

PAULO ALBERTO MISFELDT SCHMIDT

**Sequenciamento da produção em uma área de tratamento de
superfície na indústria aeronáutica**

Paulo Alberto Misfeldt Schmidt

**Sequenciamento da produção em uma área de tratamento de
superfície na indústria aeronáutica**

Dissertação apresentada a Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche
Coorientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

Guaratinguetá - SP
2019

S353s Schmidt, Paulo Alberto Misfeldt
Sequenciamento da produção em uma área de tratamento de superfície na indústria aeronáutica / Paulo Alberto Misfeldt Schmidt – Guaratinguetá, 2019.
53 f: il.
Bibliografia: f. 43-45

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Dale Luche
Coorientador: Prof. Dr. Aneirson Francisco da Silva

1. Superfícies (Tecnologia) 2. Indústria aeroespacial. 3. Metais - Oxidação anódica I. Título.

CDU 629.733(043)

PAULO ALBERTO MISFELDT SCHMIDT

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO: MESTRADO PROFISSIONAL**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Jorge Muniz Junior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ROBERTO DALE-LUCHE
Orientador/UNESP/FEG


Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
UNESP/FEG


Prof. Dr. FABRÍCIO MACIEL GOMES
EEL/USP

DADOS CURRICULARES

PAULO ALBERTO MISFELDT SCHMIDT

NASCIMENTO	02.12.1985 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Alberto Schmidt Osnilda Misfeldt Schmidt
2007/2011	Engenharia Aeronáutica UNITAU – Universidade de Taubaté
2012/2015	MBA em Gestão Industrial FGV – Fundação Getúlio Vargas

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha saúde, minha família e meus amigos.

Aos meus pais *Alberto Schmidt e Osnilda Misfeldt Schmidt*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. José Roberto Dale Luche* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

A empresa representada pelas pessoas do Sr. Rogério Gimenez e Mário Coelho, pelo apoio e pela confiança no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento e também para todos os professores do programa que não mediram esforços para auxiliar nas dificuldades, pelo aprendizado, crescimento pessoal e profissional.

"A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê."

Arthur Schopenhauer

RESUMO

A programação da produção é uma questão muito importante em qualquer empresa de manufatura. Neste trabalho, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista para programar a produção de uma área de tratamento de superfície em uma empresa do setor aeronáutico. Uma breve descrição dos processos envolvidos é apresentada. Otimizar o planejamento diário da área de tratamento de superfície não é uma atividade simples, diversas restrições devem ser consideradas no modelo, como o tipo da liga de matéria-prima, a capacidade dos tanques e das gancheiras. Os resultados de planos diários de produção obtidos pelo modelo possuem a combinação ótima de produtos a serem fabricados utilizando os recursos disponíveis em sua capacidade máxima e por consequência aumentando a produtividade da área. Questões técnicas dos processos foram levadas em consideração como restrições uma vez que os produtos foram homologados junto aos fabricantes das aeronaves. Foram realizados experimentos com trinta instâncias reais e outras trinta com demanda acumulada. Os resultados alcançados pelo modelo proposto foram muito superiores quando comparados à prática da empresa, para se ter uma ideia, no período em que foi registrada a menor diferença, o modelo mostra que é possível produzir mais que o dobro do que a empresa produziu com os mesmos recursos, evidenciando que há capacidade produtiva disponível para absorver novos produtos junto aos clientes atuais e futuros.

PALAVRAS-CHAVE: Programação da produção. Dimensionamento de lotes. Problema da mochila. Tratamento de superfície. Anodização crômica.

ABSTRACT

Production scheduling is a very important issue in any manufacturing company. In this work, a mixed integer linear programming model was developed to program the production of a surface treatment area in an aeronautical company. A brief description of the processes involved is presented. Optimizing the daily planning of the surface treatment area is not a simple activity, several constraints must be considered in the model, such as the type of raw material alloy, the capacity of the tanks and the glaciers. The results of daily production plans obtained by the model have the optimal combination of products to be manufactured using available resources at their maximum capacity and consequently increasing the area productivity. Technical issues of the processes were taken into consideration as restrictions since the products were homologated with the aircraft manufacturers. Experiments are performed with thirty real instances and another thirty with accumulated demand. The results achieved by the proposed model were much higher when compared to the company's practice, so as to have an idea, in the period when the smallest difference was registered, the model shows that it is possible to produce more than double what the company produced with same resources, showing that there is production capacity available to absorb new products with current and future customers.

KEYWORDS: Scheduling. Lot sizing. knapsack problem. Surface treatment. Chromic anodizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema metodológico do projeto	16
Figura 2 - Passos do método <i>Branch and Bound</i>	20
Figura 3 - Resolução inicial de um PLI.....	20
Figura 4 - Ramificação em Subproblemas 1 e 2.....	21
Figura 5 - Espaço de soluções de S1 e S2	21
Figura 6 - Ramificação de S2 em subproblemas S3 e S4.....	22
Figura 7 - Espaço de soluções de S3 e S4	22
Figura 8 - Ramificação de S3 em Subproblemas S5 e S6	23
Figura 9 - Espaço de soluções de S5 e S6	23
Figura 10 - Entrada do processo de tratamento de superfície.....	30
Figura 11 - Gancheiras com produtos montados, 8 peças (a) e 3 peças (b)	31
Figura 12 - Gancheiras encaixadas no barramento do tanque de anodização crômica	32
Figura 13 - Fluxograma com as etapas de processo na área de tratamento superficial	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados bibliométricos	14
Tabela 2 - Quantidade máxima de gancheiras com o produto no tanque B1	37
Tabela 3 - Quantidade máxima de gancheiras com o produto no tanque B2	38
Tabela 4 - Quantidade máxima do item na gancheira	39
Tabela 5 - Grupo de matéria prima à qual pertence o item.....	40
Tabela 6 - Desempenho do modelo vs realizado pela empresa em cada dia de produção.....	41
Tabela 7 – Resultados com instâncias de demandas acumuladas.....	43

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	13
1.3	MÉTODO DE PESQUISA.....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1	PROGRAMAÇÃO LINEAR.....	18
2.2	PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA.....	19
2.3	DIMENSIONAMENTO DE LOTES E SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO	24
2.3.1	Tipos de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção	25
2.3.2	Problema de dimensionamento de lotes não capacitado	25
2.3.3	Problema de dimensionamento de lotes capacitado	27
2.3.4	Problema discreto de dimensionamento e programação de lotes	28
3	DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA	30
3.1	DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL	30
3.2	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	33
4	RESULTADOS	37
4.1	EXPERIMENTOS COM DEMANDA REAL	40
4.2	EXPERIMENTOS COM INCREMENTO NA DEMANDA	42
5	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	45
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	46
5.4	RELATO DO SPONSOR.....	46
	REFERÊNCIAS.....	47
	APÊNDICE A – TABELA COM INFORMAÇÕES PARA ELABORAÇÃO DO MODELO.....	51

1 INTRODUÇÃO

A indústria aeroespacial está em constante expansão no mundo. No Brasil foi apenas nas décadas de 1960 e 1970 que o setor se consolidou. Em 1969, a Empresa Brasileira de Aeronáutica (Embraer) foi formada com o compromisso de implementar a indústria aeronáutica no país (GOMES, 2012). Foi no ano de 1994 que a Embraer foi privatizada e a produção do setor aeroespacial brasileiro deixou de ser responsabilidade do governo brasileiro. De acordo com Gomes *et al.* (2017), o envolvimento do BNDS com indústrias do ramo tem aumentado desde a privatização da Embraer. No ano de 2017, o Market Share do segmento aeronáutico mundial das empresas brasileiras cresceu para 13% (EMBRAER, 2017). Esse aumento indica um crescimento do setor aeroespacial brasileiro, tornando-o cada vez mais importante para a economia do país. De acordo com a AIAB (2018), o Setor Aeroespacial Brasileiro em 2016 foi responsável por gerar cerca de 7,4 bilhões de dólares, 22.100 empregos e exportar um total de 6,5 bilhões de dólares.

A indústria aeroespacial tem como característica mais marcante o alto grau de tecnologia envolvida em seus processos, produzindo bens de alto valor agregado. Estas empresas podem ser classificadas em três camadas (*tier*) e as *Original Equipment Manufacturers* (OEM). As empresas OEM são responsáveis pelas montagens finais dos produtos, como a Boeing e a Embraer. As empresas *tier 1* fabricam os principais componentes para as empresas OEM, já as empresas do *tier 2* fornecem componentes e subsistemas para empresas do *tier 1*, enquanto as empresas de *tier 3* fornecem softwares, pequenos componentes, partes e peças e por fim as empresas *tier 4* fornecem matéria-prima para as outras empresas.

Este trabalho trata da modelagem e otimização de um problema de planejamento e controle da produção na área de tratamento de superfície (galvanoplastia) da Liebherr Aerospace Brasil, empresa localizada na região brasileira do Vale do Paraíba/SP. A empresa é *tier 1*, produzindo sistemas aeronáuticos como trens de pouso, sistemas de pressurização, controles de voo e aviônica. A unidade já produziu mais de 400 produtos diferentes em sua área de galvanoplastia.

A empresa trabalha com pedidos em carteira, o que significa que todos os produtos disponíveis para tratamento na área de galvanoplastia possuem pedidos confirmados pelo cliente. Para o planejamento da produção ocorrer, é necessário considerar uma variedade de requisitos, sendo eles o tipo de liga da matéria-prima e o processo de tratamento superficial em si. A empresa possui dois tanques de anodização crômica com capacidades diferentes e para cada um, poderá realizar até 40 *starts* (lotes) em um único dia.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Sendo o tanque de anodização crômica o gargalo atual no sistema produtivo da galvanoplastia, este trabalho buscou responder à seguinte questão de pesquisa: “Qual a melhor combinação de produtos e respectivas quantidades a ser feita em cada lote/tanque, respeitando todas as restrições técnicas e operacionais e, desta forma, obter a máxima produtividade?”.

1.2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

O tratamento de superfície na indústria aeronáutica gera altos custos por consumir grandes quantidades de energia elétrica e ter controles rígidos no processo. Melhorias de eficiência operacional impactam no aspecto econômico uma vez que os recursos serão utilizados em sua capacidade total, processando uma maior quantidade de peças a cada ciclo. O impacto ambiental também pode ser diminuído ao se otimizar a utilização dos recursos de produção.

Este trabalho tem como objetivo geral propor uma ferramenta computacional de otimização para a programação da produção na área de tratamento de superfície em sistemas aeronáuticos da Liebherr como trens de pouso, sistema de pressurização, controles de vôo e aviônica.

Como objetivos específicos, teve-se:

- desenvolver um modelo de programação linear inteira mista (PLI Mista) para obter a maior eficiência na programação da produção nos tanques de anodização crômica;
- Implementar o modelo algébrico na IDE GAMS com o *solver* CPLEX 12;
- Utilizando instâncias reais da empresa, comparar a produtividade do tanque quando programados pelo pessoal da empresa *versus* a programação sugerida pela ferramenta proposta neste trabalho;
- Realizar experimentos com demanda acumulada para evidenciar os benefícios da ferramenta.

