

APLICAÇÃO DE MODELOS PARA O PROBLEMA DE *JOB-SHOP SCHEDULING* EM UMA INDÚSTRIA DO SETOR MOVELEIRO

Adrieli Pereira de Souza

Universidade Federal do Paraná – Campus Jandaia do Sul
R. Dr. João Maxímiano, 426 - Vila Operária, Jandaia do Sul - PR, CEP: 86.900-000
adrielipereira19@gmail.com

Jonathan Vinicius Kaizer

Universidade Federal do Paraná – Campus Jandaia do Sul
R. Dr. João Maxímiano, 426 - Vila Operária, Jandaia do Sul - PR, CEP: 86.900-000
jonathanviniuskaiser@gmail.com

Marco Aurélio Reis dos Santos

Universidade Federal do Paraná – Campus Jandaia do Sul
R. Dr. João Maxímiano, 426 - Vila Operária, Jandaia do Sul - PR, CEP: 86.900-000
marcoarelioreis@yahoo.com.br

RESUMO

Este artigo tem como objetivo definir a ordem em que as tarefas deverão iniciar e terminar dentro de uma linha de produção de uma empresa do setor moveleiro e conseqüentemente minimizar o *makespan*. Tais problemas são conhecidos na literatura como *Job-Shop Scheduling*. Dois modelos de programação matemática foram desenvolvidos e resolvidos pelo *software* comercial GAMS™, com o intuito de avaliar o desempenho quanto agilidade e capacidade de resolução dos mesmos, bem como apontar as oportunidades de solução para o problema em estudo. Com a aplicação dos dois modelos, foi obtido um *makespan* no valor de 52320 em unidades de tempo fictício. Entretanto, no segundo modelo houve uma redução na ordem de 43,8% e 52,4% no tempo de conclusão das tarefas para duas máquinas e uma redução no tempo de resolução do problema de 95%. Sendo assim, a aplicação em questão vem oferecer elementos que auxiliam na otimização do processo.

PALAVRAS CHAVE. Programação Linear Inteira Mista, *Job-Shop Scheduling*, Indústria moveleira.

Tópicos: PO na Indústria, Programação Matemática.

ABSTRACT

This paper has the objective of to define the sequence of jobs should within a production line in a furniture industry to minimize makespan. Such problems are known in the literature as Job-Shop Scheduling. Two mathematical programming models were developed and solved by the commercial software GAMS™, in order to evaluate their performance in terms of agility and resolution capacity, as well as to point out the opportunities for solving the problem under study. With the application of both models, the makespan of 52320 in fictitious time units was obtained. However, in the second model there was a reduction in the order of 43.8% and 52.4% in the job completion time for two machines and a 95% reduction in the problem resolution time. Therefore, this work offers elements that help in the optimization of the process.

KEYWORDS. Linear Mixed Integer Programming , Job-Shop Scheduling, Furniture industry.

Paper Topics: OR in Industry, Mathematical Programming.

1. Introdução

O setor moveleiro vem crescendo de maneira exponencial nos últimos anos e mesmo com a presença em todo o território nacional, 78,1% das empresas deste ramo estão localizadas na região Sul e Sudeste do Brasil, isso se dá devido a diversos fatores sendo um deles a concentração populacional, o que gera demanda por consumo desses produtos [Abimóvel 2019].

Com a intensa concentração de empresas do mesmo setor em uma única região, cresce a concorrência, sendo necessário cada vez mais eficiência na qualidade e produtividade nos processos, mas para que isso aconteça os encarregados do Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) devem administrar corretamente todos os recursos humanos, matérias-primas, máquinas e equipamentos para que eles sejam aproveitados com a máxima capacidade [Costa 2016].

Segundo [Costa 2016] o PPCP busca equilibrar duas variáveis, a redução de custos e o atendimento ao cliente. Mediante ao que foi exposto, este trabalho dará ênfase na redução de custos através de uma área do conhecimento da Engenharia de Produção chamada de Pesquisa Operacional, a qual se desdobra em propor métodos para soluções à diversos problemas de tomada de decisão e otimização de sistemas, sendo uma delas o problema de sequenciamento de operações.

O trabalho foi realizado em uma empresa de médio porte, localizada na região norte do Paraná, que produz e comercializa móveis há aproximadamente 30 anos, e teve como objetivo apresentar duas propostas de solução para otimizar a produção e principalmente maximizar os lucros da empresa por meio da definição das ordens em que as tarefas deverão iniciar e terminar dentro de uma linha de produção, bem como a sequência ideal que as peças de um produto sejam produzidos. Para encontrar as duas propostas de solução, foi elaborado dois modelos de programação matemática com objetivos de otimização distintos: um para minimizar o tempo de processamento (*makespan*), e outro para minimizar a soma dos tempos de conclusão das peças.

