

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE
MONTAGENS ESTRUTURAIS NA INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

Bruno Jensen Virginio da Silva

SÃO CARLOS
2020

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**OTIMIZAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO DE
MONTAGENS ESTRUTURAIS NA INDÚSTRIA
AERONÁUTICA**

Bruno Jensen Virginio da Silva

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do Título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

Coorientadora: Prof. Dra. Vitória Maria Miranda Pureza

**SÃO CARLOS
2020**

B. J. V., Silva

Otimização da programação de montagens estruturais na
Indústria Aeronáutica / Silva B. J. V. -- 2020.
160f.

Tese de Doutorado - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Reinaldo Morabito

Banca Examinadora: Moacir Godinho Filho, Horácio
Hideki Yanasse, Miguel Cezar Santoro, Denise Sato
Yamashita

Bibliografia

1. Indústria Aeronáutica. 2. Montagem Estrutural. 3.
Programação da Produção. I. B. J. V., Silva. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Bruno Jensen Virginio da Silva, realizada em 09/10/2020.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto (UFSCar)

Profa. Dra. Vitória Maria Miranda Pureza (UFSCar)

Prof. Dr. Moacir Godinho Filho (UFSCar)

Prof. Dr. Horacio Hideki Yanasse (UNIFESP)

Prof. Dr. Miguel Cezar Santoro (USP)

Profa. Dra. Denise Sato Yamashita (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Dedicatória

Aos meus pais, Neuza e José, pelo apoio durante toda a minha vida na conquista de objetivos profissionais e acadêmicos e na preocupação com a minha educação e preparo como pessoa. Esse apoio foi fundamental na conquista desta importante etapa da vida.

A todas as pessoas queridas que souberam compreender o motivo da minha ausência e sempre me motivaram a continuar ao longo dos anos que o doutorado exigiu, apesar da distância.

Dedico essa tese a todos aqueles que fizeram e fazem o progresso da indústria aeroespacial no Brasil e no mundo.

Agradecimento

Agradeço ao Breno Junio, pelo fundamental apoio no desenvolvimento dos códigos, em especial em Java, e com as ferramentas de tecnologia da informação.

Agradeço ao Prof. Reinaldo Morabito, pela amizade, confiança e orientação do doutorado e em todos os outros trabalhos que fizemos juntos. Agradeço à Profa. Vitória, pela fundamental ajuda e compartilhamento de experiência no desenvolvimento das heurísticas e coorientação na pesquisa.

Agradeço aos membros da banca de qualificação e defesa, Prof. Moacir Godinho, Prof. Horário Yanasse, Prof. Miguel César Santoro e Dra. Denise Yamashita pelos comentários e sugestões para o texto da tese e métodos de solução.

“Truth in politics is optional. Truth in engineering is mandatory”
A verdade na política é opcional. A verdade na engenharia é mandatória.
Igor Sikorsky (1889-1972)

Resumo

Neste trabalho é estudado a programação de atividades em montagens estruturais na indústria aeronáutica. As montagens estruturais formam a etapa em que as aeropeças, os subconjuntos e as principais estruturas das aeronaves, como as asas, empenagens, dianteira, traseira e fuselagem, são montadas entre si, formando as aeroestruturas. Essencialmente, o problema estudado nessa tese é como distribuir as atividades de montagem ao longo do tempo e dos recursos, considerando a utilização de gabaritos de montagem e trabalhadores, com diferentes especializações, respeitando os planos de produção e várias restrições tecnológicas, a um mínimo custo. O objetivo dessa pesquisa é otimizar o custo de mão de obra do problema de programação de montagens estruturais de aeronaves, baseado em um caso real presente na indústria aeronáutica. Para isso, foram desenvolvidas e aplicadas abordagens de otimização baseadas em modelos matemáticos e métodos de solução heurísticos. Um outro objetivo desse trabalho é contribuir para a prática de pesquisa operacional, sendo que o problema de programação de montagem estrutural é descrito detalhadamente e é proposto um modelo para representá-lo formalmente, de modo que a sua descrição possa ser utilizada no lugar de problemas idealizados para motivar pesquisas futuras correlatas. Neste trabalho, é desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista para representar o problema, baseado em modelos de programação de projetos com recursos restritos e modelos de problemas de disponibilidade de recursos. Foram realizados experimentos computacionais com amostras reais fornecidas por uma indústria aeroespacial brasileira, e os resultados demonstraram que o modelo proposto é capaz de encontrar soluções efetivas para problemas de tamanho realista. Métodos heurísticos construtivos, buscas locais especializadas, múltiplos inícios aleatórios e heurísticas de programação matemática foram desenvolvidos e aplicados utilizando Java e GAMS/CPLEX, visando obter boas soluções em tempos computacionais aceitáveis na prática. Os resultados dos experimentos computacionais demonstraram que as heurísticas conseguem diferentes combinações de tempo computacional e qualidade de solução. Em geral, os tempos computacionais utilizados para gerar soluções pelos métodos heurísticos são menores do que os utilizados pelos modelos matemáticos com o CPLEX e, muitas vezes, com qualidade de solução muito próxima. As soluções geradas com o modelo matemático e o CPLEX utilizam um tempo computacional longo em vários casos, porém, geraram as melhores soluções em

todos os experimentos. Os resultados demonstraram que é possível gerar soluções de boa qualidade para a programação de montagens estruturais aeronáuticas utilizando os métodos propostos. A montagem estrutural de aeronaves exige várias operações, com uma rede de precedência complexa e interação entre diversos recursos produtivos, o que torna o planejamento e a programação de montagens uma atividade complexa para ser realizada manualmente por humanos, sem apoio de tecnologia computacional e analítica adequada. Além disso, essa pesquisa aborda um setor com grande relevância econômica para o Brasil. O desenvolvimento de tecnologia voltada para ganhos competitivos desse setor tem o potencial de contribuir para o seu desenvolvimento e sua competitividade no Brasil e no mundo.

Palavras Chave: montagem estrutural, indústria aeronáutica, programação da produção, modelos de programação matemática, heurística de programação matemática, heurísticas, programação de projetos.

Abstract

In this research, the structural assembly schedule of activities in the aeronautical industry is studied. Structural assemblies are the manufacturing stage in which the parts, sub-assemblies and the main structural parts of the airplanes, like wings, stabilizer, front, rear and fuselage, are assembled together, forming the aerostructures. Essentially, the problem studied in this thesis is how to allocate the assembly activities over time and resources, considering the use of assembly fixtures and workers, with different specializations, respecting the production plans and technological constraints at a minimum cost. The objective of this research is to optimize the labor cost of the airplane structural assembly scheduling problem, based on a real case in the aerospace industry. To do that, optimizations approaches based in mathematical models and heuristic methods were developed. Another objective of this research is to contribute to the practice of the operational research, considering that the structural assembly is described in details and it is proposed a model to represent it mathematically in a way that its description could be used instead of idealized problems to motivated future correlated research. In this work, a mixed integer linear programming model is developed to represent the problem, based on resource constrained project scheduling and resource availability models. Computational experiments were performed with real data provided by a Brazilian aerospace company, and the results showed that the proposed model is capable of generating solutions to real size problems. Constructive heuristic methods, specialized local searches, random multistart and mathematical programming heuristics were developed and applied using Java and GAMS/CPLEX, in order to obtain good solutions in acceptable computational times in practice. The results of the computational experiments showed that the heuristics achieve different combinations of computational time and solution quality. In general, the computational times used to generate solutions using heuristic methods are shorter than those used by mathematical models with CPLEX and, sometimes, with very close solution quality. The solutions generated using the mathematical model and CPLEX use a long computational time in some cases, however, they generated the best solutions in all experiments. The results showed that is possible to generate good quality solutions for the aeronautical assembly scheduling using the proposed methods. Structural assembly of airplanes requires several operations, with a complex precedence network and interaction among many productive

resources, which makes assembly and scheduling and planning a complex activity to be performed manually by humans, without the support of computer and analytical technology. In addition, this research studies an industry with great economic relevance to Brazil. The development of technology aiming competitive benefits to this industry has the potential to contribute to its development and competitiveness in Brazil and worldwide.

Key words: structural assembly, aeronautics industry, production scheduling, mathematical programming models, heuristics based on mathematical programming, heuristics, project scheduling.

Lista de Figuras

Figura 1: Boeing 737 NG. Fonte: Boeing (2017a).....	25
Figura 2: Etapas de produção na indústria aeronáutica. Fonte: Embraer (2017).....	26
Figura 3: Processo de pintura de aeropreças. Fonte: Figeac-Aero (2017).....	27
Figura 4: Montagem final de um Boeing 777. Fonte: AviationCV (2017).....	28
Figura 5: Montagem final do Boeing 787 <i>Dreamliner</i> . Fonte: Airchive (2017).....	28
Figura 6: Operário realizando operações de furação na montagem estrutural de um SU-34 russo, na planta de Novosibirsk. Fonte: <i>Asian Defence News</i> (2017).....	30
Figura 7: Operação de cravação de rebites de aviões na Segunda Guerra Mundial. Fonte: <i>History</i> (2017).....	30
Figura 8: Equipamento de rebiteagem automática. Fonte: Gemcor (2017).....	31
Figura 9: Gabarito de montagem das asas do Cessna <i>Citation Longitude</i> . Fonte: <i>The Whichita Eagle</i> (2017).....	32
Figura 10: Gabarito de montagem da porta superior traseira do A400M Atlas. Fonte: <i>Composite World</i> (2017).....	32
Figura 11: Montagem do interior de um Sukhoi <i>Super Jet 100</i> . Fonte: <i>Asian Defence News</i> (2017).....	33
Figura 12: Selagem de interfaces de um AC-130J <i>Ghostrider</i> . Fonte: Tinker (2017).....	34
Figura 13: Montagem estrutural da sessão de fuselagem. Fonte: Avia.pro (2017).....	35
Figura 14: Custo acumulado na aeronave durante todo o processo de manufatura. Fonte: Chao e Graves (1992, 1998).....	69
Figura 15: Plano de produção da montagem estrutural. Fonte: Silva e Morabito (2015).....	71
Figura 16: Plano de montagem estrutural e o programa de produção.....	71
Figura 17: Quantidade de aeronaves em montagem. Fonte: Silva e Morabito (2015).....	72
Figura 18: As representações das atividades utilizadas na rede de precedência. Fonte: Pinedo (2005).....	74
Figura 19: Rede de precedência da montagem estrutural.....	78
Figura 20: Plano de produção ilustrativo.....	80
Figura 21: Distribuição dos turnos do trabalho.....	81
Figura 22: Ajuste da duração das atividades conforme os turnos ativados e desativados.....	82
Figura 23: Ajuste da duração das atividades de cura conforme os finais de semana.....	83
Figura 24: Ajuste da duração das atividades conforme os turnos ativados e desativados.....	83
Figura 25: Programação das atividades para um exemplo ilustrativo com a montagem de uma aeronave por mês e 480 horas de <i>lead time</i>	85
Figura 26: Utilização de mão de obra por tipo no exemplo ilustrativo.....	86
Figura 27: Funcionamento das restrições de consumo de recursos.....	91
Figura 28: Exemplo ilustrando o funcionamento da restrição de precedência imediata.....	92
Figura 29: Exemplo ilustrando o funcionamento da restrição de precedência.....	92
Figura 30: Pseudocódigo da heurística construtiva.....	100
Figura 31: Pseudocódigo da heurística de busca local.....	103
Figura 32: Pseudocódigo da heurística de múltiplos inícios aleatórios.....	106
Figura 33: Algoritmo da heurística de programação matemática.....	113
Figura 34: Variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando o modelo com único modo.....	115
Figura 35: Variação da quantidade de mão de obra em função do dia da semana de início da produção para uma aeronave utilizando um único modo e <i>lead time</i> 396 horas.....	116

Figura 36: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do <i>lead time</i> de produção para 2 aeronaves por mês com um único modo.....	117
Figura 37: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do <i>lead time</i> de produção para 3 aeronaves por mês com um único modo.....	118
Figura 38: Variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando múltiplos modos de execução.....	121
Figura 39: Comparação da variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando um único modo e múltiplos modos de execução.....	122
Figura 40: Variação da quantidade de mão de obra em função do dia da semana de início da produção com múltiplos modos e uma aeronave no plano com <i>lead time</i> 396 horas.....	123
Figura 41: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do <i>lead time</i> de produção para 2 aeronaves por mês utilizando múltiplos modos.....	123
Figura 42: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do <i>lead time</i> de produção para 3 aeronaves por mês utilizando múltiplos modos.....	124
Figura 43: Convergência dos limitantes inferior e superior do experimento 34.....	127
Figura 44: Utilização de mão de obra para o experimento com <i>lead time</i> 480 e tempo de ciclo de 160.....	128
Figura 45: Comparação do desempenho computacional e da qualidade das soluções para os vários métodos utilizados.....	138