Tais problemas são encontrados na literatura de “dimensionamento de lotes” (*lot-sizing problems*) (STADTLER & SAHLIN (2013); HELLION (2013)), sendo que, de acordo com a teoria da complexidade computacional, a maioria dos problemas desta classe são NP-Difíceis (GOLDREICH, 2008), combinado com conceitos do “problema da mochila” (*knapsack*

problem) que de acordo com Zhang *et al* (2017), problemas da mochila também podem ser classificados em termos de complexidade computacional como NP-Difíceis.

Uma pesquisa bibliométrica na base de dados *Scopus* foi realizada para se ter maior conhecimento a respeito de trabalhos que possuem aderência aos temas deste estudo. As palavras-chave utilizadas foram definidas com base na bibliografia preliminar. Estão compilados os resultados de número de artigos e citações com cada palavra-chave pesquisada.

Tabela 1 - Dados bibliométricos

PALAVRAS-CHAVE	NÚMERO DE ARTIGOS	CITAÇÕES
Lot Sizing	954	8578
Knapsack Problem	1058	7181
Knapsack Problem and Lot Sizing	11	107
Knapsack Problem and Scheduling Problem	77	584
Lot Sizing and Scheduling Problem	201	1890
Aerospace Industry and Linear Programming	7	24
Aerospace Industry and Integer Programming	5	27
Aerospace Industry and Lot Sizing	0	0
Aerospace Industry and Scheduling Problem	5	19
Aerospace Industry and Knapsack Problem	0	0
Aerospace Industry and Scheduling Problem and Integer Programming	1	0
Avionics	1140	4950
Surface Treatment and Lot Sizing	0	0
Surface Treatment and Knapsack Problem	0	0
Surface Treatment and Scheduling Problem	11	100
Surface Treatment and Integer Programming	3	20
Surface Treatment and Linear Programming	3	17

Fonte: Autor (2019).

Nota-se que nas combinações de assuntos de indústria aeroespacial e *lot sizing* não há artigos relacionando os dois temas, como também são poucos os trabalhos que empregam a programação linear na indústria aeroespacial. Portanto, pode-se considerar que este trabalho contribuirá no âmbito científico e profissional ao relacionar temas ainda muito pouco explorados na literatura.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

Neste trabalho, realizou-se um estudo na área de galvanoplastia da empresa Liebherr Aerospace Brasil. O problema de planejamento diário da produção dos tanques de anodização crômica foi escolhido por ser o gargalo da área da empresa.

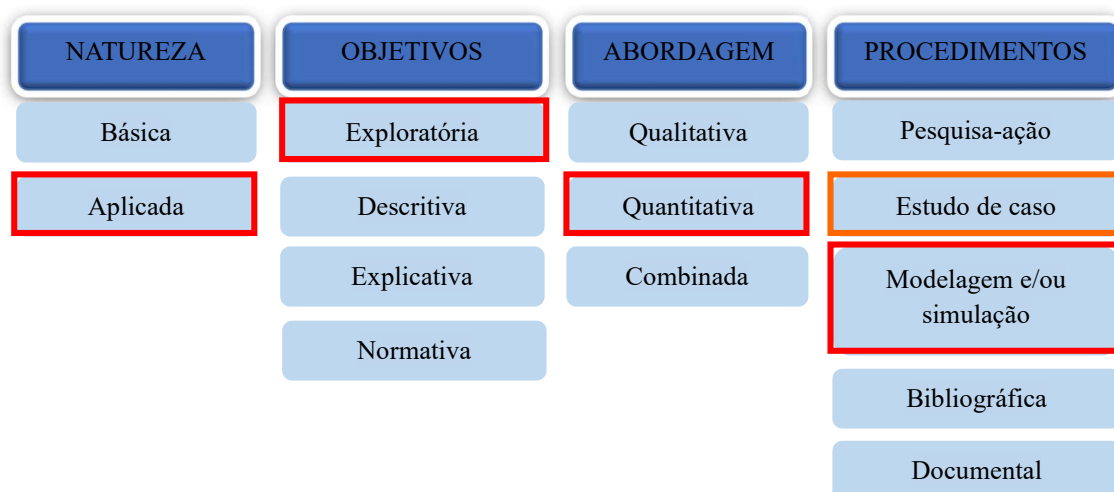
Este trabalho ainda está delimitado em alguns aspectos. O primeiro limite colocado se deve à restrição de a análise ser baseada em ferramentas da pesquisa operacional, particularmente da programação linear inteira mista. Um segundo limite refere-se à utilização de dados de uma única companhia. Esse segundo limite não restringe o aproveitamento para aplicação em outras empresas. Durante a execução do projeto, houve o acompanhamento do supervisor e equipe da própria empresa, envolvendo a coleta e análise dos dados e discussão das etapas e resultados.

O entendimento sobre os eixos conceituais que apoiam a melhor compreensão do problema foi facilitado à partir de uma investigação teórica. Na pesquisa exploratória busca-se o conhecimento das características de um fenômeno, para procurar explicações das causas e consequências deste (GIL, 2002). Frequentemente, o estudo exploratório é realizado quando o objetivo da pesquisa se torna examinar um assunto ou problema pouco estudado ou não abordado antes (MARCONI *et al*, 2004).

De acordo com Bertrand & Fransoo (2002) e Morabito & Pureza (2010), esta pesquisa trata-se de um estudo de caso empírico ao ser motivado por aplicação real encontrada em visitas a processos de produção que ainda não se encontram bem documentados na literatura. Ainda pode ser classificada como de natureza aplicada, utilizando uma abordagem quantitativa. Na Figura 1 é apresentado o esquema metodológico do projeto.

O modelo algébrico foi desenvolvido a partir de conceitos de dimensionamento e sequenciamento de lotes de produção e do problema da mochila. Foi implementado um modelo de programação linear inteira mista para a otimização da produção na linguagem *General Algebraic Modeling System* (GAMS) e utilizado o *Solver* CPLEX 12 para sua resolução.

Figura 1 - Esquema metodológico do projeto



Fonte: Autor (2019).

O software GAMS é um sistema de modelagem matemática de alto nível. Este sistema foi desenvolvido para modelar e resolver problemas de programação linear e não linear. É facilmente adaptado para aplicações complexas de modelagem.

A validação dos resultados obtidos pela ferramenta foi realizada em conjunto com os gestores da empresa. Verificou-se que o objetivo de obter o melhor planejamento diário da produção dos tanques de anodização crômica foi atingido, respondendo assim à questão de pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta dissertação está organizada em mais 4 capítulos. A fundamentação teórica é tratada no Capítulo 2, abordando os conceitos e ferramentas utilizadas, tais como o problema de Programação Linear, Programação Linear Inteira, Problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção e o problema da mochila.

Em seguida, no Capítulo 3 é descrito o problema, apresentando as etapas e processos da área de tratamento de superfícies da Liebherr Aerospace Brasil e descreve-se o modelo algébrico de PLI Mista proposto.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados computacionais das trinta instâncias reais (dois meses de produção) e comparadas às práticas da empresa. Na sequência, são apresentados os experimentos com outras trinta instâncias com demanda acumulada de dois meses.

Por fim, no Capítulo 5 são discutidas as conclusões e perspectivas para pesquisas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta modelos de programação matemática e técnicas de Pesquisa Operacional que têm a finalidade de apoiar decisões do planejamento e controle da produção em sistemas de manufatura.

2.1 PROGRAMAÇÃO LINEAR

A programação linear foi classificada como um dos mais importantes avanços científicos nos meados do século XX, e que até 2006 já tinha poupado vários milhões de dólares na indústria (HILLER & LIEBERMAN, 2013). Muitos de seus problemas são considerados em termos de complexidade computacional como NP-Hard, em outras palavras quanto maior o problema, a complexidade computacional aumenta exponencialmente.

Um problema de programação linear consiste em procurar maximizar ou minimizar uma função linear de muitas variáveis, essas variáveis estarão sujeitas a uma ou mais restrições que também devem ser lineares (CLÍMACO *et al*, 2003).

Dessa forma, o modelo básico da programação linear pode ser expresso de acordo as equações 1, 2 e 3.

$$(\text{Max./Min.}) \ Z = \sum_{j=1}^n c_j * x_j \quad (1)$$

$$(\text{S.A.}) \ \sum_{j=1}^n a_{ij} * x_j \begin{cases} \leq \\ \geq \\ = \end{cases} b_i, \quad i = 1, \dots, m \quad (2)$$

$$x_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Sendo,

z é a Função que será maximizada ou minimizada

c_j são os coeficientes das variáveis na função objetivo

x_j são as variáveis de decisão positivas

a_{ij} são os coeficientes das variáveis nas restrições

b_i são as constantes das restrições

Para encontrar a solução de um problema de programação linear, pode-se utilizar o método Simplex, que é um algoritmo no qual é possível indicar se o modelo tem solução, e se é limitada ou infinita. No simplex, o modelo é dividido em duas partes sendo a etapa “a” como

teste de otimalidade, no qual se verifica se a solução é ótima, e a etapa “b” onde busca-se a melhoria para a solução atual (MARINS, 2011).

2.2 PROGRAMAÇÃO LINEAR INTEIRA

A PLI trata os casos de problemas com todas as variáveis de decisão inteiras. É possível especificar um *range* de valores de algumas variáveis, por exemplo, para variáveis binárias, que podem assumir apenas os valores (0,1). Além das variáveis com domínio de inteiros, podem existir no mesmo problema variáveis positivas ou livres com valores reais, de onde surge o nome de Programação Inteira Mista (PLI Mista), muito comum em sistemas de manufatura (PRADO, 2016).

O método de *Branch and Bound* (ramificação e limitação) consiste em obter a solução ótima para um problema com variáveis inteiras. A partir de uma solução inicial relaxada, cria-se dois novos problemas com as mesmas restrições e função objetivo acrescidos de uma nova restrição, onde, uma das variáveis inteiras com valor relaxado terá seu valor limitado no primeiro problema a um valor menor ou igual ao valor truncado da variável na solução relaxada; no segundo problema, a mesma variável deverá receber um valor maior ou igual ao valor inteiro da variável arredondado para cima. A melhor solução que satisfaça o domínio das variáveis durante o método é conhecida como incumbente. Para cada solução relaxada com valor melhor do que o da incumbente, o procedimento criará mais dois problemas e adicionará uma nova restrição a cada um deles como explicado. O método só termina quando não existir um nó folha na árvore com solução relaxada melhor que a incumbente. Os passos do método *Branch and Bound* são apresentados na Figura 2.