2. Referencial Teórico

Neste tópico serão abordados conceitos condizentes com o objetivo proposto e que deram o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 Planejamento, Programação e Controle da Produção

Segundo [Tubino 2007] o Planejamento, Programação e Controle da Produção (PPCP) é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos da empresa de forma a atender da melhor forma possível aos planos estabelecidos nos três níveis hierárquicos de planejamento e controle (estratégico, tático e operacional).

O PPCP deve manter o equilíbrio entre o fornecimento de produtos e serviços, e a demanda dos consumidores. Além do mais, deve garantir uma produção com qualidade, rapidez, confiabilidade, flexibilidade e custo baixo, que somente será possível com recursos produtivos disponíveis na quantidade adequada, no momento certo e nos níveis de qualidade desejados [Slack et al. 2006].

As funções do PPCP dentro de uma organização dependem de modelos matemáticos, estatísticos e de simulação, que são técnicas típicas da Pesquisa Operacional, para alocar recursos limitados às tarefas que precisam ser executadas, de modo que a empresa otimize e alcance seus objetivos. O PPCP precisa interagir com outras funções de tomada de decisão dentro da empresa como o MRP (*Materials Requirement Planning*, ou simplesmente em português conhecido como Planejamento de Necessidades de Materiais), pois, é necessário que todas as matérias-primas e recursos estejam disponíveis na hora certa e na quantidade requerida para iniciar o processamento dos produtos. Portanto, os cronogramas e o sequenciamento das operações devem ser decididos pelo PPCP em conjunto com o MRP [Pinedo 2005].

2.2 Sequenciamento de Operações

O sequenciamento de operações é um processo utilizado em muitas indústrias de manufatura e serviços. A definição do sequenciamento de operações consiste na alocação de recursos e tarefas levando em consideração os diferentes níveis de prioridade de cada item a ser produzido. Adotar uma estratégia de sequenciamento de operações tem como principal objetivo otimizar a produção

de forma a minimizar custos, tempos e demais recursos. Portanto, a escolha de um método de auxílio a tomada de decisão para o problema específico de sequenciamento de operações desempenha um papel importante nos sistemas de produção [Pinedo 2008].

Segundo [Pedroso e Corrêa 1996] os métodos desenvolvidos para solucionar os problemas de sequenciamento de operações são ferramentas de suporte a tomada de decisão que consiste em considerar a melhor solução, de modo a otimizar o processo dentro de uma multiplicidade de opções. O PPCP pode ser afetado por diversos fatores, como falhas nas máquinas, tempos de processamento maiores que o esperado, entre outras limitações dentro do ambiente produtivo, deste modo o sequenciamento é fundamental para obtenção de resultados satisfatórios, pois leva em consideração, inúmeras variáveis que podem influenciar na otimização da cadeia produtiva.

2.3 JOB-SHOP SCHEDULING

A palavra *Scheduling* traduzida para o português pode significar programação ou agendamento, e dentro do contexto industrial constitui a ordem em que as tarefas serão executadas dentro de uma linha de produção, definindo assim o seu sequenciamento, de modo a atender algum critério de efetividade, como, por exemplo minimizar o *makespan*, ou seja, o tempo total de processamento de todas as tarefas. O *Job-shop Scheduling* estabelece dentro de um ambiente de produção a ordem pela qual as n tarefas (*Jobs* em inglês) serão processadas nas m máquinas, permitindo que a sequência das tarefas não seja a mesma em todas as máquinas, este modelo leva em consideração um roteiro preestabelecido [Arenales et al. 2007].

Cita-se um trabalho recente realizado por [Shen et al. 2018], no qual os autores desenvolveram um modelo de Programação Linear Inteira Mista para o problema de *Flexible Job Shop Scheduling* com a sequência dependente dos tempos de *setup* que é uma generalização do modelo clássico. O elemento fundamental do trabalho de [Shen et al. 2018] para o qual os autores desse trabalho se inspiraram para formular o modelo proposto neste artigo, é que cada tarefa (*Job*), consiste de um conjunto de roteiros de operações que podem ser processadas por um sub conjunto de máquinas.

Entretanto, para o caso aqui estudado, como o ambiente não é caracterizado como *Flexible Job Shop*, conforme descrito por [Shen et al. 2018], mas simplesmente como *Job Shop*, o modelo foi ajustado para que se tenha uma máquina específica definida para cada tipo de operação, porém, cada máquina pode executar mais de uma operação distinta em uma mesma Tarefa (*Job*).