Lista de tabelas

Tabela 1: Palavras chaves utilizadas na busca de artigos nas bases de dados.....	53
Tabela 2: Duração, tipo e recursos das atividades de montagem de uma aeronave em único modo de execução.....	75
Tabela 3: Duração das atividades e consumo de recursos conforme o modo de execução.....	76
Tabela 4: Turnos de trabalho do plano de produção.....	80
Tabela 5: Parâmetros do exemplo ilustrativo do funcionamento das restrições (37) e (38).....	90
Tabela 6: Funcionamento detalhado das restrições (38).....	90
Tabela 7: Equação de precedência imediata para o exemplo ilustrativo.....	92
Tabela 8: Equação de precedência para o exemplo ilustrativo.....	93
Tabela 9: Resultados computacionais dos experimentos realizados com o modelo de único modo.....	119
Tabela 10: Resultados computacionais dos experimentos realizados com múltiplos modos.	126
Tabela 11: Resultados computacionais dos experimentos com a heurística construtiva.....	128
Tabela 12: Resultados dos experimentos computacionais com a heurística de busca local...	129
Tabela 13: Comparação da melhoria da busca local em relação à solução inicial.....	130
Tabela 14: Resultados da Heurística de Múltiplos Inícios Aleatórios.....	131
Tabela 15: Comparação da melhoria da busca local em relação à solução inicial.....	131
Tabela 16: Desempenho computacional da heurística de RMH combinada com <i>Fix-and-Optimize</i> para planos com múltiplos modos.....	133
Tabela 17: Resultados da Heurística de Múltiplos Inícios Aleatórios combinada com a <i>Fix-and-Optimize</i>	134
Tabela 18: Desempenho computacional da heurística de programação matemática para planos com múltiplos modos.....	136
Tabela 19: Comparação da qualidade das soluções e duração das duas MIP Heurísticas.....	137
Tabela 20: Resultados dos experimentos nos melhores casos para todos os exemplares e métodos utilizados.....	140

Lista de Siglas

ALB – *Assembly Line Balance*
BKS – *Best Known Solution*
CNC – *Computer Numerical Control*
CONWIP – *Constant Work in Process*
CPM – *Critical Path Method*
CTCTP – *Continuous Time/Cost Trade-off Problem*
CTRTP – *Continuous Time/Resource Trade-off Problem*
DES – *Discrete Event Simulator*
DSS – *Decision Support System*
DTCTP – *Discrete Time/Cost Trade-off Problem*
DTRTP – *Discrete Time/Resource Trade-off Problem*
EADS – *European Aeronautic Defense and Space Company*, atual Airbus
EDD – *Earliest Due Date*
ETO – *Engineering To Order*
EXCH – *Heurística Exchange ou Fix-and-Optimize*
FAL – *Final Assembly Line*
GAMS – *General Algebraic Modeling System*
GRP – *Generalized Precedence Constraints*
HH – *Horas homem*
IAI – *Israel Aerospace Industries*
ISS – *International Space Station*
IWO – *Invasive Weed Optimization*
LAI – *Lean Aerospace Initiative*
LB – *Local Branching*
LCS – *Littoral Combat Ship*
MDTRTP – *Multiple-DTRTP*
MIP – *Mixed Integer Problem*
MIT – *Massachusetts Institute of Technology*
MRCPSP – *Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem*
MRIP – *Multi-mode Resource Investment Problem*
MRTT – *Multi Role Transport Tanker*
MTCPSP – *Multi-mode Time Constrained Project Scheduling Problem*
NASA – *National Aeronautical and Space Administration*
NS – *Número de série*
PERT – *Program Evaluation and Review Technique*
PRCPSP – *Preemptive RCPSP*
PSP – *Payment Scheduling Problem*
RACP – *Resource Availability Cost Problem*
RACPT – *Resource Availability Cost Problem with Tardiness*
RCPSP – *Resource Constrained Project Scheduling Problem*
RCPSPDCF – *Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows*
RINS – *Relaxation Induced Neighborhood Search*
RIP – *Resource Investment Problem*
RLP – *Resource Leveling Problem*
RMH – *Random Multistart Heuristic*

RPWT – *Ranked Positional Weight Technique*
RRTP – *Resource/Resource Trade-off Problem*
SIBS – *Simulation-Based Scheduler*
TCPSP – *Time Constrained Project Scheduling Problem*
TRTP – *Time/Resource Trade-off Problem*
USAF – *United States Air Force*
UTC – *United Technologies Corporation*

Sumário

1. Introdução.....	17
1.1. Objetivo.....	18
1.2. Justificativa.....	18
1.3. Método de pesquisa.....	20
1.4. Organização do trabalho.....	23
2. Revisão de Literatura.....	24
2.1. Indústria Aeroespacial.....	24
2.1.1. Produção de aviões.....	25
2.1.2. Montagem estrutural.....	28
2.2. Programação de projetos.....	35
2.2.1. Programação de projetos com recursos restritos.....	39
2.2.2. Programação de projetos com tempo restrito.....	44
2.2.3. Problemas de programação de projetos com <i>trade-offs</i>	48
2.2.4. Casos especiais.....	50
2.3. Aplicação de otimização matemática na manufatura da indústria aeroespacial.....	52
2.3.1. Gestão da produção.....	53
2.3.2. Fabricação aeroespacial.....	54
2.3.3. Montagem Estrutural.....	57
2.3.4. Montagem Final.....	59
2.3.5. Outros trabalhos correlatos.....	61
2.4. Quadro comparativo com a presente pesquisa.....	62
3. Descrição do Problema.....	67
3.1. Planejamento de montagem aeronáutica.....	67
3.2. Descrição do problema de montagem estrutural aeronáutico.....	72
4. Modelagem Matemática.....	87
4.1. Modelo matemático com único modo de execução.....	87
4.2. Modelo matemático com múltiplos modos de execução.....	93
5. Métodos Heurísticos.....	96
5.1. Métodos heurísticos.....	96
5.1.1. Heurística construtiva.....	98
5.1.2. Heurística de busca local.....	100
5.1.3. Heurística de múltiplos inícios aleatórios.....	103
5.2. Heurística de programação matemática (MIP- <i>Heuristics</i>).....	106
5.2.1. Heurística de programação matemática proposta.....	108
6. Resultados Computacionais.....	113
6.1. Resultados dos experimentos computacionais do modelo com único modo.....	113
6.2. Resultados dos experimentos computacionais do modelo com múltiplos modos.....	120
6.3. Resultados dos experimentos computacionais da heurística construtiva.....	126
6.4. Resultados dos experimentos computacionais da heurística de busca local.....	128
6.5. Resultados dos experimentos computacionais da heurística de múltiplos inícios aleatórios.....	129
6.6. Resultados dos experimentos computacionais da combinação da heurística de múltiplos inícios aleatórios com <i>Fix-and-Optimize</i>	130
6.7. Resultados dos experimentos computacionais com a heurística de programação matemática.....	133

6.8. Comparação dos resultados computacionais dos diversos métodos.....	136
7. Conclusões e Perspectivas.....	140
Referências.....	143

1. Introdução

A indústria aeroespacial é formada por três segmentos: aeronáutico, defesa e espacial. O segmento aeronáutico é o responsável pela concepção e produção de aeronaves e seus sistemas e subsistemas. O segmento de defesa é responsável por sistemas militares para utilização por governos com finalidades de segurança, tais como aeronaves, equipamentos de vigilância e armamentos, como mísseis e bombas, entre outros. O segmento espacial é responsável pelas tecnologias e sistemas utilizados para operar fora da atmosfera da terra, ou seja, no espaço, como satélites, foguetes lançadores, equipamentos e serviços que os auxiliem nas suas atividades. A indústria aeroespacial representa milhões de empregos no mundo, e é responsável por centenas de bilhões de dólares de faturamento anual (AIA, 2019).

A produção de aeronaves pode ser dividida em três grandes etapas (EMBRAER, 2017). A etapa de fabricação transforma a matéria-prima em peças, chamadas de aeropeças ou peças primárias. As montagens estruturais formam a etapa em que as aeropeças, os subconjuntos e as principais estruturas das aeronaves, como asas, empenagens, dianteira, traseira e fuselagem, são montadas entre si, formando as aeroestruturas. Por fim, a etapa de montagem final é aquela em que todos os componentes estruturais são montados entre si, e os sistemas e subsistemas, como aviônica, motores, trens de pouso, entre outros, são montados e integrados na aeronave. Essa pesquisa foca especificamente na montagem estrutural, baseada no caso real de uma montagem de aeronaves a jato realizada no Brasil por uma empresa do setor aeronáutico. Durante a montagem estrutural, as atividades competem pela alocação de vários recursos produtivos escassos, como mão de obra e gabaritos de montagem. Basicamente, o problema é fazer a programação dessas atividades e recursos, respeitando todas as restrições tecnológicas e prazos de produção, a um custo mínimo.

A montagem estrutural aeronáutica é realizada no Brasil principalmente pela Embraer e por outras empresas fornecedoras de aeroestruturas para os aviões da Embraer, tais como a Latecoere, Alestis, Aernnova e Sonaca/Sobraer. Empresas de aviação leve e aeronaves não tripuladas também realizam montagem estrutural aeronáutica de menor porte, sendo que este tipo de montagem está fora do escopo dessa pesquisa. A mão de obra utilizada na montagem estrutural aeronáutica é altamente qualificada e, por isso, é escassa e cara. Além disso, outros recursos produtivos utilizados nessa etapa de produção são específicos para as aeronaves de cada empresa e exigem grandes investimentos por parte das mesmas para serem projetados e produzidos (CAGGIANO; MARZANO; TETI, 2016). A montagem estrutural de aeronaves requer várias

operações, apresentando uma rede de precedência complexa e interação entre diversos recursos produtivos, o que torna o planejamento e a programação de montagens uma atividade complexa para ser realizada por humanos sem apoio de tecnologia analítica adequada.

1.1. Objetivo

O objetivo dessa pesquisa é otimizar um o problema de programação de montagens estruturais de aeronaves a jato, baseados em um caso real presente na indústria aeronáutica. As atividades de montagem estrutural devem ser programadas considerando vários aspectos particulares, como a utilização de múltiplos turnos de trabalho, integração entre atividades de montagem com selagem, cadência de produção de aeronaves, rede de precedência, entre outros, de forma a minimizar o custo total de produção. Este custo é formado pela soma dos custos em capacidade produtiva, devido à quantidade de mão de obra alocada na montagem, e o estoque em processo, que estão em uma relação de conflito ou um *trade-off*.

Para atingir o objetivo, foram desenvolvidas e aplicadas abordagens de otimização baseadas em modelos matemáticos e métodos de solução heurísticos. As abordagens de otimização propostas para esse problema devem ser capazes de encontrar soluções que equilibrem esse *trade-off*, e minimizem o custo global de produção, utilizando um tempo computacional razoável para a tomada de decisão na prática de um planejamento e controle de produção desse tipo. Convém salientar que apesar da relevância desse problema na prática, foram encontrados poucos trabalhos na literatura que propuseram abordagens de otimização na mesma linha desta pesquisa sendo que, os trabalhos encontrados possuem hipóteses muito simplificadoras. Um outro objetivo desse trabalho também é contribuir para a prática de pesquisa operacional. Essa pesquisa contribui para a área de manufatura aeronáutica, descrevendo formalmente e em detalhes como é o problema na prática, de modo que possa utilizar essa descrição e formulação para motivar pesquisas futuras.

1.2. Justificativa

A programação de montagens da indústria aeronáutica é um problema pouco estudado na literatura científica. Alguns trabalhos reportados na literatura possuem foco principal em submontagens utilizando apenas um gabarito, tais como Silva (2010), Silva et al. (2011), Silva et al. (2014a, 2014b), e em montagem final, como em Borreguero et al. (2015a, 2015b). Apesar da importância prática do problema, existem poucos trabalhos reportados que estudam a montagem estrutural. Silva e Morabito (2015) fizeram um primeiro estudo exploratório de uma montagem estrutural considerando várias hipóteses simplificadoras, e os resultados deste estudo motivou o desenvolvimento da presente pesquisa.

O problema estudado nessa tese é de montagem estrutural aeronáutica. Nesse problema, atividades são realizadas utilizando trabalhadores e gabaritos de montagem. Existem dois tipos de trabalhadores, os montadores e os seladores, de acordo com a respectiva qualificação. As atividades são divididas em três tipos, que são as montagens, realizadas pelos montadores, as selagens, realizadas pelos seladores, e a cura da selagem, que não utiliza trabalhadores de nenhum tipo, mas ocupa os gabaritos de montagem. O horizonte de planejamento é dividido em turnos de trabalho, cada um com as suas equipes de trabalhadores, ou seja, cada turno pode ter um número diferente de trabalhadores de cada especialidade. A quantidade de trabalhadores em uma equipe não muda ao longo do horizonte de planejamento para um mesmo tipo de mão obra. Isso acontece porque a empresa não pode contratar funcionários sob demanda no curto prazo ou mudá-los de turno, e ela deve definir o tamanho das equipes de forma a atender à demanda. Por isso, o recurso mão de obra é disponível segundo um calendário, de acordo com os turnos de trabalho previamente definidos.

A empresa pode definir que um turno, por exemplo, o turno da madrugada, é desativado, o que significa que não haverá trabalhadores disponíveis nesse horário para executar as atividades. No entanto, as atividades de cura não precisam de trabalhadores e serão realizadas nesse caso, independentemente do turno de trabalho estar ativo ou não. Pela mesma razão, é possível explorar essa característica das atividades de cura e utilizar os finais de semana e feriados, com a finalidade de encontrar soluções melhores. Como as atividades de montagem e selagem precisam de trabalhadores para serem realizadas, no caso em que existir um turno desativado, estas atividades continuarão no próximo turno ativo disponível. Conseqüentemente, uma diferença em relação aos modelos matemáticos descritos na literatura é que a duração da atividade depende do instante de início desta. As atividades de cura sempre são iniciadas imediatamente após a sua respectiva atividade de selagem ser concluída, gerando uma relação chamada de precedência imediata. Essa pesquisa visa contribuir com métodos de solução apropriados e efetivos para tratar esse problema utilizando abordagens de otimização baseadas em modelos matemáticos.