Figura 2 - Passos do método *Branch and Bound*

Enquanto existir subproblema para ser investigado

1. Resolva um subproblema pelo método Simplex

1.1. Se o problema for infactível, descarte-o.

1.2. Para uma solução X^* de inteiros

1.2.1. Se $Z \text{ de } X^* \leq Z^*$, descarte o subproblema, não há contribuição.

1.2.2. Senão, faça $Z^* = Z$, X^* é a nova incumbente.

1.2.3. Os demais subproblemas com $Z < Z^*$ são descartados.

1.3. Se a solução não for inteira:

1.3.1. Se $Z \text{ de } X^* \leq Z^*$, descarte o subproblema, não há contribuição.

1.3.2. Senão, Faça $S^* = S$ e

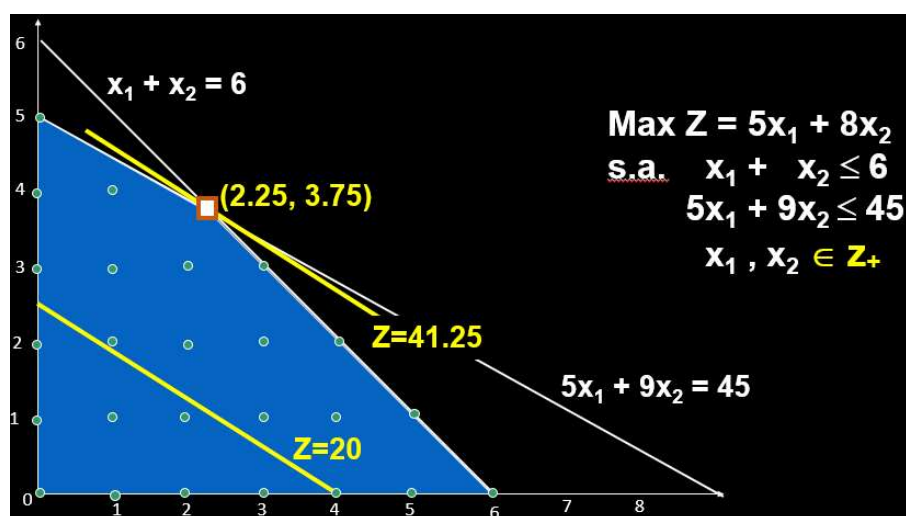
1.3.2.1. Escolha um x_i qualquer que tenha um valor não inteiro na solução.

1.3.2.2. Crie dois novos subproblemas adicionando $x_i \leq \lfloor x_i^* \rfloor$ no primeiro subproblema e $x_i \geq \lceil x_i^* \rceil$ no segundo.

Fonte: Luche (2016).

Portanto, a resolução de um PLI ou PLI Misto, provavelmente implicará em um esforço computacional várias vezes maior do que em um problema relaxado. Para ilustrar melhor, considere o problema exemplo e resolução gráfica contidos na Figura 3.

Figura 3 - Resolução inicial de um PLI



Fonte: Luche (2016).

No exemplo, $(x_1; x_2) = (2,25; 3,75)$ é a solução ótima do problema relaxado, mas não do

PLI. Desta maneira, o valor da solução ótima relaxada ($z = 45,25$) se torna o *upper bound* para o valor ótimo do problema inteiro. O passo agora é particionar a região viável da solução relaxada escolhendo uma variável que possui valor real na solução ótima relaxada. Optando por $x_2 (3,75)$, observe que cada ponto inteiro viável deve ter o $x_2 \leq 3$ ou $x_2 \geq 4$. Com isso em mente, são criados dois subproblemas como apresentado na Figura 4.

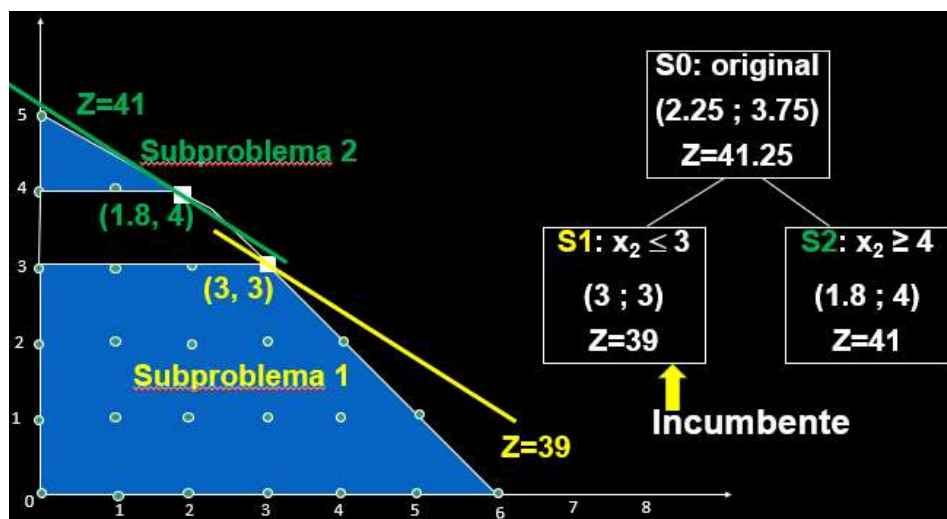
Figura 4 - Ramificação em Subproblemas 1 e 2

Subproblema 1	Subproblema 2
Max $Z = 5x_1 + 8x_2$	Max $Z = 5x_1 + 8x_2$
s.a.	s.a.
$x_1 + x_2 \leq 6$	$x_1 + x_2 \leq 6$
$5x_1 + 9x_2 \leq 45$	$5x_1 + 9x_2 \leq 45$
$x_2 \leq 3$	$x_2 \geq 4$
$x_1, x_2 \geq 0$	$x_1 \geq 0$

Fonte: Adaptado de Luche (2016).

Na Figura 5 estão os resultados para os dois subproblemas criados (S1 e S2), além da demonstração gráfica do espaço de soluções para cada subproblema dentro do espaço de soluções do problema inicial.

Figura 5 - Espaço de soluções de S1 e S2



Fonte: Adaptado de Luche (2016).

Têm-se em S1 uma solução ótima inteira, portanto, esta será a primeira incumbente (Z^*) e não deve ser ramificada. Z^* é um limite inferior para a solução ótima (OPT) do PLI, ou seja, $\text{OPT(PLI)} \geq Z^*$. A ramificação de S2 como aparece na Figura 6, acontece, pois, $Z=41$ de S2 é melhor do que $Z=39$ da atual incumbente.

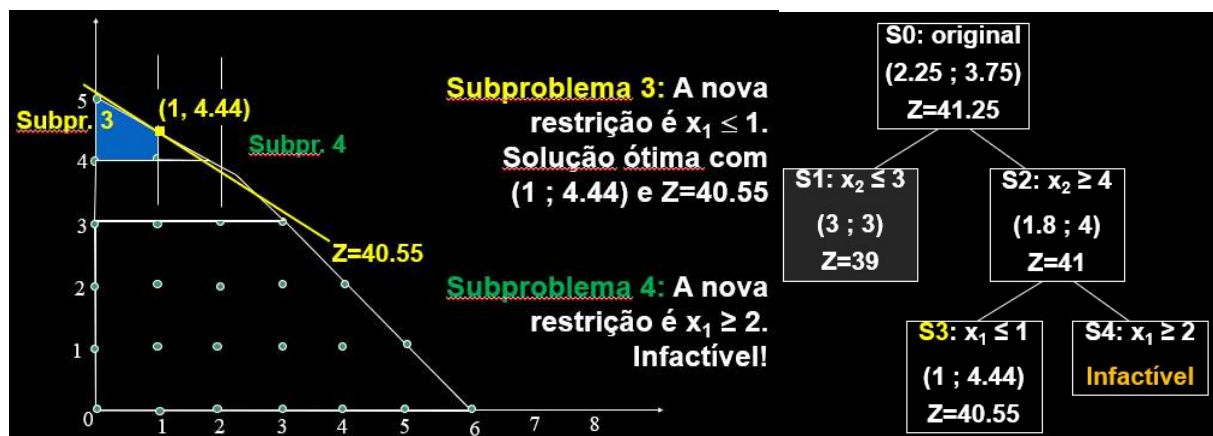
Figura 6 - Ramificação de S2 em subproblemas S3 e S4

Subproblema 3	Subproblema 4
Max $Z = 5x_1 + 8x_2$	Max $Z = 5x_1 + 8x_2$
s.a.	s.a.
$x_1 + x_2 \leq 6$	$x_1 + x_2 \leq 6$
$5x_1 + 9x_2 \leq 45$	$5x_1 + 9x_2 \leq 45$
$x_2 \geq 4$	$x_2 \geq 4$
$x_1 \leq 1$	$x_1 \geq 2$
$x_1 \geq 0$	

Fonte: Adaptado de Luche (2016).

O espaço de soluções para S3 e S4 são apresentados na Figura 7.

Figura 7 - Espaço de soluções de S3 e S4



Fonte: Adaptado de Luche (2016).

O limitante superior é atualizado para 40.55, S4 será descartado por ser infactível, já S3 será ramificado acrescentando restrições em x_2 a fim de gerar os subproblemas S5 e S6 como apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Ramificação de S3 em Subproblemas S5 e S6

Subproblema 5

$$\text{Max } Z = 5x_1 + 8x_2$$

s.a.

$$x_1 + x_2 \leq 6$$

$$5x_1 + 9x_2 \leq 45$$

$$x_2 = 4$$

$$x_1 \leq 1$$

$$x_1 \geq 0$$

Subproblema 6

$$\text{Max } Z = 5x_1 + 8x_2$$

s.a.

$$x_1 + x_2 \leq 6$$

$$5x_1 + 9x_2 \leq 45$$

$$x_2 \geq 5$$

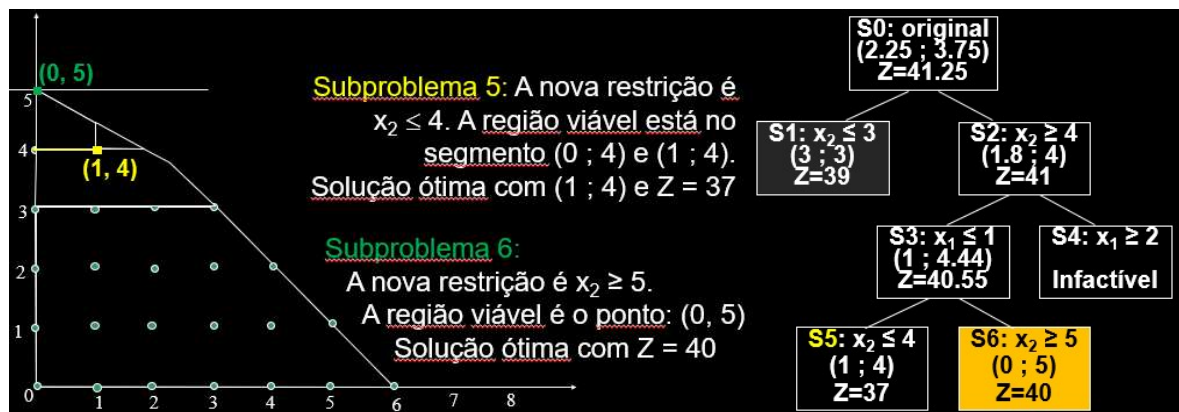
$$x_1 \leq 1$$

$$x_1 \geq 0$$

Fonte: Adaptado de Luche (2016).