Por simplificação também, foi considerada para a situação analisada, diferente da situação estudada por [Shen et al. 2018], os tempos de *setup* independentes da sequência. Contudo, vale resaltar que os modelos matemáticos desenvolvidos neste trabalho, se leva em consideração que o *setup* depende da máquina, da peça e da operação.

Os autores [Godinho Filho e Fernandes 2010] reforçam o conceito de *Job-shop* como sendo um sistema intermitente, em que os itens fabricados não têm o mesmo roteiro de fabricação dentro de um setor produtivo. Este modelo de *Scheduling* se distingue dos demais devido algumas características básicas: operação em lotes, possibilita que uma mudança na demanda possa ser atingida variando o tamanho ou a frequência dos lotes, tende a ter custos maiores de *setup*, os materiais são levados para os postos de trabalho onde cada operação é realizada, ou seja, as filas nos centros de trabalho são maiores e utiliza equipamentos de uso geral.

Baseado no modelo apresentado por [Arenales et al. 2007], adequou-se o modelo *Job-shop Scheduling* para a realidade da indústria moveleira, objeto de estudo dessa pesquisa, em dois modelos com objetivos diferentes. Assim, o primeiro modelo, cujo objetivo é minimizar o *makespan* é apresentado conforme o conjunto de inequações de (1) à (9). As definições para os conjuntos, subconjuntos, índices, parâmetros e variáveis de decisão do modelo representado de (1) à (9), se encontram no Quadro 1.

Quadro 1 – Definição dos conjuntos, subconjuntos, índices, parâmetros e variáveis de decisão

Conjuntos	
I	Conjunto de peças
J	Conjunto de máquinas
K	Conjunto de operações

Subconjuntos	
K_i	Conjunto de operações para peça i tal que $K_i \subset K$
K_o	Conjunto de operações para peça o tal que $K_o \subset K$
I	Conjunto de peças.
J	Conjunto de máquinas
Índices	
i	Define o tipo de peça que é distinta da peça o
o	Define o tipo de peça o que é distinta da peça i
r	Define o tipo de máquina em função de uma determinada operação distinta da máquina j
j	Define o tipo de máquina em função de uma determinada operação distinta da máquina r
k	Define o tipo de operação em função de uma determinada peça distinta da operação q
q	Define o tipo de operação em função de uma determinada peça distinta da operação k
Parâmetros	
t_{ijk}	Define o tempo de ciclo da peça i na máquina j para realizar a operação k
s_{ijk}	Define o tempo de <i>setup</i> da peça i na máquina j para realizar a operação k
l_{ijk}	Define a quantidade de peças i que passam na máquina j que executam a operação k
p_{ijk}	Define a quantidade de peças i que deve juntar na pilha, após passar na máquina j , antes de começar a realizar a operação $k+1$
M	$Big\ M = \sum_i \sum_j \sum_k (l_{ijk} t_{ijk} + s_{ijk})$
Variáveis de Decisão	
x_{ijk}	Instante de início da operação k na máquina j para processar a peça i
y_{ijkoq}	Assume valor igual a 1 se a operação k da peça i precede a operação q da peça o na máquina j e 0 caso contrário
C	<i>Makespan</i>

Fonte: Os autores (2020)

$$\begin{aligned}
 & \text{mínimo } C & (1) \\
 \text{Sujeito à} & & \\
 & x_{ijk} \geq s_{ijk}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K; & (2) \\
 & x_{irk+1} \geq x_{ijk} + p_{ijk} t_{ijk} + s_{irk+1}, \forall i \in I, \forall k \in K_i, \forall r \in J, \forall j \in J, s.a. r \neq j; & (3) \\
 & x_{ijk} \geq x_{ojq} + l_{ojq} t_{ojq} + s_{ijk} - M y_{ijkoq}, & (4) \\
 & \forall i \in I, \forall o \in I, s.a. i \neq o, \forall j \in J, \forall k \in K_i, \forall q \in K_o; \\
 & x_{ojq} \geq x_{ijk} + l_{ijk} t_{ijk} + s_{ojq} - M(1 - y_{ijkoq}), & (5) \\
 & \forall i \in I, \forall o \in I, s.a. i \neq o, \forall j \in J, \forall k \in K_i, \forall q \in K_o; \\
 & x_{ijk} \geq x_{ijq} + l_{ijq} t_{ijq} + s_{ijk}, \forall k \in K_i, \forall q \in K_i, s.a. k > q, \forall i \in I, \forall j \in J; & (6) \\
 & C \geq x_{ijk} + l_{ijk} t_{ijk}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K_i; & (7) \\
 & x_{ijk} \geq 0, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K_i; & (8) \\
 & y_{ijkoq} \in [0,1], \forall j \in J, \forall k \in K_i, \forall q \in K_o, \forall i \in I, \forall o \in I, s.a. i \neq o. & (9)
 \end{aligned}$$

