



ESTUDO DE CASO: SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO DE ABRASIVOS

Carolina Meduna Baziewicz

Universidade Federal do Paraná

Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas

carol.meduna@gmail.com

Cassius Tadeu Scarpin

Universidade Federal do Paraná

Avenida Coronel Francisco H. dos Santos, 100 – Jardim das Américas

cassiusts@gmail.com

RESUMO

O objetivo deste trabalho é verificar a eficiência da aplicação de modelos exatos para o sequenciamento de tarefas (*Scheduling*) na linha de produção de uma indústria de abrasivos. A estratégia utilizada foi utilizar dados reais de sequenciamento passados para identificar potenciais de melhoria em termos de redução de setup e tempo total de processamento. Duas análises foram feitas: o sequenciamento de tarefas para uma operação (*Single Machine*); e a criação de uma heurística para o sequenciamento de tarefas em um conjunto de operações. Na primeira pesquisa, o modelo utilizado reduziu o setup mensal total em 3h20min, o que representou uma redução de 29,4% em setup, e uma redução de 2,7% no *Makespan*. Na segunda pesquisa, verificou-se que a metodologia empregada reduziu em média o Lead Time da Produção em 53% para a família de produtos P1, 85% para a família P2, e 40% para a família P4.

PALAVRAS CHAVE. *Single Machine, Sequenciamento, Makespan.*

ABSTRACT

The objective of this research is to verify the efficiency of applying exact models to solve scheduling problems in a real-world situation: a production line of abrasives. The strategy was to analyze real data in order to identify potential improvements in terms of setup reduction and decreasing total processing time. This work includes two studies: a creation of a *Single Machine* model, and the creation of a heuristic for solving a *Job Shop* model. On the first case, the model was able to reduce the total monthly setup time in 3h20min, which represented a 29,4% reduction in setup, and a 2,7% reduction in *Makespan*. On the second case, the model reduced average production Lead Time by 53% for the “Product Family P1”, 85% for the “Product Family P2”, and by 40% for the “Product Family P4”.

KEYWORDS. *Single Machine, Scheduling, Makespan.*



1. Introdução

Para competir no mercado atual, é de suma importância que as empresas busquem manter um elevado nível de qualidade, atendimento e entrega dos produtos e serviços oferecidos, garantindo desta forma a satisfação plena de seus clientes.

Em empresas do setor industrial, é essencial planejar, programar e controlar o que se produz, pois grande parte dos recursos da empresa encontra-se na linha de produção. Com o intuito de organizar as atividades que se referem à produção em um ambiente produtivo, as empresas criam um setor de apoio à produção, conhecido como PCP, ou Planejamento e Controle da Produção. O PCP funciona como um departamento de apoio, que é responsável pelo gerenciamento dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional. [Tubino, 2009].

Mais que um departamento de uma empresa, o termo PCP é utilizado para se referir a um conjunto de técnicas e sistemáticas de planejar, controlar e dirigir o processo de manufatura e produção em todos os seus aspectos e níveis, incluindo materiais, equipamentos, pessoal, fornecedores, clientes internos e externos e as relações com as demais funções empresariais.

Segundo [Arenales et. al. 2015], existem três possíveis horizontes de planejamento de um sistema produtivo: o longo, o médio e o curto prazo. Neste trabalho, o foco foi dado ao estudo de planejamento de curto prazo (nível operacional). O planejamento de curto prazo representa o planejamento das atividades diárias da fábrica, entre elas a programação da produção, a liberação de ordens de produção e a priorização de clientes na sequência produtiva.

Na perspectiva de curto prazo, um dos principais objetivos é a determinação da sequência (*Scheduling*) que n tarefas deverão ser processadas em m máquinas. Sequenciar a produção significa, em poucas palavras, determinar qual será a ordem de execução dos pedidos existentes em carteira. Se existe um conjunto de n tarefas a serem processadas em uma máquina, o número de possíveis sequências diferentes é de n fatorial. A natureza combinatória deste problema da literatura clássica torna-o difícil de ser resolvido por modelos exatos, pois cada tarefa incluída na sequência tem um grande impacto no número de possíveis soluções para o problema.

Segundo [Pinedo 2012], são cinco os possíveis ambientes para o processamento de tarefas: uma máquina (*Single Machine*), máquinas paralelas (*Parallel Machine*), *Flow Shop*, *Jop Shop*, e *Open Shop*. Neste trabalho, o ambiente estudado é o *Single Machine*, com posterior generalização para o problema *Job Shop*.

O objeto de análise é uma linha de produção de abrasivos, de uma empresa localizada na região metropolitana de Curitiba, cujas características serão descritas nas próximas seções. A estratégia empregada em ambas as etapas foi comparar o que foi realizado pela empresa em algum período no passado recente (março e agosto), com os resultados obtidos na pesquisa para identificar se a metodologia empregada teria trazido ganhos à empresa, se houvesse sido utilizada.

2. Revisão da Literatura

Na construção de um modelo matemático é necessário definir que critério se deseja minimizar ou maximizar. Para o problema de sequenciamento de produção, alguns critérios são comumente utilizados. De acordo com [Arenales et al. 2015], são eles: Makespan, Atraso Máximo (Tardiness), Adiantamento Máximo (Earliness), Lateness Máximo, Lateness Total, e o Número de Tarefas Atrasadas. Neste trabalho, o intuito é minimizar o Makespan, que é o instante de término do processamento de todas as tarefas.

O modelo exato utilizado neste trabalho é uma adaptação do modelo clássico de sequenciamento de produção para uma máquina para minimização do Makespan, apresentando por [Arenales et. al. 2015], em conjunção com o trabalho de [Miller et al. 1960]. Ele é um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), cujo objetivo é minimizar o Makespan em uma máquina. A adaptação foi feita devido ao elevado tempo computacional que a resolução do modelo clássico requer, muitas vezes não sendo possível obter uma resposta.

A única diferença em relação ao modelo original é a maneira como foi escrita a função objetivo. Ao invés de minimizar o instante de término da última tarefa (C_{max}), minimiza-se o



somatório do “custo de produção” de todas as tarefas. A função objetivo utilizada neste trabalho é idêntica à função objetivo de um Problema Clássico de Transporte, onde se tem um determinado custo para transportar um item da origem i para o destino j . Analogamente, o “custo de transporte” significa a soma do setup decorrente de processar a tarefa j imediatamente após a tarefa i , mais o valor do tempo de processamento da tarefa j . Em ambas as formas de escrever a função objetivo, o resultado final ainda é o de minimizar o *Makespan*.

Ao construir o modelo, foram estipuladas as seguintes premissas:

- Todas as tarefas do sequenciamento inicial estão disponíveis no instante de tempo zero.
- Não é permitida a preempção durante o sequenciamento, ou seja, as tarefas não podem ser interrompidas durante o processamento.
- Uma tarefa fictícia inicial (0) foi utilizada como ponto de início do sequenciamento.