Na Figura 9 pode-se verificar os espaços de soluções para S5 e S6, também é apresentada a árvore completa para o PLI.

Figura 9 - Espaço de soluções de S5 e S6



Fonte: Adaptado de Luche (2016).

Um subproblema é descartado se $Z \leq Z^*$. Aqui, o subproblema S5 é descartado. Se um subproblema S tem solução ótima inteira com $Z > Z^*$, em seguida, S substituirá a incumbente. Este é o caso no subproblema S6, que tem melhor solução inteira Z^* . Assim, $(0; 5)$ é a nova incumbente, e o novo $Z^* = 40$. Sem subproblemas a serem ramificados, S6 gerou a solução ótima para o PLI.

2.3 Dimensionamento de Lotes e Sequenciamento da Produção

A função de planejar e organizar a produção de uma empresa é destinada comumente ao departamento de Planejamento e Controle de Produção (PCP). Segundo Georgiadis e Michaloudis (2012), o trabalho do PCP em indústrias de manufatura é complexo, sendo que existe muita variabilidade nos processos de produção de acordo com os diferentes pedidos dos clientes, cada qual com diferentes características. Dessa forma, modelos de planejamento de produção envolvendo múltiplos itens, capacidades restritivas e tempos significativos de *setup* ocorrem frequentemente no meio industrial e têm sido muito estudados na literatura (ABSI; KEDAD-SIDHOUM, 2008).

O dimensionamento de lotes e o sequenciamento da produção são dois dos problemas mais importantes no campo do planejamento da produção. Muitas vezes, as decisões sobre estes dois pontos são feitas hierarquicamente, ou seja, inicialmente são definidos os tamanhos dos lotes para então se definir o sequenciamento da produção (SERESHTI; BIJARI, 2013) além de que o sequenciamento integrado é outro fator importante no ambiente competitivo de produção (BAE; MOON; YUN, 2014).

As decisões de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção trata da definição de quanto e quando produzir, alocando os recursos por período de tempo de modo que os custos sejam minimizados (BELO FILHO; SANTOS; MENESES, 2012). Cada produto é produzido por diferentes processos e requer diferentes recursos, conforme especificações e requisitos dos clientes. O problema é determinar quando e quanto produzir de cada produto, ou seja, definir o tamanho dos lotes em cada etapa do processo e em que período cada etapa será realizada, a fim de utilizar os recursos disponíveis de forma adequada e atender as datas de entrega.

A importância dos problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção para as empresas industriais fez com que estes temas tenham sido intensamente estudados pela comunidade científica nas últimas três décadas. Autores como Fleischmann (1990), Potts *et al.* (1992), Kimms (1996), Drexl & Kimms (1997), Jans & Degraeve (2004), Beraldi *et al.* (2008), Ferreira *et al.* (2009), Kovács *et al.* (2009), Tonaki & Toledo (2010), Camargo *et al.* (2012), Baldo *et al.* (2014), Copil (2017) e Vaez *et al.* (2019) realizaram estudos e revisões de variações do problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção.

Mesmo com o grande progresso da teoria e dos softwares de programação inteira mista, muitos problemas de dimensionamento de lotes continuam sendo computacionalmente

desafiantes para resolver na prática (DE ARAUJO *et al.*, 2015).

2.3.1 Tipos de problemas de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção

A modelagem de um sistema real de produção é complexa. Ela envolve diversas características que devem ser levadas em consideração para que o dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção seja aplicável na realidade da empresa.

Karimi *et al.* (2003) e Brahimi *et al.* (2006), apontam os seguintes itens como os principais aspectos a serem considerados na modelagem e classificação de um problema de dimensionamento de lotes e sequenciamento da produção: horizonte de planejamento, número de níveis (estágios) de produção, número de produtos produzidos, número de máquinas, as restrições de capacidade e de recursos, se o produto é perecível, a demanda do produto produzido, os custos e tempos de *setup* e a política de atendimento da demanda da empresa.

Com tantos aspectos diferentes para se considerar, diversos modelos diferentes foram desenvolvidos ao longo dos anos. O primeiro deles é conhecido na literatura como lote econômico de compra (*Economic Order Quantity* – EOQ). Esse modelo se mostrou muito simples e restrito em suas aplicações. O EOQ assume um processo produtivo de um único nível sem restrições de capacidade (não capacitado) (DREXL & KIMSS, 1997).

Algum tempo depois de desenvolvido, o lote econômico de compra serviu de base para Rogers (1958) e Hanssmann (1962) desenvolverem o sequenciamento de lotes econômicos de produção (*Economic Lot Scheduling Problem* – ELSP). Esse modelo considera múltiplos níveis de produção, além de restrições de capacidade, o que tornou o problema mais desafiador, mas também mais aplicável (BRAHIMI *et al.*, 2006).

As próximas gerações de modelos começaram a considerar restrições de capacidade em conjunto com abordagens dinâmicas (DREXL & KIMMS, 1997). Segundo Jans & Degraeve (2008), desde então, com os avanços nas pesquisas, os problemas de dimensionamento de lotes incorporaram mais aspectos de sequenciamento da produção (*schedulling*).

2.3.2 Problema de dimensionamento de lotes não capacitado

O problema de dimensionamento de lotes não capacitado (*uncapacitated lot sizing problem* – ULSP) apresenta como característica ser monoestágio, ou seja, considera-se que a matéria prima seja transformada diretamente em produto, sem passar por etapas intermediárias.

Neste tipo de problema também são considerados os custos de *setup*, entretanto não são

consideradas as restrições de capacidade no modelo e o horizonte de planejamento é finito e dividido em vários períodos discretos. A demanda de cada período é conhecida, podendo variar sobre o tempo. Esse tipo de modelo é uma variação simples dos problemas de dimensionamento de lotes.

Um problema de dimensionamento de lotes não capacitado pode ser modelado utilizando a programação inteira mista:

Índices:

- t período de produção ($t = 1, \dots, T$);
 j produto ($j = 1, \dots, J$);

Variáveis de Decisão:

- I_{jt} quantidade no estoque do produto j no período t ;
 q_{jt} quantidade produzida do produto j no período t ;
 x_{ij} variável binária que indica se o custo de *setup* do produto j irá ocorrer ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$);

Parâmetros:

- C_t capacidade disponível da máquina no período t ;
 m quantidade de produtos;
 d_{jt} demanda do item j no período t ;
 h_{jt} custos de estoque do produto j no período t ;
 s_j custos de *setup* do produto j ;
 T quantidade de períodos;

Limitante superior do volume de produção do produto j no período t : $M_{jt} = \sum_{k=t}^T d_{jk}$;

$$\text{Min } \sum_{j=1}^m \sum_{t=1}^T (s_{jt}x_{jt} + c_{jt}q_{jt} + h_{jt}I_{jt}) \quad (4)$$

Sujeito a:

$$q_{jt} + I_{j(t-1)} - I_{jt} = d_{jt}, \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T \quad (5)$$

$$q_{jt} \leq M_{jt}x_{jt}, \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T \quad (6)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T \quad (7)$$

$$I_{jt}, q_{jt} \geq 0, \quad j = 1, \dots, J, \quad t = 1, \dots, T \quad (8)$$

A função objetivo, equação (4) visa minimizar os custos de *setup*, de produção e de estoque do processo produtivo. As equações de (5) a (8) são as restrições do problema. Em (5), têm-se o balanço do estoque por período. O volume máximo de produtos produzidos dentro do horizonte de planejamento é delimitado em (6). Variáveis binárias são definidas em (7) e em (8) encontram-se as condições de não negatividade.

2.3.3 Problema de dimensionamento de lotes capacitado

O problema de dimensionamento de lotes capacitado (*capacitated lot-sizing problem* – CLSP) é uma extensão do modelo ULSP onde se considera as capacidades do processo produtivo. Ele também é classificado como um problema *large bucket problem* por considerar períodos relativamente grandes como dias ou semanas, onde é possível produzir mais de um produto por período (BRAHIMI *et al.*, 2006). Foi proposto por Manne (1958).

Esse tipo de problema pode ser expresso matematicamente utilizando uma PLI Mista como apresentado em Drexl & Kimms (1997):

Índices:

t período de produção ($t = 1, \dots, T$);

j produto ($j = 1, \dots, J$);

Variáveis de Decisão:

I_{jt} quantidade no estoque do produto j no período t ;

q_{jt} quantidade produzida do produto j no período t ;

x_{ij} variável binária que indica se o custo de *setup* do produto j irá ocorrer ($x_{ij} = 1$) ou não ($x_{ij} = 0$);

Parâmetros:

C_t capacidade disponível da máquina no período t ;

d_{jt} demanda do item j no período t ;

h_{jt} custos de estoque do produto j no período t ;

s_j custos de *setup* do produto j ;

I_{j0} estoque inicial do produto j ;

p_j quantidade de recursos necessários para produzir um produto j ;

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (9)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{(t-1)} + q_{jt} - d_{jt}, j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (10)$$

$$p_j q_{jt} \leq C_t x_{jt}, j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (11)$$

$$\sum_{j=1}^J p_j q_{jt} \leq C_t, \quad t = 1, \dots, T \quad (12)$$

$$x_{jt} \in \{0,1\}, x_{jt}, j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$I_{jt}, q_{jt} \geq 0, j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (14)$$

Mantém-se na função objetivo (9) a otimização dos custos de *setup* e de estoque. As equações (10) representam o balanço do estoque, as equações (11) determinam que um produto só poderá ser produzido se a máquina estiver preparada para produzi-lo, as equações (12) representam as restrições de capacidade, enquanto as equações (13) e (14) tratam do domínio das variáveis.

2.3.4 Problema discreto de dimensionamento e programação de lotes

O problema discreto de dimensionamento e programação de lotes (*discrete lot-sizing and scheduling problem* - DLSP) mistura decisões de dimensionamento e sequenciamento de lotes.

Segundo Haase & Kimms (1999) em um problema DLSP o horizonte de planejamento é dividido em um grande número de pequenos períodos (horas, dias, semanas), assumindo que durante o processo produtivo de cada período não aconteça mudanças de produto e que toda a capacidade do processo esteja sendo utilizada, seguindo assim uma política de “tudo ou nada” implicando que no máximo um produto seja produzido por período. Dada essa característica esse modelo é classificado como *small bucket problem*, que ao contrário do problema CLSP o período usado é pequeno o suficiente para normalmente ser possível produzir apenas um produto por período (BRAHIMI *et al.*, 2006).