Na equação (1) é definido a função objetivo, que neste caso é minimizar o *makespan* C . A inequação (2) é a condição para que o tempo de início x_{ijk} de todas as operações k em cada peça i e em cada máquina j , ocorra após o tempo de *setup* s_{ijk} . A restrição (3) estabelece a condição para que o instante de início x_{irk+1} da operação $k+1$ para a peça i na máquina r , ocorra após a pilha de tamanho p_{ijk} para a peça i , estiver finalizada na máquina j e a máquina r estiver com o *setup* s_{irk+1} realizado para iniciar a operação $k+1$. A próxima inequação (4) é a condição para que a peça o na operação q preceda a peça i na operação k na máquina j , caso y_{ijkoq} seja igual à 0. A restrição (5) ao contrário da inequação (4), é a condição para que a peça i na operação k preceda a peça o na operação q na máquina j , caso y_{ijkoq} seja igual à 1. Logo a restrição (6), estabelece a condição para que o instante de início da operação k para a peça i na máquina j , ocorra após o lote de tamanho

l_{ijq} , para a peça i na operação q , estiver finalizada na máquina j e a mesma estiver com o *setup* realizado para iniciar a operação k . A inequação (7), define a condição para que o *makespan* C , seja o tempo total para processar todos os lotes de peça pertencentes ao conjunto I em todas as operações pertencentes ao conjunto K_i . A restrição (8) define que todas as variáveis x_{ijk} são não negativas. E finalmente, a (9) define que todas as variáveis y_{ijkq} são binárias.

Ainda se formulou um segundo modelo para minimizar a soma dos tempos de utilização de cada uma das máquinas para realizar o processamento de todas as peças. Sendo assim, para este novo modelo, definiu-se a variável C_j como sendo o tempo de conclusão de todas as peças na máquina j .

Logo, denota-se a equação (10) como a nova função objetivo para o modelo.

$$\text{mínimo } \sum_{j \in J} C_j \quad (10)$$

Para o segundo modelo, substituiu a restrição representada pela inequação (7) pela inequação (11).

$$C_j \geq x_{ijk} + l_{ijk}t_{ijk}, \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K_i; \quad (11)$$

A restrição (11) define a condição para se determinar o instante de conclusão para o processamento de todas as peças em cada máquina. As demais restrições permaneceram iguais a do modelo anterior.

A finalidade de se propor este novo modelo é para contar com a possibilidade de liberar as máquinas em uma data mais cedo, liberando estas para fabricação de novas peças associadas a novos produtos.

3. Metodologia

Do ponto de vista da natureza a pesquisa desenvolvida é considerada uma pesquisa aplicada, pois tem o objetivo de gerar conhecimento para aplicação prática e busca à solução de problemas que ocorrem na realidade [Silva e Menezes 2005]. Quanto aos objetivos, a pesquisa é classificada como empírica normativa, empírica pelo fato que a pesquisa foi modelada em cima de uma situação real e normativa uma vez que prescreve uma solução para melhorar os resultados já existentes na literatura, por meio do desenvolvimento de novas diretrizes para a empresa [Turrioni e Mello 2012]. Já do ponto de vista da abordagem, a pesquisa em questão pode ser classificada como quantitativa, pelo fato das informações coletadas serem mensuráveis e pelo uso de ferramentas estatísticas como Excel™ para análise e tratamento de dados [Miguel 2010]. E por fim, do ponto de vista dos métodos utilizados, a pesquisa foi realizada por modelagem, pois permite um modelo real ser testado aplicando técnicas de sequenciamento de operações para otimização do processo, minimizando custos e tempos sem modificá-lo fisicamente [Turrioni e Mello 2012].

As primeiras etapas da pesquisa ocorreram da seguinte maneira: primeiramente, marcou-se uma reunião com os responsáveis pelo Planejamento, Programação e Controle da Produção da empresa em estudo para a apresentação da proposta de pesquisa, nesta reunião foi apresentado todos os objetivos, as vantagens e como seria o desenvolvimento do modelo de sequenciamento de operações, deixando claro os benefícios para ambos os responsáveis presentes na reunião que autorizaram a condução da pesquisa. A autorização da pesquisa se deu mediante a condição de que os pesquisadores mantivessem total confidencialidade sobre todas as informações técnicas e outras relacionadas ao projeto de pesquisa nas dependências da empresa. Os pesquisadores elaboraram um termo de confidencialidade que foi assinado pelas partes, deixando claro a responsabilidade sobre o sigilo de todas as informações obtidas.