As montagens estruturais são etapas intermediárias de produção de aeronaves, em que são utilizadas grandes quantidades de recursos e os produtos em produção já possuem alto valor agregado. Por isso, oferecem oportunidades de melhorias significativas e preocupações com redução de custos de produção. Por exemplo, a redução de 10% no custo total de produção de cada aeronave pode representar um ganho recorrente significativo de lucratividade. Na prática de programação de montagens na indústria aeronáutica, esse problema é normalmente resolvido utilizando-se *softwares* comerciais de programação de projetos, desenvolvidos para uso geral e que

não capturam todas as particularidades desse tipo de operação produtiva. Portanto, a construção de abordagens analíticas específicas pode gerar ganhos econômicos importantes em relação à prática atual.

Uma justificativa adicional é que por se tratar de uma pesquisa baseada em um caso real, o desenvolvimento de métodos que encontrem soluções em tempos computacionais adequados para o problema pode contribuir para a solução de outros problemas práticos presentes em contextos diferentes, que possuam semelhança de descrição, contribuindo para a prática de otimização. Outra justificativa dessa pesquisa, conforme os dados apresentados na seção 2.1, é a relevância econômica do setor aeroespacial para o Brasil e o mundo. O desenvolvimento de tecnologia analítica voltada para ganhos competitivos desse setor tem o potencial de contribuir para o seu desenvolvimento e competitividade no mundo, no contexto de Indústria 4.0.

Embora o sistema de produção estudado nessa tese está em uma empresa específica, a tecnologia de produção utilizada é típica do setor e, por isso, o processo e o problema descritos são semelhantes em todas as indústrias aeronáuticas no mundo que realizam montagem estrutural.

1.3. Método de pesquisa

Os métodos de pesquisa podem ser classificados como qualitativos ou quantitativos. Segundo Bryman (1989), na abordagem qualitativa, a perspectiva dos indivíduos que estão sendo estudados durante a pesquisa é enfatizada com o objetivo de compreender melhor os pontos de vista de todos os envolvidos, com o mínimo de restrição por parte dos pesquisadores. Por isso, as pesquisas qualitativas utilizam predominantemente métodos como entrevistas ou pesquisa participante, entre outros. Segundo Bryman (1989) e Martins (2009), as principais características da pesquisa qualitativa são:

- ênfase na interpretação subjetiva dos indivíduos;
- delineamento do contexto do ambiente da pesquisa;
- abordagem não muito estruturada;
- múltiplas fontes de evidências;
- importância da concepção da realidade organizacional;
- proximidade com o fenômeno estudado.

A abordagem quantitativa, por outro lado, confere menor ênfase às perspectivas e subjetividade das pessoas objeto da pesquisa. As hipóteses são formuladas com base em leis gerais

e, dessa forma, as variáveis de estudo são escolhidas pelo pesquisador ou já estão definidas na literatura. As pesquisas quantitativas em engenharia de produção utilizam métodos como modelagem e simulação, a experimentação, quase-experimento e pesquisa de avaliação. Segundo Bryman (1989) e Martins (2009), as principais preocupações da abordagem quantitativa são:

- mensurabilidade: as variáveis utilizadas para testar as hipóteses das pesquisas são deduzidas a partir da literatura e são passíveis de serem medidas;
- causalidade: é estabelecida uma relação de causa e efeito entre as variáveis independentes e as dependentes, respectivamente;
- generalização: é a capacidade de generalizar os resultados, além dos limites da pesquisa;
- replicação: é a capacidade de, após seguir os procedimentos descritos nos métodos e resultados de uma pesquisa, reproduzir os mesmos resultados de forma independente.

O método utilizado nesta pesquisa é o de modelagem e simulação em que, segundo as definições de Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito e Pureza (2009), as variáveis do problema são definidas em modelos matemáticos e computacionais, utilizados para representar a situação prática objeto do estudo e para manipular as variáveis utilizando técnicas analíticas e experimentais. Essa pesquisa utiliza modelos matemáticos de otimização para estudar os problemas de programação de montagens estruturais na indústria aeronáutica e por isso, o método adotado nesta pesquisa é de modelagem e simulação. As variáveis de escolha para o presente problema são baseadas na teoria de programação da produção, sendo que a inclusão da perspectiva das pessoas envolvidas no problema, como trabalhadores ou gerentes de produção, é bastante limitada e, focada principalmente na definição do escopo da abordagem quantitativa, definindo quais aspectos do problema são relevantes e quais detalhes podem ser ignorados. Adicionalmente, as variáveis do problema são facilmente quantificáveis e de controle fácil, pois estão basicamente sob controle dos responsáveis pelo planejamento e pela produção das aeronaves.

Segundo Bertrand e Fransoo (2002), os problemas podem ser axiomáticos ou empíricos, e descritivos ou normativos. Os problemas axiomáticos são problemas teóricos idealizados pelo pesquisador, enquanto os problemas empíricos são baseados em situações práticas que são estudados pelo pesquisador. Os problemas descritivos visam descrever o funcionamento de um sistema e o relacionamento entre as variáveis deste, enquanto os problemas normativos se preocupam em prescrever soluções e procedimentos para um problema ou um sistema. A presente pesquisa tem por objetivo melhorar o desempenho da programação de produção em um contexto prático e, por isso, trata-se de uma pesquisa essencialmente empírico-normativa.

Segundo Morabito e Pureza (2009), a abordagem de modelagem e simulação em pesquisa operacional segue quatro etapas principais. A primeira é de definição do problema, em que o escopo do projeto, as decisões de interesse, os objetivos envolvidos e o modelo conceitual são definidos. A segunda é a construção do modelo matemático, em que é feita a formulação matemática do problema em estudo, respeitando as decisões tomadas na primeira etapa. O modelo matemático pode ser baseado em outros modelos existentes na literatura e, nessa etapa, é comum realizar experimentos iniciais para testar o modelo em desenvolvimento. A terceira etapa é a solução do modelo, em que abordagens, *softwares* e *hardwares* de computação são utilizados ou desenvolvidos para resolver o modelo matemático proposto na segunda etapa. São realizados experimentos para testar o desempenho computacional do método de solução e os resultados encontrados são analisados, com o objetivo de verificar a adequação do modelo matemático desenvolvido e a sua aderência ao caso empírico em estudo, quando é o caso. Segundo os autores, nessa etapa também é comum realizar análises de sensibilidade dos parâmetros de entrada e estudos de cenários. A quarta e última etapa é a validação do modelo, em que os resultados encontrados são comparados com dados empíricos históricos ou reportados na literatura, e é verificado o quanto o modelo encontrado representa a situação em estudo podendo, dependendo dos objetivos e resultados, gerar um retorno a alguma das etapas anteriores.

Esta pesquisa segue, de modo geral, as quatro etapas da abordagem de modelagem e simulação apresentadas anteriormente. A definição do problema foi realizada utilizando levantamentos dos processos e tecnologias de montagem estrutural aeronáutica utilizada mundialmente, e também, com a cooperação de uma empresa aeronáutica que utiliza um processo de montagem típico do setor. A construção do modelo foi realizada utilizando a literatura de planejamento e controle da produção e especificamente, a literatura de programação da produção utilizando modelos matemáticos de programação de projetos. Também foram estudadas pesquisas e trabalhos semelhantes já publicados, que foram realizados em montagens aeronáuticas. Dessa forma, foi possível definir as abordagens de modelagens utilizadas, embora o problema real exigiu que o modelo criado fosse customizado, para representar todas as características técnicas presentes na operação deste tipo de manufatura. Para resolver o modelo proposto, foi utilizado o *software* de otimização comercial GAMS/CPLEX (*General Algebraic Modeling System*), além de estratégias baseadas em heurísticas de programação matemática e outras heurísticas implementadas em Java. Os experimentos computacionais foram realizados utilizando dados reais, fornecidos pela empresa em que o estudo foi realizado, e os parâmetros das heurísticas foram variados para realizar análise de sensibilidade em qualidade da solução e tempo computacional. Os programas de produção

gerados então foram cuidadosamente analisados, como forma de validar a abordagem utilizada. Todos esses passos são descritos nos próximos capítulos da tese, conforme descrito na seção 1.4.

1.4. Organização do trabalho

Esse trabalho está dividido em sete capítulos. Neste Capítulo 1, é apresentado o objeto de estudo, os objetivos do trabalho, as justificativas para desenvolvê-lo e o método de pesquisa utilizado. No Capítulo 2, é descrito o processo de produção de aeronaves e, particularmente, a montagem estrutural é apresentada em detalhes. Também é apresentada uma revisão de literatura científica dos trabalhos relacionados e de planejamento da produção de aeronaves. No Capítulo 3 é descrito em detalhes o problema objeto de estudo dessa pesquisa. No Capítulo 4 são apresentados os trabalhos científicos de programação de projetos e é proposto um modelo matemático na versão com um e múltiplos modos de execução para representar o problema objeto desta pesquisa. No Capítulo 5 são apresentadas as heurísticas construtivas, de busca local, múltiplos inícios e de programação matemática, propostas para resolver problemas de tamanhos maiores. No Capítulo 6 são apresentados os resultados dos experimentos computacionais dos modelos matemáticos com um e múltiplos modos de execução e dos resultados das heurísticas. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões dessa pesquisa e são discutidas algumas perspectivas de pesquisa futura a partir deste trabalho.

2. Revisão de Literatura

Nesse capítulo são apresentadas as características gerais do processo de manufatura de aviões, da montagem estrutural aeronáutica e também é realizada uma revisão de literatura de trabalhos que utilizaram abordagens de pesquisa operacional e otimização na manufatura da indústria aeroespacial, assim como da literatura de programação de projetos, particularmente para os propósitos dessa tese. Por fim, é feita uma comparação da tese com pesquisas que mais se aproximam do problema estudado e que estão disponíveis na literatura.

2.1. Indústria Aeroespacial

A aviação e o desejo de voar dos humanos existe há muito tempo, desde os trabalhos de Leonardo da Vinci e muitos outros que se dedicaram à realização desse sonho anteriormente. A indústria aeronáutica tem pouco mais de um século desde o seu surgimento de fato, com a criação das primeiras aeronaves no final do século XIX e início do século XX. Desde os pioneiros da aeronáutica e aviação até o início do século XXI, a indústria aeronáutica evoluiu muito, acrescentando as vertentes de defesa e espacial e formando hoje o setor chamado de indústria aeroespacial. Importante destacar que a indústria de aviação atua principalmente na prestação de serviços de transporte de cargas e passageiros com a utilização de aeronaves, enquanto a indústria aeroespacial concebe, projeta, desenvolve, manufatura, comercializa e suporta aeronaves e equipamentos correlatos utilizados por empresas e governos. De modo geral, pode-se afirmar que a indústria aeroespacial é fornecedora da indústria de aviação, no entanto, são setores econômicos distintos.

Conforme mencionado anteriormente, a indústria aeroespacial é importante globalmente, sendo responsável por centenas de bilhões de dólares de faturamento anual e milhões de empregos globalmente. A indústria aeroespacial nos Estados Unidos representou US\$ 929 bilhões em receitas e cerca de 881 mil empregos diretos e 1,67 milhão de empregos indiretos em 2018 (AIA, 2019). Existem empregos no setor aeroespacial em todos os estados da federação americana, incluindo estados pouco populosos como Alasca, Havaí e Montana. Os salários e benefícios anuais médios em 2018 foram de US\$ 92.742, cerca de 87% acima da média nacional dos Estados Unidos. Na Europa, a indústria aeroespacial representou cerca de €246 bilhões e 870 mil empregos diretos em 2018 (ASD, 2019). No Brasil, a indústria aeroespacial gerou US\$ 6,37 bilhões em receitas, exportou US\$ 5,46 bilhões ou cerca 2,7% das exportações brasileiras, e gerou 22 mil empregos em 2017 (AIAB, 2018). Cerca de 90% da receita do setor no Brasil é originada no

segmento aeronáutico. É um dos principais setores exportadores brasileiros e por tudo isso, é um setor grande e importante no Brasil e no mundo.

2.1.1. Produção de aviões

As aeronaves são produtos complexos, que possuem muitos componentes difíceis de fabricar devido à sua geometria, materiais e requisitos de desempenho. As aeronaves devem voar em ambientes muito diferentes, como desertos quentes, aeroportos em grandes altitudes, regiões tropicais quentes e úmidas, clima polar e altas altitudes, com pressão atmosférica e temperatura ambiente baixas. Além disso, a operação deve ser segura e econômica, o que gera requisitos de desempenho complexos. Conseqüentemente, as aeronaves são fabricadas com materiais e componentes específicos para a indústria aeroespacial, com características de desempenho muito diferenciadas. As aeronaves são feitas de muitos componentes diferentes. Por exemplo, o Boeing 737 NG, que é uma aeronave comercial de porte médio apresentada na Figura 1, é formado por cerca de 600 mil componentes diferentes, muitos deles utilizados em pequenas quantidades (Boeing, 2017b). Soma-se a isso o fato de as aeronaves serem produtos com baixo volume de produção. O Boeing 737 NG produzido em Renton no Estado de Washington nos Estados Unidos, tem como recorde taxas de 42 unidades por mês em 2019 e chegou a ter a perspectiva de produzir 57 unidades por mês em 2021, enquanto a Airbus planejava produzir cerca de 60 A320Neo por mês em 2021, sendo essa uma das maiores taxas de produção mensal (ou cadência) da indústria atualmente (USA Today, 2017; Reuters, 2020). Por isso, a produção de aeronaves é um sistema de manufatura de baixo volume e alta variedade.



