também conhecidos como Sistemas de Manufatura Automatizados, máquinas de Controle Numérico Computadorizado (CNC) são usadas para realizar operações em lotes. Cada operação requer um conjunto de ferramentas que podem ser armazenadas nas caixas de ferramentas das máquinas. Durante a produção, um dispositivo automático de intercâmbio de ferramentas é usado para trocar rapidamente entre as ferramentas da caixa e o dispositivo que suporta a ferramenta ativa. Esta capacidade de intercâmbio rápido permite que as máquinas possam executar várias operações sucessivamente (CRAMA, 1997).

No entanto, a caixa de ferramentas da máquina tem capacidade limitada e pode não conter todas as ferramentas necessárias para a execução de um plano de produção. Conseqüentemente, são necessárias atividades de *setup* ao longo da produção: a máquina precisa ser parada para a remoção da caixa de ferramentas, as trocas de ferramentas necessárias são efetuadas e a caixa é reinsertada na máquina.

Um sistema de controle computadorizado realiza a gestão das peças, ferramentas e manuseio de materiais. Mas apesar da automatização, recursos humanos também podem ser necessários para gerenciar as operações do sistema, carregar peças de trabalhos brutas e descarregar peças acabadas, realizar manutenção de equipamentos e trocar e preparar ferramentas.

Gerir um FMS pode ser mais complicado que a gestão de um sistema de produção convencional devido à flexibilidade da máquina, que é a capacidade de executar vários tipos de operações, de formas diferentes. As ferramentas das máquinas são bastante versáteis e vários tipos de peças podem ser fabricados simultaneamente. Além disso, cada parte

individual, mesmo aquelas do mesmo tipo de peça, pode ter várias rotas através do sistema (STECKE, 1986).

Os FMS são frequentemente utilizados na indústria metal-mecânica e configurações semelhantes também são comuns na indústria eletrônica de produção de Placas de Circuitos Impressos (*Printed Circuit Boards*).

O presente trabalho foi motivado pela situação prática encontrada em uma empresa de pequeno porte do mercado metal-mecânico de precisão do Estado de Minas Gerais, especializada na fabricação de peças e caixas em chapas metálicas para aparelhos de radiologia hospitalar, aparelhos óticos, equipamentos para laboratório, eletroeletrônicos e iluminação. Especificamente, foi estudado o setor de estamperia que conta com uma punctionadeira CNC capaz de estampar chapas de aço, aço inoxidável e alumínio através de ferramentas de furo e corte. O planejamento da empresa envolve jornadas de trabalho e limites de horas extras, o que pode levá-la a incorrer em custos com o excedente da jornada normal de trabalho e com eventuais custos de atrasos nas entregas dos produtos.

É importante estudar a programação de máquinas CNC dentro do planejamento da empresa porque essas máquinas têm pouca interação humana e proporcionam elevados níveis de produtividade. Por outro lado, as paradas para trocas de ferramentas podem ser complexas, exigir tempos elevados para a sua execução e podem gerar riscos à integridade da máquina, pois uma troca de ferramentas mal sucedida é capaz de gerar danos. Assim, o número de paradas da máquina e de trocas de ferramentas tem impacto no tempo total da produção e conseqüentemente nos custos de horas extras e de atrasos.

O objetivo deste trabalho é desenvolver e aplicar métodos heurísticos eficientes, capazes de encontrar soluções satisfatórias para a programação da produção da máquina CNC em um tempo computacional reduzido. É importante atingir esse objetivo, pois o desenvolvimento de métodos eficientes pode aumentar a produtividade das máquinas flexíveis, reduzindo consideravelmente os tempos e custos de produção.

Para todos os métodos desenvolvidos são realizados experimentos computacionais em instâncias com dados reais e os resultados são comparados com a prática da empresa. Encontrar resultados de qualidade em um tempo computacional reduzido pode incentivar o uso do método para reais aplicações no contexto industrial.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver métodos heurísticos eficientes para a programação da produção de máquinas CNC, capazes de reduzir os custos de produção utilizando um tempo computacional reduzido e apresentar e comparar o desempenho dos métodos com a programação realizada no chão de fábrica da empresa e com modelo de programação inteira executado em pacote de otimização.

Para a consecução do objetivo geral são traçados os seguintes objetivos específicos:

- Implementar um método de particionamento do conjunto de *jobs*, que considere os prazos de entrega;
- Implementar um método de agrupamento dos *jobs*, buscando reduzir os números de parada da máquina e de trocas de ferramentas;
- Implementar um método de sequenciamento dos grupos de *jobs*, com o intuito de reduzir os custos com horas extras e de atraso;
- Implementar um método de busca, capaz de reduzir os custos da produção;
- Comparar o desempenho das técnicas utilizadas, considerando o conjunto de dados disponibilizado pela empresa e um modelo de programação inteira.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Neste capítulo introdutório são apresentados os conceitos de sistemas de manufatura flexíveis que envolvem a programação de máquinas CNC. Os objetivos deste trabalho também são apresentados.

No Capítulo 2 são apresentados as características dos sistemas de manufatura flexíveis, os problemas envolvidos na programação das máquinas CNC e a revisão bibliográfica sobre o Problema de Sequenciamento de *Jobs* e de Trocas de Ferramentas. O contexto industrial e o problema foco deste trabalho são apresentados no Capítulo 3, bem como a modelagem matemática para o problema.

No Capítulo 4 são descritos, de forma detalhada, as heurísticas e métodos desenvolvidos para resolver o problema. No Capítulo 5 estão os experimentos numéricos, os resultados obtidos e a análise dos mesmos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões do presente estudo, relatando a eficiência dos métodos utilizados para a resolução do problema.

Capítulo 2

Sistemas de Manufatura Flexível

Nos Sistemas de Manufatura Flexível máquinas CNC são utilizadas para executar sucessivamente tarefas (ou *jobs*, como encontrado na literatura). Cada máquina realiza operações usando as ferramentas disponíveis em sua caixa de ferramentas (*tool magazine*), cuja capacidade é limitada, ou seja, o número de espaços (*slots*) para alocação de ferramentas é limitado. Cada *job* exige um subconjunto de ferramentas, que tem de ser colocado na caixa de ferramentas da máquina antes do *job* ser processado. Nenhum *job* requer mais ferramentas do que a capacidade da caixa de ferramentas da máquina pode suportar, caso contrário, o problema seria inviável. Como a caixa de ferramentas da máquina tem capacidade limitada, e, em geral, o número de ferramentas necessárias para produzir todos os *jobs* excede essa capacidade, é preciso realizar atividades de *setup*, isto é, a máquina é parada, ferramentas são retiradas da caixa de ferramentas e substituídas por outras.

Crama *et al.* (2007) ressaltam que, na literatura, dois tipos de caixas de ferramentas são descritos. Um tipo é o denominado compartimento linear que é essencialmente uma fileira de *slots* consecutivos. Este tipo de compartimento é muito comum na montagem de Placas de Circuitos Impressos (*Printed Circuit Boards*). O outro tipo é um compartimento giratório, que é normalmente utilizado na indústria de metal-mecânica.

Quanto às ferramentas utilizadas pela máquina, estas podem ter tamanho uniforme e não-uniforme. Tamanho uniforme significa que todas as ferramentas têm o mesmo tamanho e, conseqüentemente, ocupam o mesmo número de *slots* na caixa de ferramentas. Tamanho não-uniforme refere-se à situação onde o tamanho não é o mesmo para todas as ferramentas e estas podem ocupar diferentes números de *slots*.

A dificuldade de considerar ferramentas de tamanhos não-uniformes é que a localização física da ferramenta na caixa se torna relevante. Por exemplo, remover duas ferramentas de tamanho um de *slots* não-adjacentes (não consecutivos) não cria espaço suficiente para alocar uma ferramenta de tamanho dois. Assim, além de determinar quais ferramentas necessitam estar presente na caixa é preciso especificar qual a localização de cada

uma. Quando todas as ferramentas têm tamanho único, a única decisão relevante é se a ferramenta deve ser colocada na caixa ou não (CRAMA *et al.*, 2007).

2.1 PROBLEMA DE SEQUENCIAMENTO DE *JOBS* E DE TROCAS DE FERRAMENTAS

O problema central de gerenciamento em máquinas flexíveis é determinar uma sequência de *jobs* e uma sequência associada de carregamento de ferramentas, de modo a otimizar alguma medida de desempenho da produção (CRAMA, 1997).

Este problema é conhecido na literatura como Problema de Sequenciamento de *Jobs* e de Trocas de Ferramentas (*job Sequencing and tool Switching Problem – SSP*) e acopla o Problema de Sequenciamento de *Jobs* (*job Sequencing Problem – SP*) e o Problema de Ferramentas (*Tool Problem – TP*), também denominado Problema de Trocas de Ferramentas (*Tool Switching Problem*).

O Problema de Ferramentas surge quando se tem uma sequência fixa para processamento dos *jobs*. Neste caso, o objetivo é determinar, para a sequência dada, quais ferramentas devem ser carregadas na caixa de ferramentas, em cada posição do sequenciamento de *jobs*, de modo a minimizar o número total de trocas de ferramentas.

Os dois principais objetivos estudados na literatura para o SSP são: minimizar o número total de *setups* e minimizar o número total de trocas de ferramentas. Minimizar o número total de *setups*, também denominado número total de instantes de troca, é um objetivo apropriado quando existe um tempo de *setup* fixo e independente do número de ferramentas que serão trocadas (TANG e DENARDO, 1988b). Nestes casos, minimizar o número de paradas pode ser mais eficiente do que minimizar o número de trocas de ferramentas (KONAK *et al.*, 2008). Este objetivo está também relacionado com o Problema de Agrupamento de *Jobs* (*Job Grouping Problem*) que consiste em, dado um determinado conjunto de *jobs*, dividir este conjunto em um menor número possível de subconjuntos que podem ser processados sem acarretar trocas de ferramentas. Minimizar o número total de trocas de ferramentas é um objetivo especialmente importante quando o tempo necessário para trocar uma ferramenta é significativo no que diz respeito aos tempos de processamento

dos *jobs*, ou quando vários pequenos lotes de diferentes *jobs* devem ser processados sucessivamente (CRAMA *et al.*, 1994).

Tang e Denardo (1988a) afirmam que o Problema de Sequenciamento de *Jobs* é NP-difícil. Os autores examinam o SP considerando um grafo no qual os nós representam os *jobs* e os arcos entre dois nós representam o número de trocas de ferramentas necessárias, quando os *jobs* são executados consecutivamente. Afirmam que encontrar a solução ótima corresponde ao caminho Hamiltoniano no grafo, que por sua vez, é equivalente a resolver o Problema do Caixeiro Viajante (*Traveling Salesperson Problem*), que é conhecidamente NP-Difícil. Com base nessa observação, Crama *et al.* (1994) provam que o SP é NP-Difícil, apresentando dois teoremas: o primeiro faz analogia de uma versão restrita do SP com o Problema de Permutação de Matrizes que é comprovadamente NP-Difícil; o segundo mostra que o caso geral do SP, composto por uma máquina com capacidade fixa maior ou igual a dois, corresponde ao Problema do Caixeiro Viajante (NP-Difícil).

2.2 EXAME DE LITERATURA SOBRE O SSP

Na literatura, Tang e Denardo (1988a) e Bard (1988) são considerados os primeiros autores a descreverem o SSP relacionado com o planejamento da produção de máquinas flexíveis. Os autores examinam alguns tipos de máquinas que exigem ajustes finos durante as trocas de ferramentas e verificam que o tempo necessário para operações de ajuste é significativamente alto em relação ao tempo de processamento dos *jobs*. Isso implica que muito tempo de processamento da máquina será desperdiçado em operações ocasionais de ajuste, a menos que o número total de trocas de ferramentas seja minimizado. Por isso, o critério de desempenho considerado pelos autores é minimizar o número total de trocas de ferramentas.

Tang e Denardo (1988a) observam que resolver o problema em questão envolve dois tipos de variáveis de decisão: a sequência de processamento dos *jobs* e o conjunto de ferramentas que devem ser colocadas na máquina antes de cada *job* ser processado. Propõem um modelo de programação inteira baseado em variáveis binárias que relacionam *jobs*, assim como ferramentas carregadas na máquina, a posições na ordem de sequenciamento. Os autores realizam testes com instâncias de tamanho pequeno, porém não obtém bons resultados. Eles observam que a formulação é fraca em termos de relaxação linear, visto que

esta é sempre zero, a não ser que a sequência de *jobs* seja fixada. Então, propõem uma política capaz de minimizar, em tempo polinomial ($O(MN)$), em que M é o número total de ferramentas e N é o número total de *jobs*, o número total de trocas de ferramentas para uma sequência fixa de *jobs*. Essa política é denominada *Keep Tool Needed Soonest* (KTNS) e estabelece que, no instante em que ferramentas devem ser removidas da caixa para dar lugar a outras necessárias ao processamento de um *job*, devem ser mantidas na caixa as ferramentas que serão utilizadas no futuro mais próximo e, conseqüentemente, devem ser retiradas da caixa as ferramentas que serão utilizadas mais tarde, ou seja, aquelas que serão utilizadas pelos *jobs* que estão mais distantes na sequência de processamento.

Os autores também apresentam uma heurística que consiste de três etapas. Na primeira, uma solução de boa qualidade é obtida através do caminho Hamiltoniano em um grafo no qual os *jobs* representam os nós e o tamanho das arestas é dado pelo número de trocas entre dois *jobs*, quando processados em sequência. O segundo passo consiste em aplicar a política KTNS para encontrar o menor número de trocas para a sequência de *jobs* obtida. O terceiro passo caracteriza-se pela aplicação de perturbações na sequência com o intuito de encontrar resultados melhores. O procedimento é testado computacionalmente e obtém soluções de boa qualidade para instâncias com 10, 20 e 30 *jobs*. Para instâncias com 40 ou mais *jobs* a heurística é menos eficiente, o que, segundo os autores, pode ser devido ao critério de parada estabelecido (tempo computacional).

Tang e Denardo (1988b) avaliam o Problema de Sequenciamento de *Jobs* sob a perspectiva de minimizar o número total de instantes de troca. Os autores descrevem o Problema de Agrupamento de *Jobs* em conjuntos que requerem no máximo C ferramentas (C é a capacidade da caixa de ferramentas) e demonstram que o problema é equivalente ao SP, uma vez que se todos os *jobs* são agrupados de maneira ótima, nenhuma ferramenta extra é necessária para produzir cada grupo, e conseqüentemente, qualquer que seja a sequência dos *jobs* dentro de cada grupo, a solução continuará sendo ótima. Com isso, observam, pela primeira vez, que a solução ótima de uma instância não muda se forem removidas da instância os *jobs* cujos conjuntos de ferramentas são subconjuntos dos conjuntos de ferramentas requeridos por outros *jobs*. Essa propriedade é chamada Regra de Dominância. Os autores propõem um esquema *branch-and-bound* baseado em um problema não linear, que combina dois procedimentos: a busca de limitantes superiores e de limitantes inferiores a partir do

valor ótimo da função objetivo do problema de agrupamento de *jobs*. Para avaliar a eficiência do procedimento, os autores o implementam computacionalmente em instâncias geradas aleatoriamente e obtêm resultados ótimos para a minimização de número de instantes de troca de ferramentas para instâncias com até 30 *jobs*.

Bard (1988) formula o SSP como um problema de programação inteira não-linear e apresenta uma heurística para minimização do número total de trocas de ferramentas. O autor mostra que é possível reduzir o tamanho do problema através do pré-processamento dos dados de entrada. Esse pré-processamento, assim como a Regra de Dominância, implica que se um determinado *job* requer exatamente as mesmas ferramentas ou um conjunto menor de ferramentas iguais às de outro *job*, o processamento sequencial desses *jobs*, ou seja, um imediatamente após o outro, não requer trocas. Assim, esses *jobs* podem ser agrupados em um único *job*, o que reduz o tamanho do problema. A técnica de solução apresentada foi a relaxação Lagrangeana aliada ao *branch-and-bound*. Através da relaxação de uma das restrições do modelo, o problema de sequenciamento de *jobs* é desacoplado do problema de trocas de ferramentas. O autor propõe o uso de uma heurística de relaxação baseada em informação dual, capaz de encontrar soluções de boa qualidade rapidamente. Esta heurística é constituída por quatro passos. No primeiro passo, através de relaxação Lagrangeana obtêm-se o problema primal relaxado que é resolvido para se obter sequências de *jobs*. Para cada sequência obtida é aplicada a política KTNS para identificar o número mínimo de trocas de ferramentas. A sequência que gera o menor de trocas de ferramentas é então escolhida. No segundo passo, a vizinhança da sequência escolhida é examinada, ou seja, a posição de alguns *jobs* é alterada e, através da aplicação da política KTNS, verifica-se o número necessário de trocas de ferramentas. No terceiro passo, as soluções obtidas no segundo passo são confrontadas com a melhor sequência encontrada até o momento e, caso alguma seja melhor, esta é escolhida. Então, retorna-se ao passo dois. No caso em que todas as demais soluções são analisadas e nenhuma apresenta resultado melhor que a solução atual, avança-se para o passo 4, que interrompe a heurística, pois, uma solução local foi obtida. A heurística é testada em instâncias geradas aleatoriamente. Os resultados obtidos comprovam que o pré-processamento dos dados reduz consideravelmente o tempo gasto para a execução completa da heurística e demonstram a capacidade de fornecer resultados de boa qualidade em tempo computacional relativamente baixo.

Crama *et al.* (1994) abordam o Problema de Ferramentas com o objetivo de minimizar o número total de trocas de ferramentas. Os autores reformulam o TP como um modelo de programação inteira e apresentam uma prova de que a política KTNS resolve o problema em tempo polinomial. A formulação é baseada na representação das N ferramentas e M jobs como uma matriz $P_{M \times N}$, em que p_{ij} é 1(0) se a ferramenta i é requerida(não requerida) pelo job j . Essa representação induz que o subproblema ferramental é redutível a um problema de rede de fluxo máximo, no qual cada ferramenta tem seu tempo de preparação e o objetivo é minimizar a soma de todos os tempos de preparação. Os autores fazem uma associação entre o TP e o Problema do Caixeiro Viajante e propõem heurísticas construtivas e de refinamento baseadas em heurísticas clássicas: heurística da aresta mais curta (*shortest edge heuristic*), heurística do vizinho mais próximo, heurística da inserção mais distante e algoritmos de *branch-and-bound*. Os autores também apresentam heurísticas gulosas aliadas à política KTNS e uma heurística de busca *2-opt* na qual, dada uma sequência de jobs, a posição de dois deles é trocada com o objetivo de produzir um número menor de trocas de ferramentas. Os experimentos são realizados em instâncias aleatórias divididas em 16 grupos de acordo com os tamanhos das matrizes job x ferramenta e pela capacidade da caixa de ferramentas. Os autores concluem que, avaliando a qualidade das soluções obtidas com cada heurística, a heurística gulosa e a *2-opt* apresentam os melhores resultados.

Hertz *et al.* (1998) também propõem heurísticas baseadas no Problema do Caixeiro Viajante para resolver o SSP. Porém, os autores apresentam uma abordagem mais adequada para a definição da “distância” (número de trocas de ferramentas) entre dois jobs. Os autores ressaltam que as distâncias definidas por Tang e Denardo (1988a) e Crama *et al.* (1994) apenas consideram a interação entre dois jobs e não levam em conta as ferramentas que estão na caixa após o processamento do primeiro deles. Os autores resolvem o problema em que os jobs equivalem aos nós de um grafo e um caminho mais curto neste grafo é obtido, o qual equivale a uma sequência de jobs. A política KTNS é então aplicada à sequência para fornecer o número mínimo de trocas de ferramentas. Os autores utilizam essa técnica e as novas distâncias em heurísticas construtivas denominadas *Farthest Insertion Heuristic*, propostas por Golden e Stewart (1985). Os testes computacionais são realizados nas instâncias propostas por Crama *et al.* (1994) e apresentam um desempenho superior aos resultados obtidos por estes autores. Hertz *et al.* (1998) apontam uma relação diretamente proporcional entre a qualidade das soluções e o tempo computacional requerido; e concluem que,

dependendo do contexto industrial em questão, o melhor método pode variar de acordo com a escolha do critério de avaliação: qualidade da solução ou tempo computacional.

O algoritmo proposto por Al-Fawzan e Al-Sutan (2002) visa reduzir o número total de trocas de ferramentas. Os autores utilizam Busca Tabu para gerar um conjunto de sequências de *jobs* e, para cada sequência, o algoritmo KTNS é aplicado para obter a política ótima de carregamento de ferramentas. O algoritmo de Busca Tabu proposto utiliza o conceito de memória de curto prazo, inicializa com uma sequência aleatória de *jobs*, calcula o número de trocas de ferramentas associado e armazena como a melhor solução encontrada. Em seguida, esta sequência é utilizada para gerar um conjunto de sequências vizinhas, trocando dois *jobs* de posição e em cada uma delas é aplicado o algoritmo KTNS. A melhor sequência não tabu é selecionada e armazenada na lista tabu. A memória de longo prazo guarda a frequência que um par de *jobs* é trocado durante a busca. Os autores também propõem extensões para a Busca Tabu que utilizam diferentes esquemas para gerar sequências aleatórias, estruturas de memória e oscilações estratégicas e probabilísticas. Os testes computacionais são realizados em instâncias geradas aleatoriamente, de acordo com parâmetros estabelecidos por Tang e Denardo (1988a) e comparações entre os métodos utilizados são apresentadas.