Segundo Drexl & Kimms (1997) a modelagem matemática desse tipo de problema é muito parecida com a modelagem do CLSP. A única diferença é o fato de que o custo de *setup* ocorre apenas quando o tipo de produto produzido muda e não quando o período muda, como ocorria no CLSP. Dessa forma, é utilizado um novo conjunto de variáveis para representar essa situação: $y_{jt} \rightarrow$ Variável binária que indica se a máquina está configurada para produzir o produto j no período t ($y_{jt} = 1$) ou não ($y_{jt} = 0$).

$$\text{Min } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T (s_j x_{jt} + h_j I_{jt}) \quad (15)$$

Sujeito a:

$$I_{jt} = I_{j(t-1)} + q_{jt} - d_{jt} \quad (16)$$

$$j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T$$

$$p_j q_{jt} = C_t x_{jt}, \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (17)$$

$$\sum_{j=1}^J y_{jt} \leq 1, \quad t = 1, \dots, T \quad (18)$$

$$x_{jt} \geq y_{jt} - y_{j(t-1)} \quad (19)$$

$$j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T$$

$$I_{jt}, q_{jt}, x_{jt} \geq 0, \quad j = 1, \dots, J \quad t = 1, \dots, T \quad (20)$$

Outras extensões de problemas de dimensionamento e sequenciamento de lotes podem ser consultadas em Drexl & Kimms (1997).

3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DO PROBLEMA

Neste capítulo é abordado o problema identificado na área de tratamento de superfície da empresa estudada. As etapas do processo de tratamento superficial são descritas de forma geral para facilitar o entendimento da área produtiva e das restrições do processo. Em seguida, um modelo de PLI Mista para a programação diária da produção é apresentado.

3.1 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO SUPERFICIAL

A programação no setor de galvanoplastia é realizada com base nos produtos entregues pela área de usinagem e já disponíveis na área de tratamento; que são alocados conforme a Figura 10. Deve-se então buscar a utilização máxima dos recursos disponíveis e evitar tornar gargalo um processo e subutilizar outros ao longo do dia. Como exemplo, se determinado produto possui o processo de ‘inspeção por líquido penetrante’, e em seguida o processo de Anodização Crômica, realizar o sequenciamento da combinação de produtos/processos em cada dia, se torna uma tarefa onerosa e difícil de encontrar a melhor programação.

Figura 10 - Entrada do processo de tratamento de superfície



Fonte: Cortesia Liebherr Aerospace Brasil (2019).

As caixas aguardam para serem processadas na área e são programadas de acordo com a experiência da liderança, onde se busca a melhor combinação de produtos para otimizar o uso dos tanques de anodização crômica, gargalo do setor e da empresa. A programação desta combinação é realizada com base no quadro *HEIJUNKA* e após esta etapa, o operador procura

a caixa do produto na entrada.

As peças são montadas em gancheiras/dispositivos específicos para cada tipo de produto (Figura 11). As dimensões de cada peça são determinantes para a quantidade e a forma de fixação nas gancheiras.

Figura 11 - Gancheiras com produtos montados, 8 peças (a) e 3 peças (b)



(a)



(b)

Fonte: Cortesia Liebherr Aerospace Brasil (2019).

Após a montagem das peças, pode-se visualizar na Figura 12, que as gancheiras são encaixadas no barramento do tanque de anodização crômica para a realização do tratamento especificado. O local onde as gancheiras são encaixadas podem ser alterados conforme a geometria de cada peça, buscando a melhor divisão de maneira a ocupar o máximo espaço disponível do tanque.

Figura 12 - Gancheiras encaixadas no barramento do tanque de anodização crômica

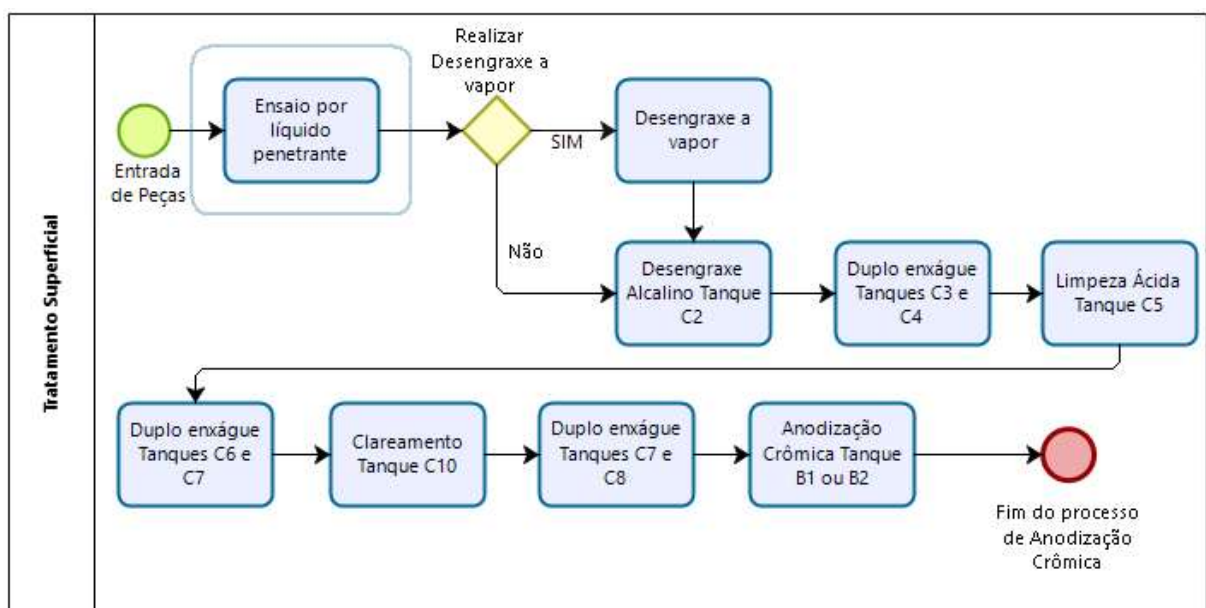


Fonte: Cortesia Liebherr Aerospace Brasil (2019).

O barramento onde as gancheiras são encaixadas é fixo, não podendo alterar sua posição. Desta forma, deve-se buscar a melhor divisão em todos os sentidos do tanque, partindo da posição do barramento, ou seja, do meio do tanque. Os eixos que podem ser explorados são: profundidade, largura e espessura.

A Figura 13 é uma representação esquemática de todo o processo na área de tratamento superficial.

Figura 13 - Fluxograma com as etapas de processo na área de tratamento superficial



Fonte: Autor (2019).

Nota-se que antes da etapa de anodização crômica, há oito etapas de preparação que tratam basicamente de processos de limpeza e ativação da superfície do produto para receber o tratamento em ácido crômico.

A primeira fase é o recebimento das peças liberadas pelo processo de Usinagem, onde é abastecido por uma rota de movimentação de materiais em horários previamente definidos. A segunda etapa pode ocorrer ou não, dependendo do processo definido pelo cliente. O ensaio por líquido penetrante é uma etapa importante no processo produtivo, pois tem como principal objetivo detectar possíveis falhas de origem mecânica ou de material.

As etapas entre o desengraxe, tanque D1 e duplo enxágue, tanques C7 e C8, referem-se ao processo de limpeza e ativação da superfície que será anodizada no processo de anodização crômica. Estas etapas são importantes pois um processo de limpeza ineficiente causará problemas de qualidade no produto. Apesar de importante tecnicamente para o processo, não é um item a ser considerado na elaboração do modelo.

Os processos existentes são compartilhados por vários produtos, e para cada produto há uma sequência determinada de processos. Não há possibilidade de alteração nesta sequência devido às especificações de projeto e validação do sistema realizado entre a empresa e seus clientes. Entretanto, é possível processar diferentes produtos ao mesmo tempo no tanque de anodização crômica, desde que atendam a alguns requisitos como: a liga da matéria-prima deve ser a mesma ou pertencer ao mesmo grupo e o processo em que está sendo trabalhado.

Um produto é submetido sempre à mesma combinação e sequência de processos definidos para ele. O *layout* da área não define a sequência de processos, mas segue um fluxo definido. Por exemplo, o ensaio por líquido penetrante não pode ser realizado após o processo de anodização crômica.

O problema consiste em buscar a melhor combinação de gancheiras montadas em cada tanque de forma a maximizar sua produção. A gestão do setor é consciente de que não pratica as melhores programações, sendo desta forma subutilizado, ao mesmo tempo que requer horas extras para atendimento aos prazos, elevando os custos de produção.

3.2 MODELAGEM DO PROBLEMA

Esta seção apresenta um modelo de programação inteira mista, desenvolvido com o objetivo de otimizar a programação diária da produção no tanque de anodização crômica em uma área de tratamento de superfície. Conforme já apresentado anteriormente, o processo de anodização crômica apresenta restrições, os produtos a serem tratados devem ser da mesma liga

de matéria-prima, ter o mesmo tipo de processo de anodização e os processos de ensaio por líquido penetrante e jateamento de esferas não podem ser realizados após o tratamento.

Entretanto, as quantidades de gancheiras e a quantidade de produto por gancheira são variáveis, dependendo das restrições acima citadas e da geometria dos produtos. Produtos diferentes podem ser anodizados simultaneamente desde que obedecido as restrições de processo.

Os índices, parâmetros e variáveis do modelo são:

Índices

I	Itens: 1..56
T	Períodos: 1..40 (um dia de produção)
K	Tanques "knapsack": B1, B2
M	Grupos (tipo de processo) por matéria-prima: B1, B2, B6, LTS30
G	índice da gancheira no tanque: 1..10

Parâmetros

IE_i	Quantidade disponível do item i na Entrada
IG_i	Quantidade máxima de peças do item i em uma gancheira
$GK_{i,k}$	Quantidade máxima de gancheiras com o item i por tanque k
$GM_{i,m}$	Grupo de matéria prima m a qual pertence o item i

Variáveis

$x_{t,k,g,i}$	Quantidade no período t do produto i no tanque k com a gancheira g , variáveis inteiras positivas.
$y_{t,k,g,i}$	$y_{t,k,g,i} = 1$ se no período t o produto i está no tanque k com a gancheira g , $y_{t,k,g,i} = 0$ se contrário. Estas variáveis fazem papel semelhante ao de <i>setup</i> (se a gancheira está preparada ou não para produzir aquele item). São variáveis binárias auxiliares que facilitam a modelagem.
$w_{t,k,m}$	$w_{t,k,m} = 1$ se a matéria prima m é utilizada no tanque k no período t , $w_{t,k,m} = 0$ se contrário.
F_i	Falta de produção do item i , variáveis inteiras positivas.

Função Objetivo

$$\max z = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I t * y_{tkgi} + M * \sum_{i=1}^I F_i \quad (21)$$

O primeiro termo da função objetivo (21) faz com que a produção ocorra sempre nos primeiros períodos e desta maneira, garantindo que utilizará a capacidade máxima possível dos tanques nesses períodos. Sem esse termo e no caso em que os tanques sejam capazes de realizar toda a produção dentro do dia, os tanques poderiam operar sem utilizar toda a sua capacidade e desta maneira, utilizando mais *starts* (períodos) do que o mínimo necessário. M é um número grande o suficiente para garantir o que o segundo termo, que trata da falta de produção, seja mais relevante que o primeiro.

São apresentadas as restrições que foram necessárias para elaborar o modelo de otimização:

A restrição (22) refere-se à produção diária de acordo com a disponibilidade de peças. As variáveis F_i são utilizadas para indicar a quantidade disponível não produzida de cada item.