Figura 1: Boeing 737 NG. Fonte: Boeing (2017a)

Desde a sua origem, a indústria aeronáutica carrega as suas particularidades que resultam em processos produtivos característicos dessa indústria. A automação em geral é difícil, devido à complexidade dos produtos e baixo volume de produção. É uma indústria de alta tecnologia, que utiliza grande quantidade de mão de obra altamente qualificada em seus processos produtivos.

Conforme mencionado no Capítulo 1, a produção de aeronaves segue três grandes etapas. A primeira é a fabricação, a segunda é a montagem estrutural e a última é a montagem final. Na Figura 2 são apresentadas as etapas e alguns processos que são realizados em cada uma delas.

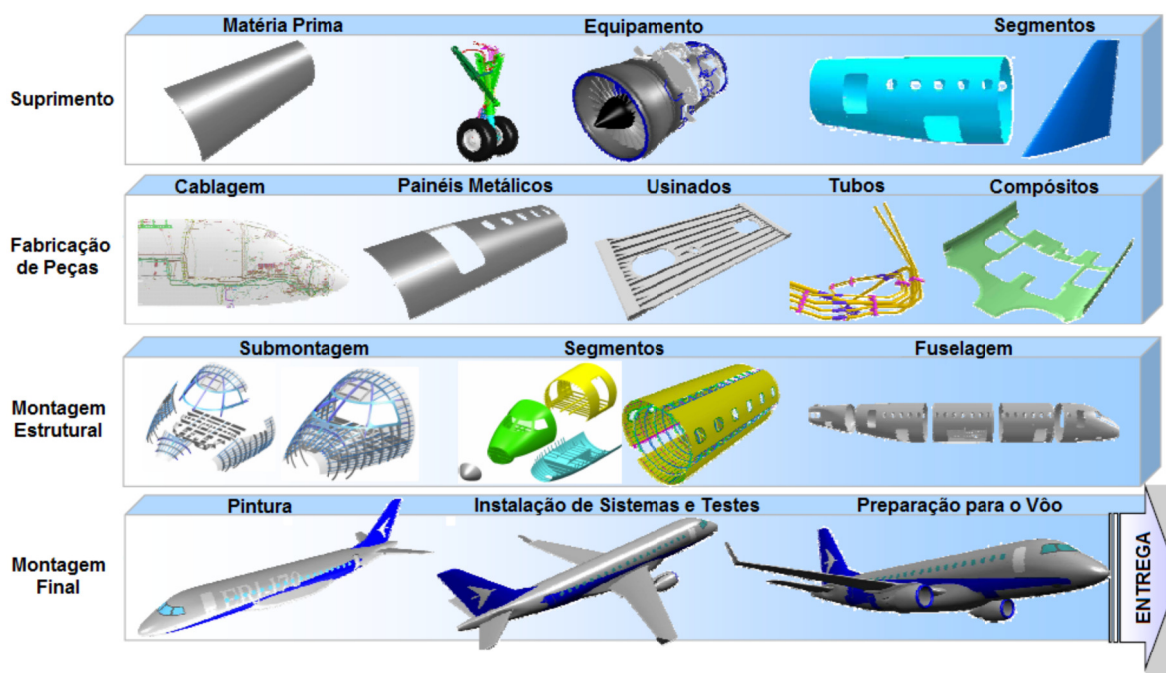


Figura 2: Etapas de produção na indústria aeronáutica. Fonte: Embraer (2017).

A fabricação é a etapa inicial do processo produtivo, em que a matéria-prima é transformada em aeropeças e revestimentos. Por ser uma indústria de baixo volume e alta variedade, o processo de fabricação possui muitos fluxos de produção diferentes, com volumes que não justificam a criação de linhas dedicadas. Por isso, a organização dessa etapa de produção segue predominantemente a organização por processo, conhecida como *job shop* (SLACK; CHAMBER; JOHNSTON, 2009). A fábrica é organizada por processos produtivos, por exemplo, setor de tratamento térmico, conformação, jateamento, pintura, tratamento de superfície, entre outros, e as peças são movimentadas entre os processos, cada uma seguindo seu roteiro de produção particular. Os processos de fabricação de peças são muito variados, dependendo dos materiais que formam o componente, como compósitos ou metálicos (diversas ligas de alumínio, aço e titânio, predominantemente), e se são peças conformadas, usinadas ou tubulações. Na Figura 3 é

apresentado o processo de pintura de aeropeças, como um exemplo de processo de fabricação aeronáutico.



Figura 3: Processo de pintura de aeropeças. Fonte: Figeac-Aero (2017).

A montagem estrutural é a etapa em que as peças fabricadas são montadas gradualmente, até formarem os grandes conjuntos estruturais da aeronave. As primeiras montagens, por serem menores, são chamadas de submontagens e geram os subconjuntos. Os subconjuntos então são montados e formam os conjuntos e grandes conjuntos, que são montados entre si nas etapas de junção, formando as estruturas das aeronaves. Essa pesquisa tem como foco essa etapa do processo de produção e por isso, ela é descrita em detalhes na seção subcapítulo 2.1.2.

A montagem final é a etapa em que as estruturas já estão montadas e a aeronave é equipada com vários sistemas e subsistemas complexos e de maior valor agregado, tais como os motores, trens de pouso, computadores de bordo, aviônica (eletrônica embarcada em aviões), entre outros. Também é nessa etapa que a aeronave receberá os acabamentos finais, tais como pintura, móveis internos para os passageiros e tripulação, entre outros.

Na primeira década do século XXI, várias dentre as maiores empresas do setor aeroespacial que produzem aviões adotaram práticas de manufatura enxuta e migraram as montagens finais do *layout* estático para linhas de montagem. Na Figura 4 apresenta um exemplo de montagem final do Boeing 777, uma aeronave comercial de transporte de passageiros da categoria de corpo largo (*wide body*). Observe na Figura 4 que está sendo realizada a junção de três grandes segmentos estruturais, que é a fuselagem central com a asa, a traseira e a dianteira.



Figura 4: Montagem final de um Boeing 777. Fonte: AviationCV (2017)

Na Figura 5 é apresentada a montagem final do Boeing 787 *Dreamliner*, em Everett, nos Estados Unidos. Observe que as aeronaves, além de já terem concluídas suas montagens estruturais, estão recebendo equipamentos e estão parcialmente pintadas. Após a conclusão da montagem final, a aeronave será testada em solo, realizará o voo de teste do fabricante, chamado de voo de produção e, posteriormente, será entregue aos clientes.



Figura 5: Montagem final do Boeing 787 *Dreamliner*. Fonte: Airarchive (2017)

2.1.2. Montagem estrutural

O foco desta pesquisa é na montagem estrutural e por isso, essa etapa do processo de produção de aeronaves é descrita em detalhes nesta seção. A montagem estrutural é a etapa em que as estruturas das aeronaves são montadas, utilizando as peças fabricadas na etapa anterior. As

atividades de montagem estrutural são predominantemente manuais, complexas e caras. Segundo Caggiano et al. (2016), o custo em uma estação de montagem de aeronaves leve é de € 163/hora, incluindo a mão de hora, ferramentas, manutenção, etc. Platzer (2009) afirma que em 2008 o salário anual médio no setor aeroespacial nos Estados Unidos era de US\$ 79.700, cerca de 47% maior do que o salário anual médio do setor de manufatura, que era de US\$ 54.400. Deloitte (2016) afirma que o salário médio anual na indústria aeroespacial nos Estados Unidos em 2014 foi de US\$ 99.443. No relatório realizado pelo AIA(2019) os salários e benefícios anuais médios do setor aeroespacial em 2018 foram de US\$ 92.742, cerca de 87% acima da média nacional dos Estados Unidos. No Brasil, não foram encontrados dados específicos do setor. Esses números ilustram o custo de mão de obra comparado com outros setores da economia e porque otimizar mão de obra é uma importante forma de redução de custo na manufatura aeroespacial.

A mão de obra utilizada na montagem de aeronaves é altamente qualificada, pois deve ser capaz de montar conjuntos complexos, com especificações de projeto muito restritas. Por isso, a mão de obra tem custo maior que a média do setor metal mecânico, além de ser escassa no mercado, particularmente no Brasil devido ao tamanho do setor nesse país. Geralmente, as empresas do setor aeroespacial brasileiro investem, elas mesmas, na formação de mão de obra qualificada, para atender às suas demandas. As principais operações realizadas pelos trabalhadores nas operações manuais são as atividades de furação, cravação de rebites e selagem de interfaces.

Na furação, o operário deve adequar furos feitos nas aeropeças nas etapas de fabricação ou fazer novos furos, conforme o ferramental de montagem e o projeto exigirem. Na Figura 6 é apresentado um montador realizando operações de furação na montagem estrutural de um SU-34 *Fullback*, uma aeronave de combate russa. A furação que está sendo realizada na Figura 6 é a preparação para a operação de rebiteagem. Observe que os pontos escuros são rebites já montados e existem outros furos sem rebites. Todos precisam de operações de furação manual semelhante à apresentada na Figura 6. A furação pode ter que ser realizada em múltiplas etapas, em que o montador troca as brocas da furadeira aumentando gradualmente o seu diâmetro e, conseqüentemente, dos furos que estiver realizando. Essa operação é chamada de alargamento. Em cada furo também pode ser necessário realizar um rebaixo, para que a cabeça do rebite fique dentro do revestimento metálico, que é parte da estrutura da aeronave, sem nenhuma parte sobressalente para garantir desempenho aerodinâmico.



Figura 6: Operário realizando operações de furação na montagem estrutural de um SU-34 russo, na planta de Novosibirsk. Fonte: *Asian Defence News* (2017)

A cravação de rebites ou rebitagem é a atividade em que os montadores posicionam os rebites nos furos e, com o auxílio de ferramentas manuais, como martelotes e barras encontradoras, o rebite é rebatido na sua posição, unindo duas ou mais peças metálicas estruturais. Na Figura 7 é apresentado um exemplo de operação de cravação na montagem da asa de um avião militar nos Estados Unidos, durante a Segunda Guerra Mundial. Apesar de retratar uma operação industrial da década de 1940, as operações manuais de cravação de rebites executadas atualmente são semelhantes à ilustrada na Figura 7.



Figura 7: Operação de cravação de rebites de aviões na Segunda Guerra Mundial. Fonte: *History* (2017)

Atualmente, existem robôs e máquinas que realizam as atividades de rebiteagem, furação e selagem (processo de vedação, explicado posteriormente em detalhes nesta seção), principalmente em grandes painéis de aeronaves comerciais, por serem mais padronizados e, por isso, serem de automação mais fácil. Rooks (2001) apresenta um estudo de automação de montagem estrutural da asa da aeronave A340, utilizando um robô de grande escala e 10 eixos. Fayaweera e Webb (2007) descrevem a utilização de um robô para fazer a montagem de um painel aeronáutico. Na Figura 8 é apresentada uma máquina de rebitar automática, realizando as atividades de furação, rebiteagem e selagem em um painel de uma aeronave comercial. É importante observar que apesar de máquinas, como as da Figura 8, serem utilizadas em muitas empresas do setor aeroespacial atualmente, elas exigem atividades manuais de montagem antes e depois da rebiteagem automática, por isso, elas não substituem totalmente a utilização de mão de obra.

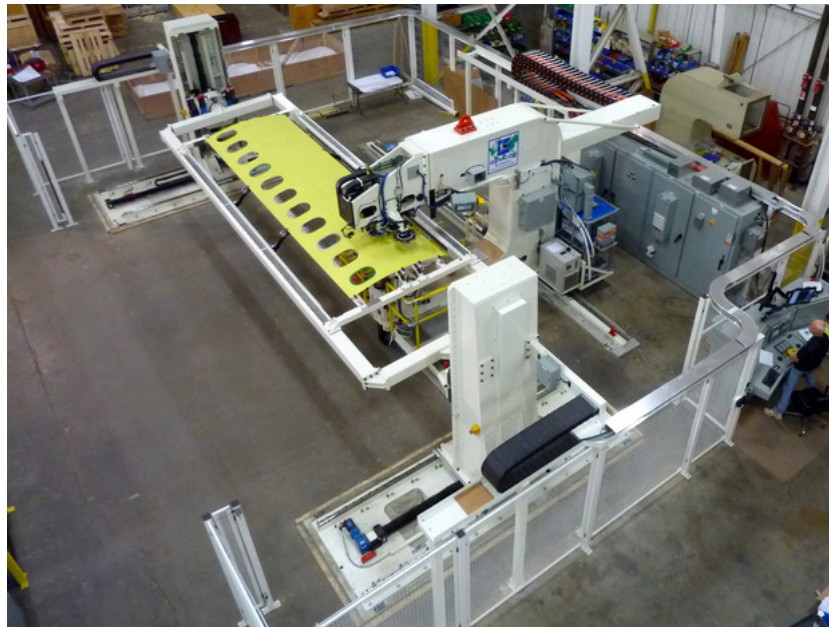


Figura 8: Equipamento de rebiteagem automática.
Fonte: Gemcor (2017)

As atividades de montagem manuais precisam utilizar dispositivos de produção, chamados de gabaritos de montagem. Esses gabaritos são ferramentais utilizados para guiar os operadores no posicionamento das peças e da furação, de acordo com as especificações de projeto. Os gabaritos são fixos e podem variar de tamanho, dependendo do conjunto que está sendo montado e da etapa de montagem. Na Figura 9 é apresentado um gabarito de montagem de uma aeronave executiva, chamada *Cessna Citation Longitude*, que é uma aeronave da categoria de porte médio (*Super Midsize*). A estrutura azul é o gabarito e as linhas verticais em cinza metálico são partes do gabarito que orientam o posicionamento das nervuras da asa.