Seja n o número de tarefas a serem processadas em uma determinada máquina. Sejam os seguintes parâmetros, inteiros e não negativos:

$$\begin{aligned}
 p_i &= \text{tempo de processamento da tarefa } i \text{ na máquina} \\
 s_{ij} &= \text{tempo de setup da máquina para processar a tarefa } j \\
 &\text{imediatamente após a tarefa } i \\
 c_{ij} &= s_{ij} + p_j \\
 M &= [\max\{p_1, \dots, p_n\} + \max\{s_{ij}\}] * n
 \end{aligned}$$

Definem-se as seguinte variáveis:

$$\begin{aligned}
 c_i &= \text{instante de término de processamento da tarefa } i \\
 x_{ij} &= \begin{cases} 1, & \text{se a tarefa } i \text{ é antecessora de } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}
 \end{aligned}$$

O modelo matemático pode ser definido por:

$$\min \sum_{j=0, j \neq i}^n \sum_{i=0, j \neq i}^n c_{ij} x_{ij} \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij} = 1, \quad j = 0, \dots, n \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij} = 1, \quad i = 0, \dots, n \quad (2.3)$$

$$C_j \geq C_i - M + (s_{ij} + p_j + M)x_{ij}, \quad i = 0, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (2.4)$$

$$C_0 = 0 \quad (2.5)$$

$$C \in R_+^n, \quad \mathbf{x} \in B^{(n+1)(n+1)} \quad (2.6)$$

Esta adaptação no modelo clássico foi utilizada por [Silva 2016], em sua dissertação de mestrado, trabalho este que é um dos principais trabalhos que servem como base para esta pesquisa. Em seu trabalho, busca-se medir o impacto de inserção e/ou desistências de tarefas no problema de sequenciamento para uma máquina. O modelo adaptado apresenta-se como uma solução muito eficiente na resolução do problema de *Single Machine*.

3. Características do Ambiente Estudado

A linha de produção da empresa estudada é constituída por um total de doze operações (Figura 2). Quatro operações são totalmente manuais (Junção – 6 e 7– e Embalagem –10 e 12), e as demais são realizadas por máquinas, com o auxílio de operadores em tempo integral.



O produto circula entre os postos de trabalho, enquanto as máquinas permanecem fixas em suas posições, caracterizando o layout da fábrica como do tipo funcional (ou por processo), no qual as operações semelhantes são agrupadas no mesmo local. Dentre as vantagens de utilizar um layout por processo, está a grande flexibilidade para se produzir vários tipos de produto. Uma desvantagem é a grande movimentação existente (transporte), e o impacto disto no ritmo de produção. [Slack 1997]

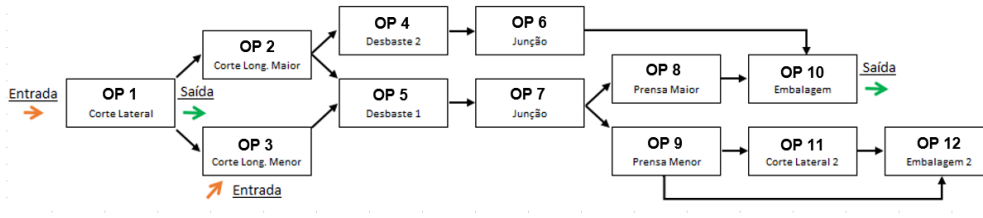


Figura 1 – Representação Esquemática da Linha de Produção
Fonte: A Autora (2017)

Há quatro famílias de produtos na fábrica, que foram assim denominadas: P1, P2, P3 e P4. Cada família possui um roteiro pré-determinado na fábrica, existindo, portanto, um total de quatro possíveis roteiros (Figura 2 - a). Existem postos de trabalho compartilhados entre duas ou mais famílias, como também existem operações exclusivas por família (Figura 2 - b). As operações 1, 5, 7 e 10 são compartilhadas, enquanto as demais são específicas para uma família. Um ambiente no qual existe um número de tarefas a serem processadas por um conjunto de máquinas, em que cada tarefa possui seu próprio roteiro, é considerado um ambiente do tipo *Job Shop*.

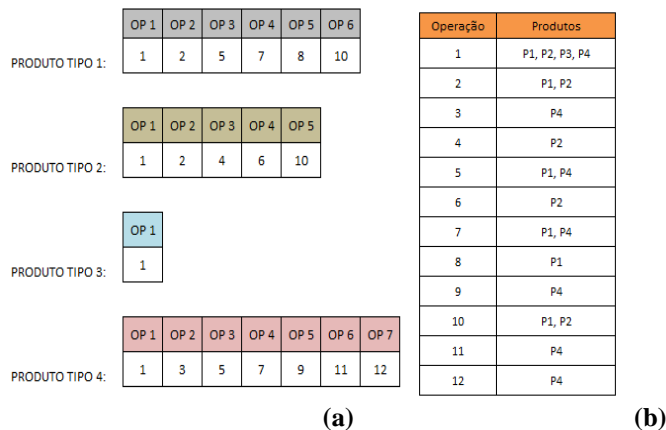


Figura 2 – Roteiro de Fabricação por Família
Fonte: A Autora (2017)

São características do sistema: o fluxo intermitente de produção; a alta flexibilidade de produção devido à utilização de equipamentos para propósitos gerais e mão de obra altamente qualificada; a dificuldade de controle, devido ao fluxo desordenado, o que repercute negativamente sobre estoques e programas de qualidade; o baixo volume de produção; a maior dificuldade de programação e controle; Lead Time de produção alto; e alto tempo de espera entre processos.

Em um sistema de produção em lotes, o sequenciamento de produção é uma tarefa bastante crítica para o desempenho do sistema produtivo, pois muitas vezes a maior parcela do Lead Time de produção corresponde ao tempo de espera entre as máquinas, podendo chegar com certa facilidade a 80% do tempo total. [Tubino 2009]

4. Sequenciamento para uma máquina

Para realizar a análise de sequenciamento *Single Machine* foi necessário adotar uma estratégia para escolher uma operação dentre as 12 existentes no conjunto. Para tanto, buscou-se



identificar o gargalo produtivo. Segundo os princípios da Teoria das Restrições [Goldratt, 2012], o gargalo da produção é o posto que possui menor capacidade de produção, e é o ponto que deve ser explorado/elevado para que a capacidade do sistema possa aumentar.

É importante comentar que a identificação da operação gargalo não é tão intuitiva para um sistema de produção do tipo *Job Shop*. No sistema estudado, diferentes produtos possuem diferentes tempos de processamento em cada uma das operações. Para uma família de produtos, o posto de menor capacidade pode ser uma determinada operação, sendo que para outra família de produtos, outra operação passe a ser o posto menos produtivo. Com isso, o *mix* de produção faz como que o gargalo não permaneça fixo em um único lugar a linha.

Uma análise empírica indicou que a melhor operação para compor este estudo seria operação 1, a primeira operação do sistema produtivo (todos os produtos passam por esta operação). Esta operação representa a tarefa de maior tempo de processamento para as famílias P1 e P3, e consiste de uma máquina bastante requisitada no sistema produtivo atual.

Para a construção do modelo matemático de sequenciamento de produção, dois foram os parâmetros necessários: o tempo de processamento de cada tarefa na máquina e o tempo de setup dependente da sequência. Ambos os parâmetros foram determinados através de tomadas de tempo. Para o setup dependente, observou-se que o tempo médio de movimentação das facas da máquina é constante. Entre uma ordem e outra, bastava identificar o número de facas a serem ajustadas, e então multiplicar este valor pelo tempo médio de movimentação da faca. Já o tempo de processamento foi determinado com base na velocidade da máquina utilizado para cada tipo de material, no tamanho da ordem de produção, e no número de bobinas utilizadas.