O trabalho foi realizado em uma empresa de médio porte, localizada na região norte do Paraná, que produz e comercializa móveis há aproximadamente 30 anos. A coleta de dados se iniciou por um estudo mais aprofundado acerca do processo, através de visitas à fábrica com o intuito de entender a sistemática da empresa, evidenciar particularidades e pontos críticos para obtenção de informações. Posteriormente, foi realizada outras visitas à empresa para coleta de tempos dos processos. Com os dados dos processos coletados se iniciou o desenvolvimento do modelo

abordado neste artigo, utilizando *softwares* comerciais tais como o EXCEL™, GAMST™ e CPLEX™.

4. Aplicação dos Modelos

Nesta seção passa-se a mostrar a aplicação do modelo formulado e apresentado na seção 2.3 deste artigo, representado pelo conjunto de equações e inequações de (1) à (9).

Por motivos de confidencialidade, todos os dados foram alterados convenientemente, mantendo-se seus valores relativos, por meio de uma transformação linear de escala. Da mesma forma, as informações a respeito das designações de máquinas, peças e operações foram alteradas para novas codificações, mantendo assim o sigilo das informações.

Portanto, a aplicação é descrita para um conjunto de seis máquinas designadas de M1 à M6, que podem executar um conjunto de até sete operações designadas de O1 à O7 para um total de 19 (dezenove) peças que formarão um único produto. Para este artigo, designam-se as peças de T1 à T19. As operações seguem a ordem de sequenciamento de acordo com sua numeração, por exemplo, a operação O1 é executado em primeiro e logo em seguida vem a operação O2, e assim por diante.

Confira o roteiro das operações na Tabela 1. Note que a Máquina M2 executa duas operações distintas para a peça T19: as operações O1 e O2.

Tabela 1- Roteiro das operações das máquinas

ROTEIRO DAS OPEAÇÕES NAS MÁQUINAS							
Peças	Máquinas						
	M1	M2	M2	M3	M4	M5	M6
T1	O1				O3	O2	O4
T2		O2		O1	O4	O3	O5
T3				O1			O2
T4	O1						O2
T5	O1						O2
T6	O1				O3	O2	O4
T7		O1					O2
T8	O1						O2
T9		O1					O2
T10		O1					O2
T11	O1						O2
T12	O1						O2
T13				O1			O2
T14				O1			O2
T15	O1						O2
T16	O1						O2
T17	O1						O2
T18						O2	O1
T19		O1	O2				O3

Na Tabela 2 estão as informações dos tamanhos dos lotes das peças que passam em cada máquina nas suas respectivas operações.

Tabela 2 - Tamanho do Lotes considerados

Peças	TAMANHO DOS LOTES						
	Máquinas						
	M1	M2	M2	M3	M4	M5	M6
T1	400				2800	400	1600
T2		400		800	800	400	800
T3				800			800
T4	400						800
T5	400						800
T6	400				2800	400	1600
T7		800					800
T8	800						800
T9		800					1600
T10		800					1600
T11	800						800
T12	800						800
T13				1600			800
T14				1600			800
T15	800						800
T16	800						800
T17	800						1600
T18						400	1600
T19		800	800				1600

Na Tabela 3 estão os tamanhos das pilhas de peças que precisam acumular, após uma dada operação para assim se movimentar para próxima operação.

Tabela 3 - Tamanho do Pilhas consideradas

Peças	TAMANHO DA PILHA						
	Máquinas						
	M1	M2	M2	M3	M4	M5	M6
T1	160				640	160	640
T2		200		200	400	200	400
T3				400			400
T4	80						160
T5	80						160
T6	160				640	160	640
T7		80					80
T8	80						80
T9		320					320
T10		320					320
T11	80						80
T12	80						80
T13				320			320
T14				320			320
T15	320						320

T16	320			320
T17	80			40
T18			180	180
T19		30	30	30

Na Tabela 4 estão os tempos de ciclo para cada operação e cada peça, ou seja, corresponde ao tempo de duração de cada operação para se processar uma unidade de peça. Vale ressaltar que as unidades de tempo, em termos de sigilo de informações, foi modificada para uma unidade fictícia.