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K \sum_{g=1}^G X_{tkgi} + F_i = IE_i \quad \forall i \quad (22)$$

A quantidade de gancheiras por tanque varia de acordo as geometrias das peças, desde que sejam da mesma liga de matéria-prima e tipos de processos de anodização. A equação 23 trata da proporção de ocupação dos tanques. Cada tipo de peça possui uma quantidade máxima de gancheiras que podem ser instaladas em cada tanque e, considerando que gancheiras com peças diferentes podem ser instaladas no mesmo lote/tanque, deve-se calcular a proporção de ocupação de cada gancheira, que somadas, não deve ultrapassar a capacidade do tanque.

$$\sum_{g=1}^G \sum_{i=1}^I Y_{tkgi} \left(\frac{1}{GK_{ik}} \right) \leq 1 \quad \forall t, k \quad (23)$$

Em (24) assegura-se que a quantidade máxima do item em uma gancheira será respeitada.

$$X_{tkgi} \leq IG_i * Y_{tkgi} \quad \forall t, k, g, i \quad (24)$$

Na restrição (25), a gancheira que está sendo processada dentro do tanque de anodização, só pode ter um produto, que independe da quantidade.

$$\sum_{i=1}^I Y_{tkgi} \leq 1 \quad \forall t, k, g \quad (25)$$

Já o conjunto de restrições em (26), definem que uma única liga de matéria-prima será utilizada por lote.

$$\sum_{m=1}^M W_{tkm} \leq 1 \quad \forall t, k \quad (26)$$

As restrições em (27) por sua vez, definem que o produto na gancheira pertence à matéria-prima definida para o lote.

$$Y_{tkgi} \leq \sum_{m=1}^M W_{tkm} * GM_{im} \quad \forall t, k, g, i \quad (27)$$

Por fim, a restrição (28) ordena a utilização das gancheiras no tanque a partir da gancheira de índice 1. Esta não é uma restrição necessária, mas organiza a resposta do modelo.

$$\sum_{i=1}^I Y_{tkgi} \geq \sum_{i=1}^I Y_{tkg+1i} \quad \forall t, k, g \quad (28)$$

O último conjunto de restrições (29), assegura que haverá produção para todo $Y_{tkgi} = 1$.

$$X_{tkgi} \geq Y_{tkgi} \quad \forall t, k, g, i \quad (29)$$

No capítulo 4 serão apresentados os resultados com a execução do modelo.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, os experimentos com a resolução exata do modelo fizeram uso da linguagem de modelagem GAMS (MCCARL *et al.*, 2014) com o *solver* de programação inteira mista CPLEX 12 (ILOG, 2016). Foram executadas trinta instâncias que correspondem a trinta dias trabalhados na empresa nos meses de julho e agosto de 2019. O computador utilizado possui processador intel I7 3.1 GHz com 8gb de RAM e SSD com Windows 10. Os resultados foram comparados com a programação realizada pela empresa e posteriormente foram realizados experimentos com aumento da demanda.

Cada instância refere-se a um dia de produção na empresa, cada dia pode possuir até 40 subperíodos, conhecidos como *starts* $T=40$. Durante os dois meses foram listados $I=56$ diferentes produtos na área de tratamento de superfície. A empresa possui nesta área dois tanques de anodização crômica com diferentes capacidades. Em cada tanque poderá haver uma quantidade limitada de gancheiras de acordo com os produtos que serão tratados, nas Tabelas 2 e 3, estão relacionadas as quantidades de gancheiras que cada produto pode ter em um tanque se este tiver apenas gancheiras do mesmo item.

Tabela 2 - Quantidade máxima de gancheiras com o produto no tanque B1

Qtd de gancheiras do item no tanque	ITENS				
4	1964A2200				
	830D0100	829D0100	1320_0101	1312_0101	4774_0002
	4775_0002	810A0400	786A0700	926_0102	3957A0600
	4778_0102	3958A0600	1386A2200	6896A0100	1556A0200
5	1559A0200	1555A0200	1553A0200	1554A0200	4781A0100
	S4_9504612	S4_9504622	918_0102	920A0100	1394_0101
	1568_0101	6884_2011	6885_2011	6886_2011	6887_2011
	6898A0100	6882_2011	6883_2011	6888_2011	962A0100
	70069_23	2434A2200	798_0184		
6	1806_041	1806_5051	1806A0200	6864_0280	1642A0400
	787A0100	1806A0800	786A0600	341_0250	60091_011
7	6774_01030	6754_0481	3470_085	6753_02011	5450A0000
	6724_0941	3470_028			
8	1567A0100	3445A1800	60078_0900	S4_9704300	6724_0271
9	831A0600	786A0900	342_0460	S4_9704411	
10	1806D0900				

Fonte: Autor (2019).

Tabela 3 - Quantidade máxima de gancheiras com o produto no tanque B2

Qtd de gancheiras do item no tanque	ITENS				
1	1964A2200				
2	830D0100	829D0100	1320_0101	1312_0101	4774_0002
	4775_0002	810A0400	786A0700	926_0102	3957A0600
	4778_0102	3958A0600	1386A2200	6896A0100	1556A0200
	1559A0200	1555A0200	1553A0200	1554A0200	4781A0100
	S4_9504612	S4_9504622	918_0102	920A0100	1394_0101
	1568_0101	6884_2011	6885_2011	6886_2011	6887_2011
	6898A0100	6882_2011	6883_2011	6888_2011	962A0100
	70069_23	2434A2200	1806_041	786A0600	6864_0280
	787A0100	1806A0800	1806_5051	1806A0200	1567A0100
	341_0250	60091_011	6774_01030	6754_0481	3470_085
3	6753_02011	S4_9704411	5450A0000	6724_0941	798_0184
	S4_9704300	1642A0400	6724_0271	3470_028	
4	831A0600	1806D0900	786A0900	3445A1800	60078_0900
	342_0460				

Fonte: Autor (2019).

Para cada gancheira (todas idênticas), também há uma quantidade máxima de peças que poderá ser empregado, as dimensões do produto definem a quantidade máxima de itens na gancheira. Por simplificação e prática atual na empresa, considerou-se que só deve haver tipo de produto em cada gancheira. A Tabela 4 apresenta a quantidade possível de cada item em uma gancheira (independente do tanque).

Tabela 4 - Quantidade máxima do item na gancheira

Qtd do item na gancheira	ITENS				
2	1806_041	1806A0200			
3	787A0100	786A0600			
4	6864_0280				
6	1567A0100	786A0900	3445A1800	3470_085	S4_9704411
	2434A2200	3470_028	962A0100	S4_9704300	1642A0400
5	798_0184				
	786A0700	4778_0102	1554A0200	4781A0100	920A0100
8	6884_2011	6885_2011	6886_2011	6887_2011	1964A2200
	6882_2011	6883_2011	6888_2011		
10	831A0600	1806_5051			
	830D0100	829D0100	1806A0800	4774_0002	4775_0002
	810A0400	926_0102	1386A2200	6896A0100	1556A0200
12	1559A0200	1555A0200	60078_0900	1553A0200	341_0250
	60091_011	342_0460	6754_0481	6753_02011	6774_01030
	5450A0000	6898A0100	6724_0941	70069_23	6724_0271
15	918_0102				
21	S4_9504612	S4_9504622			
24	1320_0101	1312_0101	3957A0600	3958A0600	1394_0101
	1568_0101				
60	1806D0900				

Fonte: Autor (2019).

Todos os itens em um tanque devem pertencer a um mesmo grupo de matéria-prima, como exemplo, perceba na Tabela 5 que os itens ‘S4_9704300’ e ‘1642A0400’ pertencem ao mesmo grupo (B6) e, portanto, no mesmo tanque só poderão existir gancheiras montadas com esses produtos.

Tabela 5 - Grupo de matéria-prima à qual pertence o item

ITENS					
B1	1806A0200	1567A0100	786A0600	786A0700	926_0102
	S4_9504612	S4_9504622	918_0102		
B2	830D0100	810A0400	1559A0200	920A0100	6898A0100
	829D0100	787A0100	831A0600	4774_0002	4775_0002
	786A0900	4778_0102	1386A2200	6896A0100	1556A0200
	1555A0200	1553A0200	1554A0200	4781A0100	S4_9704411
	5450A0000	6884_2011	6885_2011	6886_2011	6887_2011
	1964A2200	6882_2011	6883_2011	6888_2011	2434A2200
B6	S4_9704300	1642A0400			
LTS30	1320_0101	3445A1800	342_0460	6864_0280	6724_0271
	1806_041	1806D0900	1806A0800	1312_0101	1806_5051
	3957A0600	3958A0600	60078_0900	341_0250	60091_011
	6774_01030	6754_0481	3470_085	6753_02011	1394_0101
	1568_0101	6724_0941	798_0184	962A0100	70069_23
	3470_028				

Fonte: Autor (2019).

4.1 EXPERIMENTOS COM DEMANDA REAL

Os resultados para as trinta instâncias executadas com a ferramenta podem ser consultados na Tabela 6. Cabe ressaltar a grande diferença nos resultados em relação às práticas atuais. Para todas as instâncias, o modelo obteve uma programação da produção muito superior à realizada pela empresa. Para se ter ideia, o total de peças programadas pelo modelo chega muito próximo de ser quatro vezes maior que a realizada pela empresa. Cabe comentar que em nenhum dos dias houve algum incidente ou manutenção de equipamento na área que influenciasse no desempenho da empresa. O tempo máximo utilizado para a ferramenta computacional (modelo implementado em GAMS/CPLEX), foi determinado em 600 segundos. Para todas as instâncias a ferramenta foi capaz de produzir todas as peças disponíveis na entrada. O *gap* (distância entre a melhor solução inteira encontrada e a melhor solução relaxada) registrado deve-se ao objetivo no primeiro termo da função (21) e não ao total de peças. É provável que a otimalidade das instâncias que apresentaram *gap* só tenha ocorrido por falta de

tempo para provar a otimalidade da solução. Esse tipo de problema é comum em problemas de PLI e PLI Mista.

Tabela 6 - Desempenho do modelo vs realizado pela empresa em cada dia de produção

Dia	Nº Peças disponíveis	Nº Peças na Programação dos Engenheiros	Nº Peças na Programação da Ferramenta	GAP (%) 600seg	Δ (%) melhoria
10/7	1.737	321	1.737	1,37	541
11/7	1.759	278	1.759	1,09	633
12/7	1.814	235	1.814	1,77	772
15/7	1.582	247	1.582	1,84	640
16/7	1.649	357	1.649	2,68	462
17/7	1.446	298	1.446	4,30	485
18/7	961	264	961	2,56	364
19/7	1.329	272	1.329	0,79	489
22/7	1.789	237	1.789	1,09	755
23/7	1.940	245	1.940	1,64	792
24/7	1.039	261	1.039	0,41	398
25/7	933	328	933	2,70	284
26/7	1.397	246	1.397	2,81	568
29/7	1.175	224	1.175	2,98	525
30/7	945	249	945	1,52	380
1/8	697	284	697	2,78	245
2/8	803	279	803	2,26	288
5/8	772	311	772	2,56	248
6/8	754	299	754	2,35	252
7/8	852	267	852	1,08	319
8/8	419	242	419	0 (172s)	173
9/8	566	229	566	2,22	247
12/8	1.065	271	1.065	1,59	393
13/8	937	290	937	2,23	323
14/8	495	310	495	0 (33s)	160
15/8	324	273	324	0 (133s)	119
16/8	323	198	323	0,75	163
19/8	480	226	480	0 (59s)	212
20/8	918	224	918	1,69	410
TOTAL DE PEÇAS	30.900	7.765	30.900		398
GAP MÉDIO				1,66	

Fonte: Autor (2019).