Figura 9: Gabarito de montagem das asas do Cessna *Citation Longitude*.
Fonte: *The Wichita Eagle* (2017)

Na Figura 10 é apresentado um gabarito de montagem da porta superior traseira do compartimento de cargas do cargueiro militar A400M Atlas, fabricado pela Airbus. Observe que o gabarito consegue girar no eixo longitudinal, para facilitar o trabalho dos operadores. Na Figura 10 é possível observar que dois operadores estão realizando uma cravação de rebites, provavelmente utilizando um martelete e uma barra encontradora. Em geral, as atividades de rebitagem exigem duas pessoas, uma utilizando o martelete e outra utilizando uma barra encontradora, no lado oposto.



Figura 10: Gabarito de montagem da porta superior traseira do A400M Atlas.
Fonte: *Composite World* (2017)

Considere como exemplo a montagem da dianteira de uma aeronave comercial. A montagem estrutural da dianteira exige diversas atividades de montagem dos subconjuntos que formam a dianteira. Cada subconjunto utiliza um gabarito específico. Os subconjuntos são movidos para outros gabaritos para serem montados juntos, até a dianteira estar toda montada. Por isso, o processo de montagem estrutural exige múltiplos passos sequenciais, utilizando vários gabaritos diferentes, que interagem entre si com relações de precedência entre as atividades.

Além das atividades em gabaritos, a montagem da dianteira e de outros conjuntos estruturais exige a realização das atividades no interior e no exterior da fuselagem nas etapas mais avançadas da montagem estrutural. Na Figura 11 são apresentados os montadores trabalhando dentro da cabine da tripulação (*cockpit*) de um Sukhoi *Super Jet* 100. Observe que o espaço é restrito devido às limitações físicas e por isso, a quantidade de operadores que são capazes de trabalhar simultaneamente nessas atividades é limitada.



Figura 11: Montagem do interior de um Sukhoi *Super Jet* 100.

Fonte: *Asian Defence News* (2017)

A selagem de interfaces tem a função principal de vedar a aeronave para ser operada pressurizada em grandes altitudes. Também pode ser utilizada para prevenir vazamentos de fluidos, principalmente combustível, impedir a entrada de água e, conseqüentemente, proteger de corrosão, entre outras finalidades. Na montagem estrutural, a sua principal finalidade é vedar os espaços entre os revestimentos, chamados de interfaces. Normalmente, os selantes são feitos de materiais poliméricos, tem uma aparência viscosa semelhante a uma pasta de dentes e são aplicados com auxílio de bisnagas ou ferramentas específicas. Existem muitos tipos diferentes de selantes, que são

utilizados conforme a função que exercerão na aeronave e por isso, possuem muitas características diferentes. Podem utilizar solventes voláteis que restringem o tempo máximo de espera para aplicação após a preparação e também exigir um tempo de cura, necessário para o selante atingir as características físico-químicas exigidas, tipicamente entre 10 e 12 horas, podendo variar em função da temperatura ambiente. Na Figura 12 é apresentado um militar da Força Aérea Americana (USAF – *United States Air Force*) realizando uma operação de selagem de interfaces na asa de um AC-130J *Ghostrider* durante uma operação de manutenção.



Figura 12: Selagem de interfaces de um AC-130J *Ghostrider*.
Fonte: Tinker (2017)

As atividades de montagem estrutural, principalmente a rebiteagem e a selagem de interfaces, estão sujeitas às restrições técnicas de projeto e também à geometria e espaço das aeronaves, conforme o processo de montagem avança. Muitas vezes, atividades de montagem relativamente simples se tornam difíceis devido às dificuldades de acesso dos operários. Na Figura 13 é apresentado um exemplo de múltiplas atividades de montagem acontecendo simultaneamente dentro da seção de fuselagem de uma aeronave russa. Em geral, não existe restrição que impeça as atividades de selagem e montagem acontecerem simultaneamente na mesma montagem estrutural, entretanto, podem existir relações de precedência entre essas atividades. Quando existir precedência, geralmente a selagem é realizada após a montagem ser concluída.

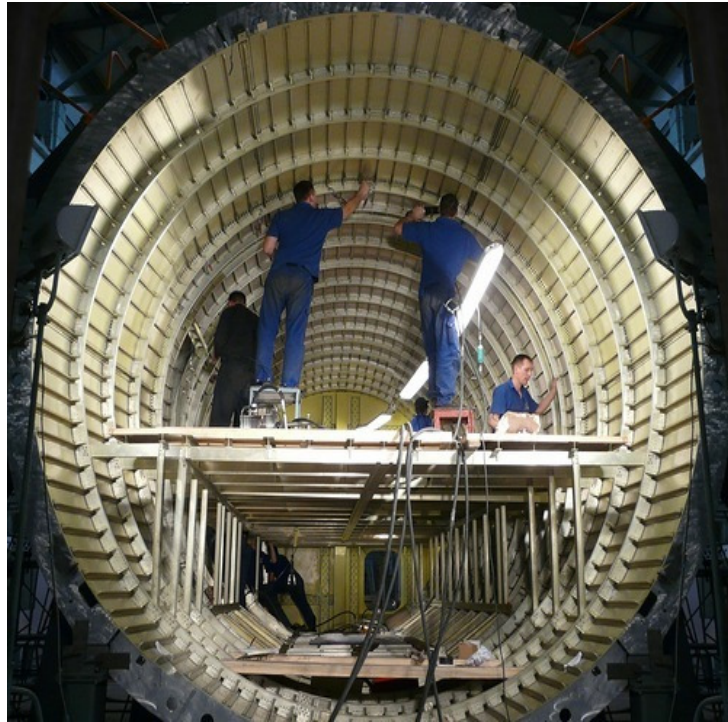


Figura 13: Montagem estrutural da sessão de fuselagem.
Fonte: Avia.pro (2017)

Observe que as atividades descritas nessa seção são realizadas em todos os componentes estruturais de uma aeronave, internos e externos. Considerando que uma aeronave pode ter centenas de milhares de rebites, percebe-se que a montagem de aeronaves pode consumir muitos milhares de homens hora.

2.2. Programação de projetos

O planejamento e controle da produção é uma das áreas mais importantes da administração da produção. Seu principal objetivo é a administração dos recursos produtivos e a produção de bens e serviços de forma eficiente e racional (SLACK; CHAMBER; JOHNSTON, 2009). A programação da produção é um conjunto de técnicas utilizadas para alocar recursos a atividades no tempo, considerando as particularidades do sistema produtivo em questão. A programação de máquinas em geral está preocupada com a alocação de atividades ou tarefas em recursos renováveis, que não necessariamente são máquinas. Por outro lado, a programação de projetos está preocupada com a alocação de atividades aos recursos, considerando uma variedade muito maior de tipos de recursos, segundo Herroelen et al. (1999). A programação de projetos é geralmente utilizada na programação de sistemas produtivos de produtos complexos e produzidos em baixos volumes, como aeronaves (SILVA, 2010), foguetes, ou de produção única (*one of a kind*), como construção civil (SONMEZ; GUREL, 2016), navios (HURINK et al., 2011), satélites espaciais (XIONG et al., 2016), entre outros. Alguns autores como Morton e Pentico (1993) e

Brucker et al. (1999) apresentam os problemas de programação de *job shop* como casos particulares dos problemas de programação de projetos.

A literatura de programação de produção utiliza várias denominações para o conjunto mais básico das operações que são realizadas na produção. Geralmente, em problemas de programação de máquinas, utiliza-se o termo operação ou tarefa, enquanto que na literatura de programação de projetos é utilizado o termo atividade. Neste trabalho, optou-se por utilizar atividade. Duas técnicas amplamente utilizadas em programação de projetos são o CPM (*Critical Path Method*) e o PERT (*Project Evaluation and Review Technique*). Segundo Billon (1964), o PERT foi criado durante a execução do projeto Polaris, um míssil balístico lançado de submarino que a Marinha dos Estados Unidos estava desenvolvendo na década de 1950, descrito por Malcon et al. (1959). O projeto precisava ser concluído no menor tempo possível e para isso, foi solicitado que os responsáveis estimassem três tempos de execução para as principais atividades, um otimista, um pessimista e um mais provável, e as atividades foram organizadas considerando o risco de execução. Ainda segundo Billon (1964), a técnica de CPM foi criada por matemáticos e engenheiros da empresa francesa Du Pont, e considera as variáveis de tempo e custo determinísticos.

Os recursos utilizados nas atividades de programação de projeto podem ser de quatro tipos diferentes. Herroelen et al. (1999) afirmam que os recursos renováveis são aqueles que estão disponíveis em um certo nível durante todo o horizonte de planejamento, e não são consumidos quando utilizados, tais como máquinas e mão de obra, entre outros. Herroelen et al. (1999) também afirmam que os recursos não renováveis são aqueles que são consumidos durante a execução das atividades do projeto, tais como dinheiro, energia, materiais, entre outros. Segundo Kolisch e Padman (2001), um terceiro tipo são os recursos duplamente limitados, ou seja, são recursos que são limitados em um período e podem ter um prazo de validade, como um orçamento. O orçamento é uma quantidade finita de dinheiro que pode ser utilizada até um certo horizonte de tempo. Kolisch e Padman (2001) apresentam os recursos parcialmente renováveis, que são recursos renováveis disponíveis apenas por um subperíodo do horizonte de planejamento, e cita como exemplo trabalhadores que possuem contratos semanais em um projeto com horizonte mensal.

Węglarz et al. (2011) chamam a classificação dos recursos nas quatro categorias apresentadas de divisão por restrição de recursos, que é a forma mais utilizada na literatura, e apresenta extensões e variações dessa classificação. Os pesquisadores também propõem classificar os recursos pela divisibilidade e preemptibilidade. Segundo Węglarz et al. (2011), no critério de divisibilidade, os recursos podem ser discretos ou contínuos. Os recursos discretos são aqueles que só podem ser alocados às atividades em quantidades discretas de um conjunto finito de possíveis

alocações. Exemplos de recursos discretos são pessoas e máquinas, entre outros. Os recursos contínuos podem ser alocados em quaisquer quantidades, a partir de um intervalo. Exemplos de recursos contínuos são energia, líquido, dinheiro, entre outros. A preemptibilidade é a capacidade de interromper a alocação de um recurso a uma atividade, alocá-lo à outra e então, alocá-lo novamente à primeira atividade, sendo que o processamento desta continua do mesmo estágio de progresso de quando o recurso foi desalocado. Quando o recurso tem essa capacidade, ele é chamado de preemptível, ou não preemptível, caso contrário.

Além da classificação apresentada, Węglarz et al. (2011) apresentaram outros tipos de recursos. Os recursos dedicados são aqueles que podem ser alocados a apenas a uma atividade por vez. Recursos espaciais são aqueles que são utilizados por um grupo de atividades, que ocupam esse recurso do início ao fim. Nesse caso, todas as atividades do grupo podem ser alocadas simultaneamente, entretanto, é impossível alocar atividades de grupos diferentes utilizando os mesmos recursos espaciais ao mesmo tempo. Um tipo especial de recursos espaciais são os recursos adjacentes, em que a localização física dos recursos em relação aos outros é dada e interfere no processamento das atividades. Recursos cumulativos são aqueles em que a quantidade disponibilizada é uma função acumulada no tempo. Por exemplo, a utilização de suprimentos que chegam de fornecedores e são estocados no armazém, tipicamente estão limitados entre um estoque de segurança mínimo e uma capacidade de estoque máxima. Węglarz et al. (2011) explica que os recursos não renováveis são recursos cumulativos que não são reabastecidos e com estoque de segurança zero e por isso, os recursos cumulativos são uma generalização dos recursos não-renováveis.

Os recursos reutilizáveis são semelhantes aos recursos renováveis, mas são consumidos gradualmente ao longo do tempo. Um exemplo são as ferramentas de corte, que com a utilização perdem a capacidade de corte e após um período de utilização, precisarão ser ajustadas ou trocadas para continuarem funcionando. Węglarz et al. (2011) explica que esse tipo de recurso com o tempo fica indisponível e precisa de uma operação para reciclá-lo, para então estar disponível novamente. Recursos sincronizados são aqueles em que a utilização deve ocorrer simultaneamente. Um exemplo é a aplicação de um exame a alunos de uma mesma turma em laboratórios, que possuem quantidade limitada e definida de alunos por exame. Assim, o grupo de alunos pode ter que ser dividido em vários subgrupos, e a atividade de examiná-los ser dividida em várias subatividades, que devem iniciar simultaneamente, sendo que os laboratórios são os recursos sincronizados.

Recursos com múltiplas habilidades são aqueles em que cada recurso é capaz de realizar múltiplas atividades que necessitam de recursos renováveis diferentes. Recursos heterogêneos são uma mistura entre recursos com múltiplas habilidades diferentes e renováveis. Por exemplo, um conjunto de trabalhadores é um recurso renovável e os trabalhadores podem ter habilidades diferentes. Então, uma atividade pode exigir a alocação de um conjunto de trabalhadores com habilidades mínimas ou complementares, e a duração ou qualidade da atividade depende das habilidades combinadas desse grupo de trabalhadores. Outra categoria é a dos recursos com preparação, ou seja, são os recursos que quando precisam ser alocados de uma atividade para a outra, exigem algum tipo de preparação ou *setup*. Esse *setup* é dependente da sequência de troca.