Tabela 4 - Tempo de Ciclo

Peças	Máquinas						
	M1	M2	M2	M3	M4	M5	M6
T1	3,024				3,192	6,804	1,2
T2		2,784		6,924	6,828	5,76	1,2
T3				3,936			1,2
T4	3,024						1,2
T5	3,024						1,2
T6	3,024				3,192	6,804	1,2
T7		7,37136					1,2
T8	4,476						1,2
T9		3,432					1,2
T10		3,432					1,2
T11	4,476						1,2
T12	4,248						1,2
T13				3,768			1,2
T14				3,768			1,2
T15	3,408						1,2
T16	3,408						1,2
T17	2,808						1,2
T18						13,5	1,2
T19		7,368	3,036				1,2

Na Tabela 5 estão os tempos de *setup* para cada operação e cada peça. Mais uma vez, cabe informar que as unidades de tempo, em termos de sigilo de informações, foi modificada para uma unidade fictícia.

Tabela 5 - Tempos de *Setup*

Peças	Máquinas						
	M1	M2	M2	M3	M4	M5	M6
T1	432				468	0	1440
T2		432		288	468	0	1440
T3				288			1440
T4	432						1440
T5	432						1440

T6	432		468	0	1440
T7		432			1440
T8	432				1440
T9		432			1440
T10		432			1440
T11	432				1440
T12	432				1440
T13			288		1440
T14			288		1440
T15	432				1440
T16	432				1440
T17	432				1440
T18				0	1440
T19		432	432		1440

Para modelagem e otimização, foi utilizado o *software The General Algebraic Modeling System (GAMS™)* versão 23.5 em computador com processador Intel (Core i7) 2,8 GHz até 2,9 GHz, com 8 GB de memória RAM e sistema operacional da Microsoft™ (Windows 10) na plataforma 64 bits. O sistema GAMS™, para resolução deste problema específico, combinou os recursos de modelagem de alto nível do GAMS com o poder dos otimizadores CPLEX versão 12.10. Os otimizadores CPLEX são projetados para resolver rapidamente problemas grandes e difíceis com a mínima intervenção do usuário. O tempo de resolução foi de 43,844 segundos e os resultados são apresentados na Figura 1 que ilustra o Gráfico de Gantt.



Figura 1 - Gráfico de Gantt para solução otimizada para o primeiro modelo

Na Figura 1, apresenta-se a programação das 19 (dezenove) peças nas 6 (seis) máquinas, sendo

que as barras em vermelho representam os tempos de *setup*, e as demais barras coloridas os tempos de processamento de cada lote de peça. Sendo assim, na solução ótima obtida através do modelo de Programação Linear Inteira Mista representado pelo conjunto de equações e inequações expressos de (1) à (9), obteve-se um *makespan* no valor de 52320 em unidades de tempo fictício.

Já os tempos de conclusão de cada uma das máquinas foram para esta situação de 27417,6 para M1, 23417,09 para M2, 21897,6 para M3, 47597,28 para M4, 29514,24 para M5 e finalmente 52320 para M6.

Observa-se que, na Figura 1, por exemplo, que a peça T1 inicia o seu processamento na máquina M5 no instante 915,84, antes mesmo do lote inteiro de peças T1 ter terminado de ser processado na máquina M1. Isto ocorre, pois no instante 915,8 já foi processada a primeira pilha de peças T1 na máquina M1 e logo em seguida se inicia o seu processamento na máquina M5, sendo que os demais itens do lote permanecem em M1 para terminarem de serem processados, finalizando o trabalho de todo Lote de T1 em M1 no instante 1641,6.

Também rodou-se o segundo modelo que minimiza o somatório dos tempos de conclusão de todas as tarefas em cada uma das máquinas. Este segundo modelo tem como função objetivo a equação (10) e tem a inequação (11) como a nova restrição que substitui a restrição (7) do modelo anterior. Tanto a equação (10) como a inequação (11) já foram apresentadas na seção 2.3. deste artigo. Sendo assim, a Figura 2 apresenta-se o gráfico com a nova programação para as peças.

Para este modelo, o tempo de resolução foi de 2,203 segundos, o tempo foi menor que o anterior.