Nota-se que o tempo computacional está relacionado à quantidade de peças a serem produzidas, conforme o número de peças aumenta, fica mais difícil construir os vários lotes (tanches).

4.2 EXPERIMENTOS COM INCREMENTO NA DEMANDA

A construção de instâncias com demanda acumulada a partir dos exemplos utilizados na seção anterior, teve como objetivo verificar como o desempenho da ferramenta é afetado ao acumular a demanda de dois meses vizinhos. Esse teste se torna importante, uma vez que a ferramenta obteve resultados muito expressivos e que podem vir a influenciar o comercial da empresa a incluir outros clientes ou maior quantidade dos produtos em sua carteira.

As trinta instâncias foram construídas com o acúmulo da demanda de dois dias consecutivos (duas instâncias) encontradas nas demandas reais da empresa utilizadas nos experimentos da seção 4.1. Cada instância foi executada duas vezes, primeiro com o tempo máximo de execução determinado em 600 segundos e em seguida em 3.600 segundos.

Os resultados com cada instância nos testes com variação de demanda e do número de períodos são apresentados na Tabela 7. A primeira coluna refere-se ao número da instância, a segunda coluna traz a quantidade de peças disponíveis na entrada; a terceira coluna divulga a quantidade de peças que foram programadas pela ferramenta, enquanto a quarta coluna traz o *gap* de otimalidade. Na quinta e sexta colunas encontram-se os resultados para o tempo de execução de até 3.600 segundos.

A partir das trinta instâncias testadas, pode-se perceber que quando a quantidade de peças na entrada é alta, não é possível fabricar todas elas, dada a limitação da área. Destaca-se que o *gap* médio quando executadas com 600 segundos foi de 18,72%, mas que, ao aumentar o tempo para 3.600 segundos, foi possível baixar o *gap* médio para apenas 2.04 e aumenta a produção de 13 instâncias em 14 que não apresentaram a produção total da entrada. Portanto, só não houve melhora na instância 1, o que sugere pelo baixo *gap* que já era a melhor solução possível quando executada com 600 segundo, só não foi provada dentro do tempo disponível em ambas rodadas. As demais instâncias, com exceção da 10, possuem *gap* baixo, o que também sugere que já seja a solução ótima, precisando apenas de mais tempo para provar sua otimalidade.

Tabela 7 – Resultados com instâncias de demandas acumuladas

Instância	Nº Peças disponíveis	Nº Peças 600seg	GAP (%) 600seg	Nº Peças 3.600seg	GAP (%) 3600seg
01	3.496	3.136	0,28	3.136	0,27
02	3.573	3.262	4,41	3.272	1,32
03	3.396	3.180	8,04	3.194	1,90
04	3.231	3.043	11,16	3.062	1,58
05	3.095	3.005	23,54	3.023	0,60
06	2.407	2.399	64,61	2.407*	0,83
07	2.290	2.283	53,35	2.290*	0,72
08	3.118	2.938	5,11	2.943	2,31
09	3.729	3.445	13,13	3.479	1,63
10	2.979	2.950	53,63	2.963	26,99
11	1.972	1.972	0,69	1.972	0,64
12	2.330	2.314	81,89	2.330*	1,07
13	2.572	2.555	77,12	2.572*	0,96
14	2.120	2.120	1,25	2.120	1,00
15	1.493	1.493	1,73	1.493	1,60
16	1.245	1.245	2,02	1.245	1,34
17	1.500	1.500	2,70	1.500	1,49
18	1.575	1.575	1,49	1.575	1,36
19	1.526	1.526	1,98	1.526	0,13
20	1.606	1.606	3,28	1.606	0,99
21	1.271	1.271	1,10	1.271	0,94
22	985	985	2,35	985	2,13
23	1.631	1.609	91,95	1.631*	2,04
24	2.002	2.000	41,33	2.002*	0,97
25	1.432	1.432	1,51	1.432	1,05
26	819	819	3,50	819	1,75
27	647	647	1,20	647	0,38
28	803	803	2,79	803	1,79
29	1.398	1.398	1,00	1.398	0,62
30	918	918	3,54	918	0,87
TOTAL DE PEÇAS	61.159	59.429		59.614	
GAP MÉDIO			18,72		2,04

Fonte: Autor (2019).

Note que os valores em negrito na quinta coluna indicam que houve melhoria (maior quantidade de peças produzidas) em relação aos resultados da terceira coluna. O valor com ‘*’

indicam que ao melhorar a solução, também se produziu a totalidade de peças disponíveis na entrada.

5 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tratou de um problema encontrado em empresas fornecedoras de peças de alto valor agregado para o setor aeronáutico. O setor de galvanoplastia consiste no gargalo da empresa estudada. Ao final, pode-se concluir que os objetivos listados foram alcançados com sucesso.

5.1 VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS E RESPOSTA À QUESTÃO DE PESQUISA

Verifica-se no Capítulo 4 que todos os objetivos foram alcançados ao desenvolver e implementar um modelo algébrico para a programação da produção dos tanques.

Respondendo à questão de pesquisa, “Qual a melhor combinação de produtos e respectivas quantidades a ser feita em cada lote/tanque, respeitando todas as restrições técnicas e operacionais e, desta forma, obter a máxima produtividade?”. Ao utilizar instâncias reais da empresa, os resultados demonstram que a ferramenta obteve sucesso em comparação às práticas atuais, e que na maioria das instâncias conseguiu programar a produção de todas as peças disponíveis na entrada.

5.2. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Quanto às vantagens de utilizar a ferramenta proposta, destacam-se:

A melhoria proporcionada à programação da produção na linha de tratamento, com resultados muito superiores às praticadas na empresa;

Automatização da tarefa de programação. Conhecendo-se a entrada de peças no setor, a ferramenta não precisará da análise de um gestor de área para consolidar o programa, além de que, a programação se torna mais confiável e libera o gestor para realizar outras tarefas menos sistematizadas;

É possível implementar o uso da ferramenta uma vez que a empresa adquira o GAMS/CPLEX, que, dado o benefício esperado, se pagará rapidamente. Outra possibilidade é programar o modelo em linguagem de programação que possa ser incorporada ao ERP da empresa;

Os resultados indicaram também que agora há capacidade disponível nos tanques de processo da anodização crômica para absorção de novos negócios para a empresa contribuindo para a diluição de custos e aumento de recursos financeiros;

Espera-se que os resultados despertem a atenção dos gestores para realizarem estudos em outras áreas da empresa que possam ser o gargalo da vez.

5.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Com o objetivo de ampliar os estudos aqui iniciado nesta pesquisa, sugere-se o aprofundamento e a materialização das seguintes possibilidades:

Implementação de uma ferramenta computacional com interface de simples operação para o chão de fábrica;

Avaliar a possibilidade de expansão para outros processos dentro da área de tratamento superficial, por exemplo, na cabine de pintura;

Expandir a aplicação com suas devidas adequações de restrições para outras áreas produtivas dentro da empresa e/ou até unificar o processo de programação da produção; pode-se, assim, expandir os conceitos aplicados para toda a organização de modo que haja um aumento na produtividade da unidade.

5.4 RELATO DO SPONSOR

“Havia um grande desafio dentro de uma área de tratamento de superficial, onde o número de restrições e de conceitos a serem considerados, que foi de alguma forma aumentar a capacidade produtiva uma vez que este tipo de instalação é altamente custoso para se manter e também para aquisição de uma nova linha. E nas diversas possibilidades que teríamos, uma que foi certamente definida consistiu na aproximação junto a academia, onde ferramentas de engenharia foram aplicadas e os resultados surpreenderam, pois evidenciou a capacidade ainda não explorada para aquisição de novos produtos, além é claro da competitividade junto aos concorrentes em um mercado cada dia mais acirrado. A ferramenta demonstrou robustez pelos resultados e a implementação completa não será algo difícil de acontecer. Desta forma, consideramos que os resultados gerados pelo trabalho têm total aplicabilidade no dia a dia da área e trará bons frutos para o futuro próximo.”

REFERÊNCIAS

- ABSI, N.; KEDAD-SIDHOUM, S. The multi-item capacitated lot-sizing problem with setup times and shortage costs. **European journal of operational research**, Netherlands, v. 185, n. 3, p. 1351-1374, 2008.
- DE ARAUJO, S. A. *et al.* Period decompositions for the capacitated lot sizing problem with setup times. **Inform Journal on Computing**, United States, v. 27, n. 3, p. 431-448, 2015.
- ASSOCIAÇÃO DAS INDÚSTRIAS AEROESPACIAIS DO BRASIL. **Números da AIBA**. Disponível em: <http://www.aiab.org.br/numeros-da-aiab.asp>. Acesso em: 30 dez. 2018.
- BAE, H.; MOON, I.; YUN, W. Economic lot and supply scheduling problem: a time-varying lot sizes approach. **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 52, n. 8, p. 2422-2435, 2014.
- BALDO, T. A. *et al.* An optimization approach for the lot sizing and scheduling problem in the brewery industry. **Computers & Industrial Engineering**, United Kingdom, v. 72, p. 58-71, 2014.
- BERALDI, P. *et al.* Rolling-horizon and fix-and-relax heuristics for the parallel machine lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent set-up costs. **Computers & Operations Research**, United States, v. 35, n. 11, p. 3644-3656, 2008.
- BERTRAND, M. J. W.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, United Kingdom, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.
- BILLINGTON, P. J.; MCCLAIN, J. O.; THOMAS, L. J. Mathematical programming approaches to capacity-constrained MRP systems: Review, formulation and problem reduction. **Management Science**, United States, v. 29, n. 10, p. 1126-1141, 1983.
- BRAHIMI, N. *et al.* Single item lot sizing problems. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 168, n. 1, p. 1-16, 2006.
- CAMARGO, V. C. B.; MATTIOLLI, L.; TOLEDO, F. M. B. A knapsack problem as a tool to solve the production planning problem in small foundries. **Computers & Operations Research**, United States, v. 39, n. 1, p. 86-92, 2012.
- CLÍMACO, J. N.; ANTUNES, C. H.; ALVES, M. J. G. **Programação linear multiobjetiva**. Portugal: Imprensa Coimbra, 2003.
- COPIL, K. *et al.* Simultaneous lotsizing and scheduling problems: a classification and review of models. **OR spectrum**, Germany, v. 39, n. 1, p. 1-64, 2017.
- DREXL, A.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling: survey and extensions. **European Journal of operational research**, Netherlands, v. 99, n. 2, p. 221-235, 1997.