Os recursos alocáveis são aqueles em que a alocação dos recursos necessários para uma certa atividade deve ser realizada pela execução de uma outra atividade. Ocorre nos casos em que existe uma atividade que exige um *setup*, que utiliza algum recurso escasso para fazê-lo. Por último, Węglarz et al. (2011) apresenta os recursos auxiliares, que são recursos utilizados em atividades de *setup* mas, que não são utilizados durante o processamento. Um exemplo seriam trabalhadores especializados que inicializam a operação de máquinas CNC (*Computer Numeric Control*), mas que, em seguida, operam sem a necessidade desse recurso.

No caso dessa pesquisa, os principais recursos utilizados nas montagens são pessoas e gabaritos de montagem. Do ponto de vista da divisão dos recursos, os recursos são do tipo renováveis, pois estão disponíveis todos os dias do horizonte de planejamento e não são consumíveis. Os gabaritos poderiam ser classificados também como recursos dedicados, pois processam apenas uma atividade por vez. Pelo critério de divisibilidade, os recursos só podem ser utilizados em quantidades pré-definidas e por isso, são discretos. Pelo critério de preemptibilidade, as pessoas e gabaritos são recursos preemptíveis, pois poderiam ser realocados a outra atividade e serem alocados novamente às atividades originais, sem perdas. No entanto, na prática isso não é desejável ou até mesmo fácil de fazer, particularmente no caso dos gabaritos. Portanto, os recursos foram considerados como não preemptíveis.

Existem muitas variações do problema de programação de projetos, que são apresentadas por Kolisch e Padman (2001), Hartmann e Briskorn (2010), Węglarz et al. (2011), Herroelen et al. (1998), Brucker et al. (1999) e Herroelen e Leus (2005). A seguir são apresentadas quatro principais categorias consideradas nesse trabalho.

2.2.1. Programação de projetos com recursos restritos

Os problemas de programação de projetos com recursos restritos (RCPSp – *Resource Constrained Project Scheduling Problems*) são aqueles em que, dado um conjunto de atividades relacionadas por uma rede de precedência e um conjunto limitado de recursos, deve-se determinar o menor tempo em que se consegue completar o projeto. Os recursos podem ser recursos produtivos, financeiros ou qualquer outro tipo necessário para completar o projeto. Hartmann e Briskorn (2010) afirmam que no RCPSp, todos os recursos devem ser renováveis, todos os dados do problema são determinísticos, os parâmetros são inteiros e as atividades são não preemptivas. Blazewics et al. (1983) demonstrou que o RCPSp é um problema fortemente NP-difícil do ponto de vista da complexidade computacional. Brucker et al. (1999), Herroelen et al. (1998), Herroelen et al. (1999), Herroelen (2001) e Kolisch e Padman (2001) propõem uma classificação para o RCPSp e fazem uma extensa revisão de modelos, métodos e heurísticas utilizados para representá-los e resolvê-los.

Os problemas de RCPSp são encontrados em muitos contextos práticos. Bartels e Zimmermann (2009) utilizaram uma abordagem de RCPSp para otimizar o processo de pesquisa e desenvolvimento de novos veículos na indústria automobilística, mais especificamente na etapa de testes. Knust (2010) estudou a programação de partidas de tênis em um campeonato amador na Alemanha. De Boer (1998) desenvolveu um sistema de suporte à decisão (DSS – *Decision Support System*) para apoiar o planejamento de serviços de construção e manutenção naval em um estaleiro na Holanda. Pinha et al. (2016) estudou o planejamento de manutenção naval de um estaleiro no Rio de Janeiro. Burnett (2011) estudou a montagem de sessões de submarinos militares nos Estados Unidos. Horio e Suzuki (2010) estudaram a criação de escalas de trabalho de enfermeiras em hospitais. Buford et al. (2004) estudou as operações de preparação dos tanques de combustível externos utilizados nos ônibus espaciais da NASA. Bronnikov et al. (2015) utilizaram o RCPSp para planejar o treinamento de tripulações de cosmonautas para a estação espacial internacional (ISS – *International Space Station*), no centro de Pesquisa, Testes e Treinamento de Cosmonautas Yuri Gagarin, na Rússia. O treinamento envolve a utilização de vários recursos específicos, tipos diferentes de qualificações, um orçamento limitado e a programação das atividades técnicas nesse contexto.

Calhoun (2000) estudou o planejamento de campanhas aéreas de aeronaves de combate para o Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Dorndorf (2002) estudou as operações em terra de aeronaves comerciais durante o período entre o pouso e a próxima decolagem. Xiong et al. (2016) estudou o planejamento das atividades de pesquisa de desenvolvimento de satélites da rede chinesa de posicionamento global, chamada de Baidou.

Schultmann e Sunke (2007) revisaram a utilização de modelos de RCPSP na indústria de construção. Existem outros trabalhos na literatura reportando outras aplicações do RCPSP e, portanto, as pesquisas referenciadas neste trabalho não são uma revisão exaustiva. Note que, em síntese, as aplicações são tão diversas como na indústria naval na construção e manutenção de navios, submarinos, equipamentos para produção de petróleo *offshore*, programação de atividades de pesquisa e desenvolvimento na indústria automobilística e aeroespacial, operações em solo de naves espaciais e aeronaves comerciais, centros de treinamento de cosmonautas, serviços hospitalares, operações militares, construção civil, entre outros. Portanto, trata-se de uma classe de problemas com vasta aplicação prática.

Pritsker et al. (1969) foi o primeiro a propor na literatura um modelo matemático em que o tempo do projeto é discreto e este se tornou um modelo clássico para o RCPSP. Essa formulação utiliza variáveis binárias para definir quando as atividades são programadas e é a formulação mais amplamente utilizada na literatura. Pinedo (2005) apresenta o modelo clássico de programação de projetos com restrições de recursos e tempos de processamento determinístico, detalhados a seguir. Considere:

k : tipo de recursos, $k = 1, \dots, K$

j : atividade, $j = 1, \dots, J$

t : instante de tempo, $t = 1, \dots, H$

p_j : tempo de processamento da atividade j

N : número de diferentes tipos de operadores

c_k : quantidade total disponível de operadores do tipo k

rec_{jk} : é o número de operadores do tipo k que a atividade j necessita para ser executada

A : conjunto de pares de atividades j e h , tal que j precede h ($j \rightarrow h$)

As variáveis de decisão são:

$$x_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no instante } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O número de operadores do tipo k que a atividade j utiliza no intervalo de tempo $[t-1, t]$ é dado pela expressão (1):

$$rec_{jk} \cdot \sum_{u=t}^{t+p_j-1} x_{ju} \quad (1)$$

A formulação apresentada considera o tempo discreto, ou seja, a variável que aloca a atividade tem um índice t para definir qual instante que a atividade j termina. É utilizado um limitante superior para o *makespan*, denominado H . O *makespan* é o tempo de término da última atividade do projeto, ou seja, é o tempo de término do projeto. Um limitante superior comumente utilizado é a soma dos tempos de processamento de todas as atividades, calculado pela expressão (2).

$$H = \sum_{j=1}^J p_j \quad (2)$$

Considerando que H é inteiro, então o instante de término de cada atividade j é dado pela expressão (3).

$$\sum_{t=1}^H t \cdot x_{jt} \quad (3)$$

Para o modelo considerado, utiliza-se uma atividade fictícia que sucede todas as atividades da rede de precedência, com duração nula e sem consumir qualquer recurso. Essa atividade é chamada de atividade $J + 1$. Então, o tempo de término de todas as atividades é o tempo de término da atividade $J + 1$, ou seja, o *makespan*, conforme a expressão (4).

$$\sum_{t=1}^H t \cdot x_{J+1,t} \quad (4)$$

Pinedo (2005) apresenta o modelo de programação linear inteira para o RCPSP, com o objetivo de minimizar o *makespan*, como:

$$\text{Minimizar } \sum_{t=1}^H t \cdot x_{J+1,t} \quad (5)$$

Sujeito a:

$$\sum_{t=1}^H (t \cdot x_{jt} + p_h) - \sum_{t=1}^H (t \cdot x_{ht}) \leq 0 \quad \text{para todo } j \rightarrow h \in A(j, h) \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^J (rec_{jk} \cdot \sum_{b=t}^{t+p_j-1} x_{jb}) \leq c_k \quad \text{para todo } k \text{ e } t \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^H x_{jt} = 1 \quad \text{para todo } j \quad (8)$$

$$x_{jt} \in \{1, 0\} \quad \text{para todo } j \text{ e } t \quad (9)$$

A função objetivo (5) minimiza o *makespan*. As restrições (6) garantem o respeito às relações de precedência entre as tarefas. As restrições (7) garantem que a quantidade do recurso i em uso a cada instante t para executar as atividades respeite a quantidade total disponível. As restrições (8) garantem que todas as atividades serão programadas uma e somente uma vez. As restrições (9) são referentes ao domínio das variáveis. Nesse modelo clássico, não existem os múltiplos modos de execução, mas cada atividade pode precisar de diversos recursos ao mesmo tempo para ser executada. No caso do modelo (5)-(9), o recurso utilizado é a mão de obra, rec_{jk} , mas poderia ser qualquer outro recurso renovável.

Algumas vezes, as atividades do projeto podem ser executadas de várias formas, consumindo diferentes quantidades de recursos produtivos e com durações diferentes. Por exemplo, na construção de um edifício, pode-se alocar diferentes quantidades de pessoas a uma determinada atividade, e cada alocação tem um custo e duração diferente para a atividade. Por isso, cada alocação é vista como um modo de execução dessa atividade. A relação entre a redução da duração e do custo não precisa ser necessariamente linear para os modos de execução. Esse caso é chamado de problema de programação de projetos com recursos restritos e múltiplos modos (MRCPSP – *Multi-mode Resource Constrained Project Scheduling Problem*). O MRCPSP foi apresentado por Talbot (1982), que utilizou uma variação do modelo de Pritsker et al. (1969) para formular o problema. Hartmann e Briskorn (2010) afirmaram que o MRCPSP é uma generalização do RCPSP pois, se existir somente um modo por atividade e nenhum recurso não renovável estiver no MRCPSP, ele é reduzido ao RCPSP original.

A seguir é apresentada a formulação do MRCPSP, adaptado de Pinedo (2005). Considere os mesmos parâmetros apresentados no modelo (5)-(9), com as seguintes modificações.

i : modo de execução, com i variando de $i = 1, \dots, I$

p_{ji} : tempo de processamento da atividade j no modo i

rec_{jki} : é o número de operadores do tipo k que a atividade j necessita para ser executada no modo i

As variáveis de decisão são:

$$x_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no instante } t \text{ e é executada no modo } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (10)$$

O número de operadores do tipo k que a atividade utiliza no intervalo de tempo $[t-1, t]$ é dado pela expressão (11):

$$rec_{jki} \cdot \sum_{i=1}^I \sum_{u=t}^{t+p_j-1} x_{ju} \quad (11)$$

A formulação de programação linear inteira apresentada também utiliza tempo discreto, com o objetivo de minimizar o *makespan*.

$$\text{Minimizar } \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^H (t \cdot x_{J+1,t,i}) \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^H (t \cdot x_{ju}) - \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^H (t - p_{hi}) \cdot x_{hti} \leq 0 \quad \text{para todo } j \rightarrow h \in A(j, h) \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+p_j-1} (rec_{jki} \cdot x_{jbi}) \leq c_k \quad \text{para todo } k \text{ e } t \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^H x_{ju} = 1 \quad \text{para todo } j \quad (15)$$

$$x_{ju} \in \{1, 0\} \quad \text{para todo } j, t \text{ e } i \quad (16)$$

A função objetivo (12) minimiza a duração do projeto. As restrições (13) garantem a relação de precedência entre as atividades j e h . As restrições (14) garantem que a quantidade de recursos utilizados em cada instante de tempo respeita a quantidade disponibilizada. As restrições (15) obrigam que cada atividade seja alocada uma e somente uma vez no horizonte de planejamento em um único modo. As restrições (16) são referentes ao domínio das restrições. Note que os modelos (5)-(9) e (12)-(16) são muito semelhantes, sendo que as principais diferenças são o índice relacionado aos modos de execução da variável de decisão e no parâmetro do consumo de recursos.

Embora o problema tratado nessa pesquisa não seja um RCPSP puro, as formulações (5)-(9) e (12)-(16) foram aqui utilizadas de forma adaptada na modelagem matemática do caso real. Outras formulações do RCPSP diferentes da apresentada por Pritsker et al. (1969) foram apresentadas na literatura. Mingozzi et al. (1998) apresentaram uma formulação baseada em subconjuntos viáveis e propuseram novos limitantes inferiores para a formulação e um algoritmo exato, baseado no método *branch-and-bound*. Koné et al. (2011) e Artigues et al. (2013) propuseram dois modelos em tempo contínuo para o RCPSP, na formulação que eles chamam de baseadas em eventos. Na comparação com as formulações em tempo discreto, não houve nenhuma formulação que dominou o desempenho computacional, exceto para os exemplares com horizonte de tempo longo em que a formulação em tempo contínuo tem vantagens.