Para realizar o estudo e compará-lo com a situação real, a empresa forneceu os dados de sequenciamento praticados no mês de Março (pedidos processados por dia, quantidades, grão, dimensão dos produtos, e sequência utilizada). Os dados foram tratados em Excel para que os parâmetros necessários (tempo de processamento na máquina, e setup entre tarefas) pudessem ser calculados. Foram analisadas 322 ordens de produção, estas distribuídas ao longo de 23 dias. Os dias foram analisados independentemente uns dos outros.

O modelo matemático utilizado foi o descrito na seção 3. O Visual Basic (VBA) do Excel foi utilizado para facilitar a escrita dos modelos (formato “.LP”) para futura resolução no software Gurobi versão 7.0.1. No total foram 23 arquivos em formato “.LP” gerados, todos de tamanhos diferentes, devido ao número de tarefas sequenciadas variarem dentre os dias.

5. Sequenciamento para um conjunto de máquinas

O objetivo desta segunda pesquisa foi tornar a análise do sequenciamento de produção mais próxima do real. Além de expandir a análise para o conjunto inteiro de operações, os dias de produção não foram tratados separadamente, mas sim em conjunto. Com isso, buscou-se melhorar a decisão quanto ao momento de colocação de um pedido na fábrica. Por exemplo, se é economicamente viável em termos de setup e processamento deixar para produzir um item mais tarde (outro dia), pois a data de entrega ainda nos permite tal escolha, isso poderá ser feito. Porém, se é economicamente viável produzir um item com certa antecedência, para economia de setup, isto também poderá ser feito. Essas são decisões que o modelo consegue tomar. Um item com vencimento próximo, entretanto, será obrigado a ser produzido na data certa, mesmo que isso torne a solução pior.

Os dados reais utilizados foram da produção do mês de agosto no período de 15/08 a 19/08 - 5 dias úteis. Os dados reais foram retirados do sistema SAP utilizado no ambiente de trabalho. O estudo foi realizado da seguinte forma:

- Uma lista com todos os pedidos “disponíveis” na fábrica para serem processados no dia 16/08 foi feita – pedidos recebidos no dia 15 ficaram disponíveis para processamento somente no dia seguinte.
- Faz-se a modelagem e a resolução do modelo matemático *Single Machine* sequenciando todas as tarefas de (1). As tarefas que precisam ser necessariamente processadas neste dia são forçadas a participar do sequenciamento (restrição inclusa no modelo).



- Analisando o instante de término de cada tarefa sequenciada em (2), verificam-se quais tarefas seriam processadas no mesmo dia, e quais ficariam para o dia seguinte.
- Executa-se a execução da heurística de “propagação” da solução da primeira operação para as demais operações. (próxima seção)
- No dia 17/06, faz-se uma nova lista de tarefas, incluindo as que não puderam ser processadas no dia anterior, somado às novas tarefas que “chegaram” ao sistema.
- Executa-se a resolução do modelo matemático *Single Machine* sequenciando todas as tarefas de (4). As tarefas que precisam ser necessariamente processadas neste dia são forçadas a participar do sequenciamento (restrição inclusa no modelo).
- Analisando o instante de término de cada tarefa sequenciada em (6), verificam-se quais tarefas seriam processadas no mesmo dia, e quais ficariam para o dia seguinte.
- Os dados do dia anterior (instante em que as máquinas terminarão de processar as tarefas do dia anterior) são carregados na heurística de “propagação” da solução do dia atual. (próxima seção)
- Continuar até o fim do período de análise.

Para a realização das etapas citadas, foi necessário obter o tempo de processamento das tarefas em cada operação, bem como o tempo de setup dependente da sequência em cada operação. O tempo de processamento da primeira operação já era conhecido como descrito na seção 5. Os demais tempos de processamento foram determinados com base em dados de um estudo de cronoanálise fornecido pela empresa. Os tempos de setup foram mensurados fisicamente.

5.1 Heurística de “Propagação” da solução

A heurística criada consiste em fazer a “explosão” dos resultados alcançados no sequenciamento *Single Machine* para as demais operações. A ideia é propagar a resolução encontrada na primeira operação (a sequência obtida pelo modelo exato) para as demais operações, e assim analisar os resultados para verificar se a estratégia utilizada foi eficiente. As tarefas seguirão cada uma seu fluxo no sistema, até o final do processamento. Às vezes, não necessariamente a sequência da primeira operação será a mesma sequência da última operação, pois algumas tarefas com menor tempo de processamento podem “passar na frente” de outras, quando elas estão sendo processadas em paralelo (lembrando que as tarefas não passam pelas mesmas operações).

É importante comentar que o sistema real possui certas condições de funcionamento atual, que buscaram ser incorporadas à “explosão” do sequenciamento. Desta forma, busca-se tornar a comparação do estado atual vs. proposta a mais justa e coerente possível. Foram consideradas as seguintes condições:

- Após chegar ao sistema, o pedido levará um dia para ficar disponível para processamento. Por exemplo, se um pedido for feito no dia 15/08, ele demorará um dia para ser processado (impressão, separação do material pelo pessoal de logística, comunicação interna).
- Após passar pela última operação, o pedido levará um dia para ser faturado. Por exemplo, ao passar pela última operação dia 17/08, o pedido demorará um dia para ser processado (apontamento de produção, consolidação de ordens, faturamento, chegada da transportadora).
- As máquinas disponíveis atualmente na fábrica não estão 100% operantes, pois há um quadro reduzido de funcionários de forma que:
 - As operações 2 e 3 são processadas pelos mesmos funcionários. Se a operação 2 está operante, a operação 3 está parada, e vice-versa.
 - As operações 4 e 5 são também processadas pelos mesmos funcionários. Se uma operação está funcionando, a outra está obrigatoriamente ociosa.



- Para a produção do produto P4, existe um período de espera entre as operações 9 e 11, que é um período de cura natural. Portanto, se um produto P4 passou pela operação 9 em um determinado dia de produção, ela somente irá ser processada na operação 11 no próximo dia.
- O período de trabalho é das 08h00min às 12h00min, e das 13h12min às 18h00min. No total, são 528 minutos disponíveis. Considerou-se que há uma “perda” do tempo útil de 20% do tempo, reduzindo a capacidade útil do dia para 423 minutos. Esta perda foi um valor estimado pela equipe que realizou a cronograma na empresa. Ele se deve principalmente: ao grande número de tarefas manuais hoje necessárias; à falta de padronização na execução das micro-tarefas realizadas no posto de trabalho; e à grande movimentação física de materiais de uma estação à outra.
- As operações 5-6-10, 5-7-8-10 e 5-9-11 funcionam como uma linha de produção. O lote de produtos não precisa esperar ser totalmente processado na operação 5, por exemplo, para começar a ser processado na operação 6. Estas condições foram contempladas no gráfico de Gantt.