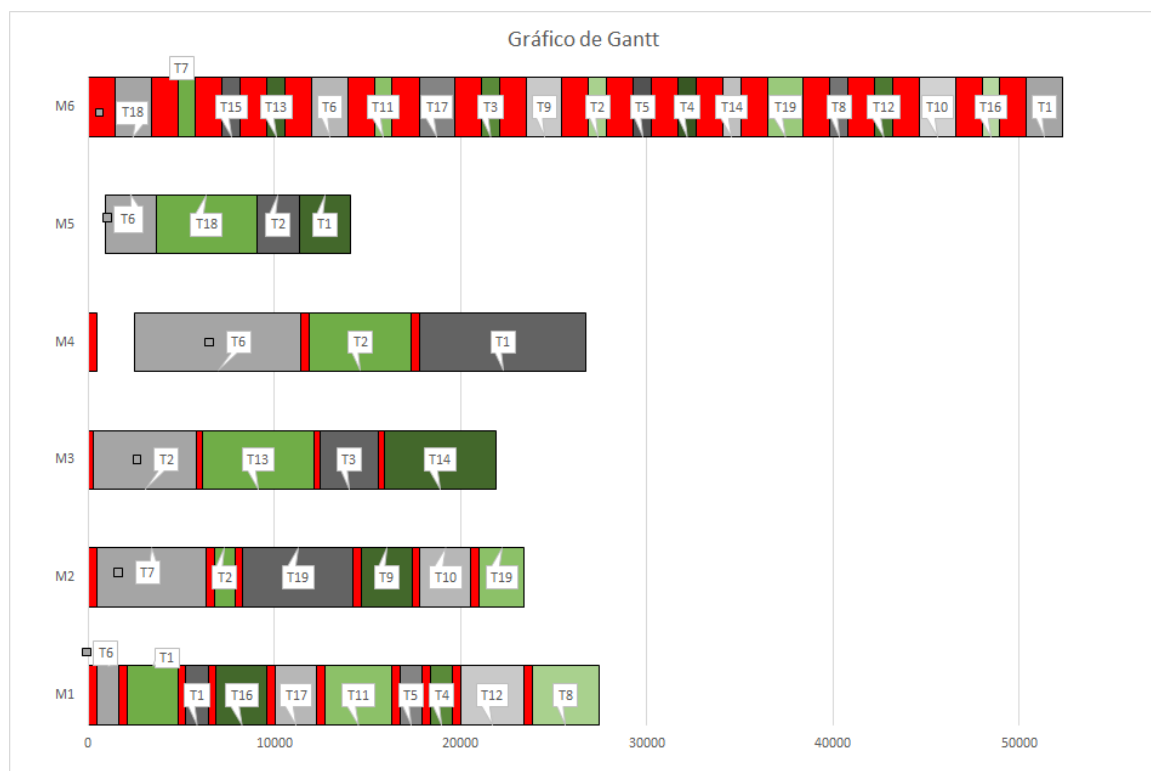


Figura 2 - Gráfico de Gantt para solução otimizada para o segundo modelo

Na Figura 2, está ilustrado a programação das 19 (dezenove) peças nas 6 (seis) máquinas obtido utilizando o novo modelo proposto, sendo que as barras em vermelho representam os tempos de *setup*, e as demais barras coloridas os tempos de processamento de cada lote de peça.

Com a aplicação do segundo modelo, também foi obtido um *makespan* no valor de 52320, entretanto, os tempos de conclusão para M4 e M5 para completa todas as tarefas, foram respectivamente de 26746,08 e 14063,04, uma redução na ordem de 43,8% e 52,4% respectivamente. Os demais tempos de conclusão para as demais máquinas permaneceram

inalteradas em relação ao modelo anterior.

5. Considerações Finais

Este trabalho teve como proposta encontrar soluções ideais para o sequenciamento de peças dentro de uma linha de produção de uma fábrica do setor moveleiro. Foi realizado um estudo aprofundado do modelo *Job Shop Scheduling*, o qual foi adaptado para a realidade da indústria moveleira, objeto de estudo desta pesquisa. Sendo assim, foi definido, para os dois modelos apresentados, uma máquina específica para cada tipo de operação, porém, cada máquina poderia executar mais de uma operação distinta em uma mesma Tarefa, além do mais, foi considerado os tempos de *setup* independentes da sequência, mas dependentes da máquina, da peça e da operação.

Foram desenvolvidos dois modelos de sequenciamento de operações, o primeiro com o objetivo geral de apenas minimizar o *makespan* e o segundo de minimizar a soma dos tempos de conclusão de todas as tarefas em cada uma das máquinas. Primeiramente analisou-se o desempenho de agilidade do *software The General Algebraic Modeling System (GAMS™)* combinado com o otimizador CPLEX, que obteve um tempo de resolução de 43,844 segundos no primeiro modelo e 2,203 segundos no segundo, portanto, pode-se observar que a capacidade de resolução do *software* para o segundo modelo foi muito mais eficiente.