Muitos métodos de solução diferentes são utilizados nos problemas de MRCPSP e RCPSP. Węglarz et al. (2011) fizeram uma extensa revisão dos métodos de solução utilizados no MRCPSP e no RCPSP. Segundo os autores, os métodos variam desde métodos exatos a métodos aproximados, formados por três tipos principais, que são as regras de despacho, heurísticas e metaheurísticas e busca locais. Na literatura também existem trabalhos que focaram na geração de limitantes inferiores mais apertados para o valor da solução ótima do problema. Talbot (1982) utilizou a duração do caminho crítico, em que o modo mais rápido é alocado, como primeiro limitante inferior do problema. Maniezzo e Mingozzi (1999) apresentaram outras regras para calcular limitantes inferiores.

Na literatura, são reportados muitos casos especiais e extensões do problema MRCPSP. De acordo com Węglarz et al. (2011), as variações mais comuns do MRCPSP são aquelas que consideram recursos não renováveis e recursos duplamente limitados. Problemas envolvendo *trade-off* entre recurso, tempo e custo também podem ser considerados como casos especiais do MRCPCP e são apresentados na seção 2.2.2.

2.2.2. Programação de projetos com tempo restrito

Möhring (1984), Easa (1989), Demeulemeester (1995) e Hsu e Kim (2005) dividem os problemas de programação de projetos em duas grandes categorias. A primeira é o problema de recursos restritos, em que dada uma quantidade limitada de recursos, deve-se encontrar o menor tempo possível para completar o projeto. Os problemas de RCPSP e suas variações fazem parte dessa categoria, conforme apresentado na seção 2.2.1. A segunda é o problema de tempo escasso. Dado um tempo limite T para a duração do projeto, o objetivo é encontrar uma programação para as atividades com o menor custo para alocar recursos disponíveis e ilimitados ao projeto. Segundo Easa (1989), os problemas dessa categoria são chamados de problemas de nivelamento de recursos (RLP – *Resource Leveling Problems*). Möhring (1984) afirma que os problemas de programação de projetos com recursos e tempos escassos são problemas duais.

Considere que existem k recursos diferentes, t instantes discretos de tempo e que o tempo de conclusão do projeto é T . O problema de disponibilidade de recursos (RACP – *Resource Availability Cost Problem*), também chamado de problema de investimento de recursos (RIP – *Resource Investment Problem*), consiste em alocar a quantidade de cada recurso k , a_k , que minimiza o custo total do projeto formado pelo produto do custo de disponibilidade do recurso k , cd_k , pela quantidade utilizada do recurso, ou seja, $cd_k \cdot a_k$, e foi definido na literatura pela primeira vez por Möhring (1984) e classificado por Demeulemeester (1995). Segundo Demeulemeester (1995) e Su

et al. (2018), o RACP é um caso particular do RLP. A diferença entre ambos é que no RACP a quantidade de recursos a_k é alocada ao projeto durante todo o horizonte de tempo, enquanto no RLP a quantidade de recursos alocada pode variar em função do tempo, sendo normalmente definido como u_{kt} . Su e Santoro (2016) e Demeulemeester (1995) definiram que o primeiro caso é chamado de disponibilidade de recurso, enquanto o segundo caso é chamado de utilização de recurso. Su et al. (2018) definiram que a função objetivo do RACP geralmente é minimizar o custo de alocação de recursos, enquanto o RLP tem como função objetivo minimizar alguma medida de variação no consumo de recursos. Möhring (1984) afirmou que o RACP é um problema NP-difícil e por isso, não se espera que seja encontrado um algoritmo eficiente para encontrar a solução ótima de problemas de grande porte. Por isso, muitos autores investigaram diversos métodos de solução para esse problema. Su et al. (2018) fizeram uma revisão dos métodos exatos e heurísticos utilizados para resolver o RACP e suas variações.

Deckro e Hebert (1989) e Gudelmond et al. (2008) apresentaram o problema de programação de projetos com tempo restrito (TCPSP – *Time Constrained Project Scheduling Problem*), em que a diferença em relação ao RACP é que a disponibilidade de recursos em um dado instante t é fixa, e a variável de decisão é quanto e quando adicionar recursos extras. Gudelmond et al. (2008) citam como exemplo a decisão de contratar mais funcionários ou utilizar horas extras para aumentar a quantidade disponível de horas de funcionários durante um dia de trabalho.

Alguns autores tais como Hurink et al. (2011), Vandenheede et al. (2015), Silva et al. (2014) e Borreguero et al. (2015) apresentaram os problemas de TCPSP como sinônimos de problemas de programação de projetos com tempo escasso. Verbeeck et al. (2016) argumentaram que o TCPSP é uma variante do RCPSP e do RACP. Os autores explicam que no TCPSP, uma quantidade fixa e pré-definida de recursos é disponibilizada (como no RCPSP) e um tempo limite do projeto é definido (como no RACP). Entretanto, pode-se alocar uma capacidade adicional para cada recurso temporariamente mediante um custo de alocação. No RACP, é determinado apenas quantos recursos são necessários, enquanto no TCPSP é necessário definir quando, quanto e qual tipo de adicional recurso deve ser contratado para concluir o projeto dentro do tempo limite definido. Embora o TCPSP seja uma classe de problemas não delimitada a uma função objetivo em específico, Verbeeck et al. (2016) afirmaram que o seu objetivo principal é minimizar o custo com a contratação de recursos extras para concluir o projeto. Gudelmond et al. (2008) afirmaram que o TCPSP é uma variante do RCPSP. Nessa pesquisa, TCPSP, RLP e RACP não são considerados sinônimos.

Na revisão de literatura realizada nesse trabalho, foi possível observar que os problemas de RCPSP são muito mais estudados na literatura do que o RACP e o TCPSP, e que não foi encontrado um trabalho publicado que revise e classifique os problemas de programação de projetos com tempo escasso. Entretanto, existem algumas aplicações de TCPSP e RACP reportadas na literatura. Hurink et al. (2011) estudou a programação de docas de construção naval utilizando TCPSP com restrições de adjacência. Allerding et al. (2012) estudou a utilização do TCPSP na gestão de consumo de eletricidade das chamadas casas inteligentes. Couch (2016) estudou a manutenção de navios da *Royal Canadian Navy* (Marinha Real do Canadá). Schultz e Atzmon (2014) utilizam os modelos de RACP e RCPSP para analisar a utilização dos recursos em um centro logístico de aeronaves militares nos Estados Unidos.

A seguir é apresentada a formulação do RACP, adaptada de Möhring (1984). Considere os parâmetros e a formulação do modelo (5)-(9). Considere também:

k : tipo de recurso, $k = 1, \dots, K$

T : prazo máximo para entrega de todas as atividades

rec_{jk} : quantidade do recurso k necessária para executar a atividade j

v_k : custo de disponibilizar uma unidade do recurso k

As variáveis de decisão do modelo são:

a_k : quantidade a ser disponibilizada do recurso k

$$x_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no instante } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Um modelo matemático para o RACP é dado por:

$$\text{Minimizar } \sum_{k=1}^K v_k \cdot a_k \quad (17)$$

$$\sum_{t=1}^T (t \cdot x_{jt}) + p_h - \sum_{t=1}^T (t \cdot x_{ht}) \leq 0 \quad \text{para todo } j \rightarrow h \in A(j, h) \quad (18)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+p_j-1} (rec_{jk} x_{jb}) \leq a_k \quad \forall t, k \quad (19)$$

$$\sum_{t=1}^T x_{jt} = 1 \quad \forall j \quad (20)$$

$$x_{jt} \in \{1, 0\}; a_k \in \mathfrak{R}; a_k \geq 0; t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J \quad (21)$$

A função objetivo (17) minimiza o custo total dos recursos a serem disponibilizados para executar o projeto. As restrições (18) garantem o respeito às relações de precedência. As restrições (19) garantem que a quantidade de recursos utilizados em qualquer momento t não ultrapasse a quantidade a ser disponibilizada, a_k . As restrições (20) garantem que cada atividade é programada uma e somente uma vez. As restrições (21) são referentes ao domínio das variáveis. A função objetivo (17) é o custo total do projeto, e poderia ter outras variáveis para representar outros custos tais, como horas extra e subcontratação, entre outros, com o objetivo de minimizar o custo total.

Assim como no RCPSP, os problemas de RACP/RLP e TCPSP possuem as suas variações com múltiplos modos chamadas de problema de investimento em recursos com múltiplos modos (MRIP – *Multi-mode Resource Investment Problem*) apresentado por Hsu e Kim (2005), ou problema de disponibilidade de recursos com múltiplos modos (MRACP – *Multi-mode Resource Availability Cost Problem*) apresentado por Yamashita e Morabito (2009), e problema de programação de projetos com tempo restrito e múltiplos modos de execução (MTCPSPP – *Multi-mode Time Constrained Project Scheduling Problem*). Um modelo de programação de projetos com restrição de tempo e múltiplos modos de execução (MRACP – *Multi-mode Resource Availability Cost Problem*) é apresentado a seguir, baseado em Yamashita e Morabito (2007). Considere os seguintes parâmetros:

i : modo de execução, $i = 1, \dots, I$

t : período de tempo, $t = 1, \dots, T$

k : tipo de recurso, $k = 1, \dots, K$

j : atividade, $j = 1, \dots, J$

p_{ji} : tempo de processamento da atividade j no modo de execução i

A : conjunto dos pares de atividades j e h , tal que j precede h ($j \rightarrow h$)

rec_{jik} : quantidade do recurso k utilizada para executar a tarefa j no modo i

v_k : custo de disponibilizar uma unidade do recurso k

As variáveis de decisão são:

a_k : quantidade a ser disponibilizada do recurso k

$$x_{jti} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no instante } t \text{ no modo de execução } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\text{Minimizar } \sum_{k=1}^K v_k \cdot a_k \quad (22)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (t \cdot x_{jti}) \leq \sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T (t - p_{hi}) \cdot x_{hti} \quad \text{para todo } j \rightarrow h \in A(j, h) \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I \sum_{b=t}^{t+p_j-1} \text{rec}_{jki} x_{jbi} \leq a_k \quad \forall t, k \quad (24)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=1}^T x_{jti} = 1 \quad \forall j \quad (25)$$

$$x_{jti} \in \{1, 0\}; a_k \in \mathfrak{R}; a_k \geq 0; t = 1, \dots, T; k = 1, \dots, K; j = 1, \dots, J \quad (26)$$

A função objetivo (22) minimiza o custo total dos recursos a serem utilizados no projeto. As restrições (23) garantem o respeito às relações de precedência. As restrições (24) garantem a utilização de no máximo a quantidade total de recursos disponível. As restrições (25) garantem que cada tarefa é alocada uma e somente uma vez para todo o horizonte de tempo. As restrições (26) são referentes ao domínio das variáveis.

Os modelos (17)-(21) e (22)-(26) foram adaptados para serem utilizados na formulação do modelo matemático desenvolvido nessa pesquisa, conforme discutido no capítulo 4.

2.2.3. Problemas de programação de projetos com *trade-offs*

Essas duas categorias de problemas de programação de projeto estão relacionadas entre si. Möhring (1984) mostra que o RACP é o problema dual do RCPSP. As duas categorias são duas formas de analisar um projeto, uma voltada para os recursos e outra voltada para a duração do projeto. Os responsáveis pelo projeto geralmente estão limitados em tempo e recursos produtivos ou um orçamento e, por isso, buscam uma solução que relaciona o custo de utilizar recursos produtivos com a duração do projeto.

Diversos trabalhos de revisão de literatura definem os problemas de *trade-off* de programação de projetos tais como Herroelen et al. (1998), Kolisch e Padman (2001) e Hartmann e

Briskorn (2010) sendo que, o trabalho mais completo encontrado durante a revisão de literatura foi o de Węglarz et al. (2011).

O problema de *trade-off* entre tempo e custo (TCTP – *Time/Cost Trade-off Problem*) é o caso em que a duração das atividades varia em função do seu custo, representado como o consumo de um recurso não renovável, como o dinheiro. A duração é limitada à quantidade máxima e mínima do recurso que pode ser alocada. Os dois objetivos mais comuns são, dado um limite de tempo, encontrar as durações e a programação das atividades que minimizam o custo total (chamado de problema com tempo limitado) e, dada uma quantidade limitada de recursos, encontrar as durações e a programação das atividades que minimizam o custo do projeto (chamado de problema do orçamento). A relação entre tempo e custo pode ser contínua e, nesse caso, é chamada de problema de *trade-off* entre tempo e custo contínuos (CTCTP – *Continuous Time/Cost Trade-off Problem*), ou discreta, caso em que é chamado de problema de *trade-off* entre tempo e custo discreto (DTCTP – *Discrete Time/Cost Trade-off Problem*). Wuliang e Chengen (2008) apresentaram os DTCTP com recursos restritos e múltiplos modos (MRC-DTCTP – *Multi-mode Resource Constrained DTCTP*). A diferença nesse caso é que os recursos renováveis são limitados e formados pela combinação de custos diretos e custos indiretos. Os custos diretos podem ser alocados de forma a alterar a duração das atividades. Segundo Wuliang e Chenhen (2009), Hindelang e Muth (1979) foram os primeiros a definir o CTCTP.

Węglarz et al. (2011) definiram também o problema de *trade-off* entre tempo e recurso (TRTP – *Time/Resource Trade-off Problem*), em que o tempo de processamento das atividades varia conforme uma função não decrescente da utilização de um único recurso renovável alocado a esta atividade. A função objetivo mais comum é encontrar a duração e a programação das atividades que minimizam a duração do projeto, e o problema dual é a minimização da alocação de recursos para um projeto com tempo limitado. Possui também as variações discreta (DTRTP – *Discrete Time/Resource Trade-off Problem*) e contínua (CTRTP – *Continuous Time/Resource Trade-off Problem*), dependendo da forma da variação da relação entre tempo e recurso. No caso em que existem múltiplos recursos renováveis com relações de *trade-offs* entre tempo e recurso, o problema é chamado de MDTRTP (*Multiple-DTRTP*). Herroelen et al. (1998) afirmaram que o DTRTP é um subproblema do MRCPSP, que também possui os *trade-offs* entre tempo e custo, tempo e recurso e recurso e recurso e, por isso, o DTRTP é um problema NP-difícil.