Os dados foram inseridos e manipulados em planilhas de Excel. Com o auxílio do *Visual Basic (VBA)*, os modelos de programação foram gerados e salvos via extensão “.LP”. Os arquivos “.LP” foram por sua vez resolvidos através da plataforma interativa (*Interactive Shell*) do *software Gurobi 7.0.1*. Os resultados foram novamente inseridos na planilha de *Excel*. A heurística de “propagação” da solução foi implementada também via em linguagem de programação *Visual Basic for Applications (VBA)*.

6. Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para os dois cenários discutidos anteriormente. Os resultados serão também analisados e discutidos. Os testes computacionais foram realizados em um computador com processador Intel® Core™ i5 - 4260 CPU @1.40 GHz 2.00 GHz, 4GB de RAM.

No primeiro estudo, foram solucionados 23 modelos referentes ao atendimento de 322 ordem de produção no mês de março de 2016. Os modelos foram resolvidos pelo *software Gurobi 7.0.1*, atingindo o resultado ótimo de forma instantânea. No mês de março de 2016, foram registradas 123 horas dedicadas à produção dos itens. Destas 123 horas, 11 foram dedicadas à realização do setup na operação 1. O estudo realizado mostra que é possível reduzir o tempo de setup de 11 horas para aproximadamente 8 horas (redução de 3horas20min), que representa uma redução de 29,4% em tempo de Setup Total.

Além disso, é possível verificar que ao invés de spender 123 horas para a fabricação dos 322 itens, é possível dedicar 119 horas, que consiste em uma melhoria de 2,7% no *Makespan*.

Cenário	Setup	Makespan
Original (seg)	40.873	442.018
Otimizado (seg)	28.872	430.017
Redução (%)	29,4%	2,7%

Tabela 1 – Redução de Setup e Makespan.

Fonte: A Autora (2017)



Data	Número de Tarefas	Tempo de Processamento (seg)	Setup Original (seg)	Makespan Original (seg)	Setup Otimizado (seg)	Makespan Otimizado (seg)	Diferença Absoluta Setup (seg)	Redução Percentual do Setup (%)	Redução Percentual do Makespan (%)
01/mar	30	32.014	1.800	33.814	936	32.950	864	48,0%	2,6%
02/mar	6	4.688	432	5.120	360	5.048	72	16,7%	1,4%
03/mar	21	20.637	2.232	22.869	1.296	21.933	936	41,9%	4,1%
04/mar	12	10.086	1.944	12.030	1.728	11.814	216	11,1%	1,8%
07/mar	17	13.851	1.584	15.435	1.080	14.931	504	31,8%	3,3%
08/mar	17	15.207	3.672	18.879	3.384	18.591	288	7,8%	1,5%
09/mar	14	13.743	1.584	15.327	1.008	14.751	576	36,4%	3,8%
10/mar	20	32.014	4.248	36.262	2.808	34.822	1.440	33,9%	4,0%
11/mar	15	32.014	1.440	33.454	1.224	33.238	216	15,0%	0,6%
12/mar	17	14.530	1.296	15.826	864	15.394	432	33,3%	2,7%
14/mar	16	14.364	2.160	16.524	1.800	16.164	360	16,7%	2,2%
15/mar	15	14.505	936	15.441	576	15.081	360	38,5%	2,3%
16/mar	13	13.336	1.152	14.488	1.008	14.344	144	12,5%	1,0%
17/mar	21	20.086	5.112	25.198	2.952	23.038	2.160	42,3%	8,6%
18/mar	6	19.973	648	20.621	576	20.549	72	11,1%	0,3%
21/mar	7	6.828	792	7.620	648	7.476	144	18,2%	1,9%
22/mar	9	14.378	792	15.170	792	15.170	0	0,0%	0,0%
23/mar	12	11.619	936	12.555	648	12.267	288	30,8%	2,3%
24/mar	15	17.224	2.064	22.150	1.152	21.238	912	44,2%	4,1%
28/mar	10	19.734	864	20.598	648	20.382	216	25,0%	1,0%
29/mar	11	15.639	1.008	16.647	936	16.575	72	7,1%	0,4%
30/mar	9	17.210	1.800	19.010	1.440	18.650	360	20,0%	1,9%
31/mar	9	27.465	2.376	29.841	2.304	29.769	72	3,0%	0,2%
Total	322	401.145	40.872	444.879	30.168	434.175	10.704	-	-
Horas	-	111	11	124	8	121	3	-	-

Tabela 2 – Resultado Geral do Estudo de Sequenciamento em uma máquina

Fonte: A Autora (2017)

É possível observar que quanto maior for o setup total registrado em um determinado dia, maior também é a possibilidade de melhorar este resultado através da utilização do modelo exato. É interessante observar que na operação 1, foram registradas 3h30min de hora extra para o mês de referência. Com os resultados obtidos na melhora de sequenciamento (redução de 3horas20min de Setup), a necessidade de realizar horas extras se reduz a praticamente zero. O impacto econômico desta redução não pode ser estimado devido à insuficiência de dados.

No segundo estudo foram analisados cinco dias corridos de produção. Ao longo deste período, foram sequenciadas no total de 173 tarefas. Destas, 112 puderam ser processadas pelo menos pela operação 1 dentro do período supracitado. Na tabela 3, pode-se observar qual é o número de tarefas que “chega” à fábrica em cada um dos dias analisados.

Dia	Tarefas Dia Anterior	Tarefas Dia Atual	Total Tarefas no Dia	Tarefas Atendidas	Tarefas na Fila dia Seguinte
1	0	33	33	21	12
2	12	30	42	28	14
3	14	33	47	19	28
4	28	36	64	26	38
5	38	41	79	18	61
Total	-	173	-	112	-

Tabela 3 – Tabela Resumo do Estudo de Sequenciamento para um conjunto de máquinas

Fonte: A Autora (2017)

É possível observar que o número de tarefas que chega por dia (“Tarefas Dia Atual”), é maior que a capacidade da fábrica de atendê-las (“Tarefas Atendidas”). Dessa maneira, acontece um acúmulo de pedidos, evidenciando que neste período ocorreu um pico de demanda. O número total de tarefas “sequenciadas” no modelo (“Total Tarefas”) aumentou gradativamente ao longo da semana. Pode-se observar que no primeiro modelo de otimização linear (dia 1) havia 33 tarefas a serem sequenciadas, ao ponto que no último dia (dia 5), foram 79 tarefas sequenciadas.

O aumento do número de tarefas em um modelo de sequenciamento da produção impacta diretamente no tempo de resolução despendido na busca pela solução ótima. O tempo de resolução de um modelo com 33 tarefas é consideravelmente menor que o tempo de resolução de um modelo com 80 tarefas, devido à natureza combinatória dos dados, conforme previamente comentado.

A tabela 4 traz os valores registrados para a resolução dos cinco modelos mencionados. Somente o primeiro modelo atingiu o ótimo, com 1076 segundos. Os demais modelos não



atingiram o ótimo, porém chegaram bem perto disso, com o valor do Gap reportado pelo Solver ficando com valor abaixo de 1%. Foi possível obter a primeira solução factível para cada um dos problemas de maneira bem rápida, e a convergência para um valor estável também se dá de maneira rápida (em torno de 20 minutos). Após este período, a solução estabiliza, e mais nenhuma melhora é registrada no valor da função objetivo. Os modelos foram deixados rodando por mais de 24 horas, e o solver não foi capaz de encontrar a solução ótima. Estabeleceu-se um critério de parada para exportar a solução incumbente, de que se o Gap não se alterar por mais de 60 minutos consecutivos, a solução é interrompida e os valores das variáveis são exportados.