Laporte *et al.* (2003) mostram que uma razão para o desempenho ruim do modelo proposto por Tang e Denardo (1988a) para o SSP é o fato do valor da relaxação linear ser sempre igual a zero. Diante disso, propõem uma nova formulação baseada no modelo que Dantzig *et al.* (1954) propõem para o Problema do Caixeiro Viajante. O modelo considera que o SSP corresponde ao Problema do Caixeiro Viajante se um nó fictício representando o início e o fim das operações for acrescentado e se variáveis binárias forem introduzidas para garantir que uma ferramenta necessária ao processamento de um *job* estará carregada na máquina ao início de sua execução. Os autores também propõem dois algoritmos exatos para o problema: um algoritmo do tipo *branch-and-cut*, que resolve a nova formulação, e o outro é uma aplicação direta do método *branch-and-bound*, que em vez de usar relaxação linear, utiliza como limitante superior inicial uma solução obtida através da aplicação de uma heurística gulosa. Esta heurística seleciona o primeiro *job* que requer o maior número de ferramentas, a partir daí os próximos *jobs* são selecionados de acordo com o número de ferramentas comuns com o último *job* escolhido. Para a sequência obtida, o limitante inferior é definido através da aplicação da política KTNS. Os testes são realizados em instâncias geradas segundo os

critérios propostos por Crama *et al.* (1994). O algoritmo *branch-and-cut* apresenta bons resultados, porém, em instâncias com até 9 *jobs*. Para instâncias com número de *jobs* maior ou igual a 10, os resultados não são satisfatórios. O algoritmo *branch-and-bound* obtém resultados mais encorajadores e é capaz de resolver instâncias com até 25 *jobs*, o que, segundo os autores, confirma seu potencial de aplicação no contexto real.

Yanasse (2007) propõe um procedimento para determinar um limite inferior para o número mínimo de trocas de ferramentas, baseado na resolução de subproblemas. O autor demonstra que o valor ótimo do número mínimo de trocas de ferramentas para processar um subconjunto estrito do total de *jobs* é menor ou igual ao valor ótimo do número mínimo de trocas necessário ao processamento de todos os *jobs*. O procedimento seleciona um subconjunto de *jobs* e resolve de maneira ótima o subproblema que está associado a este conjunto. Em seguida, um *job* é acrescentado por vez ao subproblema e o novo número mínimo de trocas é calculado. A quantidade de *jobs* que são inseridos no subconjunto é um total pré-fixado que leva em conta o esforço computacional despendido no cálculo do limitante inferior para o problema. O autor ressalta que a qualidade do limitante pode ser melhorada, caso um esforço computacional maior seja aceitável.

Konak *et al.* (2008) abordam o SSP sob duas perspectivas: minimizar o número de instantes de troca e posteriormente o número de trocas de ferramentas. Duas abordagens de Busca Tabu com diferentes codificações são propostas. A primeira, denominada Busca Tabu com codificação binária, baseia-se na formulação do problema com programação inteira, para agrupar os *jobs* e sequenciar o processamento dos grupos. A segunda, utiliza lista e codificação e uma representação alternativa do problema, com um algoritmo guloso construtivo para a criação dos grupos. As duas abordagens são testadas com as instâncias propostas por Tang e Denardo (1988b) e com três novos conjuntos de instâncias entre 40 e 210 *jobs*. Os resultados computacionais mostram que ambas abordagens produzem soluções ótimas ou quase ótimas em tempos razoáveis.

Yanasse *et al.* (2009) apresentam um algoritmo para o SSP, baseado em um esquema de ordenamento parcial, de modo a definir o sequenciamento ótimo de um conjunto de *jobs*. O método enumerativo inicialmente define um subconjunto de *jobs* combinando o menor número de *jobs* que juntos utilizam todas as ferramentas. O número de trocas necessárias para realizar esses *jobs* é um limitante inferior para o problema, como proposto por Yanasse

(2007). Uma vez obtida a ordem ótima desse subconjunto, os demais *jobs* são inseridos no início, entre, ou no final do subconjunto, de modo que o número de trocas de ferramentas não aumente, ou aumente o mínimo possível. Primeiramente são inseridos os *jobs* que não requerem trocas para serem processados, depois os que requerem menos trocas e assim por diante. Quando todos os *jobs* são inseridos, uma solução viável é obtida e o valor dessa solução é um limitante superior para o número de trocas de ferramentas do conjunto de *jobs*, que por sua vez, corresponde ao limitante inferior do problema, ou seja, a melhor solução é encontrada.

Cunha e Souza (2009) apresentam uma heurística gulosa baseada na heurística construtiva utilizada na metaheurística GRASP. O método proposto, a cada iteração, compara a configuração da máquina com os *jobs* que ainda não foram inseridos e verifica o número de trocas de ferramentas necessário para a execução de cada *job*. Os *jobs* são ordenados de acordo com o número de trocas necessárias e são inseridos em uma lista de candidatos a próximo *job* no sequenciamento (Lista Restrita de Candidatos da metaheurística GRASP). O tamanho desta lista é definido pelos *jobs* cujo número de trocas é maior ou igual ao número mínimo de trocas multiplicado por uma constante maior que um. A seleção do *job* da lista é feita aleatoriamente. O *job* selecionado é inserido no sequenciamento e a caixa de ferramentas é atualizada para processá-lo. Se todas as posições da caixa de ferramentas estiverem ocupadas, é retirada aquela que for menos utilizada pelos *jobs* que ainda não foram sequenciados. Os testes computacionais são realizados para instâncias reais e os resultados foram superiores àqueles empregados na prática.

Chaves *et al.* (2012) propõem uma heurística de duas fases para o SSP: uma fase construtiva e uma fase de refinamento. A fase construtiva inicialmente gera um grafo $G = (V, A)$ em que o conjunto de vértices $V = \{1, 2, \dots, m\}$ corresponde ao conjunto de ferramentas e o conjunto de arcos $A = \{1, 2, \dots, n\}$ é tal que existe um arco $k = (i, j)$ ligando os vértices i e j se e somente se as ferramentas i e j são necessárias para a execução do *job* $k \in N$. O algoritmo trabalha com a ideia de que deve ser selecionado o arco (*job*) tal que sua retirada produza vértices isolados (ferramentas que podem ser retiradas da máquina, pois não precisam mais voltar). A fase de refinamento consiste na aplicação da meta-heurística Busca Local Iterativa (*Iterated Local Search* - ILS), que utiliza a política KNTS para calcular o valor da função objetivo, ou seja, o número de trocas de ferramentas da sequência. A ILS inicia com uma

solução gerada pela fase construtiva. Em seguida, uma perturbação, que consiste em trocar a sequência de dois *jobs*, é aplicada à solução e depois uma busca local é realizada. A busca local examina possíveis trocas entre dois *jobs* da solução perturbada, avaliando a qualidade da solução a cada troca. Se a busca local encontra uma solução melhor, a nova iteração é realizada a partir desta. Os testes computacionais são realizados em cinco instâncias geradas aleatoriamente por Yanasse *et al.* (2009) e a ILS é testada combinada com a heurística gulosa e com uma heurística totalmente aleatória. Os resultados mostram que a qualidade da solução inicial tem grande influência na convergência da ILS, que a heurística proposta tem um bom desempenho para os problemas testados, pois reduz significativamente o número de nós gerados por um algoritmo enumerativo, e que é capaz de encontrar soluções com *gaps* (diferença entre o limitante inferior e superior) pequenos.

Raduly-Baka e Nevalainen (2015) estudam o Problema de Ferramentas Modular, em que a máquina é equipada com uma caixa de ferramentas *on-line*, que consiste em vários módulos de alimentação de ferramentas alteráveis. Os módulos podem conter uma série de ferramentas necessárias para os *jobs*. Neste caso, a parada da máquina entre dois *jobs* pode efetuar trocas de ferramentas ou trocar um módulo completo contendo múltiplas ferramentas. Os autores mostram que a troca de módulos incorre em um custo menor do que a troca individual de várias ferramentas componentes de um módulo. Quatro casos são apresentados: o caso geral em que tanto o número de módulos quanto a capacidade são arbitrários; o caso especial em que o número de módulos em linha é fixo, mas a capacidade destes módulos é arbitrária; o caso em que a capacidade dos módulos é fixa, mas o número de módulos *on-line* é arbitrário; e por último, o caso em que tanto o número de módulos *on-line* quanto a capacidade são fixos. Nos três primeiros casos, os autores demonstram que o problema é NP-Difícil, enquanto o problema do último caso é resolvido em tempo polinomial, embora com grande expoente, considerando as ideias de Crama *et al.* (2007).

Catanzaro *et al.* (2015) apresentam três formulações de Programação Linear Inteira baseadas nos modelos de Tang e Denardo (1988a) e Laporte *et al.* (2003). Obtêm uma relaxação linear mais robusta que as relaxações propostas na literatura e propõem desigualdades válidas para melhorar os limites inferiores fornecidos pela relaxação da programação linear. Os testes computacionais são realizados com as instâncias propostas por Laporte *et al.* (2003). Os autores mostram o comportamento dos métodos em termos de *gap* e

tempo computacional e a comparação dos resultados entre os métodos é realizada. Ressaltam que novas formulações são caracterizadas por apresentar um *gap* elevado, pois o grande número de variáveis envolvidas nos modelos e as desigualdades válidas desaceleram os tempos de solução e podem limitar o uso dessas formulações na prática.

Problemas com as mesmas características consideradas neste trabalho, como datas de entrega, agrupamento de *jobs* por produtos, turnos de trabalho, custos de atrasos e de horas extras, são pouco encontradas na literatura.

Gómez e Lorena (1998) abordam um problema semelhante ao problema foco deste trabalho, porém não consideram o agrupamento de *jobs* por produto e as horas extras são consideradas como atrasos no processo produtivo, ou seja, representa o tempo que excede o turno de produção, mas que precisa ser executado para que o processamento de nenhum *job* seja interrompido. Os autores apresentam um método que resolve o problema em duas fases. Na primeira, os *jobs* são agrupados em lotes, de modo que possam ser processados por um mesmo conjunto de ferramentas. Dentro de cada lote, os *jobs* são sequenciados de acordo com suas datas de vencimento. Na segunda fase, uma Busca Tabu é aplicada à solução inicial obtida para reduzir o número de conflitos entre o cumprimento das datas de vencimento e de posições de *jobs* que exigem paradas para trocas, antes e depois do seu processamento. Os autores propõem uma função objetivo para minimizar a soma ponderada do tempo total de produção, do tempo total de atraso, do tempo total de *setup*, do tempo total de trocas de ferramentas e do tempo total ocioso nos turnos. Os testes computacionais são aplicados às instâncias propostas por Tang e Denardo (1988a) e Yanasse *et al.* (1996) e diferentes combinações dos pesos dos termos da função objetivo são empregadas. Os resultados são superiores àqueles obtidos por Tang e Denardo (1988a) e os autores observam que existe um conflito, ou seja, uma relação de natureza inversa, entre atender as datas de vencimento e minimizar o número de trocas de ferramentas, e que os tempos de produção e de períodos ociosos não apresentam grandes variações às mudanças dos pesos.

Capítulo 3

Programação da Produção em Máquina CNC

3.1 CONTEXTO INDUSTRIAL

O contexto industrial estudado neste trabalho é o sistema de manufatura flexível composto por uma puncionadeira CNC de uma indústria de pequeno porte do mercado metal-mecânico de precisão. Este é o mesmo contexto industrial estudado por Cunha (2012) e a descrição a seguir é baseada no trabalho do autor. O modelo da puncionadeira é apresentado na Figura 1. O processo produtivo realizado por esta máquina consiste em produzir *jobs* que compõem produtos. A lista de *jobs* é completamente conhecida para o horizonte de planejamento e a vida útil de todas as ferramentas é longa o suficiente em relação ao horizonte de planejamento, ou seja, considera-se que as ferramentas não quebram e não se desgastam durante o processo de produção determinado (CRAMA *et al.*, 1994).



Figura 1 - Modelo da Puncionadeira CNC

Fonte: Página web da Euromac, disponível em <http://www.euromac.com/en>

A caixa de ferramentas da máquina (Figura 2) é do tipo compartimento giratório e possui capacidade para 10 ferramentas de tamanho uniforme. Esta capacidade é inferior ao total de ferramentas requeridas para processar todos os *jobs* de todos os produtos. A caixa é sempre carregada com capacidade total, ou seja, todos os *slots* disponíveis são preenchidos, e depois uma ferramenta só precisará ser removida quando for substituída por outra. As ferramentas são uniformes: em cada espaço da caixa de ferramentas cabe exatamente uma ferramenta e cada ferramenta ocupa apenas um *slot*, ou seja, a localização física das ferramentas na caixa não é relevante.



Figura 2 - Modelo da Caixa de Ferramentas da Puncionadeira
Fonte: Página web da Euromac, disponível em <http://www.euromac.com/en>

A atividade de *setup* computa dois tempos distintos: o primeiro tempo configura a atividade de remover a caixa de ferramentas da máquina, posicioná-la para as trocas de ferramentas e colocá-la novamente na máquina. Este tempo é fixo (12 minutos), independentemente da quantidade de ferramentas que serão trocadas. O segundo tempo está relacionado com a quantidade de ferramentas que serão trocadas durante a operação. A troca de uma ferramenta é feita manualmente e consome o mesmo tempo (3 minutos) para qualquer que seja a ferramenta. Portanto, este tempo é proporcional ao número de trocas realizadas.

Cada *job* possui um tempo de processamento. Como os produtos demandados pelos clientes possuem um prazo determinado para serem entregues, cada *job* também terá uma data para ser concluído, para não atrasar a entrega dos produtos. Além disso, *jobs* que fazem parte de um mesmo produto podem ter datas de entrega diferentes. No caso do *job* depender somente de processamento na puncionadeira, terá a data de entrega igual ao prazo de entrega do produto completo. Se o *job* componente desse mesmo produto necessitar ser, por exemplo, dobrado e soldado após o processo de puncionamento, deverá ter prazo menor para produção na puncionadeira para que, no prazo de entrega do produto, ele esteja pronto. Vale ressaltar que não há relação de precedência entre os *jobs* de um mesmo produto, ou seja, os *jobs* são executados de forma independente. Contudo, o não cumprimento do prazo de entrega de pelo menos um *job* dos que compõe um produto acarreta o não atendimento do prazo de entrega deste produto, o que gera custos adicionais relativos a multas contratuais. Estes custos variam de acordo com o cliente que solicitou o pedido e são chamados custos de atraso.

Os clientes da empresa são divididos em 3 grupos (A, B e C), de acordo com sua criticidade, e os custos por dia de atraso diferem de um grupo para o outro: R\$ 300,00, R\$ 150,00 e R\$ 50,00 por dia de atraso, respectivamente. Na prática, as características das

negociações comerciais e o relacionamento podem diferir muito entre os clientes de uma empresa. Muitas vezes pode ser vantajoso atrasar um *job* de um determinado cliente, priorizando a produção de um *job* de outro cliente, em virtude de um custo de atraso menor ou de ganhos comerciais melhores. Por exemplo, em termos de custos é mais vantajoso atrasar o produto de um cliente tipo C do que atrasar o produto de um cliente tipo A.

A programação da produção é realizada para o curto prazo, em planejamentos semanais, de segunda-feira a sábado. Ao final de cada semana é determinada a lista de produtos, e conseqüentemente de *jobs*, que deverão ser processados na semana seguinte. A empresa possui um horário regular de trabalho diário, 9 horas de processamento normal (sem qualquer custo adicional) de segunda a sexta-feira, e 4 horas de processamento normal aos sábados.

Para a fabricação de todos os produtos solicitados pelos clientes, a empresa pode realizar horas extras. Dois tipos de horas extras são empregados e variam de acordo com o dia da semana. As horas extras do tipo 1 são realizadas de segunda a sexta-feira até um limite de duas horas por dia, com o custo de R\$ 33,00 a hora. As horas extras do tipo 2 são realizadas aos sábados, com limite de 5 horas, ou de segunda a sexta-feira após o limite de horas extras do tipo 1, com limite de 2 horas, com o custo de R\$ 42,00 a hora.

Tabela 1 - Valores dos Parâmetros da Programação de Puncionadeira na prática

Turno Normal de Trabalho		
	Segunda-feira a Sexta-feira	9 horas por dia
	Sábado	4 horas
Horas Extras		
Tipo 1	Máximo de 2 horas por dia	R\$ 33,00 por hora
Tipo 2	Máximo de 5 horas aos sábados Máximo de 2 horas por dia (segunda a sexta-feira)	R\$ 42,00 por hora
Classificação dos Clientes / Custos de atraso		
	Tipo A	R\$ 300,00 por dia de atraso
	Tipo B	R\$ 150,00 por dia de atraso
	Tipo C	R\$ 50,00 por dia de atraso
Atividades de Setup		
	Trocas de Ferramentas	3 minutos por troca
	Paradas	12 minutos por parada

Devido à limitação de horas extras, pedidos podem ser atendidos em atraso. E de acordo com o custo de atraso também é possível avaliar a viabilidade de realizar horas extras ou, eventualmente, pagar o atraso. A Tabela 1 sintetiza os dados da realidade da empresa.

O objetivo na programação da punctionadeira CNC é reduzir o custo total de produção, proveniente das horas extras realizadas e dos atrasos na entrega dos produtos. Como a programação é feita semanalmente, é preciso determinar quais *jobs* deverão ser processados sucessivamente em cada dia, sem exceder o limite de horas extras estipulado para cada período de produção da empresa. Esse objetivo está relacionado com reduzir o tempo gasto com as atividades de *setup*, pois, como os tempos de processamentos dos *jobs* são pré-estabelecidos e não podem ser alterados, um sequenciamento ruim dos *jobs* impacta diretamente no tempo total da produção, e conseqüentemente aumenta a necessidade de realizar horas extras e inviabiliza a entrega dos produtos nos prazos, aumentando os custos de atrasos. A Figura 3 ilustra o objetivo e atividades relacionados com a programação da produção.

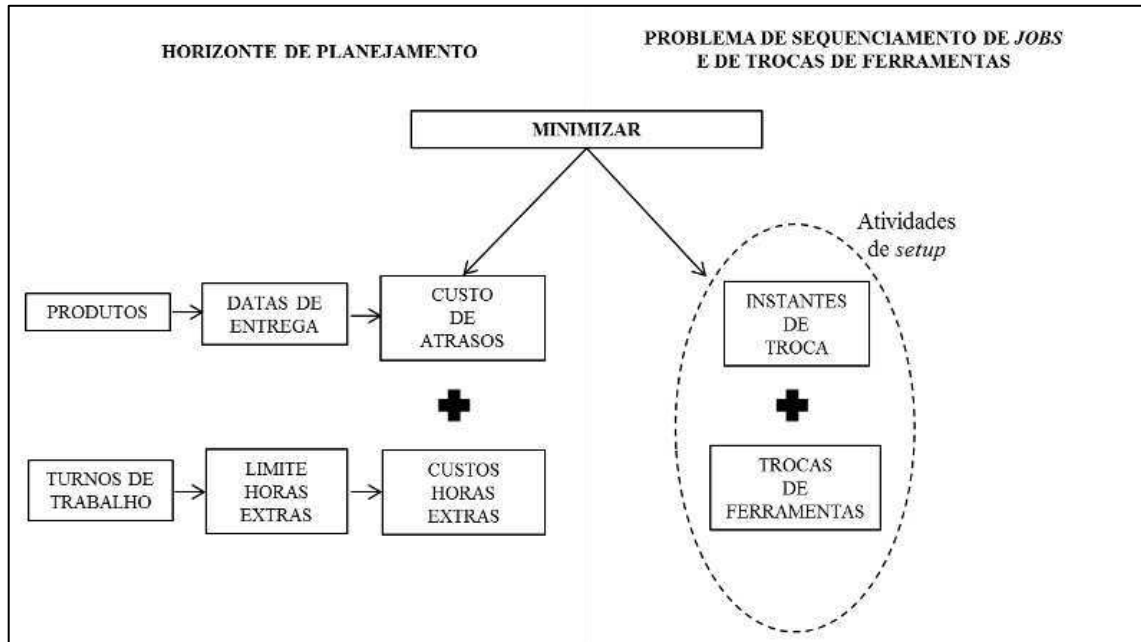


Figura 3 - Objetivo na Programação da Punctionadeira CNC

Semanalmente, a programação da produção da empresa envolve, em média, 15 produtos, que são constituídos por uma média de 3 *jobs*. Para processar todos os *jobs* são necessárias 35 ferramentas. Em média, os *jobs* requerem 4 ferramentas para serem processados.