FERREIRA, D.; MORABITO, R.; RANGEL, S. Solution approaches for the soft drink integrated production lot sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 196, n. 2, p. 697-706, 2009.

FILHO, M. A. F. B.; SANTOS, M. O.; MENESES, C.N. Asynchronous teams for joint lot-sizing and scheduling problem in flow shops. **International Journal of Production Research**, United Kingdom, v. 50, n. 20, p. 5809-5822, 2012.

FLEISCHMANN, B. The discrete lot-sizing and scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, v. 44, n. 3, p. 337-348. 1990.

GEORGIADIS, P.; MICHALOUDIS, C. Real-time production planning and control system for job-shop manufacturing: A system dynamics analysis. **European Journal of Operational Research**, Netherlands, v. 216, n. 1, p. 94-104, 2012.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Editora Atlas v.61, n.5, p.16-17. 2002.

GOMES, S. B. V.; BARCELLOS, J. A.; FONSECA, P. V. R. **O apoio ao desenvolvimento do setor de aeroespço e defesa: visões da experiência internacional**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2017.

GOMES, S. B. V. **A indústria aeronáutica no Brasil: evolução recente e perspectivas**. Rio de Janeiro: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2012.

HAASE, K.; KIMMS, A. Lot sizing and scheduling with sequence-dependent setup costs and times and efficient rescheduling opportunities. **International Journal of Production Economics**, Netherlands, v. 66, n. 2, p. 159-169, 2000.

HANSSMANN, F. **Operations research in production and inventory control**. New York: Wiley. 1962.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. Introdução à pesquisa operacional. United States: McGraw Hill. 2013.

HUANG, J. Y.; YAO, M. J. On the optimal lot-sizing and scheduling problem in serial-type supply chain system using a time-varying lot-sizing policy. **International Journal of Production Research**, v. 51, n. 3, p. 735-750. 2013.

ILOG. **IBM ILOG CPLEX Optimization Studio CPLEX User's Manual**. 2016 Disponível em:

https://www.ibm.com/support/knowledgecenter/SSSA5P_12.7.0/ilog.odms.studio.help/pdf/usrcplex.pdf. Acesso em: 10 out. 2019.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. An industrial extension of the discrete lot-sizing and scheduling problem. **IIE transactions**, v. 36, n. 1, p. 47-58, 2004.

JANS, R.; DEGRAEVE, Z. Modeling industrial lot sizing problems: a review. **International Journal of Production Research**, Netherlands, v. 46, n. 6, p. 1619-1643, 2008.

KARIMI, B.; GHOMI, S. M. T. F.; WILSON, J. M. The capacitated lot sizing problem: a review of models and algorithms. **Omega**, Elsevier, v. 31, n. 5, p. 365-378, 2003.

KOVÁCS, A.; BROWN, K. N.; TARIM, S. A. An efficient MIP model for the capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setups. **International Journal of Production Economics**, United Kingdom, v. 118, n. 1, p. 282-291, 2009.

LUCHE, José Roberto Dale. **Pesquisa operacional II**: aula 04: exercitando o *Branch and Bound*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=TgNx403i72Y>. Acesso em: 06 out. 2019.

LUCHE, J. R. D.; MORABITO, R.; PUREZA, V. Combining process selection and lot sizing models for production scheduling of electrofused grains. **Asia-Pacific Journal of Operational Research**, Singapore, v. 26, n. 03, p. 421-443, 2009.

MCCARL, B. A. *et al.* **McCarl GAMS user guide**: version 24.0. Washington: GAMS Development Corporation, 2014.

MANNE, A. S. Programming of economic lot sizes. **Management science**, United States, v. 4, n. 2, p. 115-135. 1958.

MARCONI, M. A. *et al.* **Metodologia de pesquisa**. São Paulo: Atlas. 2004.

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, Pró-Reitoria de Graduação, 2011.

MARTÍNEZ, K. P. *et al.* An exact optimization approach for an integrated process configuration, lot-sizing, and scheduling problem. **Computers & Operations Research**, United States, v. 103, p. 310-323, 2019.

MORABITO, R.; PUREZA, V. **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Campus, 2010.

PONGCHAROEN, P. *et al.* Stochastic optimisation timetabling tool for university course scheduling. **International Journal of Production Economics**, Netherlands, v. 112, n. 2, p. 903-918, 2008.

POTTS, C. N.; WASSENHOVE, L. N. V. Integrating scheduling with batching and lot-sizing: a review of algorithms and complexity. **Journal of the Operational Research Society**, United Kingdom, v. 43, n. 5, p. 395-406, 1992.

PRADO, D. S. **Programação linear**. 7.ed. São Paulo: Falconi, 2016.

ROGERS, J. A. computational approach to the economic lot scheduling problem. **Management science**, United States, v. 4, n. 3, p. 264-291, 1958.

SERESHTI, N.; BIJARI, M. Profit maximization in simultaneous lot-sizing and scheduling problem. **Applied Mathematical Modelling**, Netherlands, v. 37, n. 23, p. 9516-9523, 2013.

TONAKI, V. S.; TOLEDO, F. M. B. An approach for solving the lot-sizing problem of a market-driven foundry. **Journal of the Operational Research Society**, United Kingdom, v. 61, n. 1, p. 108-114, 2010.

APÊNDICE A – TABELA COM INFORMAÇÕES PARA ELABORAÇÃO DO MODELO

Informações Gerais								Sequência de processos												
Part Number	Tipo da liga da MP	Tipo de Processo de anodização	Quantidade de peças por gancheras	Tamanho do lote	Quantidade de gancheras por tanque		Demanda 2020	NDT	Jateamento	Mascaramento	Anodização Sulfúrica	Anodização Crômica	Jateamento	Polimento	Brunimento	Anodização Dura	Polimento	Brunimento	Alodine	Pintura
					B1	B2														
830D0100-01	7075	AC-BII	12	36	5	2	26364	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
829D0100-01	7075	AC-BII	12	36	5	2	8464	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
787A0100-03	3.4354	AC-BII	3	20	7	3	7806	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1320-0101	3.2384	AC-LTS30	24	71	5	2	7768	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
831A0600-03	7075	AC-BII	10	40	9	4	7410	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1806-041	2618A	AC-BI	2	20	6	2	5610	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1806D0900-01	2618A	AC-LTS30	60	60	10	4	5483	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1806A0800-02	2618A	AC-LTS30	12	60	7	3	5338	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1312-0101	3.2384	AC-LTS30	24	52	5	2	5304	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1806-5051	2618A	AC-LTS30	10	60	6	3	5235	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1806-012	3.1754	AC-BI	2	13	6	3	5170	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
4774-0002	7075	AC-BII	12	36	5	2	4859	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1567A0100-01	3.4364	AC-BVI	6	40	8	3	4472	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
4775-0002	7075	AC-BII	12	36	5	2	4466	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
810A0400-02	3.4364	AC-BII	12	20	5	2	4257	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
786A0900-02	7075	AC-BII	6	40	9	4	4090	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
786A0600-01	3.2384	AC-BI	3	28	7	2	3860	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
786A0700-01	3.2384	AC-BI	8	28	5	2	3726	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
926-0102	3.2384	AC-BI	12	56	5	2	3173	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
3445A1800-01	2618A	AC-LTS30	6	60	8	4	3092	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
3957A0600-01	3.1754	AC-LTS30	24	60	5	2	2838	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
4778-0102	7075	AC-BII	8	40	5	2	2742	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
3958A0600-01	3.1754	AC-LTS30	24	60	5	2	2675	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1386A2200-02	3.4364	AC-BII	12	40	5	2	2652	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6896A0100-01	7075	AC-BII	12	36	5	2	2168	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1556A0200-02	3.4364	AC-BII	12	20	5	2	1881	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1559A0200-02	3.4364	AC-BII	12	15	5	2	1850	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1555A0200-01	3.4364	AC-BII	12	20	5	2	1840	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
60078-0900	2618A	AC-LTS30	12	20	8	4	1814	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1553A0200-02	3.4364	AC-BII	12	15	5	2	1812	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1554A0200-01	3.4364	AC-BII	8	15	5	2	1800	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
341-0250	2618A	AC-LTS30	12	45	7	3	1654	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
60091-011	2024	AC-LTS30	12	50	7	3	1578	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
4781A0100-01	7075	AC-BII	8	30	5	2	1395	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
342-0460	2618A	AC-LTS30	12	60	9	4	1336	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
S4-9504612	3.2384-6	AC-BI	21	50	5	2	1258	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
S4-9504622	3.2384-6	AC-BI	21	50	5	2	1250	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
6774-01030	2618A	AC-LTS30	12	45	7	3	1146	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6754-0481	2618A	AC-LTS30	12	45	7	3	1140	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0

Informações Gerais								Seqüência de processos												
Part Number	Tipo da liga da MP	Tipo de Processo de anodização	Quantidade de peças por gancheras	Tamanho do lote	Quantidade de gancheras por tanque		Demanda 2020	NDT	Jateamento	Mascaramento	Anodização Sulfúrica	Anodização Crômica	Jateamento	Polimento	Brunimento	Anodização Dura	Polimento	Brunimento	Alodine	Pintura
					B1	B2														
3470-085	2618A	AC-LTS30	6	24	7	3	1113	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6753-02011	2618A	AC-LTS30	12	45	7	3	940	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
S4-9704411	3.4364	AC-BII	6	40	9	3	866	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
918-0102	3.2384-6	AC-BI	15	50	5	2	824	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
920A0100-01	3.4364	AC-BII	8	15	5	2	816	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0
5450A0000-01	7075	AC-BII	12	25	7	3	776	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1394-0101	3.2384	AC-LTS30	24	30	5	2	741	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
6864-0280	2618A	AC-LTS30	4	11	6	2	723	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1568-0101	3.2384	AC-LTS30	24	30	5	2	711	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
6884-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	658	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6885-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	658	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6886-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	658	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6887-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	658	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6898A0100-01	7075	AC-BII	12	36	5	2	658	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6724-0941	2024	AC-LTS30	12	25	7	3	627	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
1964A2200-03	3.4364	AC-BII	8	10	4	1	619	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6882-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	603	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6883-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	603	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6888-2011	7050	AC-BII	8	20	5	2	599	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
798-0184	2024	AC-LTS30	5	10	5	3	581	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
962A0100-04	3.1754	AC-LTS30	6	15	5	2	502	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
S4-9704300	3.4364	AC-BVI	6	40	8	3	500	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	0
1642A0400-01	7075	AC-BVI	6	20	6	3	483	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0
70069-23	2618A	AC-LTS30	12	22	5	2	481	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
6724-0271	2618A	AC-LTS30	12	50	8	3	480	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
2434A2200-01	7075	AC-BII	6	30	5	2	479	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0
3470-028	2618A	AC-LTS30	6	24	7	3	461	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0