Modelo	# Var Inteiras	#Var Contínuas	Valor da F.O. (seg)	Atingiu o Ótimo?	Gap (%)	Primeira Solução Factível (seg)	Critério de Parada
1	1.122	33	35.302	Sim	0%	1	ótimo (1076)
2	1.806	42	36.841	Não	0,78%	15	60 min sem alteração
3	2.256	47	60.895	Não	0,83%	57	60 min sem alteração
4	4.160	64	74.791	Não	0,87%	1	60 min sem alteração
5	6.320	79	109.444	Não	0,92%	8	60 min sem alteração

Tabela 4 – Tabela Resumo com os Valores de Resolução

Fonte: A Autora (2017)

Com a solução obtida para uma operação o sequenciamento obtido foi “propagado” na cadeia com a Heurística de Propagação criada. Os tempos de início e término de cada tarefa foram calculados e armazenados em uma tabela. Para melhor visualizar os resultados foram criados Gráficos de *Gantt* das tarefas sequenciadas. (Apêndice 1).

Com o intuito de avaliar a eficiência do método utilizado, buscou-se analisar os resultados obtidos confrontando-os com os resultados reais. Foi possível obter os dados reais de processamento de 82 das 112 tarefas sequenciadas (73% de cobertura). Dois aspectos foram comparados: o Lead Time de Produção, o número de tarefas atrasadas.

Em relação ao Lead Time, foi necessário fazer uma adaptação nos dados calculados no estudo pois os dados fornecidos pela empresa eram em dias. A tabela 5 a seguir apresenta os valores médios de Lead Time de todas as tarefas, segmentados por família de produto. Houve uma redução substancial do LT das tarefas sequenciadas, mesmo na unidade dias, que ficou registrada em até 85%. É interessante comentar que devido ao fato de não existir atualmente uma ferramenta de sequenciamento devidamente implantada na fábrica, o LT de produção atual além de pouco conhecido, é bastante variável (desvio padrão elevado). Nos dados reais, o maior LT registrado foi de 8 dias para um pedido de produtos tipo P2. Já no estudo feito, o maior LT registrado foi de 3 dias para produtos do tipo P4.

Produto	Real (dias)	Proposta (dias)	Redução
P1	1,1	0,5	53%
P2	1,9	0,3	85%
P3	0	0	0%
P4	3	1,8	40%

Tabela 5 – Tabela de Comparação Lead Time Médio de Produção – Real vs. Proposta

Fonte: A Autora (2017)

Com relação ao número de tarefas atrasadas, os números mostram uma melhora no nível de serviço da fábrica. Das 82 tarefas analisadas, 30 foram atendidas com atraso no sistema real, configurando um atendimento de 63%. Já no estudo proposto, o número de tarefas atrasadas cai para apenas 9, configurando um atendimento de 89%.

8. Conclusão e Trabalhos Futuros

O objetivo deste trabalho consistiu em testar e verificar a eficiência de modelos exatos em um ambiente real de produção. O ambiente de produção analisado está dentre os mais complexos existentes, pois são várias as peculiaridades do sistema analisado, tais como a não existência de lote mínimo nem lote econômico de produção, ao número reduzido de pessoas na



fábrica, à existência de uma vasta quantidade de produtos, e ao sistema de liberação de ordens do tipo *Make-to-Stock*.

Os resultados obtidos mostram que uma melhora na gestão do planejamento e controle de produção trará muitos benefícios à empresa. Foi visto que é possível reduzir consideravelmente o Lead Time de Produção dos produtos da fábrica ao se determinar uma ordem de produção a ser seguida por todos os postos operativos, reduzindo assim a fila de espera entre os processos. Com isso, a empresa ganha maior conhecimento sobre o real tempo de fabricação de seus itens, podendo assim planejar com maior exatidão sua capacidade, e se certificando que as datas de entrega prometidas aos clientes são possíveis de serem cumpridas.

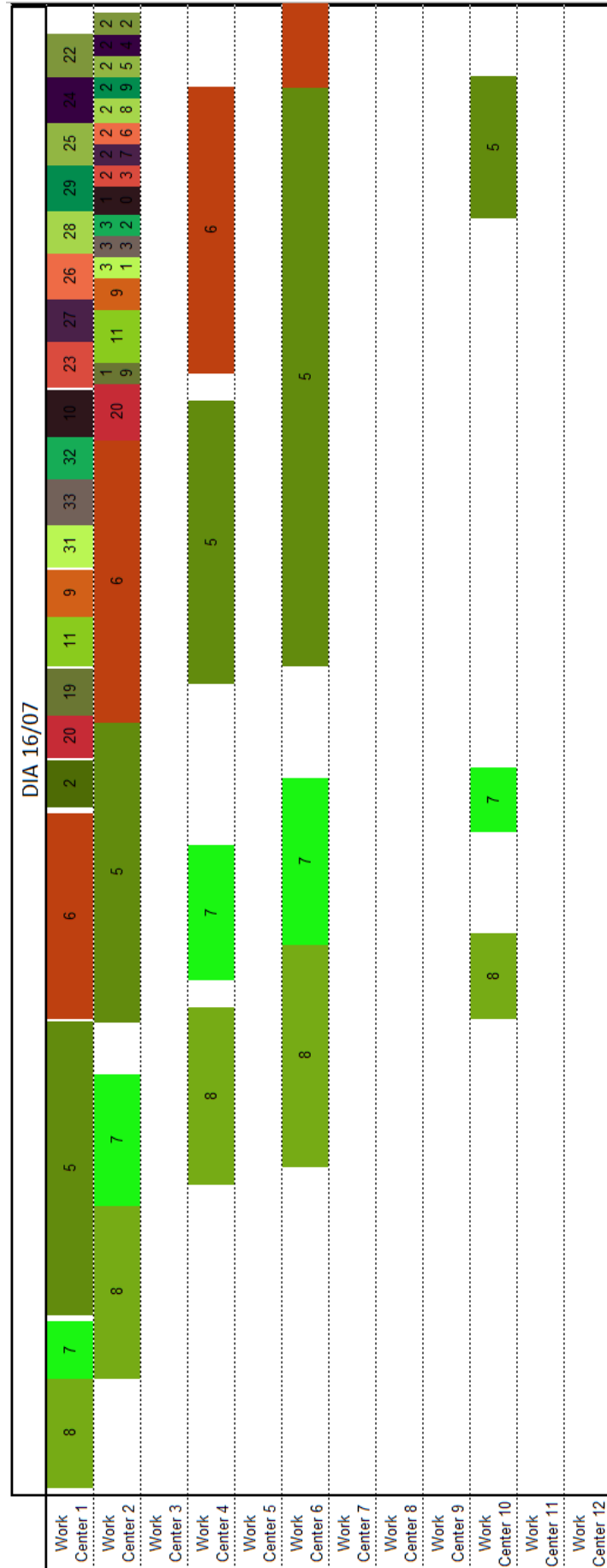
Como ideias para trabalhos futuros, sugere-se que a modelagem completa do sequenciamento de produção para o ambiente *Job Shop* seja realizada. Sabe-se que o ótimo ainda não foi alcançado, e que para isso, deve-se lançar mão de modelos mais complexos de programação linear e inteira.