Na prática, a programação da produção é feita da seguinte maneira: os *jobs* que constituem cada produto são sequenciados de acordo com a ordem de serviço gerada. Para exemplificar, considera-se uma sequência que foi efetivamente executada na prática. A empresa recebeu pedidos de fabricação de três produtos, A, B e C, nesta ordem. O produto A é composto pelo *job* 1, o produto B, pelos *jobs* 2, 3 e 4, e o produto C, pelos *jobs* 5, 6, 7 e 8. Diante desta configuração dos pedidos recebidos, os *jobs* foram executados exatamente na sequência apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Sequência de execução dos *jobs* e configuração da caixa de ferramentas da máquina

Sequência de Produção	Ferramentas Necessárias							Configuração de Caixa de Ferramentas											
								▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
<i>Job</i> 1	1	2	12	16	18	28	34	1	2	12	16	18	28	34	8	15	17		
<i>Job</i> 2	27	29	32	8	15	17						▼	▼	▼					
<i>Job</i> 3	9	14	21	26	33	32		1	2	12	16	27	29	32	8	15	17		
<i>Job</i> 4	19							▼	▼	▼	▼								
<i>Job</i> 5	7	18	23	24	9	14	33	9	14	21	26	27	29	32	8	15	17		
<i>Job</i> 6	13	30	32					9	14	7	18	23	24	32	8	19	33		
<i>Job</i> 7	10	15						▼	▼	▼	▼	▼	▼						
<i>Job</i> 8	1	5	19	26	27	33	15	13	14	7	18	23	24	32	30	19	33		
								▼	▼	▼	▼	▼	▼						
								13	10	7	18	23	24	32	30	19	15		
								▼	▼	▼	▼	▼	▼						
								13	1	5	26	27	33	32	30	19	15		

Legenda:

■ Ferramentas necessárias à execução do *job*

▼ Troca da ferramenta

Para executar os 8 *jobs* foram realizadas 8 paradas da máquina e 32 trocas de ferramentas. Contabilizando os tempos necessários para paradas e trocas de ferramentas, o tempo total de *setup* foi de 192 minutos ($8 \times 12 \text{ min} + 32 \times 3 \text{ min}$). É intuitivo que a política adotada na prática tende a gerar elevados números de paradas e de trocas de ferramentas, uma vez que esse tipo de ordenação não leva em consideração a similaridade que possa existir entre os conjuntos de ferramentas necessárias para a produção dos *jobs* na montagem da sequência. Com exceção da montagem da configuração inicial da caixa de ferramentas que considera os dois primeiros *jobs*, essa programação considera apenas o *job* seguinte para determinar a configuração da caixa.

Uma simples aplicação da política KTNS reduziria consideravelmente as trocas de ferramentas. Além disso, se no momento de parada, dois ou mais *jobs*, cujo somatório das ferramentas utilizadas não excedesse a capacidade da máquina fossem inseridas em um mesmo momento de troca, reduziria os instantes de troca da máquina.

Tabela 3 - Aplicação da política KTNS à sequência de produção

Sequência produção	Ferramentas Necessárias							Configuração de Caixa de Ferramentas														
	1	2	12	16	18	28	34	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	
Job 1	1	2	12	16	18	28	34	1 ^a Parada	1	2	12	16	18	28	34	8	15	17				
Job 2	27	29	32	8	15	17	2 ^a Parada	1	27	29	32	18	28	34	8	15	17					
Job 3	9	14	21	26	33	32	3 ^a Parada	9	27	14	32	18	21	26	33	15	19					
Job 4	19	9	27	14	32	18		21	26	33	15	19										
Job 5	7	18	23	24	9	14	33	4 ^a Parada	9	7	14	32	18	23	24	33	13	30				
Job 6	13	30	32	9	7	14	32		18	23	24	33	13	30								
Job 7	10	15	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	10	15	1	5	19	26	27	33	13	30	
Job 8	1	5	19	26	27	33	15	5 ^a Parada	10	15	1	5	19	26	27	33	13	30				

Legenda:

■ Ferramentas necessárias à execução do *job*

▼ Troca da ferramenta

A Tabela 3 apresenta o resultado da aplicação da política KTNS e da minimização do número de paradas para a sequência definida no contexto industrial. Pode-se observar que o número de paradas da máquina foi reduzido de 8 para 5 e a aplicação da política KTNS eliminou uma troca de ferramenta. Portanto, o novo tempo de atividades de *setup* é de 153 minutos, correspondendo a uma redução de 20,31%.

Para reforçar o impacto que a política de sequenciamento adotada na empresa gera no número de *setups*, a Figura 4 apresenta o número de *setups* para a programação da produção realizada em dez semanas. É possível observar que o número de *setups* é muito próximo do número total de *jobs*. O sistema funciona como se, para cada *job* que é processado, praticamente ocorresse uma parada para trocas de ferramentas. Observa-se que muitas vezes perde-se a oportunidade de retirar ferramentas da caixa que não serão utilizadas para a

produção dos *jobs* subsequentes, e de inserir ferramentas que não serão utilizadas no momento, mas que serão utilizadas em seguida.

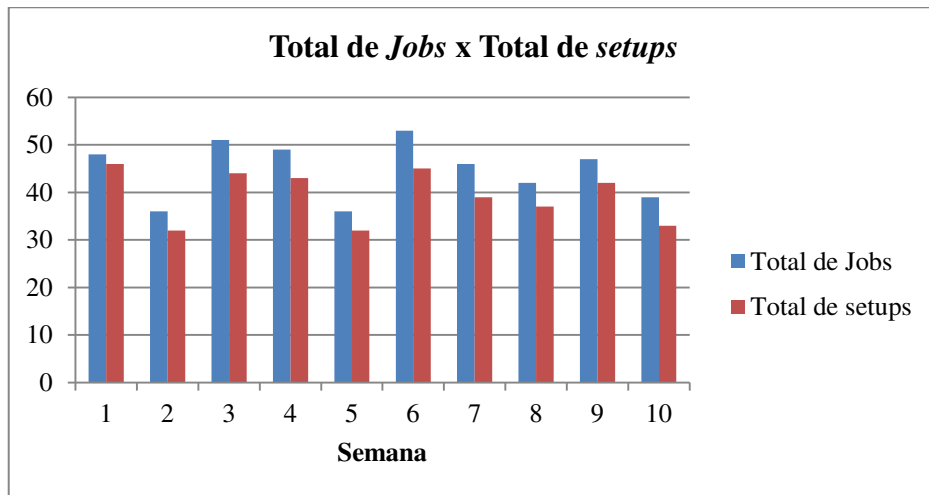


Figura 4 - Comparação entre o total de *jobs* necessários para a produção de todos os produtos em uma semana e o total de instantes de *setup*

3.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Cunha *et al.* (2011) apresentam um modelo de minimização de custos relativos a horas extras, elaborado com base no modelo proposto por Tang e Denardo (1988a), que acrescenta a possibilidade de discretizar o horizonte de planejamento em períodos (dias). Nesse modelo todos o *jobs* devem ser processados, o que dificulta a obtenção de soluções iniciais viáveis. Nos modelos propostos posteriormente não há essa restrição e *jobs* podem não ser produzidos na sequência de produção no horizonte de planejamento, o que significa assumir o custo de atraso. Os testes computacionais são realizados com instâncias reais e apresentam bons resultados quando comparados aos resultados obtidos na prática.

Cunha (2012) apresenta três modelos matemáticos construídos de forma progressiva. O primeiro é o modelo de Minimização de Custo com Horas Extras e Atrasos, apresentado por Cunha e Souza (2010). O segundo é o modelo de Minimização de Custos com Horas Extras e Atrasos, Agrupado por Produto, que agrega ao primeiro o agrupamento dos *jobs* por produtos. O terceiro modelo, denominado Minimização de Custos com Horas Extras e Atrasos, Agrupado por Produtos com Tempos Fixos de Parada (MCHEAAPTF), acrescenta ao segundo o custo fixo por cada instante de troca, é o mais completo e o que se adapta ao problema no contexto industrial. Os modelos são testados em quatro cenários, com diferentes

números de *jobs*, produtos e tempos de processamentos, cada um deles correspondente ao planejamento de uma semana do ambiente fabril. O autor observa que a resolução do problema é bastante dispendiosa do ponto de vista computacional, uma vez que em duas horas de execução, foi possível encontrar respostas ótimas para poucas instâncias e somente para aquelas com pequeno número de períodos (dois ou três dias de produção). Para poucas instâncias, os resultados obtidos foram piores que aqueles da prática, para todas as outras os resultados foram melhores em até 98%, porém o *gap* de otimalidade é bastante alto. O autor verifica também que o aumento do tempo computacional pode melhorar consideravelmente a qualidade das soluções.

O autor apresenta também uma heurística para resolver o problema, baseada na estratégia de relaxar e fixar (*relax and fix*) proposta por Wolsey (1998), cujo objetivo é tornar o modelo mais fácil de resolver, diminuindo o número de variáveis inteiras. Para isso, as variáveis binárias são divididas em subconjuntos e, a cada iteração, as variáveis de apenas um subgrupo são consideradas inteiras e as de todos os outros são relaxadas e podem assumir valores contínuos. A heurística é capaz de reduzir os custos de horas extras, porém gera custos elevados de atrasos. Outro método adotado pelo autor, foi realizar um pré-processamento dos dados, que consiste em identificar *jobs* que podem ser processados sucessivamente sem haver trocas de ferramentas. Para isso, o autor propõe atualização de parâmetros, tais como, soma dos tempos de processamento dos *jobs* agrupados e alteração da data de entrega de todos os *jobs* do grupo para a menor data dentre eles. Nos testes realizados, o autor verificou que houve perda na qualidade da solução dos resultados obtidos pelos três modelos de programação inteira.

O modelo MCHEAAPTF proposto por Cunha (2012) introduz as características relevantes do contexto industrial como: horas extras, atraso por produto e tempo fixo de *setup* e representa o problema estudado neste trabalho. A seguir, apresenta-se o referido modelo, que será denominado doravante por MHA.

Neste modelo, é considerado um dado conjunto J de *jobs* a serem sequenciados em uma máquina CNC dentro de um horizonte de planejamento composto por um conjunto T de períodos. Cada período corresponde a um dia de trabalho. Cada dia de trabalho é dividido em um conjunto N de posições que identificam a ordem de execução das atividades no dia, ou seja, se um *job* for executado na posição $n = 2$, ele é o segundo *job* processado pela máquina

no dia. Para processar o conjunto de *jobs* são necessárias ferramentas de um conjunto M . A capacidade da caixa de ferramentas é constante e igual a C , ou seja, C representa o número máximo de ferramentas que podem ser carregadas na máquina. Esta capacidade é menor que o total de ferramentas requeridas para processar todos os *jobs*, ($C < |M|$), e, por isso, são necessárias trocas de ferramentas para que todos os *jobs* sejam realizados. Os *jobs* são agrupados em R produtos, ou seja, os produtos são constituídos por *jobs* e, por isso, são denotados por uma coleção de conjuntos não vazios θ_r , $r = 1, \dots, R$ que compõem uma partição de J .

Para estabelecer as ferramentas que estão disponíveis na caixa de ferramentas da máquina em um determinado período e quais devem ser carregadas e descarregadas, são utilizadas variáveis binárias. As variáveis q_t^m indicam com o valor 1 as ferramentas m que entram na máquina no instante inicial de cada período (antes do primeiro *job* ser processado), $w_{n,t}^m$ indicam com o valor 1 as ferramentas m que estão na máquina na posição n do período t , e as variáveis $p_{n,t}^m$ indicam com valor 1 as ferramentas que entram na máquina após ser executado o *job* da posição n do período t . Vale notar que a variável $p_{n,t}^m$, para $n < |N|$, controla as ferramentas que entram na máquina antes de iniciar o *job* da posição $n+1$, e, para $n = |N|$, controla as ferramentas que entram na máquina ao final do período t , visando, se vantajoso, adiantar o *setup* para o primeiro *job* do período $t+1$. As variáveis f_{nt} recebem 1 quando ocorre troca de ferramentas na posição n do período t , e as variáveis l_t recebem 1 quando ocorre troca de ferramentas antes de iniciar as atividades do período (associada à variável q_t^m).

A variável binária $x_{n,t}^j$ indica com o valor 1, se o *job* j , $j \in J$, deve ser executado na posição n , $n \in N$, do período t , $t \in T$. O parâmetro a_m^j indica se o *job* j , $j \in J$, requer a ferramenta m , $m \in M$. O tempo de processamento de cada *job* é dado pelo parâmetro g_j . O tempo gasto com cada troca de ferramenta é constante, dado pelo parâmetro s e o tempo fixo gasto em uma atividade de *setup* é dado pelo parâmetro s' .

As variáveis v_t^1 e v_t^2 indicam, respectivamente, a quantidade de horas extras do tipo 1 e 2 que foram realizadas no período t , $t \in T$. Custos unitários o^1 e o^2 são associados às horas extras do tipo 1 e 2, respectivamente, sendo que $o^1 < o^2$. Os limites de horas extras do tipo 1 e

2 que podem ser realizadas no período t , são b_t^1 e b_t^2 , respectivamente. A capacidade de produção normal (em horas) de cada período t é dada por u_t .

A data de entrega do *job* j é d_j , o que significa que é esperado que j seja processado até o final do dia d_j para que não ocorram custos por atraso. A variável $y_k^j = 1$ indica que o *job* j não foi processado até o k -ésimo dia após sua data de entrega. O total de atraso considerado para um *job* é dado por $\sum_{k=1}^{|T|+1-d_j} y_k^j$. Por exemplo, para um sequenciamento de seis dias ($|T| = 6$) e um *job* j cuja data de entrega é o segundo dia ($d_j = 2$). Se esse *job* é fabricado no quarto dia, então $y_1^j = 1$, $y_2^j = 1$, $y_3^j = 0$, $y_4^j = 0$, $y_5^j = 0$, pois o *job* j atrasou o primeiro e o segundo dia após sua data de entrega. Se, para esse caso, o valor de $y_5^j = 1$, significa que o *job* não foi produzido dentro do horizonte de planejamento, pois, se o *job* não é processado até o quinto dia após sua data de entrega, significa que até o sexto dia (que é o último dia do sequenciamento) ele não foi produzido, ou seja, o modelo considera que este *job* será produzido no máximo um dia após o último dia de planejamento e o custo de atraso correspondente será computado.

Como os *jobs* são agrupados por produtos, se um único *job* componente atrasa, o atendimento ao prazo de entrega do produto inteiro é comprometido. Além disso, *jobs* que fazem parte de um mesmo produto podem ter datas de entrega diferentes. Consequentemente, apesar de cada *job* j componente do produto r , $j \in \theta_r$, ter sua própria data de entrega d_j , no caso de atrasos, a penalidade é associada ao produto que tem o *job* j como componente e é denotada por h_r . A data de entrega mais cedo dentre os *jobs* que compõem o produto r é representada por d_r . De maneira análoga à variável y_k^j , a variável binária $z_k^r = 1$ indica que o produto r atrasou o k -ésimo dia em virtude de um ou mais *jobs* que o compõem terem sido atrasados k dias.

O modelo é apresentado a seguir:

$$\min \sum_{t \in T} (o^1 v_t^1 + o^2 v_t^2) + \sum_{r=1}^R \sum_{k=1}^{|T|+1-d_r} h_r z_k^r \quad (3.1)$$

$$\left(\sum_{m \in M} \sum_{n \in N} p_{nt}^m + \sum_{m \in M} q_t^m \right) \cdot s + \left(\sum_{n \in N} f_{nt} + l_t \right) \cdot s' + \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} g_j x_{nt}^j \leq u_t + v_t^1 + v_t^2 \quad \forall t \in T \quad (3.2)$$

$$v_t^i \leq b_t^i \quad i = 1, 2; \quad \forall t \in T \quad (3.3)$$

$$w_{(n+1)t}^m - w_{nt}^m - p_{nt}^m \leq 0 \quad \forall n \in N : n < |N|; \forall m \in M, \forall t \in T \quad (3.4)$$

$$w_{(1)t}^m - w_{N(t-1)}^m - p_{N(t-1)}^m - q_t^m \leq 0 \quad \forall t \in T : t > 1; \forall m \in M \quad (3.5)$$

$$w_{(1)(1)}^m - q_{(1)}^m \leq 0 \quad \forall m \in M \quad (3.6)$$

$$\sum_{m \in M} w_{nt}^m \leq C \quad \forall n \in N, \forall t \in T \quad (3.7)$$

$$a_m^j x_{nt}^j - w_{nt}^m \leq 0 \quad \forall j \in J, \forall n \in N, \forall m \in M, \forall t \in T \quad (3.8)$$

$$\sum_{j \in J} x_{(1)t}^j = 1 \quad \forall t \in T \quad (3.9)$$

$$\sum_{j \in J} (x_{(n+1)t}^j - x_{nt}^j) \leq 0 \quad \forall n \in N : n < |N|; \forall t \in T \quad (3.10)$$

$$\sum_{n \in N} \sum_{t=1}^k x_{nt}^j + y_{(k+1-d_j)}^j = 1 \quad \forall j \in J; k = d_j, \dots, |T| - 1 \quad (3.11)$$

$$y_{(k+1)}^j - y_k^j \leq 0 \quad \forall j \in J; k = 1, \dots, |T| + 1 - d_j \quad (3.12)$$

$$y_k^j - z_k^r \leq 0 \quad r = 1, \dots, R; \forall j \in \theta_r; k = 1, \dots, |T| + 1 - d_j \quad (3.13)$$

$$p_{nt}^m - f_{nt} \leq 0 \quad \forall m \in M; \forall n \in N; \forall t \in T \quad (3.14)$$

$$q_t^m - l_t \leq 0 \quad \forall m \in M; \forall t \in T \quad (3.15)$$

$$f_{nt}, l_t \geq 0 \quad (3.16)$$

$$v^1, v^2 \geq 0 \quad (3.17)$$

$$x, y, w, p, q \in \{0, 1\} \quad (3.18)$$

A função objetivo (3.1) tem dois componentes. O primeiro termo está relacionado com minimizar os custos gerados com a realização de horas extras e o segundo termo representa os custos de atrasos de produtos. A restrição (3.2) garante que o tempo total gasto com as trocas de ferramentas somado ao tempo total de parada da máquina e ao tempo de processamento dos *jobs* não excede a capacidade de realização de horas normais acrescidas das horas extras dos tipos 1 e 2.

A restrição (3.3) garante que a realização de horas extras dos tipos 1 e 2 não excede os limites. A restrição (3.4) controla a troca de ferramentas para que aquelas ferramentas necessárias em uma posição $n+1$ e que não estão na máquina na posição n sejam inseridas (entrando com valor 1 na variável $p_{n,t}^m$). As ferramentas necessárias à realização do primeiro *job* do dia podem ser colocadas na caixa de ferramentas através de trocas ao final do período anterior ou, antes do seu processamento, no início do dia. A restrição (3.5) garante que se uma ferramenta requerida no instante 1 de um determinado período não está na máquina no último instante do período anterior, ela deve ser colocada por meio de uma troca ao final do período anterior ($p_{N,(t-1)}^m$) ou por meio de uma troca no início do próprio período (q_t^m). No caso do período 1, as ferramentas requeridas ao processamento do primeiro *job* devem, necessariamente, ser inseridas antes do seu processamento, conforme prevê a restrição (3.6). Isso implica que será computado um tempo $Cs + s'$ para o início da execução do período 1, para a composição inicial da caixa de ferramentas da máquina.

A restrição (3.7) garante que o total de ferramentas na caixa de ferramentas não excede sua capacidade. Todas as ferramentas necessárias à realização de um *job* devem estar na caixa de ferramentas na posição em que esse *job* é processado, conforme garante a restrição (3.8). A restrição (3.9) exige que a primeira posição de cada dia seja ocupada por exatamente um *job*. A restrição (3.10) garante que uma posição $n+1$ de um período somente será utilizada se algum *job* tiver sido alocado na posição anterior. A restrição (3.11) contabiliza os dias de atraso com relação à data de entrega do *job* j . A restrição (3.12) faz o encadeamento da variável y_t^j para contabilizar os dias de atraso de cada *job* j . A restrição (3.13) garante que o atraso de qualquer *job* pertencente a θ_r é computado como atraso do produto r como um todo. A restrição (3.14) computa o tempo fixo de parada quando há atividade de troca no instante n do dia t , e a restrição (3.15) verifica se houve atividade de troca no início do dia t . As restrições (3.16), (3.17) e (3.18) impõem os domínios das variáveis.

A título de comparação, aplica-se o modelo MHA à sequência efetivamente executada na prática pela empresa, cf. Tabela 2 da Seção 3.1. Considera-se que o custo de atraso dos três produtos é de R\$ 50,00, o tempo de processamento de cada *job* é de 60 minutos, considera-se ainda que o dia de produção tem 540 minutos de hora normal, 120 minutos de horas extras do tipo 1 e 120 minutos de horas extras do tipo 2. A solução ótima é encontrada para o exemplo e

apresentada na Tabela 4. Alterando a ordem de sequenciamento dos *jobs* é possível realizar apenas 4 paradas e 26 trocas, totalizando um tempo de *setup* de 126 minutos. Neste caso, considerando o resultado da prática que foi de 8 paradas da máquina e 32 trocas de ferramentas, totalizando 192 minutos, a redução do tempo de *setup* foi de 34,38%.

Tabela 4 - Aplicação do modelo MHA à sequência de produção

Sequência produção	Ferramentas Necessárias								Configuração de Caixa de Ferramentas																			
	1	2	12	16	18	28	34		▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼								
<i>Job 1</i>	1	2	12	16	18	28	34	1ª Parada	1	2	12	13	16	18	27	28	30	34	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	
<i>Job 2</i>	27	29	32	8	15	17	1		8	15	13	17	18	27	29	30	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼		
<i>Job 6</i>	13	30	32	2ª Parada	1	8	15	13	17	18	27	29	30	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼					
<i>Job 4</i>	19	1	5		15	10	19	18	27	26	33	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼					
<i>Job 7</i>	10	15	3ª Parada	1	5	15	10	19	18	27	26	33	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼				
<i>Job 8</i>	1	5		19	26	27	33	15	1	5	15	10	19	18	27	26	33	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
<i>Job 3</i>	9	14	21	26	33	32	4ª Parada	7	9	14	23	21	18	24	26	33	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼
<i>Job 5</i>	7	18	23	24	9	14		33	7	9	14	23	21	18	24	26	33	32	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼	▼

Legenda:

■ Ferramentas necessárias à execução do *job*

▼ Troca da ferramenta

Capítulo 4

Heurística para a Programação da Puncionadeira CNC

Como visto no Capítulo 3, o problema estudado neste trabalho conta com um conjunto de restrições tanto de ordem legal quanto da operação da empresa, o que o torna de grande complexidade. Uma forma de encontrar soluções que minimizem o custo de produção em um tempo computacional reduzido e que atendam aos requisitos desejados, é utilizando métodos heurísticos.