Analisou-se também a solução ótima alcançada nos dois modelos, no primeiro obteve-se um *makespan* no valor de 52320 em unidades de tempo fictício e os tempos de conclusão de cada uma das máquinas foram para esta situação de 27417,6 para M1, 23417,09 para M2, 21897,6 para M3, 47597,28 para M4, 29514,24 para M5 e finalmente 52320 para M6. Já para o segundo modelo foi obtido um *makespan* idêntico ao primeiro, porém, os tempos de conclusão para M4 e M5 para completar todas as tarefas, foram respectivamente de 26746,08 e 14063,04, ou seja, uma redução na ordem de 43,8% e 52,4% respectivamente. Os demais tempos de conclusão para as demais máquinas permaneceram inalteradas em relação ao primeiro modelo analisado.

As análises dos tempos de execução dos modelos são essenciais para avaliar o quanto que o método é capaz de encontrar uma solução em um tempo hábil, já que os problemas de *Job Shop* se constituem em um tipo de complexidade classificado como NP.

Ter uma boa estratégia de manufatura é fundamental na implantação do conceito de *Smart Job Shop* dentro do contexto da indústria 4.0, onde máquinas no chão de fábricas são interconectadas para oferecer monitoramento de dados em tempo real e resposta rápida na programação da produção dado modificações nas instruções de produção que pode ocorrer de última hora [Wang, Zhou e Zhu 2020]. Sendo assim, a garantia de uma resposta rápida na hora da tomada de decisão exigem por métodos computacionais que tenham uma certa agilidade na busca de uma solução ótima. E o desempenho quanto a agilidade do método em encontrar a solução ótima é que foi testado neste trabalho. Entretanto, se o problema envolver mais tarefas e máquinas, o tempo de resolução do problema pode aumentar exponencialmente, já que a execução computacional do problema não é determinado em um tempo polinomial.

Sendo assim, como sugestões de trabalhos futuros, pretende-se dar continuidade a este trabalho para testar métodos heurísticos no sequenciamento de operações envolvendo mais produtos ao invés de um único produto. Apesar dos métodos heurísticos não garantirem a solução ótima global, estes métodos podem se mostrar mais eficientes na hora de obter uma boa solução em um tempo de execução que seja considerado hábil.

Referências Bibliográficas

Abimóvel. (2019) 'Relatório Setorial da Indústria de Móveis no Brasil', 14^a. ed. atual. Brasil: IEMI – Inteligência de Mercado, 262 p.

Arenales, M.; et al. (2007) '*Pesquisa operacional*', Rio de Janeiro: Elsevier.

Costa, J. C. (2016) 'Planejamento, Programação e Controle de Produção', Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., p. 328, ISBN 978-85-8482-562-2.

Godinho Filho, M. and Fernandes, F. C. F. (2010) 'Planejamento e controle da produção: dos fundamentos ao essencial', *São Paulo: Atlas*, p. 298.

Miguel, P. A. C. (2010) 'Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações', Rio de Janeiro: Elsevier.

Pedroso, M. C.; Corrêa, H. L. (1996) 'Sistemas de Programação da Produção com capacidade finita: uma decisão estratégica?', *Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v. 36, n. 4, p. 60-73.

Pinedo, M. L. (2005) 'Planning and Scheduling in Manufacturing and Services', New York: Springer Science+Business Media

Pinedo, M. L. (2008) *Scheduling: Theory, algorithms, and systems*, *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. doi: 10.1007/978-0-387-78935-4.

Shen, L., Dauzère-Pérès, S. and Neufeld, J. S. (2018) 'Solving the flexible job shop scheduling problem with sequence-dependent setup times', *European Journal of Operational Research*. Elsevier B.V., 265(2), pp. 503–516. doi: 10.1016/j.ejor.2017.08.021.

Silva, E. L.; Menezes, E.M. (2005) 'Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação', *Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Portal*, 29(1), p. 121. doi: 10.1590/S1517-97022003000100005.

Slack, N. *et al.* (2006) 'Administração da Produção: Edição Compacta'. 1ª. ed. São Paulo: Atlas S.A., cap. Parte III - Planejamento e Controle, p. 227-438. ISBN 85-224-2171-4.

Tubino, D. F. (2007) 'Livro Planejamento e Controle da Produção', p. 190.

Turrioni, J. B. and Mello, C. H. P. (2012) 'Metodologia de pesquisa em engenharia de produção', *Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI*, p. 191. Available at: http://www.carlosmello.unifei.edu.br/Disciplinas/Mestrado/PCM-10/Apostila-Mestrado/Apostila_Metodologia_Completa_2012.pdf.

Wang, C., Zhou, G. and Zhu, Z. (2020) 'Service perspective based production control system for smart job shop under industry 4.0', *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. Elsevier Ltd, 65(March), p. 101954. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101954.