Referências

- Arenales, M. Armentano, V. Morabito, R. (2015). Pesquisa Operacional. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Goldratt, E. Cox, J. (2012). The goal: a process of ongoing improvement. North River Press. Terceira Edição.
- Howell, G. A. (1999). What is lean construction-1999? Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction, University of California, Berkeley, CA.
- Hu, Q. Mason, R. Williams, S. Found, P. (2015). Lean implementation within SME's: A literature review. Journal of Manufacturing Technology Management. Vol 26 pg7.
- Liker, J. K. Wu, Y. C. (2000) Japanese automakers, US suppliers and supply-chain superiority. Sloan Management Review. Vol42 No.1 pg 81-93.
- Lustosa, L. Mesquita, M. (2011). Planejamento e Controle da Produção. Editora Elsevier. Rio de Janeiro. 1ª edição.
- Ohno, T. (1997). O sistema Toyota de Produção – além da produção em larga escala. Porto Alegre: Artes Médicas.
- Pinedo, M. L. (2012). Scheduling. Theory, Algorithms, and Systems. New York: Springer.
- Pires, M. Stringari, M. (2012). A implantação do Lean Manufacturing em Pequenas Empresas. 2ª Semana Internacional das Engenharias da Fabor. Horizontina. Rio Grande do Sul.
- Portilho, L. (2007). Aplicação do problema de Job-Shop Scheduling em Aciarias. Monografia para graduação em Engenharia de Produção. Juiz de Fora – Minas Gerais.
- Silva, N. C. O. (2016). Aplicação de Simulação para Análise do Makespan devido à inserção e/ou desistências de tarefas no problemas de sequenciamento de produção em uma máquina. Dissertação de Mestrado em Métodos Numéricos. Universidade Federal do Paraná.
- Taj, S. Morosan, C. (2011). The impact of lean operations on the Chinese manufacturing performance. Journal of Manufacturing Technology and Management, Vol. 22 No. 2 p2 223-240.
- Paranitharan, K. P. Begam, M. S., Abuthakeer, S. S. (2011) Redesigning an Automotive Assembly Line Through Lean Strategy. International Journal of Lean Thinking, Vol. 2 No. 2 pp 1-14.
- Womack, J. T. Jones, D. T., Ross, D. (1990). The machine that changed the world: the story of Lean Production. Free Press.