A função objetivo (4.1) considerada neste trabalho, também utilizada pelo modelo MHA proposto por Cunha (2012), visa minimizar o somatório dos custos com horas extras do tipo 1 e do tipo 2 ($C_{HorasExtras}$) e dos custos com atrasos ($C_{Atrasos}$), em que S é o conjunto das sequências de *jobs* no horizonte de planejamento (seis dias de produção). Desse modo, se não for possível processar todos os *jobs* dentro das datas de entrega estabelecidas e do horário regular de trabalho dos períodos de produção, a solução será um compromisso entre realizar horas extras ou assumir custos de atrasos.

$$\min f(S) = C_{HorasExtras} + C_{Atrasos} \quad (4.1)$$

O tempo das atividades de *setup*, relacionado com as paradas da máquina e com o as trocas de ferramentas, geram impacto indireto no custo da solução e, por isso, não fazem parte da função objetivo. Como já mencionado, minimizar este tempo implica minimizar o tempo total de produção, e conseqüentemente em tentar evitar o uso de horas extras e o atraso de produtos.

Dada a complexidade do problema, o método de resolução proposto neste trabalho consiste em quatro etapas. Primeiramente, os *jobs* são particionados em lotes, de acordo com as suas datas de entrega. Depois uma heurística para agrupamento é utilizada com o objetivo de identificar os *jobs* que podem ser processados de forma subsequente sem haver trocas de ferramentas. Definidos os grupos, utiliza-se um modelo reduzido do MHA para determinar as sequências dos grupos em cada dia e quais grupos não devem ser alocados naquele dia. Por fim, é realizado um refinamento da solução, com o objetivo de alocar os *jobs* dos grupos não sequenciados e reduzir os custos de atraso.

4.1 PARTICIONAMENTO DOS JOBS

O particionamento consiste em dividir os *jobs* em conjuntos, de acordo com as datas de entrega. Todos os *jobs* com data de entrega no primeiro dia são colocados em um conjunto, os com data de entrega no segundo dia em outro, e assim sucessivamente, de acordo com o número de dias da programação e até que todos os *jobs* sejam inseridos em algum conjunto.

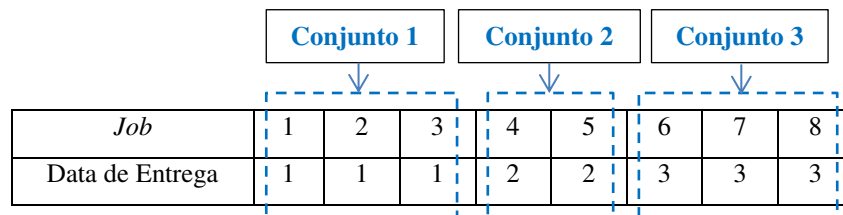


Figura 5 - Exemplo do método de particionamento de *jobs*

A Figura 5 apresenta um exemplo do método de particionamento de *jobs* em conjuntos. São considerados 8 *jobs* que precisam ser processados em 3 dias de produção. A ideia é que se todos os *jobs* forem produzidos na data de entrega, pode até ser necessário o uso de horas extras, mas não haverá custos de atrasos. Além disso, os custos com horas extras podem ser minimizados ou até eliminados se houver um sequenciamento eficiente que minimize os tempos de *setup*, ou se alguns *jobs* puderem ser adiantados em uma fase de refinamento posterior.

4.2 HEURÍSTICA DE AGRUPAMENTO

Definidos os conjuntos de *jobs* pelo método de particionamento, aplica-se para cada conjunto, uma heurística de agrupamento com o objetivo de determinar grupos de *jobs* que podem ser produzidos continuamente, ou seja, aqueles que são processados por um mesmo conjunto de ferramentas e que durante todo o processamento não demandam atividades de *setup*.

A heurística proposta utiliza os conceitos de Tecnologia de Grupo (TG). Segundo Massote (2001), a TG é um enfoque aplicado ao estudo dos sistemas de manufatura que busca o agrupamento de máquinas em células e de peças em famílias, de modo a definir o planejamento e os processos produtivos. O termo família é utilizado para designar um conjunto de peças agrupadas pela similaridade de algum atributo (por exemplo, forma geométrica) e/ou de processos de fabricação (por exemplo, coincidências dos fluxos de

processo definidos para cada uma delas). Célula ou grupo é considerado um conjunto de máquinas capazes de processar inteiramente todos os componentes de uma família.

As peças, uma vez definidas em famílias, passam a ser consideradas, para fins de planejamento produtivo, não mais como individuais, mas como uma produção em série de todo o conjunto pelo grupo definido. Assim, cada família de peças passa a ser tratada como uma peça composta por todos os atributos do grupo em que se insere. Busca-se deste modo, obter melhorias na produtividade, tais como: redução de ciclos de fabricação, confiabilidade nos prazos de entrega, menor movimentação de materiais, simplificação do processo produtivo, dentre outros (MASSOTE, 2001).

Na abordagem mais utilizada pelos métodos da TG, os atributos de fabricação, necessários para a produção das peças, e as operações necessárias de cada peça em cada máquina, são representados na forma de uma matriz binária, denominada matriz de incidência A (*peça x máquina*), em que cada elemento a_{ij} da matriz indica se a incidência existe ou não, isto é, se a peça i é processada pela máquina j , ou não.

Segundo Massote (2001), a resolução do problema tem como objetivo rearranjar as linhas e colunas da matriz de incidência para obter uma decomposição em blocos diagonais (blocos com a maioria dos elementos não nulos nas diagonais). Cada bloco representará um grupo de fabricação, ou seja, em cada bloco existirá somente uma família de peças que será executada exatamente por um grupo de máquinas.

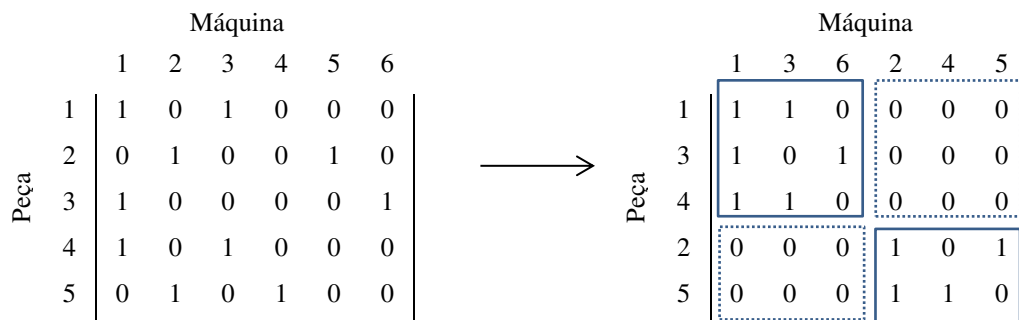


Figura 6 - Tecnologia de Grupos: exemplo de matriz de incidência e decomposição em blocos

A Figura 6 apresenta uma matriz de incidência *peça x máquina* e a decomposição em blocos diagonais. Nem sempre essa diagonalização é perfeita. Pode ser que apareçam elementos não nulos fora dos blocos. Estes elementos são denominados excepcionais e

representam o processamento que as peças terão em máquinas de outras células (MASSOTE, 2001). Sempre que possível, deve-se minimizar estes elementos.

Relacionando os termos da TG com o problema foco deste trabalho, o termo peça é substituído por *job* e o termo máquinas, por ferramentas. O termo família de peças, é substituído por conjunto de *jobs*, e o agrupamento desses *jobs* utilizará a similaridade de atributo (produto ao qual o *job* pertence) e a similaridade do processo (ferramentas utilizadas em comum pelos *jobs*). O termo célula ou grupo de máquinas é substituído por conjunto de ferramentas.

Logo, um grupo é constituído por um subconjunto de *jobs* e por um subconjunto de ferramentas. O subconjunto de ferramentas contém todas aquelas requeridas para processar todo o subconjunto de *jobs* do grupo e tem cardinalidade menor ou igual à capacidade da caixa de ferramentas. Assim, a máquina não precisa ser interrompida para realizar trocas de ferramentas durante o processamento do grupo. A ideia é que minimizando o número total grupos, conseqüentemente, o número total de instantes de troca também é minimizado.

Cada *job* pertence a apenas um grupo. Já as ferramentas podem pertencer a mais de um (elemento excepcional), de acordo com a demanda de ferramentas dos *jobs* que compõem o grupo. Um dos objetivos do método é também tentar minimizar, na medida do possível, o uso das ferramentas por mais de um grupo. Pois, ao evitar que ferramentas fiquem saindo e voltando para a caixa de ferramentas da máquina, conseqüentemente minimiza-se o número de trocas.

Diferentes trabalhos sobre a TG são encontrados na literatura. Kusiak e Chow (1986) propõem um Algoritmo de Identificação de Grupos, que procura identificar a existência de grupos mutuamente separáveis em uma matriz de incidência. O algoritmo parte de uma matriz de incidência binária de *jobs* x *ferramentas* $A = [a_{ij}]_{J \times M}$, na qual $a_{ij}=1$, se o *job* *i* utiliza a ferramenta *j*, e 0, caso contrário e procura decompor a matriz em submatrizes A_1, A_2, \dots, A_k ; em que cada submatriz corresponde a um grupo, ou seja, um subconjunto de ferramentas, e um subconjunto de *jobs*.

A abordagem utilizada por Kusiak e Chow (1986) não leva em consideração um aspecto importante do processo produtivo que é a capacidade da caixa de ferramentas da

máquina. Partindo desse pressuposto, Gómez (1996) desenvolve um algoritmo para o agrupamento de *jobs*, mais tarde utilizado por Gómez e Lorena (1998), com base naquele proposto por Kusiak e Chow (1986). O autor adiciona uma restrição ao modelo, que impõe um limite superior ao número de ferramentas utilizadas pelo conjunto de *jobs* agrupados.

Considerando o processo produtivo estudado neste trabalho, é importante ressaltar que o modelo proposto por Gómez (1996) limita a capacidade da caixa, mas não leva em consideração outro aspecto importante que é o fato dos *jobs* constituírem produtos. A similaridade por produtos é importante quando se tem os tempos de processamento de cada *job*, os turnos de trabalhos, os limites e custos de horas extras e custos de atrasos. Como o custo de atraso é computado por produto e não por *job*, se houver o atraso de dois *jobs* de diferentes produtos, serão computados dois atrasos, um para cada produto, e no caso do atraso de dois *jobs* do mesmo produto, será computado apenas um custo de atraso. Logo, a ideia é que priorizando a alocação de *jobs* do mesmo produto em um mesmo grupo, se for necessário o atraso desse grupo, será computado o atraso de apenas um produto.

O Algoritmo 1 apresenta o método de agrupamento de *jobs* proposto para atender às características do problema estudado neste trabalho. O algoritmo considera cada conjunto J_t , $t = 1, \dots, |T|$, de *jobs* dado pelo particionamento, *cf.* Seção 4.1, um por vez, para efetuar o agrupamento. Para cada *job* $j \in J_t$, M_j é o conjunto de ferramentas requeridas para processar o *job*. Monta-se uma lista L que contém os *jobs* de J_t que utilizam o menor número de ferramentas. Seja C a capacidade da caixa de ferramentas da máquina e \bar{C} a capacidade residual, ou seja, o número de ferramentas que ainda podem ser inseridas na caixa, sem exceder C . Seja k o índice do grupo G_k . Lembrando que o conjunto de *jobs* que compõem um produto r , $r = 1, \dots, R$, é definido por θ_r , $\overline{P_{\theta_r}}$ representa o número de *jobs* que compõem o produto r e que ainda não foram inseridos em algum grupo. No início $\overline{P_{\theta_r}} = |\theta_r|$. O conjunto P_k armazena os produtos que têm algum *job* pertencente ao grupo G_k e o conjunto M_{G_k} armazena as ferramentas utilizadas para processar todos os *jobs* do grupo G_k . Por fim, para um dado *job* j que não foi inserido no grupo G_k , $\overline{sm_{jk}}$ equivale ao número de ferramentas utilizadas pelo *job* j e que não são utilizadas pelos *jobs* do grupo k , ou seja, não estão no conjunto de ferramentas M_{G_k} , *i.e.*, $\overline{sm_{jk}} = |M_j - M_{G_k}|$.

ALGORITMO PARA AGRUPAMENTO DE JOBS

1. $k \leftarrow 0$;
 2. **para** ($t = 1$ até $|I|$) **faça**
 3. **enquanto** ($J_t \neq \emptyset$) **faça**
 4. $k \leftarrow k + 1$;
 5. $G_k \leftarrow \emptyset$;
 6. Monte uma lista L com os *jobs* de J_t tal que $|M_j|$ seja mínimo;
 7. Selecione aleatoriamente um elemento j de L ;
 8. $G_k \leftarrow G_k \cup \{j\}$;
 9. $\bar{C} \leftarrow \bar{C} - |M_j|$;
 10. $J_t \leftarrow J_t - \{j\}$;
 11. $P_k \leftarrow \{r : j \in \theta_r\}$;
 12. $\overline{P_{\theta_r}} \leftarrow \overline{P_{\theta_r}} - 1 : j \in \theta_r$;
 13. $M_{G_k} \leftarrow M_j$;
 14. **enquanto** ($M_{G_k} \neq \emptyset$) **faça**
 15. Selecione aleatoriamente uma ferramenta $i \in M_{G_k}$;
 16. $M_{G_k} \leftarrow M_{G_k} - \{i\}$;
 17. Seja $\Phi_P \subseteq J_t$ o conjunto de *jobs* que utilizam a ferramenta i e que compõem algum produto de P_k ;
 18. Seja $\Phi \subseteq J_t$ o conjunto de *jobs* que utilizam a ferramenta i e que não estão em Φ_P ;
 19. **enquanto** ($\Phi_P \neq \emptyset$) **faça**
 20. Selecione um *job* j de Φ_P tal que $\overline{P_{\theta_r}}, j \in \theta_r$, seja mínimo;
 21. $\Phi_P \leftarrow \Phi_P - \{j\}$;
 22. **se** ($\bar{C} - \overline{sm}_{jk} \geq 0$) **faça**
 23. $G_k \leftarrow G_k \cup \{j\}$;
 24. $\bar{C} \leftarrow \bar{C} - \overline{sm}_{jk}$;
 25. $J_t \leftarrow J_t - \{j\}$;
 26. $\overline{P_{\theta_r}} \leftarrow \overline{P_{\theta_r}} - 1 : j \in \theta_r$;
 27. $M_{G_k} \leftarrow M_{G_k} \cup \{\text{ferramentas de } M_j \text{ que não foram analisadas no grupo } k\}$;
 28. **fim se**
 29. **fim enquanto** ($\Phi_P \neq \emptyset$)
 30. **enquanto** ($\Phi \neq \emptyset$) **faça**
 31. **se** ($\exists j' \in \Phi : j' \in \theta_{r \in P_k}$) **faça**
 32. $j \leftarrow j'$;
 33. **senão** selecione aleatoriamente um *job* j de Φ ;
 34. $\Phi \leftarrow \Phi - \{j\}$;
 35. **se** ($\bar{C} - \overline{sm}_{jk} \geq 0$) **faça**
 36. $G_k \leftarrow G_k \cup \{j\}$;
 37. $\bar{C} \leftarrow \bar{C} - \overline{sm}_{jk}$;
 38. $J_t \leftarrow J_t - \{j\}$;
 39. $\overline{P_{\theta_r}} \leftarrow \overline{P_{\theta_r}} - 1 : j \in \theta_r$;
 40. $P_k \leftarrow \{r : j \in \theta_r\}$;
 41. $M_{G_k} \leftarrow M_{G_k} \cup \{\text{ferramentas de } M_j \text{ que não foram analisadas no grupo } k\}$;
 42. **fim se**
 43. **fim enquanto** ($\Phi \neq \emptyset$)
 44. **fim enquanto** ($M_{G_k} \neq \emptyset$)
 45. **fim enquanto** ($J_t \neq \emptyset$)
 46. **fim para** ($t = 1$ até $|I|$)
-

Algoritmo 1 - Algoritmo para agrupamento de *jobs*

A seguir são descritos os passos do algoritmo para dado conjunto J_t definido no particionamento. Ao longo do algoritmo elimina-se de J_t os *jobs* que forem inseridos em algum grupo. Enquanto houver *job* para ser agrupado, o algoritmo cria um novo grupo G_k . A lista L recebe os *jobs* contidos em J_t que utilizam o menor número de ferramentas, um *job* j é selecionado aleatoriamente de L e inserido no grupo G_k . A capacidade residual da caixa de ferramentas é atualizada, o *job* é removido de J_t , o conjunto P_k é atualizado com o produto ao qual o *job* j pertence e o conjunto M_{G_k} de ferramentas do grupo k é atualizado com as ferramentas utilizadas pelo *job* j .

Enquanto houver *job* que possa ser inserido no grupo G_k , ou seja, algum *job* que possua alguma ferramenta em comum com as ferramentas do grupo e que possa ser inserido no grupo sem que a capacidade da caixa de ferramentas seja excedida, os seguintes passos são realizados iterativamente.

Para cada ferramenta $i \in M_{G_k}$, obtém-se dois subconjuntos de *jobs* Φ_p e Φ . O conjunto Φ_p armazena os *jobs* que utilizam a ferramenta i e que compõem algum produto pertencente ao grupo k , *i.e.*, $i \in M_j$ e $\exists r \in P_k : j \in \theta_r$. O conjunto Φ armazena os *jobs* que utilizam a ferramenta i mas não pertencem a um produto do grupo k . Se estes conjuntos forem vazios, significa que não há *job* com a similaridade desta ferramenta para ser inserido neste grupo. Caso contrário, o método analisa primeiro o conjunto Φ_p . Seleciona-se o *job* j cujo produto ao qual pertence apresenta o menor número de *jobs* que ainda não foram inseridos em algum grupo. O objetivo é concluir a inserção de todos os *jobs* de um produto o mais breve possível. Elimina-se j de Φ_p . Se a inserção do *job* não exceder a capacidade da caixa de ferramentas da máquina, o *job* é inserido no grupo. Em seguida são atualizados a capacidade residual, o conjunto de *jobs* que ainda não foram agrupados, o número de *jobs* do produto que ainda não foram agrupados e o conjunto de ferramentas do grupo.

Finalizada a análise dos *jobs* de Φ_p , passa-se para o conjunto Φ . A princípio, os *jobs* de Φ compõem produtos que não têm *jobs* no grupo k , ou seja, produtos que não estão em P_k . No entanto, se for possível inserir um *job* de Φ em G_k , o conjunto P_k é aumentado e então outros *jobs* de Φ podem vir a ser de produtos que agora estão em P_k . Novamente a ideia é tentar montar grupos com *jobs* que compõem um mesmo produto, de forma que se um grupo for atrasado, este atraso afeta um menor número de produtos. Por exemplo, no caso em que Φ

possui os *jobs* 1 e 2 que pertencem ao produto A e o *job* 3 que pertence ao produto B. Se o *job* 1 foi inserido no grupo, então o produto A é inserido em P_k . Neste momento deverá ser analisada a inserção do *job* 2 e posteriormente, do *job* 3. O teste de capacidade da máquina e as mesmas atualizações do passo anterior são realizados, além da atualização do conjunto de produtos do grupo.

Para ilustrar a aplicação da heurística proposta, apresenta-se o exemplo a seguir. Seja o Conjunto 1 de *jobs* (associados a $t = 1$), constituído por 3 produtos. Estes produtos são compostos por 5 *jobs* que utilizam um conjunto de 7 ferramentas. O produto 1 é constituído pelo *job* 2, o produto 2, pelos *jobs* 1 e 4, e o produto 3, pelos *jobs* 3 e 5. A capacidade da máquina é limitada em 4 ferramentas, $C = 4$. A Figura 7 apresenta a matriz binária $A = [a_{ij}]_{|J| \times |M|}$ (*jobs* x ferramentas), onde $a_{ij} = 1$, se o *job* i utiliza a ferramenta j , e 0, caso contrário.

		Ferramentas						
		1	2	3	4	5	6	7
<i>Jobs</i>	1	1	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	1	0	0
	3	1	0	0	0	0	1	1
	4	1	0	0	1	0	0	0
	5	0	1	0	0	0	1	1

Figura 7 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de *jobs* - matriz de incidência

Iniciando os passos da heurística, verifica-se que o *job* que utiliza menos ferramentas é o *job* 2 (uma ferramenta). O *job* 2 é inserido no Grupo G_1 e as ferramentas do mesmo são inseridas no conjunto de ferramentas M_{G_1} do grupo. Analisando as ferramentas, verifica-se a ferramenta 5, que por sua vez, não é utilizada por outro *job*. Logo, $\Phi_p = \Phi = \emptyset$, e o primeiro grupo é definido: $G_1 = \{2\}$, $M_{G_1} = \{5\}$. Pode não ser intuitiva a definição de um grupo com apenas um *job*, dada a capacidade da máquina. Mas isto pode ser vantajoso, por exemplo, no momento de compor a primeira caixa de ferramentas da máquina do primeiro dia. Como a caixa de ferramentas deve estar sempre completa, a associação deste grupo com qualquer outro grupo que utiliza apenas três ferramentas, atenderia à exigência e traria benefícios do ponto de vista de reduzir o tempo de *setup*. A Figura 8 ilustra a seleção e definição do primeiro grupo.

		Ferramentas						
		1	2	3	4	5	6	7
Jobs	1	1	0	1	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	1	0	0
	3	1	0	0	0	0	1	1
	4	1	0	0	1	0	0	0
	5	0	1	0	0	0	1	1

→

		Ferramentas						
		1	2	3	4	6	7	
Jobs	1	1	0	1	0	0	0	
	3	1	0	0	0	1	1	
	4	1	0	0	1	0	0	
	5	0	1	0	0	1	1	

Figura 8 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de *jobs* - 1ª iteração

Prosseguindo, os *jobs* 1 e 4 utilizam duas ferramentas cada. Seleciona-se aleatoriamente o *job* 1 e este é inserido no Grupo G_2 , e suas ferramentas, no conjunto de ferramentas do grupo. Selecionando uma ferramenta utilizada pelo *job*, toma-se a ferramenta 1. Esta ferramenta é utilizada pelos *jobs* 3 e 4. Como o *job* 4 pertence ao mesmo produto que o *job* 1 ($\Phi_p=\{4\}$), verifica-se primeiro o *job* 4. Somando-se as ferramentas utilizadas pelos *jobs* 1 e 4, obtêm-se um total igual a 3, que não excede a capacidade da máquina, logo os dois *jobs* são agrupados: $G_2 = \{1,4\}$ e $M_{G_2} = \{1,3,4\}$. Verificando o *job* 3 ($\Phi=\{3\}$), certifica-se que ele não pode ser agrupado porque excede a capacidade da máquina. Como nenhum outro *job* utiliza a ferramenta 3, verifica-se aqueles que usam a ferramenta 4 (inserida na caixa de ferramentas do grupo após o agrupamento do *job* 4). A ferramenta 4 não é utilizada por nenhum outro *job*. Como não há outras possibilidades de busca, o grupo é fechado. A Figura 9 ilustra a seleção e definição do segundo grupo.

		Ferramentas						
		1	2	3	4	6	7	
Jobs	1	1	0	1	0	0	0	
	3	1	0	0	0	1	1	
	4	1	0	0	1	0	0	
	5	0	1	0	0	1	1	

→

		Ferramentas			
		1	2	6	7
Jobs	3	1	0	1	1
	5	0	1	1	1

Figura 9 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de *jobs* - 2ª iteração

Prosseguindo, novamente há um empate entre os *jobs* que utilizam o menor número de ferramentas: *jobs* 3 e 5 (três ferramentas). Seleciona-se aleatoriamente o *job* 3, que é inserido no Grupo G_3 e as ferramentas do mesmo, no conjunto de ferramentas M_{G_3} do grupo. A ferramenta 1, utilizada pelo *job* não será mais usada, a ferramenta 6 é utilizada pelo *job* 5. Verificando a capacidade da máquina, observa-se que é possível fazer o agrupamento dos dois

jobs. Logo, $G_3 = \{3,5\}$ e $M_{G_3} = \{1,2,6,7\}$. Como não há mais *jobs* para serem agrupados, o método é interrompido. A Figura 10 ilustra a seleção e definição do grupo G_3 e a finalização do algoritmo.

		Ferramentas			
		1	2	6	7
Jobs	3	1	0	1	1
	5	0	1	1	1

Figura 10 - Exemplo de aplicação da heurística de agrupamento de *jobs* - 3ª iteração

4.3 SEQUENCIAMENTO DOS GRUPOS DE JOBS

Definidos os grupos de *jobs* pela heurística de agrupamento descrita anteriormente, o próximo passo é determinar a sequência de processamento desses grupos em cada dia do horizonte de planejamento. A Figura 11 apresenta um exemplo de aplicação consecutiva do método de particionamento de *jobs* e da heurística de agrupamento, tomando como base o exemplo apresentado na Figura 5 (*cf.* Seção 4.1). Para o sequenciamento em cada dia, pode-se dizer que cada grupo passa a ser tratado como um “*job grande*” composto por todos os atributos dos *jobs* que o compõem (ferramentas, produtos, datas de entrega e tempos de processamento).

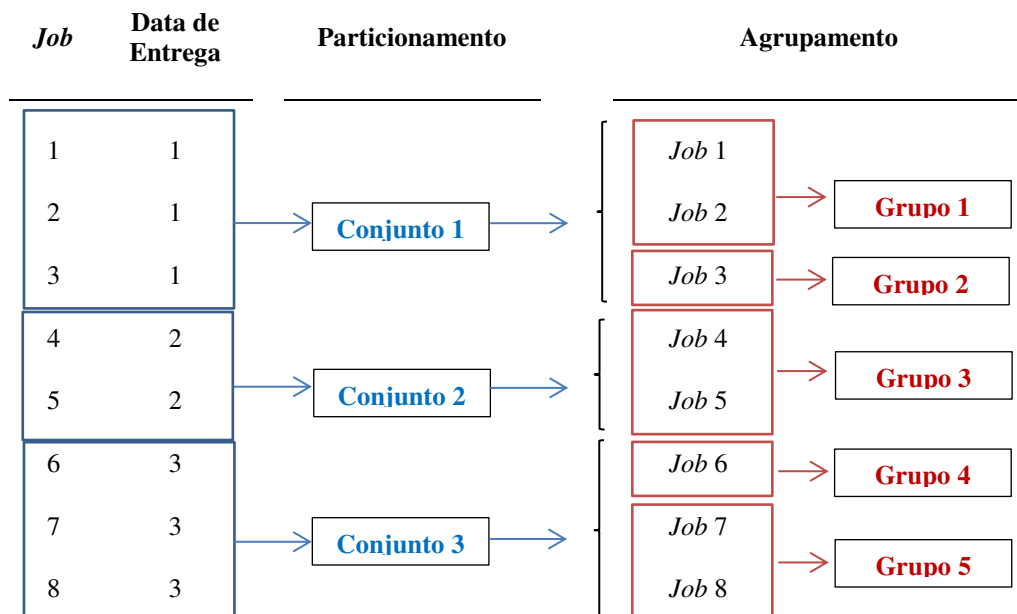


Figura 11 - Exemplo aplicação consecutiva do método de particionamento de *jobs* e da heurística de agrupamento

A definição do sequenciamento dos grupos em cada dia envolve também a determinação de quais grupos devem ou não ser produzidos no dia, isto é, quais grupos devem ser atrasados, de acordo com a função objetivo do problema (relação entre os custos com horas extras e os custos de atraso de produtos). Para realizar este sequenciamento, o modelo MHA foi reduzido para ser aplicado para cada dia do horizonte de planejamento. As alterações são apresentadas a seguir.

No modelo reduzido, cada elemento do conjunto J é um grupo de *jobs*. Como o modelo é aplicado para cada dia (período) separadamente, o parâmetro T (conjunto de períodos) deixa de fazer parte do modelo. A variável binária x_n^j indica com o valor 1, se o grupo $j, j \in J$, deve ser executado na posição $n, n \in N$. O parâmetro a_m^j indica se o grupo $j, j \in J$, requer a ferramenta $m, m \in M$. O tempo de processamento de cada grupo é dado pelo parâmetro g_j que, neste caso, representa o somatório dos tempos de processamento dos *jobs* que constituem o grupo.

A data de entrega do grupo j é o dia para o qual se aplica o sequenciamento, o que significa que o modelo vai apenas definir se o grupo deve ser produzido (e em qual posição), ou não. A variável $y^j = 1$ indica que o grupo j não foi processado no período.

Como os grupos podem conter *jobs* que pertencem a diferentes produtos, se um grupo atrasa, o atendimento ao prazo de entrega de todos os produtos que o constituem é comprometido. No modelo reduzido os conjuntos $\theta_r, r = 1, \dots, R$, são redefinidos. Para dado r , θ_r é constituído pelos grupos que contêm pelo menos um *job* que compõe o produto r . Nota-se que no modelo original os conjuntos θ_r são disjuntos, agora, podem haver interseções entre eles. A variável binária $z^r = 1$ indica que o produto r atrasou em virtude de um ou mais grupos com *jobs* que compõem este produto não terem sido produzidos. Para exemplificar, considera-se a instância constituída por 3 produtos. O Produto 1 é composto pelos *jobs* $\theta_1 = \{1,2,3\}$, o Produto 2 é composto pelos *jobs* $\theta_2 = \{4,5\}$ e o Produto 3 é composto pelos *jobs* $\theta_3 = \{6,7\}$. Os custos de atrasos associados aos produtos são: $h_1 = 3, h_2 = 5$ e $h_3 = 1$. Após o agrupamento foram gerados 4 grupos: $G_1 = \{1,2,4\}, G_2 = \{3,6\}, G_3 = \{5\}$ e $G_4 = \{7\}$. Logo, os conjuntos θ_r são redefinidos como segue: $\theta_1 = \{1,2\}$, pois os grupos G_1 e G_2 possuem *jobs* do Produto 1, $\theta_2 = \{1,3\}$, pois os grupos G_1 e G_3 possuem *jobs* do Produto 2, e $\theta_3 = \{2,4\}$, pois os grupos G_2 e G_4 possuem *jobs* do Produto 3. Supondo que na solução do

modelo reduzido, $j = 1$, isto é, o grupo G_1 , não tenha sido produzido, então $y^1 = 1$. Logo, haverá atraso dos produtos 1 e 2, pois $y^1 - z^1 \leq 0 \rightarrow z^1 = 1$, $y^1 - z^2 \leq 0 \rightarrow z^2 = 1$. E a penalidade na função objetivo será: $h_1 \times z^1 + h_2 \times z^2 = 3 + 5 = 8$. A variável w_0^m indica se a ferramenta m está inicialmente na máquina.

O modelo reduzido é apresentado a seguir:

$$\min (o^1 v^1 + o^2 v^2) + \sum_{r=1}^R h_r z^r \quad (4.2)$$

$$\left(\sum_{m \in M} \sum_{n \in N} p_n^m + \sum_{m \in M} q^m \right) \cdot s + \left(\sum_{n \in N} f_n + l \right) \cdot s' + \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} g_j x_n^j \leq u + v^1 + v^2 \quad (4.3)$$

$$v^i \leq b^i \quad i = 1, 2; \quad (4.4)$$

$$w_{(n+1)}^m - w_n^m - p_n^m \leq 0 \quad \forall n \in N : n < |N|; \forall m \in M \quad (4.5)$$

$$w_1^m - w_0^m - q^m \leq 0 \quad \forall m \in M \quad (4.6)$$

$$\sum_{m \in M} w_n^m \leq C \quad \forall n \in N \quad (4.7)$$

$$a_m^j x_n^j - w_n^m \leq 0 \quad \forall j \in J, \forall n \in N, \forall m \in M \quad (4.8)$$

$$\sum_{j \in J} x_1^j = 1 \quad (4.9)$$

$$\sum_{j \in J} (x_{(n+1)}^j - x_n^j) \leq 0 \quad \forall n \in N : n < |N| \quad (4.10)$$

$$\sum_{n \in N} x_n^j + y^j = 1 \quad \forall j \in J \quad (4.11)$$

$$y^j - z^r \leq 0 \quad \forall j \in J, r = 1, \dots, R : j \in \theta_r \quad (4.12)$$

$$p_n^m - f_n \leq 0 \quad \forall m \in M; \forall n \in N \quad (4.13)$$

$$q^m - l \leq 0 \quad \forall m \in M \quad (4.14)$$

$$f_n, l \geq 0 \quad (4.15)$$

$$v^1, v^2 \geq 0 \quad (4.16)$$

$$x, y, w, p, q \in \{0, 1\} \quad (4.17)$$

A função objetivo (4.2) visa minimizar os custos gerados com a realização de horas extras e os custos de atrasos de produtos. A restrição (4.3) garante que o tempo total gasto com atividades de *setup* somado ao tempo de processamento dos grupos não excede a capacidade de realização de horas normais acrescidas das horas extras do tipo 1 e do tipo 2.

A restrição (4.4) limita as horas extras do tipo 1 e 2. A restrição (4.5) insere as ferramentas necessárias em uma posição $n+1$ e que não estão na máquina na posição n . A restrição (4.6) garante a inserção das ferramentas requeridas ao processamento do primeiro grupo, observando o estado inicial da caixa de ferramentas da máquina.

A restrição (4.7) garante que o total de ferramentas na caixa não excede sua capacidade. Todas as ferramentas necessárias à realização de um grupo devem estar na caixa na posição em que esse grupo é processado, conforme garante a restrição (4.8). A restrição (4.9) exige que a primeira posição do dia seja ocupada por exatamente um grupo. A restrição (4.10) garante que uma posição $n+1$ será utilizada se algum grupo tiver sido alocado na posição anterior. A restrição (4.11) verifica se houve atraso do grupo j . A restrição (4.12) garante que o atraso de qualquer grupo que tenha algum *job* componente do produto r é computado como atraso do produto como um todo. As restrições (4.13) e (4.14) verificam e computam atividades de *setup*. As restrições (4.15), (4.16) e (4.17) definem os domínios das variáveis.

4.4 MÉTODO DE REFINAMENTO DA SOLUÇÃO

Definidas as sequências dos grupos em cada dia do horizonte de planejamento e quais grupos não devem ser produzidos nos respectivos dias, ou seja, aqueles que devem ser atrasados, o refinamento da solução visa verificar a possibilidade de reduzir custos de atrasos.

Minimizar os custos de atraso consiste em determinar se grupos não sequenciados pelo modelo de sequenciamento serão alocados em algum dia ou se realmente não serão produzidos no horizonte de planejamento. Um grupo não sequenciado pode ser alocado nos dias anteriores à sua data de entrega, isto é, pode ter a sua produção antecipada e não gerar custos de atraso, ou ser alocado nos dias seguintes à sua data de entrega, gerando os custos de atraso correspondentes ao total de dias que ele for atrasado.

A alocação de um grupo completo nesta fase do refinamento pode ser complicada ou até inviável, uma vez que todos os dias do sequenciamento já estão com vários grupos sequenciados. Mesmo que a inserção do grupo em um dia gere poucas atividades de *setup*, como o tempo de processamento do grupo é o somatório dos tempos de processamento dos *jobs* que o compõem, pode exceder o limite de horas permitidas para o dia ou mesmo gerar excessivos custos de horas extras. Outra questão, é que os grupos podem ser constituídos por diferentes produtos e diferentes grupos podem conter *jobs* do mesmo produto. Se um grupo atrasa, o atendimento ao prazo de entrega de todos os produtos que têm pelo menos um *job* em sua composição é comprometido. Então, por exemplo, a antecipação da produção de um grupo, pode não significar o não pagamento do custo de atraso de um produto, visto que este produto pode ter *jobs* em outros grupos que não foram sequenciados.

Assim, o método de refinamento da solução deixa de lidar com grupos e passa a tratar os produtos que possuem *jobs* que não foram sequenciados. A Figura 12 apresenta um exemplo da relação entre grupos não sequenciados e produtos em atraso. Tem-se 2 grupos que contêm *jobs* de 3 produtos diferentes. O método de refinamento analisará a inserção dos 3 produtos, não mais dos grupos.

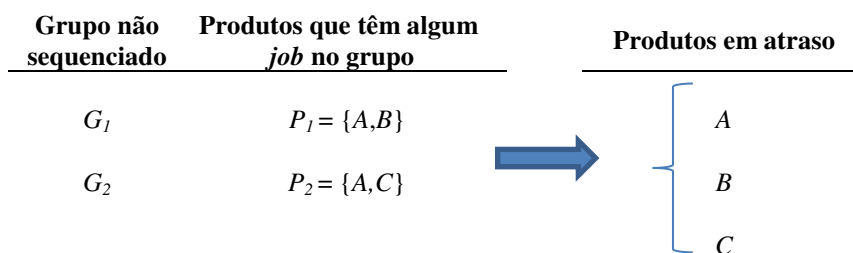


Figura 12 - Relação entre grupos não sequenciados e produtos em atraso

Vale ressaltar que, os produtos considerados em atraso em função dos grupos que não foram sequenciados, podem conter *jobs* que pertencem a outros grupos que foram sequenciados. Logo, um produto pode estar em atraso tanto porque um único *job* entre os *jobs* que o constituem não foi sequenciado, quanto porque todos os *jobs* que o compõem não foram sequenciados.

Portanto, minimizar os custos de atraso consiste em determinar se produtos em atraso, devido ao modelo de sequenciamento, terão seus *jobs* não sequenciados alocados em alguma posição dos dias ou se realmente não serão produzidos no horizonte de planejamento.

O Algoritmo 2 apresenta o método para refinamento da solução com o objetivo de antecipar o processamento de produtos em atraso. O método é aplicado sequencialmente para cada período t , $t = 2, \dots, |T|$, que possui algum grupo que não foi sequenciado. Por exemplo, se para um horizonte de 3 dias, os dias 2 e 3 apresentam atrasos, o método primeiro analisa o dia 2 e depois o dia 3. A ideia é que se os produtos em atraso nos primeiros dias puderem ser antecipados, o custo acumulado de atraso será menor, pois os *jobs* dos grupos não sequenciados pelo modelo, a princípio não são produzidos no horizonte de planejamento.

Considerando que cada dia t contém uma sequência s_t de processamento dos grupos, definida pelo método de sequenciamento, S é o conjunto solução de todas as sequências do horizonte de planejamento, $S = \{s_1, \dots, s_t\}$. O conjunto Ω é constituído pelos produtos que contêm *jobs* pertencentes aos grupos alocados no dia t e que não foram sequenciados. A partir de Ω , dois subconjuntos são constituídos: Π_p e Π . O subconjunto Π_p é composto pelos produtos que já têm algum *job* sequenciado. Já o subconjunto Π , é constituído por produtos que não possuem *jobs* sequenciados.

Primeiro são analisados os produtos de Π_p , e depois de Π . A ideia é que priorizando a inserção de produtos que já têm *jobs* sequenciados, a chance de concluir a inserção de todos os *jobs* do produto, e assim eliminar o custo de atraso, é maior. Pode também viabilizar a conclusão de mais produtos.

Os seguintes passos são realizados iterativamente. Seleciona-se de Π_p o produto r cujo custo de atraso é o maior. O produto r é removido de Π_p . Seja J_r^t o conjunto de *jobs* do produto r que estão em grupos não sequenciados no período t . Seja Δ o custo gerado pelo sequenciamento dos *jobs* de J_r^t . Seleciona-se um *job* $j \in J_r^t$. O *job* é removido de J_r^t . Então, todos os dias que antecedem, incluindo o dia t , são verificados. O dia t também é avaliado, pois pode não ter sido possível a inserção do grupo, mas pode ser possível a inserção de algum *job* do grupo separadamente. Realiza-se uma análise inicial de viabilidade da inserção. Seja α_t o tempo total de produção do dia t . Lembrando que u_t é o limite disponível de horas normais no dia t , b_t^1 e b_t^2 são os limites de horas extras do tipo 1 e 2, respectivamente. Se o tempo total α_t somado com o tempo de processamento g_j do *job* exceder o limite total de horas disponíveis no dia, o *job* não pode ser inserido neste dia.

Constatada a possível viabilidade da inserção do *job* no dia, visto que ainda não se sabe se haverá tempo disponível para as atividades de *setup* geradas, analisa-se a melhor posição para inseri-lo. Seja N_t a última posição do dia t . O objetivo é selecionar a posição em que a inserção do *job* provoca o menor acréscimo de custo. Por exemplo, considerando que o dia t possui 4 posições ($N_t = 4$) ocupadas pelos seguintes *jobs* consecutivamente: 1,2,3,4, pretende-se fazer a inserção do *job* 9. Logo, serão analisadas as sequências nas quais o *job* 9 ocupa a posição $n = 1, \dots, 5$, ou seja, 9,1,2,3,4 depois 1,9,2,3,4, assim por diante até à sequência 1,2,3,4,9.

Seja M_{jn} o subconjunto de ferramentas de M_j utilizadas pelo *job* j e que não estão na caixa de ferramentas da máquina na posição n . Se o conjunto M_{jn} for vazio, significa que todas as ferramentas necessárias para produzir o *job* j na posição n estão na máquina e, por isso, não serão necessárias atividades de *setup*. Logo, o novo tempo total α'_t de produção do dia t será α_t acrescido apenas pelo tempo de processamento g_j do *job* j . Caso contrário, aplica-se a política KTNS para a sequência obtida a partir de s_t com a inserção de j na posição n . Assim é possível obter a melhor sequência de carregamento de ferramentas na máquina e, conseqüentemente, o número total de trocas de ferramentas. Vale ressaltar que, em um momento de parada, analisa-se se as trocas de ferramentas para a execução de dois ou mais *jobs* consecutivos podem ser feitas simultaneamente, ou seja, se o somatório das ferramentas utilizadas não exceder a capacidade da máquina, as ferramentas são inseridas em um mesmo momento de troca, reduzindo as paradas da máquina.