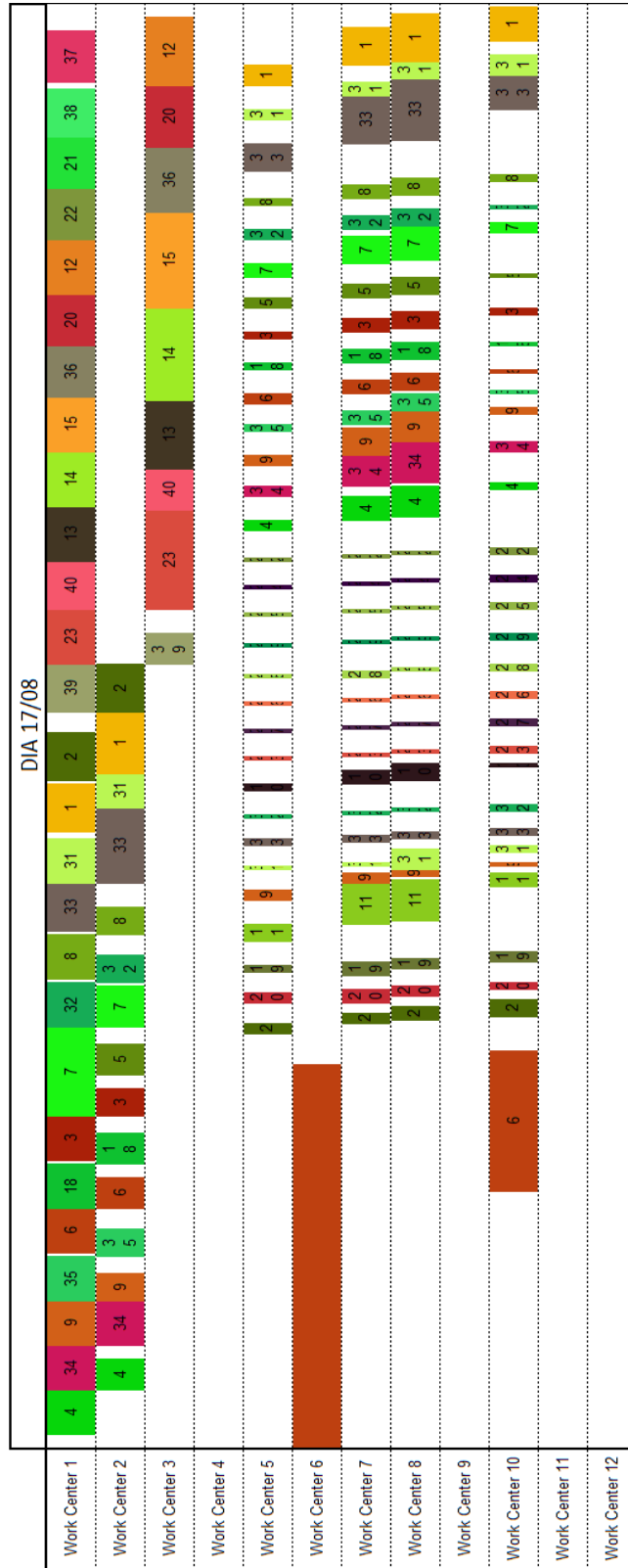


Apêndices - I



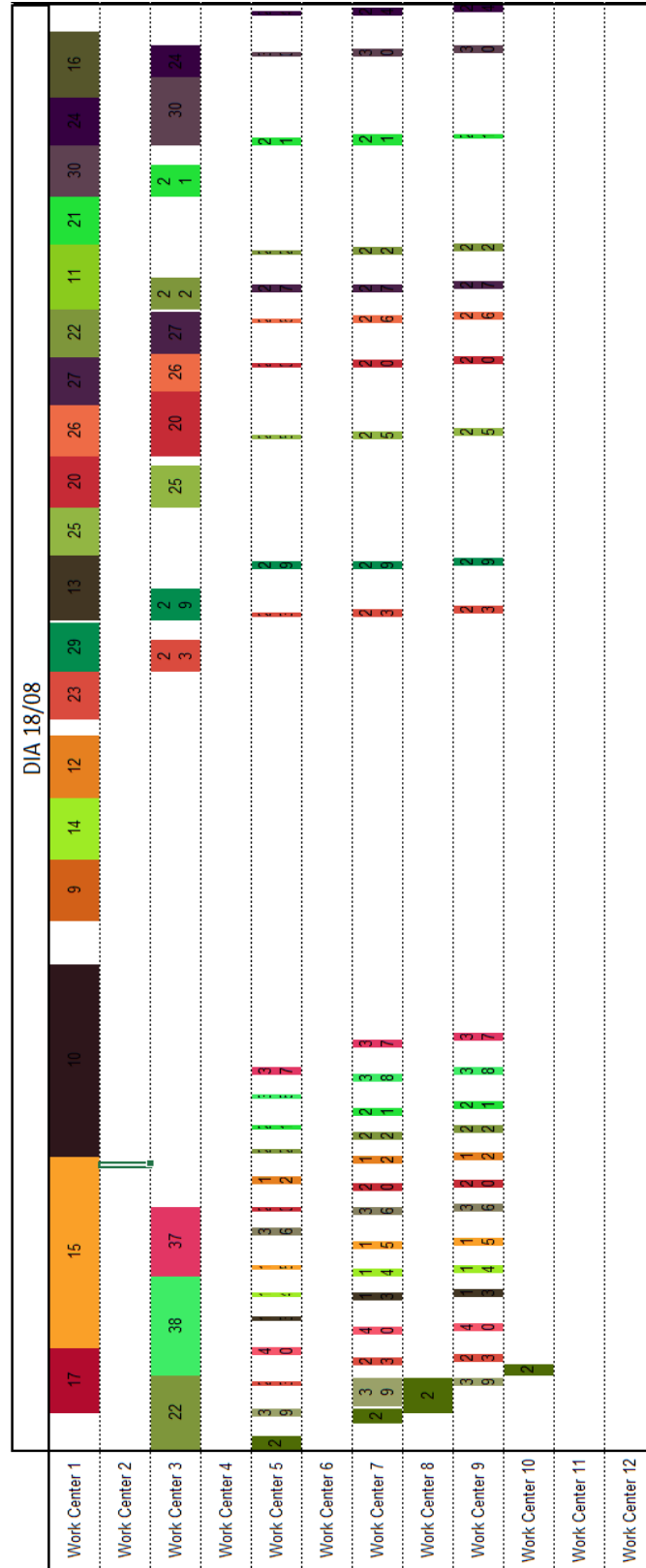


Apêndices - II



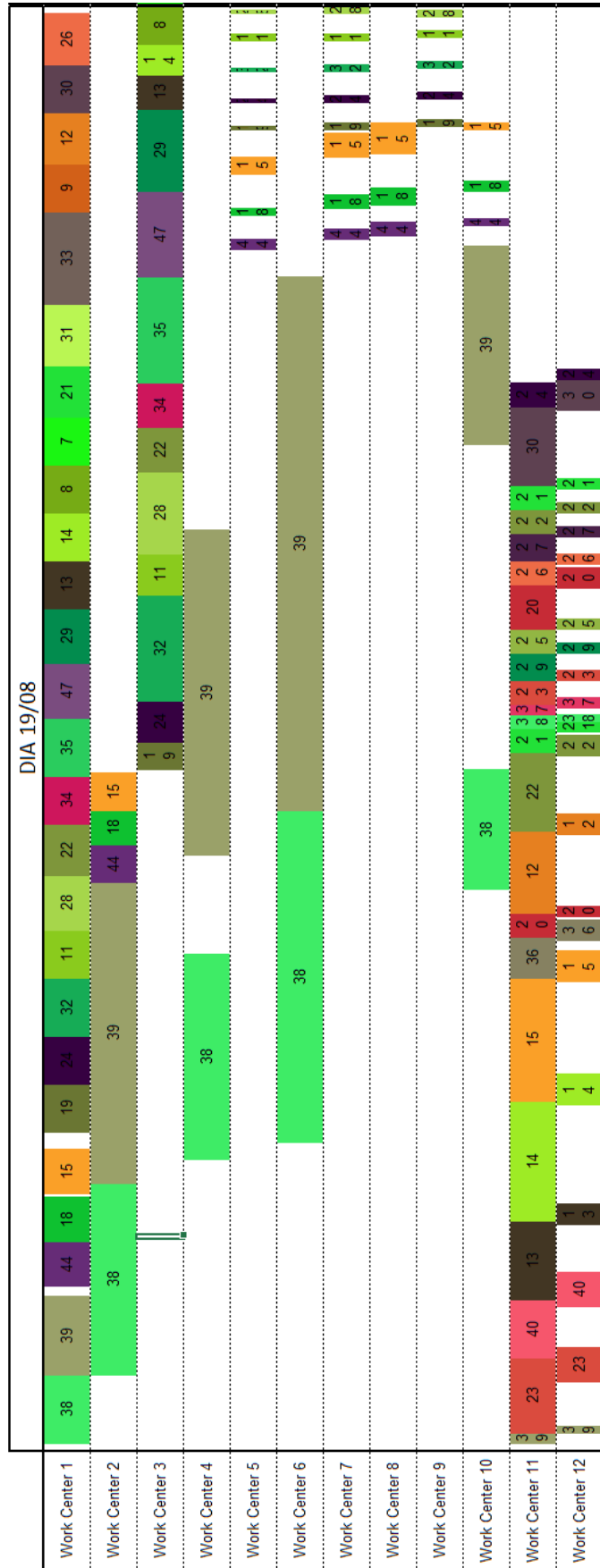


Apêndices - III