Definido o novo tempo total α'_t da sequência, uma nova verificação de viabilidade é realizada. Constatada a viabilidade, computa-se, em termos de horas extras, o custo c_{jn} gerado pela inserção do *job* j na posição n . Se α'_t for maior que o limite de horas normais somado ao limite de horas extras do tipo 1, será computado custo de hora extra do tipo 2 e eventualmente também do tipo 1. Então, se o tempo total α_t do dia antes da inserção for maior que $u_t + b_t^1$, significa que foram gerados somente custos com horas extras do tipo 2. Caso contrário, haverá custos com hora extra dos tipos 1 e 2. O custo de hora extra do tipo 2 será dado pelo excedente do limite de horas normais mais horas extras do tipo 1, multiplicado pelo custo da hora extra do tipo 2, o^2 . O custo com horas extras do tipo 1, será o limite anterior subtraído do valor máximo entre o tempo total de produção e o limite de horas normais, multiplicado pelo custo da hora extra do tipo 1, o^1 , pois no caso em que restar tempo ocioso no dia (hora normal

não utilizada), este tempo não deverá ser computado como custo. A Figura 13 exemplifica os casos de computação de custos para α'_t maior que $u_t + b_t^1$.

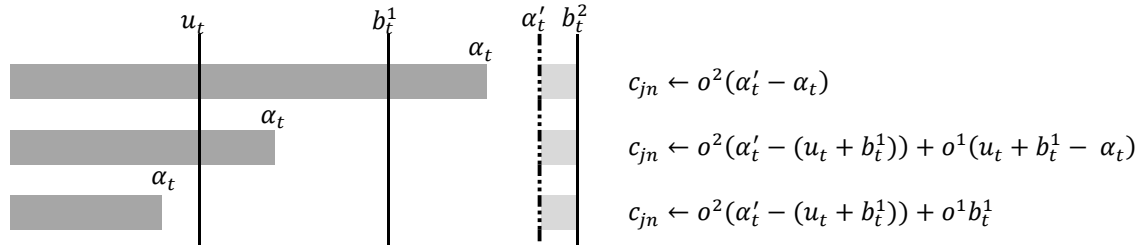


Figura 13 - Exemplo de custos com horas extras dos tipos 1 e 2

Se α'_t não for maior que o limite de horas normais mais o limite de horas extras do tipo 1, poderá ter ocorrido uso de hora extra 1 ou não (caso não exceda o limite de hora normal). Por isso, o custo será o valor máximo entre 0 e o tempo total anterior somado ao tempo de processamento do *job* menos o máximo entre o tempo total e o limite de hora normal. A Figura 14 exemplifica os casos de computação de custos para α'_t menor que $u_t + b_t^1$.

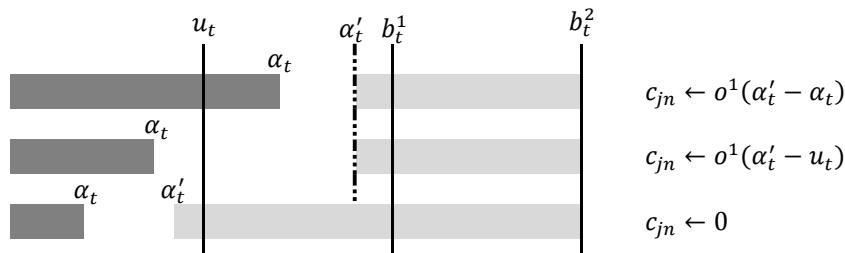


Figura 14 - Exemplo de custos com horas extras do tipo 1

Se o custo gerado c_{jn} for o menor encontrado, guarda-se a posição e o dia. Analisados todos os dias e posições, o *job* é inserido na melhor posição e na melhor sequência. Atualiza-se s'_t , pois a inserção deste *job* impacta diretamente nas próximas análises dos *jobs* do produto, e atualiza-se o custo total Δ de inserção.

Se todos os *jobs* do produto tiverem sido inseridos em alguma sequência de algum dia de 1 até t (inclusive), e se o custo total da inserção Δ for inferior ao custo total de atraso do produto (considera-se o custo do produto não ser produzido no horizonte de planejamento), atualiza-se o conjunto solução S . Se algum *job* deste produto não tiver sido inserido, não vale a pena inserir nenhum *job* do produto, pois o custo de atraso não será reduzido. Além disso, pode inviabilizar a inserção e conseqüente redução do custo de atraso de outros produtos. Em seguida, realizam-se as mesmas análises e passos para o subconjunto Π .

ALGORITMO PARA REFINAMENTO DA SOLUÇÃO

1. **Para** ($t = 2, \dots, |T|$) **faça**
 2. Seja Ω o conjunto de produtos que contém *jobs* nos grupos alocados no dia t e que não foram sequenciados;
 3. Seja $\Pi_p \subseteq \Omega$ o conjunto de produtos que tem algum *job* sequenciado;
 4. Seja $\Pi \subseteq \Omega$ o conjunto de produtos que não teve nenhum *job* sequenciado;
 5. **enquanto** ($\Pi_p \neq \emptyset$)
 6. $s'_t \leftarrow s_t$;
 7. Selecione um produto r de Π_p tal que h_r seja máximo;
 8. $\Pi_p \leftarrow \Pi_p - \{r\}$;
 9. Seja J_r^t o conjunto de *jobs* do produto r que precisam ser sequenciados;
 10. $\Delta \leftarrow 0$;
 11. **enquanto** ($J_r^t \neq \emptyset$)
 12. Selecione um *job* j de J_r^t ;
 13. $J_r^t \leftarrow J_r^t - \{j\}$;
 14. $c_j \leftarrow \infty$;
 15. **para** ($d = 1, \dots, t$) **faça**
 16. **se** ($\alpha_t + g_j \leq u_t + b_t^1 + b_t^2$) **então**
 17. **para** ($n = 1, \dots, N_t + 1$) **faça**
 18. Seja M_{jn} as ferramentas de M_j que não estão na máquina na posição n ;
 19. **se** ($M_{jn} \neq \emptyset$) **faça**
 20. $s_t'' \leftarrow s_t'$ com a inserção do *job* j na posição n ;
 21. Calcular α'_t como novo tempo total aplicando a política KTNS na sequência s_t'' ;
 22. **senão**
 23. $\alpha'_t \leftarrow \alpha_t + g_j$;
 24. **se** ($\alpha'_t \leq u_t + b_t^1 + b_t^2$) **faça**
 25. **se** ($\alpha'_t > u_t + b_t^1$) **então**
 26. $c_{jn} \leftarrow o^2(\alpha'_t - \max\{\alpha_t, (u_t + b_t^1)\}) + o^1 \max\{0, (u_t + b_t^1 - \max\{\alpha_t, u_t\})\}$;
 27. **senão**
 28. $c_{jn} \leftarrow \max\{o^1(\alpha_t + g_j - \max\{\alpha_t, u_t\}), 0\}$;
 29. **se** ($c_{jn} < c_j$) **então**
 30. $c_j \leftarrow c_{jn}$;
 31. $\bar{d} \leftarrow d$;
 32. $\bar{n} \leftarrow n$;
 33. **fim se** ($\alpha'_t \leq u_t + b_t^1 + b_t^2$)
 34. **fim para** ($n = 1, \dots, N_t + 1$)
 35. **fim se** ($\alpha_t + g_j \leq u_t + b_t^1 + b_t^2$)
 36. **fim para** ($d = 1, \dots, t$)
 37. **se** ($c_j < \infty$)
 38. $s'_d \leftarrow s'_d$ com o *job* j inserido na posição \bar{n} ;
 39. $\Delta \leftarrow \Delta + c_j$;
 40. **fim se**
 41. **fim enquanto** ($J_r^t \neq \emptyset$)
 42. **se** (todos os *jobs* de J_r^t forem inseridos e $\Delta < (|T| + 1 - t)h_r$) **então**
 43. Atualiza S efetuando as inserções calculadas para os *jobs* de J_r ;
 44. **fim enquanto** ($\Pi_p \neq \emptyset$)
 45. **enquanto** ($\Pi \neq \emptyset$)
 46. Repetir os mesmo passos e análises feitos para Π_p ;
 47. **fim enquanto** ($\Pi \neq \emptyset$)
 48. **fim para** ($t = 2, \dots, |T|$)
 49. Atualizar o custo da solução S ;
-

Algoritmo 2 - Método para refinamento da solução

Pode ser que para nem todos os produtos em atraso (ou mesmo para nenhum), tenha sido possível inserir seus *jobs* não sequenciados em posições nos dias que antecedem suas datas de entrega, ou que o custo total gerado não justifique tal inserção. No entanto, pode ser que seja possível inserir estes *jobs* em dias posteriores às suas datas de entrega. Neste caso, ainda se incorrerá em custos de atraso, porém menores do que não produzir o produto no horizonte de planejamento.

Partindo desse pressuposto, o método de refinamento para alocar os produtos ainda em atraso, se baseia no algoritmo proposto anteriormente e algumas modificações são efetuadas. Para cada *job* do produto r , a análise que era feita para a inserção nos dias d , $d = 1, \dots, t$, agora é feita de $d = t, \dots, |T|$, ou seja, da data de entrega do *job* até o último dia do horizonte de planejamento. Visando completar o produto o mais breve possível, o *job* é alocado na melhor posição do primeiro dia viável após a sua data de entrega (no método anterior eram analisados todos os dias e todas as posições e o *job* era alocado na melhor posição do melhor dia). Novamente, o produto somente é sequenciado se todos os *jobs* que o compõem puderem ser sequenciados em algum dia do horizonte de planejamento e se o custo total gerado pelo uso de horas extras e a economia entre o custo de atraso incorrido for inferior ao custo de não produzir o produto no horizonte de planejamento.

Capítulo 5

Experimentos Numéricos

Os experimentos numéricos foram realizados em instâncias com dados reais da prática da empresa que motivou o estudo deste trabalho. Essas instâncias foram obtidas a partir de 20 cenários. Cada cenário corresponde ao planejamento de uma semana (segunda-feira a sábado), que possui seis períodos ou seis dias. Para fins de análise e estudo, os cenários também foram divididos em instâncias menores variando de três a seis períodos: três dias de produção equivalem ao planejamento de segunda a quarta-feira, quatro dias equivalem ao planejamento de segunda a quinta-feira, cinco dias equivalem ao planejamento de segunda a sexta-feira e seis dias equivalem ao planejamento completo da semana, de segunda-feira a sábado.

Portanto, ao todo são 80 instâncias, já que para cada cenário são geradas 4 instâncias que contêm de 3 a 6 períodos de produção. Vale ressaltar que não os cenários são obtidos de forma independente, ou seja, não há precedência entre os mesmos e produtos não produzidos em uma semana não são transferidos obrigatoriamente para a semana seguinte.

5.1 DESCRIÇÃO DAS INSTÂNCIAS

A seguir são descritas as características das 20 semanas usadas como base para as instâncias. O *job* que requer menos ferramentas utiliza uma e o que requer mais ferramentas utiliza 7. Os produtos são compostos por no mínimo 1 *job* e por no máximo 5 *jobs*.

A Tabela 5 apresenta informações e características das semanas de programação. Para cada semana é apresentado o total de produtos considerados e o total de *jobs* que compõem esses produtos. A quarta coluna apresenta o número médio de *jobs* que compõem um produto. Em seguida são apresentadas as quantidades de produtos do Tipo A (R\$ 300,00 por dia de atraso), do Tipo B (R\$ 150,00 por dia de atraso) e do Tipo C (R\$ 50,00 por dia de atraso). A oitava coluna apresenta o número médio de ferramentas requeridas para processar um *job*, lembrando que o total de ferramentas requeridas é sempre 35. E por fim, são apresentados os tempos de processamento (TP), em minutos, mínimo e máximo entre os *jobs* e o tempo médio para processamento de cada *job*.

Tabela 5 - Características das semanas usadas como base para as instâncias

Semana	Total de Produtos	Total de Jobs	Média Jobs por Produto	Produtos Tipo A	Produtos Tipo B	Produtos Tipo C	Média Ferramentas por job	Mínimo TP de job	Máximo TP de job	Média TP dos jobs
1	16	48	3,00	5	5	6	4,40	27	109	69,29
2	12	36	3,00	5	4	3	4,20	34	104	71,56
3	17	51	3,00	6	5	6	3,96	27	111	71,56
4	21	49	2,32	6	9	6	3,80	27	108	67,40
5	14	36	2,57	1	4	9	4,36	27	111	71,30
6	17	53	3,11	5	7	5	3,57	27	111	65,25
7	14	46	3,29	6	3	5	3,96	27	109	65,07
8	15	42	2,80	4	6	5	4,00	33	111	63,86
9	15	47	3,13	8	4	3	3,66	28	111	68,89
10	12	39	3,25	1	4	7	3,46	30	111	79,05
11	15	47	3,13	6	6	3	3,46	29	111	67,62
12	14	46	3,29	4	3	7	3,91	27	111	70,78
13	16	43	2,57	4	6	6	4,84	27	106	69,79
14	12	35	2,92	7	2	3	3,97	27	109	76,94
15	10	42	4,20	3	2	5	4,14	28	107	68,02
16	19	40	2,10	7	6	6	4,48	33	111	67,00
17	12	47	3,92	1	5	6	4,02	29	110	68,23
18	16	42	2,58	8	3	5	4,33	31	108	64,67
19	16	48	3,00	6	9	1	3,81	27	111	70,42
20	12	40	3,33	4	6	2	4,13	27	108	69,23

5.2 APLICAÇÃO DO MODELO MHA

Para avaliar o comportamento do modelo MHA, as 80 instâncias foram testadas e comparadas com os resultados obtidos na prática, ou seja, no contexto industrial.

Os experimentos foram realizados utilizando um processador Intel Core i5, com 8GB de memória RAM. Para testar o modelo foi utilizado o pacote de otimização CPLEX 11 (com configurações padrão) e o tempo de processamento foi limitado a duas horas.

O modelo foi testado na forma proposta por Cunha (2012). Ao analisar o modelo, verifica-se que no caso de ser mais vantajoso em termos de custos, o modelo pode optar por não produzir um *job* dentro do horizonte de planejamento. Neste caso, serão computados os custos de atraso relacionados à diferença entre $|T| + 1$ e d_j . Por exemplo, para um período de 5 dias, um *job* cuja data de entrega é $d_j=5$ que não for alocado no horizonte de planejamento gera o equivalente a um dia de atraso, isto é, um custo de atraso de acordo com a classificação do cliente que solicitou tal pedido, considera-se que este *job* será analisado na próxima semana de produção.

Um novo teste foi realizado, para garantir que todos os *jobs* sejam produzidos dentro do horizonte de planejamento. Para tal, insere-se uma restrição que exija que todos os *jobs* sejam produzidos em algum dia do horizonte de planejamento.

$$\sum_{n \in N} \sum_{t \in T} x_{nt}^j = 1 \quad \forall j \in J; \forall n \in N; \forall t \in T \quad (5.1)$$

No entanto, o problema pode se tornar inviável se o total de horas regulares e horas extras disponíveis não forem suficientes para produzir todos os produtos. Assim, denomina-se nesse trabalho MHA alterado, o modelo composto pela função objetivo (3.1) e pelas restrições (3.2) a (3.18) e (5.1).

As Tabelas 6 a 25 apresentam os resultados obtidos na programação no contexto industrial, os resultados com a aplicação dos modelos original (MHA) e alterado e a comparação dos modelos com o resultado na prática. A primeira coluna apresenta o número de dias considerado na programação, seguido pelo número de produtos e do total de *jobs* que foram produzidos durante estes dias. As três colunas seguintes apresentam o custo com horas

extras, o custo de atraso e o custo total da solução. Em seguida, são apresentados os mesmos custos, porém dos resultados obtidos pela aplicação do modelo original. A próxima coluna apresenta a redução percentual no custo, calculada através da divisão da diferença entre o Resultado Prático (RP) e o Resultado do Modelo (RM), pelo Resultado Prático (RP) ($Redução (\%) = [(RP - RM)/RP] \times 100$). Em seguida é apresentado o valor do *gap*, uma informação fornecida pelo pacote de otimização: $GAP Ot. (\%) = [(SF - LB)/SF] \times 100$, em que *SF* é a solução final e *LB* é o *lower bound* final. As próximas cinco colunas apresentam os valores dos custos do modelo alterado, a redução percentual no custo do resultado na prática e o *gap*. O símbolo “ - ” indica que o modelo alterado não foi capaz de obter solução viável em duas horas.

Analisando os resultados de execução dos modelos em duas horas, verifica-se que o modelo original foi capaz de encontrar soluções viáveis, com grandes reduções de custos com relação à prática, em todas as instâncias. Já o modelo alterado nem sempre obtém solução viável, e quando o faz, nem sempre apresenta a redução de custo em relação à prática. Em apenas 8 das 80 instâncias as soluções viáveis obtidas pelo modelo alterado foram ligeiramente melhores que as obtidas pelo modelo original. Por outro lado, o modelo original obtém soluções viáveis significativamente melhores do que as do modelo alterado.

Os dois modelos encontraram a solução ótima para a instância com 3 dias do cenário 2 e para a instância com 3 dias do cenário 14. O modelo original encontrou solução ótima também para as instâncias com 3 e 4 dias do cenário 8 e para a instância com 3 dias do cenário 10. Então, conclui-se que mesmo com tempo computacional dispendioso estipulado, os modelos foram capazes de encontrar a solução ótima para poucas instâncias e para aquelas com pequeno número de dias considerados, em sua maioria com 3 dias e apenas uma instância com 4 dias. Os *gaps* de otimalidade para os dois modelos são elevados, aproximando, e algumas vezes alcançando, 100%.

O modelo alterado encontrou soluções piores que as obtidas no contexto industrial para a instância com 6 dias do cenário 1, para as instâncias com 4 e 6 dias do cenário 12 e para a instância com 6 dias do cenário 19. Para estas instâncias, o custo de atraso praticado no contexto industrial é relativamente alto. Os custos de horas extras praticados pelo modelo alterado são inferiores aos praticados na prática. Como o modelo alterado tenta inserir todos os *jobs* no horizonte de planejamento, consequentemente os *jobs* que têm data de entrega no

último dia do planejamento não poderão ser atrasados, ou seja, eles deverão ser sequenciados no próprio dia de entrega ou a produção deles deverá ser antecipada. Essa antecipação pode levar ao atraso de outros produtos dos dias anteriores, o que pode justificar o custo mais alto.

Os resultados do Cenário 5 ressaltam a importância de equiparar os custos de atraso com os custos de horas extras. Apesar dos custos de atraso terem aumentado para a maioria das instâncias, os custos totais reduziram em até 68,10% (modelo original) e 71,52% (modelo alterado). Os resultados do cenário 11 também corroboram com esta afirmação.

Os resultados obtidos pelo modelo alterado para o cenário 7 ressaltam a importância de utilizar métodos eficientes para reduzir os tempos das atividades de *setup*. Os custos de atraso apresentados para todas as instâncias foram iguais ao praticado no contexto industrial, porém os custos com horas extras são reduzidos em média 50%. Os resultados do cenário 16 também reforçam esta constatação.

Por fim, os resultados ressaltam a importância de utilizar um método eficiente para reduzir as atividades de *setup*, bem como sequenciar os *jobs* no horizonte do planejamento, sempre levando em consideração a relação entre realizar horas extras ou pagar o custo de atraso, já que reduções expressivas de custos são possíveis de serem obtidas. Vale ressaltar que no contexto industrial, diversos produtos não são produzidos no horizonte de planejamento para a maioria dos cenários estudados, principalmente porque os tempos destinados a atividades de *setup* são dispendiosos, geram um tempo total de produção elevado e conseqüentemente aumentam os custos de horas extras e os custos de atrasos dos produtos. O modelo original foi superior ao modelo alterado, porque encontrou as melhores soluções para a grande maioria das instâncias. A possibilidade de não produzir o *job* no horizonte de planejamento faz com que seja mais fácil obter soluções viáveis, e isso melhora o desempenho do pacote de otimização.

Tabela 6 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 1

CENÁRIO 1															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	27	373,70	450,00	823,70	143,60	100,00	243,60	70,43%	20,46%	374,40	50,00	424,40	48,48%	46,68%
4	13	39	516,00	1050,00	1566,00	317,95	150,00	467,95	70,12%	43,17%	-	-	-	-	-
5	15	45	606,50	1250,00	1856,50	384,40	150,00	534,40	71,21%	44,91%	631,70	900,00	1531,70	17,50%	77,37%
6	16	48	771,00	1250,00	2021,00	436,70	200,00	636,70	68,50%	48,45%	703,10	2850,00	3553,10	-75,81%	90,87%

- Modelo não encontrou solução no tempo de processamento estabelecido

Resultado pior que o valor praticado no contexto industrial

Tabela 7 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 2

CENÁRIO 2															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	6	18	269,20	0,00	269,20	0,00	0,00	0,00	100,00%	0,00%	0,00	0,00	0,00	100,00%	0,00%
4	8	26	319,80	0,00	319,80	1,65	0,00	1,65	99,48%	100,00%	6,60	0,00	6,60	97,94%	100,00%
5	11	34	480,30	0,00	480,30	21,45	50,00	71,45	85,12%	100,00%	78,65	0,00	78,65	83,62%	100,00%
6	12	36	444,60	0,00	444,60	74,80	0,00	74,80	83,18%	100,00%	84,70	0,00	84,70	80,95%	100,00%

Tabela 8 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 3

CENÁRIO 3															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	27	342,20	150,00	492,20	217,85	150,00	367,85	25,26%	73,93%	209,00	150,00	359,00	27,06%	74,29%
4	12	26	497,10	200,00	697,10	217,10	50,00	267,10	61,68%	45,95%	393,50	150,00	543,50	22,03%	59,27%
5	14	44	539,30	200,00	739,30	201,05	250,00	451,05	38,99%	62,83%	447,80	150,00	597,80	19,14%	68,54%
6	17	51	752,80	200,00	952,80	230,60	350,00	580,60	39,06%	61,36%	647,10	150,00	797,10	16,34%	58,54%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 9 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 4

CENÁRIO 4															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	12	29	428,30	600,00	1028,30	231,60	100,00	331,60	67,75%	36,68%	340,35	0,00	340,35	66,90%	37,60%
4	16	36	506,90	600,00	1106,90	349,20	0,00	349,20	68,45%	40,86%	363,90	0,00	363,90	67,12%	41,43%
5	18	43	576,95	600,00	1176,95	361,50	0,00	361,50	69,29%	44,52%	373,40	50,00	423,40	64,03%	51,39%
6	21	49	815,10	600,00	1415,10	372,35	50,00	422,35	70,15%	40,62%	595,80	100,00	695,80	50,83%	58,10%

Tabela 10 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 5

CENÁRIO 5															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	6	18	227,90	50,00	277,90	9,35	100,00	109,35	60,65%	8,55%	2,20	100,00	102,20	63,22%	2,15%
4	8	36	287,65	50,00	337,65	7,70	100,00	107,70	68,10%	7,15%	14,30	100,00	114,30	66,15%	12,51%
5	12	33	438,30	50,00	488,30	51,15	100,00	151,15	69,05%	33,84%	39,05	100,00	139,05	71,52%	28,08%
6	14	36	407,55	50,00	457,55	91,30	100,00	191,30	58,19%	58,24%	186,00	0,00	186,00	59,35%	61,27%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 11 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 6

CENÁRIO 6															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	8	24	267,10	50,00	317,10	89,10	0,00	89,10	71,90%	43,88%	89,10	0,00	89,10	71,90%	43,88%
4	11	36	459,30	0,00	459,30	275,70	0,00	275,70	39,97%	51,18%	279,00	0,00	279,00	39,26%	53,61%
5	15	48	639,40	200,00	839,40	281,55	50,00	331,55	60,50%	49,42%	556,80	0,00	556,80	33,67%	44,32%
6	17	53	768,90	150,00	918,90	334,50	100,00	434,50	52,72%	48,58%	-	-	-	-	-

- Modelo não encontrou solução no tempo de processamento estabelecido

Tabela 12 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 7

CENÁRIO 7															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	8	24	248,40	0,00	248,40	0,00	100,00	100,00	59,74%	100,00%	112,20	0,00	112,20	54,83%	100,00%
4	10	31	349,20	0,00	349,20	149,60	0,00	149,60	57,16%	100,00%	143,00	0,00	143,00	59,05%	100,00%
5	12	41	519,50	0,00	519,50	150,35	50,00	200,35	61,43%	80,18%	265,20	0,00	265,20	48,95%	78,49%
6	14	46	572,90	0,00	572,90	154,55	100,00	254,55	55,57%	72,36%	353,00	0,00	353,00	38,38%	75,46%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 13 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 8

CENÁRIO 8															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	8	20	274,80	0,00	274,80	46,20	0,00	46,20	83,19%	0,00%	46,20	0,00	46,20	83,19%	0,71%
4	11	28	386,30	0,00	386,30	46,20	0,00	46,20	88,04%	0,00%	46,20	0,00	46,20	88,04%	1,79%
5	13	36	487,30	0,00	487,30	63,25	0,00	63,25	87,02%	34,78%	69,30	0,00	69,30	85,78%	43,59%
6	15	42	500,10	0,00	500,10	90,75	50,00	140,75	71,86%	77,53%	162,45	0,00	162,45	67,52%	77,83%

Tabela 14 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 9

CENÁRIO 9															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	26	337,30	500,00	837,30	114,40	400,00	514,40	38,56%	22,14%	309,95	300,00	609,95	27,15%	29,78%
4	12	36	432,70	650,00	1082,70	258,15	450,00	708,15	34,59%	26,50%	462,10	300,00	762,10	29,61%	31,68%
5	14	43	588,30	950,00	1538,30	453,70	300,00	753,70	51,00%	31,27%	466,30	350,00	816,30	46,93%	35,92%
6	15	47	643,00	950,00	1593,00	512,20	300,00	812,20	49,01%	35,21%	543,40	600,00	1143,40	28,22%	53,49%

Tabela 15 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 10

CENÁRIO 10															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	6	21	281,80	50,00	331,80	0,00	150,00	150,00	54,79%	0,00%	169,60	0,00	169,60	48,88%	15,59%
4	9	29	379,45	50,00	429,45	2,75	200,00	202,75	52,79%	37,56%	220,75	0,00	220,75	48,60%	43,57%
5	11	36	539,15	50,00	589,15	231,40	50,00	281,40	52,24%	46,21%	331,25	0,00	331,25	43,77%	43,07%
6	12	39	618,40	50,00	668,40	244,60	100,00	344,60	48,44%	48,29%	340,70	0,00	340,70	49,03%	50,85%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 16 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 11

CENÁRIO 11															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	8	24	265,00	0,00	265,00	26,40	0,00	26,40	90,04%	100,00%	31,35	0,00	31,35	88,17%	100,00%
4	12	35	438,05	0,00	438,05	74,80	150,00	224,8	48,68%	53,49%	235,10	0,00	235,1	46,33%	57,82%
5	14	42	608,40	0,00	608,40	245,90	50,00	295,90	51,36%	51,66%	382,05	0,00	382,05	37,20%	64,30%
6	15	47	715,00	0,00	715,00	315,80	100,00	415,80	41,85%	55,87%	523,20	0,00	523,20	26,83%	66,85%

Tabela 17 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 12

CENÁRIO 12															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	29	349,20	700,00	1049,20	88,55	200,00	288,55	72,50%	33,49%	419,90	50,00	469,90	55,21%	43,24%
4	11	36	436,20	850,00	1286,20	227,75	150,00	377,75	70,63%	37,31%	508,30	1200,00	1708,30	-32,82%	84,05%
5	13	41	529,50	1150,00	1679,50	200,25	250,00	450,25	73,19%	45,22%	373,10	300,00	673,10	59,92%	63,94%
6	14	46	705,90	1150,00	1855,90	531,45	100,00	631,45	65,98%	53,88%	584,80	1950,00	2534,8	-36,58%	88,68%

Resultado pior que o valor praticado no contexto industrial

Tabela 18 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 13

CENÁRIO 13															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	24	276,75	200,00	476,75	148,95	50,00	198,95	58,27%	47,16%	157,35	50,00	207,35	56,51%	51,77%
4	12	31	319,80	200,00	519,80	184,65	50,00	234,65	54,86%	56,66%	206,70	50,00	256,70	50,62%	72,37%
5	13	35	457,90	200,00	657,90	168,90	50,00	218,90	66,73%	53,90%	168,30	100,00	268,30	59,22%	68,06%
6	16	43	607,90	200,00	807,90	253,40	100,00	353,4	56,26%	67,17%	450,90	0,00	450,90	44,19%	76,07%

Tabela 19 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 14

CENÁRIO 14															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	7	17	232,80	0,00	232,80	0,00	0,00	0,00	100,00%	0,00%	0,00	0,00	0,00	100,00%	0,00%
4	9	27	388,40	0,00	388,40	9,35	50,00	59,35	84,72%	39,52%	156,60	0,00	156,60	59,68%	80,05%
5	10	32	471,20	0,00	471,20	20,90	100,00	120,90	74,34%	76,79%	102,85	50,00	152,85	67,56%	78,57%
6	12	35	516,70	0,00	516,70	156,75	0,00	156,75	69,66%	80,94%	165,00	0,00	165,00	68,07%	84,25%

Tabela 20 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 15

CENÁRIO 15															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	6	27	324,70	300,00	624,70	74,80	50,00	124,80	80,02%	21,79%	294,60	0,00	294,60	52,84%	49,97%
4	7	31	338,50	300,00	638,50	81,55	100,00	181,55	71,57%	56,56%	168,25	50,00	218,25	65,82%	74,34%
5	9	37	460,00	300,00	760,00	169,00	50,00	219,00	71,18%	68,79%	166,15	50,00	216,15	71,56%	71,31%
6	10	42	550,50	300,00	850,50	162,95	100,00	262,95	69,08%	78,14%	273,15	50,00	323,15	62,00%	77,65%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 21 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 16

CENÁRIO 16															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	10	23	233,50	0,00	233,50	62,70	0,00	62,70	73,15%	100,00%	67,65	0,00	67,65	71,03%	100,00%
4	13	28	368,10	0,00	368,10	62,70	0,00	62,70	82,97%	100,00%	75,90	0,00	75,90	79,38%	100,00%
5	16	35	443,90	0,00	443,90	72,60	0,00	72,60	83,64%	100,00%	77,55	0,00	77,55	82,53%	100,00%
6	19	40	494,50	0,00	494,50	173,25	0,00	173,25	64,96%	100,00%	166,30	0,00	166,30	66,37%	100,00%

Solução do modelo alterado melhor que a do modelo original

Tabela 22 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 17

CENÁRIO 17															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	7	24	284,10	500,00	784,10	164,75	100,00	264,75	66,24%	30,43%	218,10	50,00	268,10	65,81%	43,83%
4	9	34	410,10	550,00	960,10	228,60	100,00	328,60	65,77%	46,10%	328,35	50,00	378,35	60,59%	56,72%
5	11	43	525,30	600,00	1125,30	241,05	150,00	391,05	65,25%	51,55%	452,70	150,00	602,70	46,44%	64,18%
6	12	47	695,90	600,00	1295,90	311,85	150,00	461,85	64,36%	53,12%	509,85	200,00	709,85	45,22%	67,84%

Tabela 23 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 18

CENÁRIO 18															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	24	253,15	300,00	553,15	0,00	100,00	100,00	81,92%	29,02%	109,45	50,00	159,45	71,17%	66,93%
4	11	28	305,80	300,00	605,80	29,15	100,00	129,15	78,68%	49,74%	39,05	100,00	139,05	77,05%	62,67%
5	15	38	421,50	300,00	721,50	37,40	150,00	187,40	74,03%	70,84%	156,95	50,00	206,95	71,32%	75,84%
6	16	42	515,05	300,00	815,05	210,80	0,00	210,80	74,14%	76,28%	218,65	0,00	218,65	73,17%	77,13%

Tabela 24 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 19

CENÁRIO 19															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Modelo Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	9	30	353,40	750,00	1103,40	276,05	50,00	326,05	70,45%	21,08%	-	-	-	-	-
4	11	36	511,80	1050,00	1561,80	289,70	100,00	389,70	75,05%	28,02%	516,00	50,00	566,00	63,76%	37,80%
5	14	43	612,80	1350,00	1962,80	282,20	150,00	432,20	77,98%	24,45%	-	-	-	-	-
6	16	48	775,90	1350,00	2125,90	313,50	200,00	513,5	75,85%	29,21%	661,10	2100,00	2761,1	-29,88%	86,57%

- Modelo não encontrou solução no tempo de processamento estabelecido

Resultado pior que o valor praticado no contexto industrial

Tabela 25 - Resultado da Programação no Contexto Industrial e com aplicação do modelo MHA na forma original e alterado - Comparativo do Cenário 20

CENÁRIO 20															
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Modelo Original					Resultado Alterado				
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	GAP Ot.
3	8	22	252,40	0,00	252,40	102,85	0,00	102,85	59,25%	55,09%	109,45	0,00	109,45	56,64%	66,58%
4	10	31	378,60	0,00	378,60	125,95	0,00	125,95	66,73%	78,77%	130,75	0,00	130,75	65,46%	82,99%
5	11	35	462,80	0,00	462,80	124,30	0,00	124,30	73,14%	76,66%	127,60	0,00	127,60	72,43%	83,49%
6	12	40	478,20	0,00	478,20	163,35	0,00	163,35	65,84%	94,79%	183,30	0,00	183,30	61,67%	90,84%

5.3 APLICAÇÃO DO MÉTODO HEURÍSTICO

Para avaliar o comportamento do método heurístico desenvolvido neste trabalho, as 80 instâncias foram testadas e comparadas com os resultados do contexto industrial e com o modelo MHA. Em cada instância foi aplicado o método de particionamento de *jobs*, seguido pela heurística de agrupamento de *jobs*, pelo modelo reduzido de sequenciamento de grupos e por fim, pelos métodos de refinamento da solução. O refinamento foi testado de duas maneiras: na primeira aplicou-se o método com o objetivo de antecipar a produção de produtos em atraso e depois alocar os produtos ainda em atraso em períodos posteriores. Na segunda maneira, aplicou-se os métodos na ordem inversa.

Os experimentos foram realizados utilizando um processador Intel Core i5, com 8GB de memória RAM. Para testar o método heurístico foi utilizada linguagem de programação C++ e para o modelo reduzido foi utilizado o pacote de otimização CPLEX 11 (com configurações padrão).

As Tabelas 26 a 45 apresentam os resultados obtidos na programação no contexto industrial e os melhores resultados obtidos pela aplicação do método heurístico. As três primeiras colunas apresentam informações sobre a instância: número de dias considerado na programação, número de produtos e do total de *jobs* que compõem os produtos. As três colunas seguintes apresentam o custo com horas extras, o custo de atraso e o custo total da solução do contexto industrial. Em seguida, são apresentados os mesmos custos, porém dos resultados obtidos pela aplicação do método heurístico. A próxima coluna apresenta a redução percentual no custo, calculada através da divisão da diferença entre o Resultado Prático (RP) e o Resultado do Método Heurístico (RH), pelo Resultado Prático (RP) ($Redução (\%) = [(RP - RH)/RP] \times 100$). A antepenúltima coluna indica o tipo de refinamento que obteve o melhor resultado: (1) para o refinamento adianta-posterga atraso; (2) para o refinamento posterga-adianta atraso; (*) indica que a melhor solução foi encontrada pelo modelo de sequenciamento, isto é, o refinamento não surtiu efeito. Em seguida é apresentado o tempo total de processamento (TP), em segundos, que foi necessário para o método heurístico encontrar a solução. A última coluna apresenta o valor do *gap*, uma comparação com o resultado obtido pelo modelo MHA, que é calculado através da divisão da diferença entre o

Resultado Método Heurístico (RH) e o Resultado do Modelo MHA: $(GAP\%) = [(RH - MHA)/RH] \times 100$.

Tabela 26 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 1

CENÁRIO 1												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	27	373,70	450,00	823,70	236,30	50,00	286,30	65,24%	*	4	14,91%
4	13	39	516,00	1050,00	1566,00	454,40	100,00	554,40	64,60%	1,2	9	15,59%
5	15	45	606,50	1250,00	1856,50	454,40	150,00	604,40	67,44%	1	7	11,58%
6	16	48	771,00	1250,00	2021,00	464,90	200,00	664,90	67,10%	1	8	4,24%

Tabela 27 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 2

CENÁRIO 2												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	6	18	269,20	0,00	269,20	0,00	0,00	0,00	100,00%	*	0	0,00%
4	8	26	319,80	0,00	319,80	41,80	0,00	41,80	86,93%	*	0	96,05%
5	11	34	480,30	0,00	480,30	41,80	50,00	91,80	80,89%	*	7	22,17%
6	12	36	444,60	0,00	444,60	105,05	0,00	105,05	76,37%	1	6	28,80%

Tabela 28 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 3

CENÁRIO 3												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	27	342,20	150,00	492,20	212,50	150,00	362,50	26,35%	1,2	5	-1,48%
4	12	26	497,10	200,00	697,10	212,50	200,00	412,50	40,83%	1,2	27	35,25%
5	14	44	539,30	200,00	739,30	214,15	250,00	464,15	37,22%	1,2	15	2,82%
6	17	51	752,80	200,00	952,80	251,45	350,00	601,45	36,88%	2	27	3,47%

Tabela 29 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 4

CENÁRIO 4												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	12	29	428,30	600,00	1028,30	342,90	0,00	342,90	66,65%	2	7	3,30%
4	16	36	506,90	600,00	1106,90	342,90	0,00	342,90	69,02%	2	7	-1,84%
5	18	43	576,95	600,00	1176,95	352,80	0,00	352,80	70,02%	2	9	-2,47%
6	21	49	815,10	600,00	1415,10	368,90	50,00	418,90	70,40%	2	14	-0,82%

Tabela 30 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 5

CENÁRIO 5												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	6	18	227,90	50,00	277,90	172,25	0,00	172,25	38,02%	1,2	2	36,52%
4	8	36	287,65	50,00	337,65	172,25	0,00	172,25	48,99%	1,2	3	37,47%
5	12	33	438,30	50,00	488,30	217,35	0,00	217,35	55,49%	1,2	3	30,46%
6	14	36	407,55	50,00	457,55	253,75	0,00	253,75	44,54%	1,2	3	24,61%

Tabela 31 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 6

CENÁRIO 6												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	8	24	267,10	50,00	317,10	174,00	0,00	174,00	45,13%	*	3	48,79%
4	11	36	459,30	0,00	459,30	286,05	0,00	286,05	37,72%	1	13	3,62%
5	15	48	639,40	200,00	839,40	367,45	150,00	517,45	38,35%	1	19	35,93%
6	17	53	768,90	150,00	918,90	661,10	0,00	661,10	28,06%	2	18	34,28%

Tabela 32 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 7

CENÁRIO 7												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	8	24	248,40	0,00	248,40	127,80	0,00	127,80	48,55%	1,2	5	21,75%
4	10	31	349,20	0,00	349,20	161,90	0,00	161,90	53,64%	1	5	7,60%
5	12	41	519,50	0,00	519,50	202,60	50,00	252,60	51,38%	1	8	20,68%
6	14	46	572,90	0,00	572,90	339,80	0,00	339,80	40,69%	1	7	25,09%

Tabela 33 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 8

CENÁRIO 8												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	8	20	274,80	0,00	274,80	61,60	0,00	61,60	77,58%	*	2	25,00%
4	11	28	386,30	0,00	386,30	119,35	0,00	119,35	69,10%	*	3	61,29%
5	13	36	487,30	0,00	487,30	168,30	0,00	168,30	65,46%	*	4	62,42%
6	15	42	500,10	0,00	500,10	171,60	0,00	171,60	65,69%	*	15	17,98%

Tabela 34 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 9

CENÁRIO 9												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	26	337,30	500,00	837,30	312,80	300,00	612,80	26,81%	1,2	39	16,06%
4	12	36	432,70	650,00	1082,70	312,80	450,00	762,80	29,55%	2	49	7,16%
5	14	43	588,30	950,00	1538,30	435,75	300,00	735,75	52,17%	2	50	-2,44%
6	15	47	643,00	950,00	1593,00	503,65	300,00	803,65	49,55%	2	50	-1,06%

Tabela 35 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 10

CENÁRIO 10												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	6	21	281,80	50,00	331,80	179,50	0,00	179,50	45,90%	2	3	16,43%
4	9	29	379,45	50,00	429,45	268,60	0,00	268,60	37,45%	2	3	24,52%
5	11	36	539,15	50,00	589,15	268,60	50,00	318,60	45,92%	2	8	11,68%
6	12	39	618,40	50,00	668,40	344,75	0,00	344,75	48,42%	2	7	0,04%

Tabela 36 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 11

CENÁRIO 11												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	8	24	265,00	0,00	265,00	61,60	0,00	61,60	76,75%	1,2	13	57,14%
4	12	35	438,05	0,00	438,05	260,75	0,00	260,75	40,47%	1	21	13,79%
5	14	42	608,40	0,00	608,40	350,55	0,00	350,55	42,38%	1	22	15,59%
6	15	47	715,00	0,00	715,00	470,95	0,00	470,95	34,13%	1	23	11,71%

Tabela 37 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 12

CENÁRIO 12												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	29	349,20	700,00	1049,20	181,30	150,00	331,30	68,42%	1,2	24	12,90%
4	11	36	436,20	850,00	1286,20	284,15	150,00	434,15	66,25%	1	19	12,99%
5	13	41	529,50	1150,00	1679,50	284,15	200,00	484,15	71,17%	1	18	7,00%
6	14	46	705,90	1150,00	1855,90	356,45	250,00	606,45	67,32%	1	34	-4,12%

Tabela 38 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 13

CENÁRIO 13												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	24	276,75	200,00	476,75	189,00	50,00	239,00	49,87%	2	12	16,76%
4	12	31	319,80	200,00	519,80	203,85	50,00	253,85	51,16%	2	9	7,56%
5	13	35	457,90	200,00	657,90	203,85	50,00	253,85	61,42%	2	8	13,77%
6	16	43	607,90	200,00	807,90	351,15	100,00	451,15	44,16%	2	16	21,67%

Tabela 39 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 14

CENÁRIO 14												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	7	17	232,80	0,00	232,80	42,90	0,00	42,90	81,57%	1,2	1	100,00%
4	9	27	388,40	0,00	388,40	66,00	50,00	116,00	70,13%	1	8	48,84%
5	10	32	471,20	0,00	471,20	66,00	100,00	166,00	64,77%	1	8	27,17%
6	12	35	516,70	0,00	516,70	177,45	0,00	177,45	65,66%	1	6	11,67%