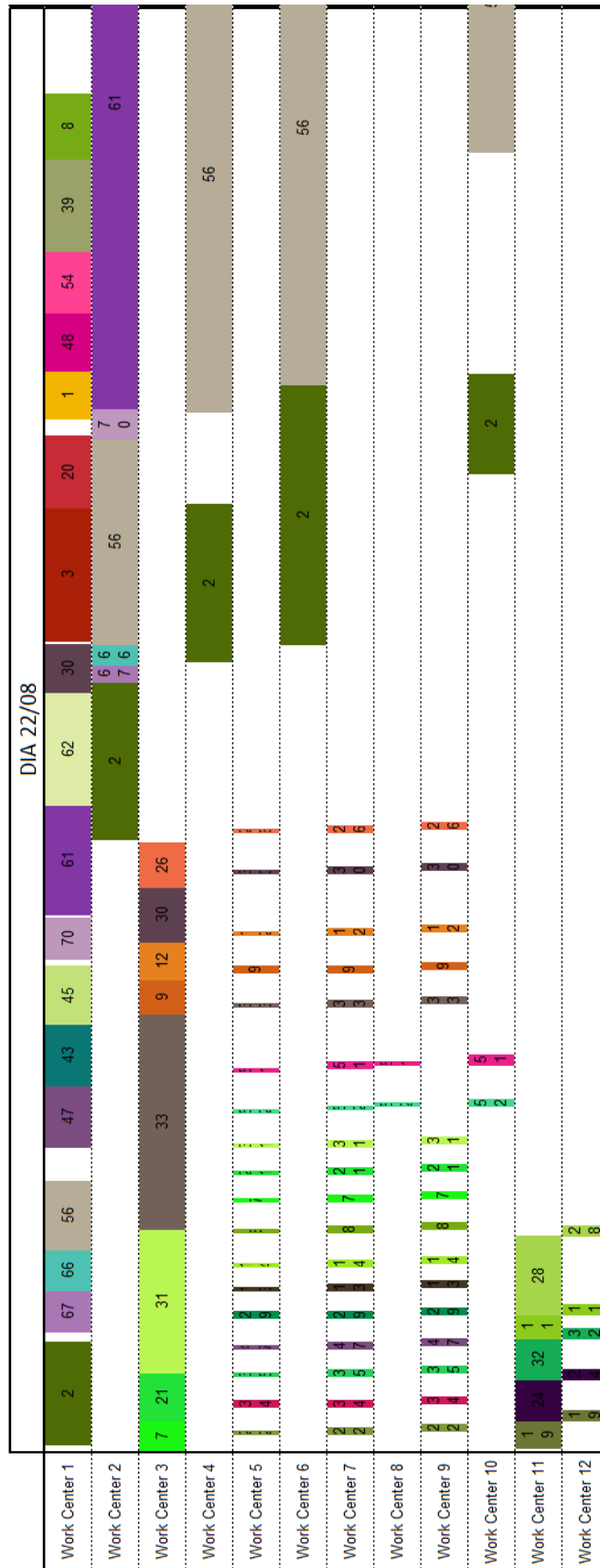


Apêndices - IV



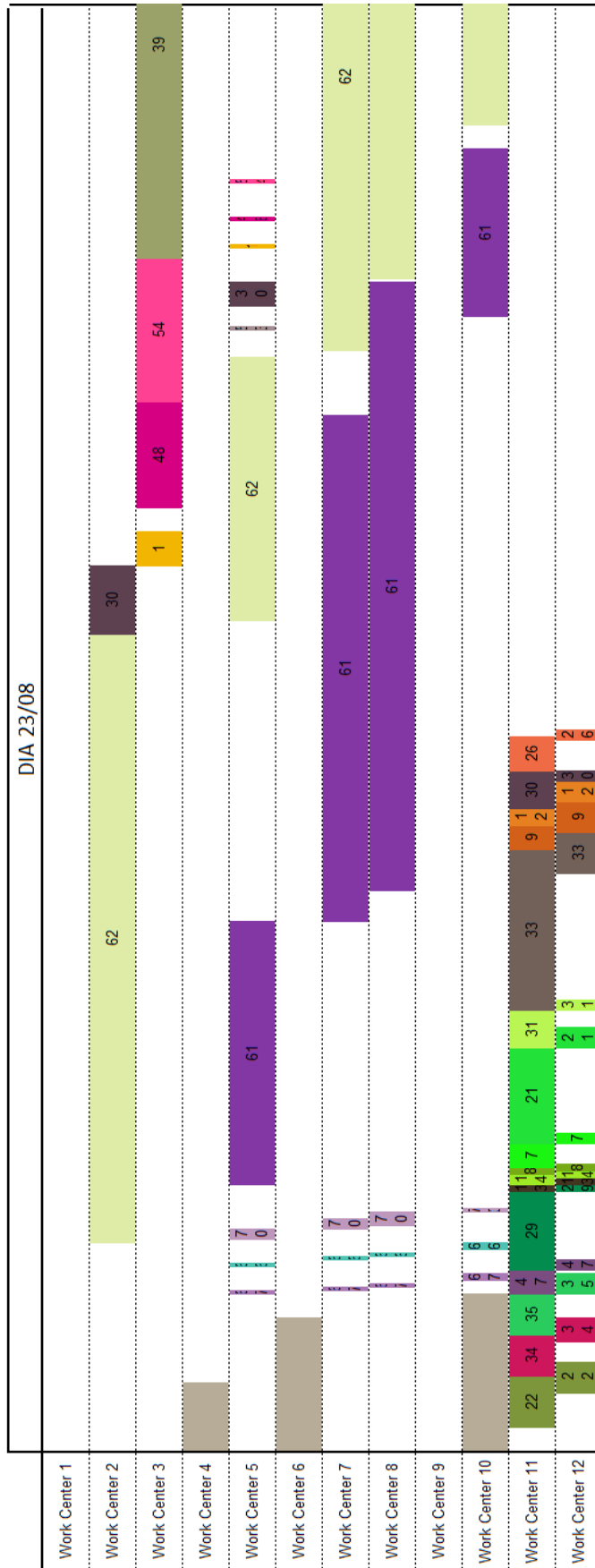


Apêndices - V



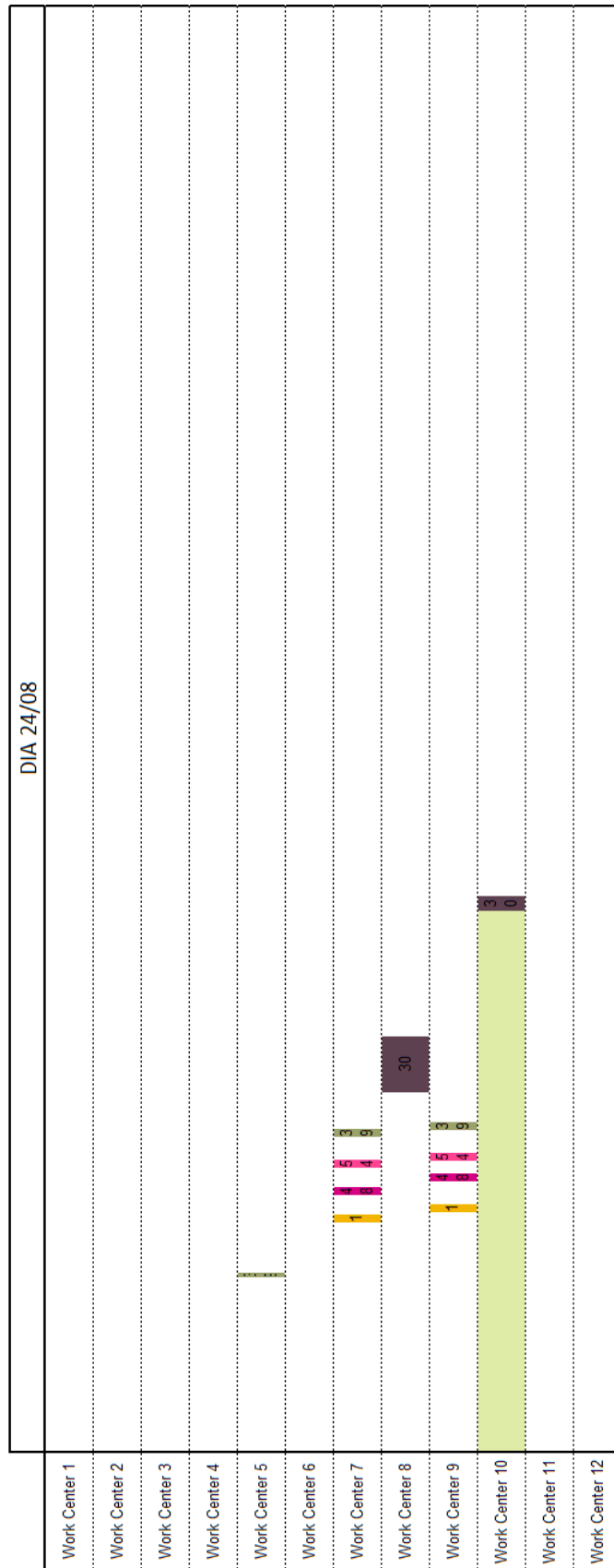


Apêndices - VI





Apêndices - VII





Apêndices - VIII