Tabela 40 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 15

CENÁRIO 15												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	6	27	324,70	300,00	624,70	141,90	50,00	191,90	69,28%	*	4	34,97%
4	7	31	338,50	300,00	638,50	141,90	100,00	241,90	62,11%	*	6	24,95%
5	9	37	460,00	300,00	760,00	217,15	50,00	267,15	64,85%	1,2	7	18,02%
6	10	42	550,50	300,00	850,50	285,60	0,00	285,6	66,42%	1	12	7,93%

Tabela 41 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 16

CENÁRIO 16												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	10	23	233,50	0,00	233,50	128,70	0,00	128,70	44,88%	*	8	51,28%
4	13	28	368,10	0,00	368,10	128,70	0,00	128,70	65,04%	*	7	51,28%
5	16	35	443,90	0,00	443,90	156,75	0,00	156,75	64,69%	*	8	53,68%
6	19	40	494,50	0,00	494,50	310,75	0,00	310,75	37,16%	*	10	44,25%

Tabela 42 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 17

CENÁRIO 17												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	7	24	284,10	500,00	784,10	222,30	50,00	272,30	65,27%	1,2	6	2,77%
4	9	34	410,10	550,00	960,10	222,30	100,00	322,30	66,43%	1,2	23	-1,95%
5	11	43	525,30	600,00	1125,30	308,10	100,00	408,10	63,73%	2	30	4,18%
6	12	47	695,90	600,00	1295,90	364,80	150,00	514,8	60,27%	2	32	10,29%

Tabela 43 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 18

CENÁRIO 18												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	24	253,15	300,00	553,15	0,00	100,00	100,00	81,92%	*	7	0,00%
4	11	28	305,80	300,00	605,80	0,00	150,00	150,00	75,24%	*	7	13,90%
5	15	38	421,50	300,00	721,50	205,70	0,00	205,70	71,49%	1,2	14	8,90%
6	16	42	515,05	300,00	815,05	205,70	0,00	205,70	74,76%	1	13	-2,48%

Tabela 44 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 19

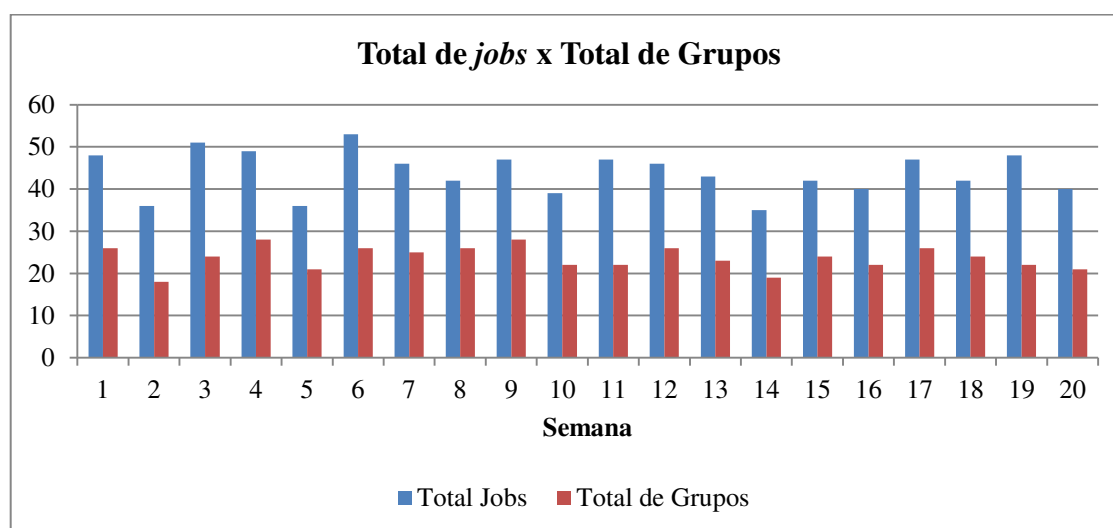
CENÁRIO 19												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	9	30	353,40	750,00	1103,40	198,50	250,00	398,50	63,88%	*	13	18,18%
4	11	36	511,80	1050,00	1561,80	338,40	250,00	588,40	62,33%	1	14	33,77%
5	14	43	612,80	1350,00	1962,80	351,60	300,00	651,60	66,80%	2	13	33,67%
6	16	48	775,90	1350,00	2125,90	441,20	350,00	791,2	62,78%	2	14	35,10%

Tabela 45 - Resultado da Heurística e comparação com Contexto Industrial - Comparativo do Cenário 20

CENÁRIO 20												
Dias	Produtos	Jobs	Resultado Prática			Resultado Heurística						
			Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Custos Horas Extras	Custos Atrasos	Custo Total	Redução	Ref.	TP(s)	GAP
3	8	22	252,40	0,00	252,40	165,90	0,00	165,9	34,27%	*	5	38,00%
4	10	31	378,60	0,00	378,60	185,70	0,00	185,70	50,95%	*	5	32,18%
5	11	35	462,80	0,00	462,80	185,70	0,00	185,70	59,87%	*	6	33,06%
6	12	40	478,20	0,00	478,20	332,70	0,00	332,7	30,43%	*	5	50,90%

Analisando os resultados, verifica-se que o método heurístico foi capaz de encontrar soluções viáveis, com grandes reduções de custos em relação ao contexto industrial, para todas as instâncias. As reduções dos resultados da prática variaram de 26,35% a 100%. A redução média foi de 57,38%.

Com relação ao tempo computacional necessário para encontrar a solução pelo método heurístico, o tempo mínimo foi inferior a 1 segundo para as instâncias de 3 e 4 dias do Cenário 2, e o tempo máximo foi de 50 segundos (instâncias com 5 e 6 dias do Cenário 9). O tempo médio de processamento foi de 13 segundos. Comparando com o tempo de duas horas utilizado pelo modelo MHA, pode-se dizer que o tempo do método heurístico é desprezível.

**Figura 15** - Comparação entre o total de jobs e o total de grupos gerados pela heurística de agrupamento para as 20 semanas

A Figura 15 apresenta o total de grupos gerados para cada semana (considerando a instância de 6 dias) diante do total de jobs. Observa-se que o número total de grupos é

praticamente a metade do número total de *jobs*. Ou seja, a heurística de agrupamento é capaz de reduzir consideravelmente o tamanho do problema e torná-lo mais fácil de ser resolvido, do ponto de vista computacional.

A heurística de agrupamento também buscava reduzir as atividades de *setup* e este objetivo foi claramente alcançado. A Figura 16, faz referência à Figura 4 (Seção 3.1), e apresenta para as mesmas instâncias, o número de *setups* do contexto industrial, do modelo MHA e do método heurístico. Essa comparação é viabilizada pelo fato de que, no contexto industrial, alguns produtos também deixam de ser produzidos no horizonte de planejamento, devido ao elevado tempo dispensado para as atividades de *setup* que aumentam significativamente o tempo total de produção. Observa-se que para todas as 10 semanas, o número de *setups* foi reduzido consideravelmente pelo método heurístico e pelo modelo MHA. Vale ressaltar que para 5 semanas, o método heurístico foi superior ao modelo MHA, houve empate em 4 semanas e o MHA foi superior em apenas uma.

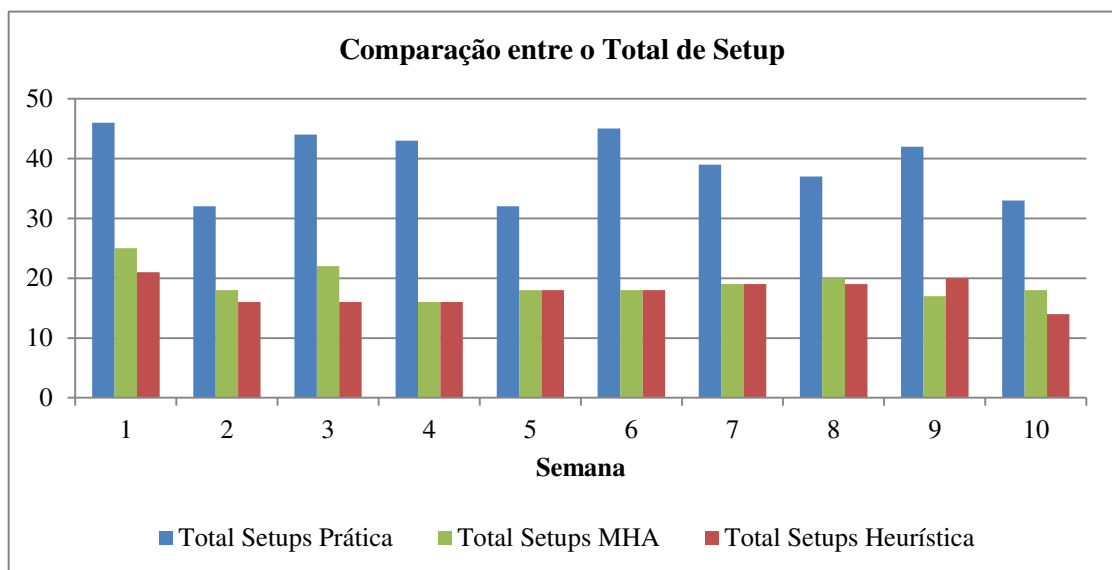


Figura 16 - Comparação entre o número total de *setups* do resultado do Contexto Industrial, do Método Heurístico e do Modelo MHA

A comparação entre os resultados do método heurístico com aqueles obtidos pelo modelo MHA, dada pelo valor do *GAP*, ressalta que o método heurístico foi capaz de encontrar soluções melhores que o MHA para 9 instâncias, enquanto que para 2 o resultado foi o mesmo ou muito próximo. A melhoria máxima alcançada foi de 4,12% e a mínima foi de 0,82%. Embora essas melhorias possam parecer pequenas, é preciso lembrar que os ganhos

em relação ao resultado da prática já são significativos. Quanto às demais instâncias, para 14 delas, o *gap* foi inferior a 9%; para 20, o *gap* foi de até 19%; para 11, o *gap* foi de até a 29%; para 15, o *gap* foi de até 49%; para 7 instâncias o *gap* foi de até 63%; e para apenas 2 instâncias o *gap* se aproximou e atingiu 100%. Para as instâncias cujos *gaps* são os mais elevados, ou a solução do modelo apresentou custo zero ou um valor próximo de zero.

Analisando o efeito do método de refinamento, representado pela coluna Ref., observa-se que para 17 instâncias os dois modos de aplicação obtiveram os mesmos resultados. Nestes casos apenas um dos refinamentos teve efeito, isto é, ou somente foi possível adiantar os produtos atrasados ou somente foi possível postergar os atrasos. Para 20 instâncias o método de adianta-posterga foi superior e para 21 instâncias o método posterga-adianta foi superior. Como a análise de refinamento é feita dos primeiros dias para os seguintes, o adiantamento de um produto de custo mais baixo pode inviabilizar o adiantamento de um produto de custo mais alto do dia seguinte. Do mesmo modo, o atraso de um produto mais barato de um dia pode viabilizar o adiantamento de um produto mais caro do dia seguinte. Este fato pode justificar o comportamento inconstante das duas formas de refinamento e sugere o uso de um método combinado ou avaliações diferentes para definir a ordem de análise dos produtos em atraso.

Vale ressaltar que para 22 instâncias, o método de refinamento não obteve efeito. Isso mostra que o método heurístico sem o refinamento já é capaz de obter boas soluções. Por outro lado, o uso de um método para reduzir os custos com horas extras poderia obter ganhos ainda maiores, visto que para a maioria dessas instâncias, o custo de atraso é nulo ou relativamente baixo. É importante observar também que os *gaps* mais significativos foram apresentados para estas instâncias.

Por fim, pode-se concluir que a ideia da heurística desde o particionamento de *jobs* até o refinamento da solução alcançou os objetivos pretendidos, pois foi capaz de gerar reduções significativas com relação à prática e em tempo computacional reduzido. Além das reduções expressivas nos custos do contexto industrial, também foram obtidas algumas melhorias dos resultados do modelo MHA. O tempo computacional necessário para alcançar os resultados são ínfimos quando comparados aos do MHA e demonstram a eficiência e aplicabilidade do método heurístico proposto.

Capítulo 6

Conclusão e Considerações Finais

No presente trabalho, heurísticas foram propostas para realizar a programação da produção em um sistema de manufatura flexível, que envolve características do contexto fabril como jornadas de trabalho, custos relacionados a horas extras e a atrasos na entrega de produtos. O problema de sequenciamento de *jobs* e de trocas de ferramentas também é abordado para a resolução do problema. Os testes computacionais foram realizados em instâncias reais e os resultados são também comparados com aqueles obtidos por um modelo de programação inteira.

O método heurístico proposto consiste em uma fase de particionamento dos *jobs* em conjuntos, de acordo com as datas de entrega visando o cumprimento dos prazos de entrega. Em seguida, uma heurística de agrupamento que utiliza conceitos de tecnologia de grupos é utilizada com o intuito de encontrar grupos de *jobs* que podem ser produzidos pelo mesmo conjunto de ferramentas e que tem atributos em comum, como o produto ao qual o *job* pertence. Nessa fase, o tamanho do problema é reduzido consideravelmente. Como o modelo de programação inteira tem dificuldade para encontrar soluções viáveis devido ao elevado número de variáveis e restrições e, quando encontra tal solução, não consegue provar a otimalidade, apresentando *gap* próximo ou igual a 100%, essa redução do tamanho do problema obtida pelo método de agrupamento representa ganhos significativos na busca por soluções de qualidade e em termos de tempo computacional.

Prosseguindo, o modelo de programação inteira é reduzido e aplicado para definir a sequência de processamento dos grupos e para definir quais grupos não devem ser produzidos em cada período de produção. É possível observar que esse método tende a não sequenciar grupos que tem elevado tempo de processamento, porém ele prioriza o sequenciamento de grupos com *jobs* de produtos diversos, atendendo ao preceito de que como o custo de atraso é computado por produto e não por *job*, o atraso desses grupos será mais custoso.

Então, um método de refinamento é aplicado para tentar alocar os *jobs* dos grupos que não foram sequenciados, antecipando ou postergando a produção destes *jobs*, com o intuito de concluir a produção e, se vantajoso em termos de custos, trocar custos de atrasos por custos de

horas extras. Ganhos significativos são obtidos para diversas instâncias. Porém o uso de um método para reduzir os custos com horas extras, que buscasse, por exemplo, antecipar atividades de *setup* e/ou produção de *jobs* poderia obter ganhos ainda maiores.

Os resultados obtidos pelo método heurístico demonstram a eficiência dos métodos propostos, uma vez que foram encontradas reduções significativas de custos em relação à prática do chão de fábrica, em tempos computacionais reduzidos. Algumas reduções de custos nos resultados também foram obtidas quando comparados aos do modelo de programação inteira em um tempo computacional desprezível, em termos de segundos, quando comparado ao do modelo, em termos de horas.

Embora o modelo de programação inteira tenha encontrado resultados melhores que o método heurístico para algumas instâncias, considerações relevantes podem ser feitas em relação ao tempo computacional. Como a programação é feita para o curto prazo, pode ser que a empresa tenha tempo suficiente para executar o modelo ao final de cada semana e programar a semana seguinte, porém o tempo computacional utilizado pelo método heurístico é ínfimo e pode ter grande impacto, por exemplo, em um momento que a empresa tenha que realizar algum ajuste diário, pois na prática existe a possibilidade da quebra de uma ferramenta, da falta de uma matéria-prima, dentre outros. Neste momento, seria necessário rodar novamente o modelo para executar apenas os produtos cujas ferramentas e materiais necessários estejam disponíveis, e esse longo período levaria à parada da produção e consequente aumento do tempo total de produção, horas extras e atrasos de produtos.

Por fim, o objetivo do trabalho foi alcançado. A complexidade do problema e a eficiência dos métodos heurísticos evidenciam o potencial da pesquisa e a sua aplicabilidade no contexto industrial, pois vislumbram ganhos e aumento de produtividade para a empresa. Embora o problema seja bastante específico, adaptações a problemas semelhantes podem ser realizadas.

Para a continuidade dos estudos sugere-se o desenvolvimento de um método para refinamento de horas extras, que permita a obtenção de ganhos ainda maiores; inserção de aleatoriedade nas heurísticas para permitam um esquema *multi-start*; desenvolvimento de um método de busca local visando integrar os métodos desenvolvidos em uma metaheurística, mantendo-se os tempos computacionais reduzidos.

Referências Bibliográficas

- Al-Fawzan, M. A.; Al-Sultan, K. S. (2002). A tabu search based algorithm for minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *Computers & Industrial Engineering*, 44, 35-47.
- Bard, J. F. (1988). A heuristic for minimizing the number of tool switches on flexible machine. *IIE Transactions*, 20, 382-391.
- Catanzaro, D.; Gouveia, L. e Labbé, M. (2015). Improved integer linear programming formulations for the job Sequencing and tool Switching Problem. *European Journal of Operational Research*, 244, 766-777.
- Chaves, A. A.; Senne, E. L. F. e Yanasse, H. H. (2012). Uma nova heurística para o problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 19, 17-30.
- Crama, Y. (1997). Combinatorial optimization models for production scheduling in automated manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 99, 136-153.
- Crama, Y.; Kolen, A. W. J.; Oerlemans, A. G. e Spieksma, F. C. R. (1994). Minimizing the number of tool switches on a flexible machine. *The International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 6, 33-54.
- Crama, Y.; Moonen, L. S.; Spieksma, F. C. R. e Talloen, E. (2007). The tool switching problem revisited. *European Journal of Operational Research*, 182, 952-957.
- Cunha Jr., J. J.; Souza, M. C. e Yanasse, H. H. (2011). Scheduling jobs on a flexible machine to minimize overtime and weighted tardiness costs. *Proceedings of International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, p. 121-125, Metz, França.
- Cunha Jr., J. J. (2012). Programação de Produção em Máquinas CNC para o curto prazo. 60f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- Cunha Jr., J. J. e Souza, M. C. (2009). Minimização de troca de ferramentas numa máquina CNC: aplicação de uma heurística gulosa a um caso real. *Anais do XLI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 842-850, Porto Seguro, Brasil.
- Cunha Jr., J. J. e Souza, M. C. (2010). Sequenciamento de tarefas em máquina de manufatura flexível para reduzir custos com horas extras e atrasos de entregas. *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, p. 1201-1212, Bento Gonçalves, Brasil.
- Dantzig, G. R.; Fulkerson, D. R. e Johnson, S. M. (1954). Solution of a large scale traveling salesman problem. *Operations Research*, 2, 393-410.
- Golden, B. L. e Stewart Jr., W. R. (1985). Empirical analysis of heuristics. In: Lawler E. L.; Lenstra, J. K.; Rinnooy Kan, A. H. G. e Shmoys, D.B., Wiley (Eds.). *The Traveling Salesman Problem: A Guide Tour of Combinatorial Optimization*, p. 207- 249, Chichester.

- Gómez, A.T. (1996). Modelo para sequenciamento de partes e ferramentas em um sistema de manufatura flexível com restrições as datas de vencimento e a capacidade do magazine. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.
- Gómez, A. T.; Lorena, L. A. N. (1998). Modelagem de sistemas de manufatura flexíveis considerando restrições temporais e a capacidade do magazine. *Gestão & Produção*, 5, 69-80.
- Hertz, A.; Laporte, G.; Mittaz, M. e Stecke, K. E. (1998). Heuristics for minimizing tool switches when scheduling part types on a flexible machine. *IIE Transactions*, 30, 689-694.
- Konak, A.; Kulturel-Konak, S. e Azizoğlu, M. (2008). Minimizing the number of tool switching instants in Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Economics*, 116, 298-307.
- Kusiak, A.; Chow, W. S. (1986). Efficient solving of the group technology problem. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 6, 2, 117-124.
- Laporte, G.; Salazar, J. J. e Semet, F. (2003). Exact algorithms for the job sequencing and toolswitching problem. *IIE Transactions*, 35, 1-9.
- Massote, A. A. (2001). Contribuição para avaliar a interface entre a aplicação da tecnologia de grupo e o projeto de células de manufatura, considerando aspectos importantes para o desempenho. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Raduly-Baka, C. e Nevalainen, O. S. (2015). The modular tool switching problem. *European Journal of Operational Research*, 242, 100-106.
- Stecke, K. E. (1986). A hierarchical approach to solving machine grouping and loading problems of flexible manufacturing systems. *European Journal of Operational Research*, 24, 369-378.
- Tang, C. S. e Denardo, E. V. (1988a). Models arising from a flexible manufacturing machine. Part I: Minimization of the number of tool switches. *Operations Research*, 36, 767-777.
- Tang, C. S. e Denardo, E. V. (1988b). Models arising from a flexible manufacturing machine. Part II: Minimization of the number of switching instants. *Operations Research*, 36, 778-784.
- Wolsey, L. A. (1998). Integer Programming. *John Wiley & Sons*.
- Yanasse, H. H. (2007). Limitante inferior para o problema de minimizar o número de trocas de ferramentas. *Anais do XXXIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 1886-1892, Fortaleza, Brasil.
- Yanasse, H. H.; Rodrigues, R. C. M. e Senne, E. L. F. (2009). Um algoritmo enumerativo baseado em ordenamento parcial para resolução do problema de minimização de trocas de ferramentas. *Gestão & Produção*, 16, 370-381.

Yanasse, H. H.; Vijaykumar, N. I. e Olivo, A. (1996). A heuristic procedure to minimize the number of tool switches in a flexible manufacturing machine. *Anais do XXVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 6, 599-603, Rio de Janeiro, Brasil.