Herroelen et al. (1998) definiram o problema de *trade-off* entre recurso e recurso (RRTP – *Resource/Resource Trade-off Problem*), em que a duração das atividades varia conforme a

quantidade de um conjunto de recursos diferentes que são alocados a elas, gerando uma relação de conflito entre os diversos recursos.

O problema aqui estudado possui relações de *trade-off* entre a quantidade de operadores e o estoque em processo. Esse *trade-off* não foi tratado diretamente no modelo matemático aqui proposto, mas utilizando experimentos com diferentes valores de estoque em processo, com o objetivo de traçar a curva de *trade-off* entre capacidade e estoque em processo. Além disso, o problema utiliza múltiplos modos de execução, portanto, explora o *trade-off* entre recursos e tempo de forma semelhante ao *Multiple-DTRTP*.

2.2.4. Casos especiais

Além das restrições e funções objetivo apresentadas nos subcapítulos anteriores, existem diversos casos especiais reportados na literatura. Hartmann e Briskorn (2010) apresentaram as restrições temporais generalizadas. Nas restrições de precedência do RCPSP, uma atividade pode iniciar imediatamente após a conclusão das suas predecessoras. Porém, existe o caso em que as atividades devem respeitar atrasos mínimos ou máximos (*time lags*) entre o início e o fim de atividades sucessoras. Existe também o caso em que os atrasos podem ser negativos, ou seja, permitem sobreposição (*overlap*). Um outro caso apresentado por Hartmann e Briskorn (2010) é o tempo mínimo de separação entre atividades, que diferentemente do *time lag*, obriga que duas atividades sem relações de precedência tenham um intervalo mínimo entre o término e início.

Restrições de tempo com interrupção (*time-switch constraints*) são aquelas em que o horizonte de tempo é dividido em subperíodos, geralmente ciclos de trabalho e descanso, e as atividades só podem ser executadas dentro de certos subperíodos. Por exemplo, pode ser utilizado para representar os dias da semana e finais de semana. Restrições de tempo de transferência ocorrem quando um recurso r está em um local em que a atividade i é executada e o local j precisa Δ_{ijr} unidades de tempo para recebê-lo, sendo que a transferência pode precisar de um outro recurso. Hartmann e Briskorn (2010) apresentaram outras variações de restrições temporais especiais, aplicadas em vários contextos práticos. Segundo Węglarz et al. (2011), as restrições temporais apresentadas são extensões do caso clássico e na literatura, os problemas de programação de projetos com essas características são chamados problemas com restrições de precedência generalizadas (GRP – *Generalized Precedence Constraints*), ou problema com janelas de tempo. A presente pesquisa utiliza restrições do tipo *time-switch* para representar a variação na disponibilidade dos recursos nos subperíodos em que o horizonte de planejamento foi subdividido, que nesse caso são os turnos de trabalho.

Węglarz et al. (2011) apresentaram os problemas de fluxo de caixa, em que objetivos ou variáveis financeiras são consideradas. Utilizando o ponto de vista de quem executa o projeto, fluxos de caixa negativos representam gastos necessários para a execução do projeto, enquanto fluxos de caixa positivos significam recebimentos por atividades completadas. O valor do dinheiro no tempo também pode ser considerado, na forma de fluxo de caixa descontado, com a função objetivo de maximizar o valor presente líquido. Segundo Węglarz et al. (2011), uma das variações financeiras mais estudadas é o problema de programação de projetos com recursos restritos e fluxo de caixa descontado (RCPSPDCF – *Resource Constrained Project Scheduling Problem with Discounted Cash Flows*). Węglarz et al. (2011) apresentaram vários trabalhos na literatura que estudaram o RCPSPDCF. Outra variação é o problema de programação de pagamentos (PSP – *Payment Scheduling Problem*), em que a quantidade e o momento dos pagamentos são determinados de forma a maximizar o valor presente líquido para um tempo limite do projeto. O mesmo problema pode ser definido com múltiplos modos de execução.

Além dos problemas de *trade-offs* entre custo, tempo e recursos apresentados na seção 2.2.3, Węglarz et al. (2011) apresentaram uma variação em que a qualidade do projeto é utilizada como um novo fator, em que um projeto possui relações de conflito entre duração, custo e qualidade. O objetivo é minimizar o custo, maximizar a qualidade e respeitar o prazo limite do projeto.

Węglarz et al. (2011) apresentaram o caso em que as atividades podem ser interrompidas e reiniciadas posteriormente, sem aumento de custo ou perda de processamento. Nesse caso, o problema é chamado preemptivo, sendo um exemplo o RCPSP preemptivo (PRCPSP – *Preemptive RCPSP*). As formas de interromper a execução das atividades podem ser discretas ou contínuas, ou seja, em instantes específicos ou a qualquer instante, e em problemas em que as atividades possuem múltiplos modos de execução. Vários trabalhos que estudaram variações preemptivas das atividades são reportadas por Węglarz et al. (2011). Na presente pesquisa, a execução das atividades de montagem e selagem podem ser interrompidas ao final do segundo turno, ficam paradas durante o terceiro turno em que não existem operadores, e são retomadas no primeiro turno do próximo dia, conforme será discutido no capítulo 3. O mesmo acontece às vésperas de finais de semana e feriados, exceto para as atividades de cura. Portanto, o problema é parcialmente preemptivo.

Todas as variações de problemas de programação de projeto apresentadas geralmente consideram que os parâmetros do problema são determinísticos. Entretanto, todas podem ser abordadas considerando incertezas nos parâmetros. Herroelen e Leus (2004, 2005) revisaram os

diversos métodos que podem ser utilizados para abordar problemas de programação de projetos com incerteza. Yamashita e Armentano (2007) desenvolveram modelos e heurísticas para o problema de RACP com incerteza. O estudo empírico de problemas de programação de projetos continuará a gerar novas variações e casos especiais, portanto, a revisão de literatura realizada não é exaustiva.

2.3. Aplicação de otimização matemática na manufatura da indústria aeroespacial

Nessa é apresentada resumidamente os trabalhos que estudaram a gestão da manufatura ou utilizaram técnicas de pesquisa operacional, tais como, heurísticas, meta-heurísticas, modelagem matemática e simulação, aplicados na manufatura aeroespacial. Os trabalhos foram divididos em dois grupos, sendo que o primeiro grupo são os trabalhos de gestão da manufatura e o segundo grupo são os trabalhos que utilizaram modelagem e simulação. Estes foram então organizados por etapa do processo de manufatura de aeronaves que, conforme explicado anteriormente, são a fabricação, montagem estrutural e montagem final, além de trabalhos correlatos. Na seção 2.4, é feita uma comparação entre a presente pesquisa e os trabalhos semelhantes encontrados nessa revisão de literatura.

A utilização de técnicas de pesquisa operacional no contexto de manufatura aeroespacial pode ser incluída como parte das tecnologias emergentes no contexto da Indústria 4.0, particularmente *Big Data* e *Analytics*. Lu (2017) e Liao et al. (2017) revisaram as aplicações de tecnologias de Indústria 4.0 em todos os setores de manufatura em geral. Lu (2017) explica que o conceito de Indústria 4.0 surgiu na Alemanha em 2011 e refere-se à adoção de um conjunto de tecnologias que, combinadas, representam a quarta revolução industrial. Liao et al. (2017) mostraram iniciativas de governos de vários países ao redor do mundo para financiar o desenvolvimento de tecnologia relacionada. De modo geral, essas tecnologias estão relacionadas à digitalização e automação das operações de manufatura, administrativas e de cadeia de suprimentos e a sua revisão detalhada está fora do escopo dessa tese. Guyon et al. (2019) analisou as oportunidades e riscos da Indústria 4.0 no setor aeronáutico e mostraram que o setor tem grande potencial para adotar as tecnologias novas que fazem parte da Indústria 4.0.

Em pesquisas nas bases de dados *Web of Science* e no *Google Scholar*, não foram encontrados muitos trabalhos que estudaram a programação de atividades de montagem estrutural aeronáutica utilizando técnicas de gestão da produção ou modelagem matemática e otimização. Na Tabela 1 são apresentadas as palavras-chave utilizadas nas pesquisas realizadas nas bases de dados.

Dos resultados encontrados, foi feito um filtro com as revistas das áreas de gestão de operações (*operations management*) e pesquisa operacional (*operations research*) e então, foram analisados os resumos dos trabalhos resultantes. Então, os trabalhos foram analisados e separados apenas aqueles que estão relacionados com a aplicação de otimização matemática na manufatura aeroespacial. Além disso, dentre os trabalhos selecionados foi verificado se outros trabalhos que os citam, ou que estão nas suas referências, também estão no escopo de revisão do trabalho.

Tabela 1: Palavras chaves utilizadas na busca de artigos nas bases de dados

#	Palavras de busca	#	Palavras de busca
1	<i>Aerospace scheduling</i>	8	<i>Aeronautics heuristic</i>
2	<i>Aerospace heuristic</i>	9	<i>Aeronautics optimization</i>
3	<i>Aerospace optimization</i>	10	<i>Aeronautics simulation</i>
4	<i>Aerospace simulation</i>	11	<i>Aeronautics manufacturing</i>
5	<i>Aerospace manufacturing</i>	12	<i>Scheduling aircraft jig</i>
6	<i>Aeronautic scheduling</i>	13	"Final assembly" AND (<i>aircraft</i> OR <i>airplane</i>)
7	<i>Aeronautics scheduling</i>	14	"operations research" AND <i>aerospace</i>

As primeiras abordagens quantitativas às montagens aeronáuticas encontradas são da década de 1930. Um engenheiro aeronáutico chamado Theodore Paul Wright observou que a quantidade de homens hora necessária para produzir cada aeronave diminuía conforme a quantidade acumulada de aeronaves produzidas aumentava, e que essa relação poderia ser explicada por uma curva exponencial. O estudo de Wright (1936) foi o primeiro a introduzir o conceito de curvas de aprendizagem na literatura científica, para representar a evolução da produtividade da produção de aeronaves ao longo do tempo. Schwedest (1940) apontou diversos problemas no projeto das aeronaves que devem ser considerados para facilitar a manufatura. Em seu trabalho, foi discutido como as montagens devem ser distribuídas em submontagens para tornar o processo de produção de aeronaves mais eficiente e fácil de sincronizar, apresentando inclusive o uso de gráficos de Gantt para a programação de montagens.

2.3.1. Gestão da produção

No grupo de trabalhos de gestão da produção, desde a década de 90 existe um consórcio de instituições de pesquisa, universidades e empresas do setor aeroespacial nos Estados Unidos voltados para desenvolver práticas de gestão de manufatura e cadeia de suprimentos baseadas em produção enxuta (*Lean Manufacturing*). Ele é chamado de *Lean Aerospace Initiative* (LAI) e é liderada no meio acadêmico pelo Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT – *Massachusetts Institute of Technology*). As pesquisas são realizadas por funcionários das empresas

do setor aeroespacial e participantes do consórcio, ou por alunos de pós-graduação das universidades, todos voltados para casos práticos, com os objetivos claramente delineados e suporte da liderança na implementação das mudanças sugeridas. Entre os exemplos de projetos de pesquisa, é possível citar as melhorias na modernização das aeronaves cargueiras *C-5 Galaxy* realizados por Barrett e Fraile (2005), o programa do caça F-16 descrito em Ferdowski e Stanke (2002), o programa do míssil AIM-120 descrito por Davidz e Nightingale (2002), a montagem final do Boeing 717 por Gastelum (2002), a produção da fuselagem do Boeing 737 apresentada em Ferdowski e Haggerty (2002), a fabricação de motores aeronáuticos na UTC (*United Technologies Corporation*) apresentados em Lennox (2006), a montagem final do helicóptero UH-60 *Black Hawk* estudada por Wolters II (2000), para citar alguns. Christ (2001) aplicou manufatura enxuta e teoria das restrições na montagem de aviões na Boeing.

Uma visão abrangente do programa e dos seus resultados é apresentada por Munman et al. (2000) e Crute et al. (2003). Os trabalhos citados utilizaram principalmente técnicas de manufatura enxuta para diminuir custos ou melhorar a qualidade dos casos empíricos estudados. Na presente pesquisa, o objetivo é otimizar a programação de montagens estruturais aeronáuticas utilizando abordagens de modelagem matemática, portanto, possuem um foco metodológico diferente. No entanto, técnicas de manufatura enxuta poderiam ser utilizadas em montagens estruturais com o objetivo de reduzir desperdícios de forma simultânea à utilização de otimização matemática, caso a gerência responsável assim decidir, gerando benefícios múltiplos. Os trabalhos que utilizaram técnicas de modelagem e simulação são apresentados a seguir.

2.3.2. Fabricação aeroespacial

Durante a pesquisa para a presente revisão de literatura foram encontrados poucos trabalhos aplicando abordagens de pesquisa operacional na fabricação de aeropeças, que podem ser agrupados por tipo de problema ou método utilizado.

O primeiro grupo são os trabalhos de programação da produção. Thörnblad et al. (2015) desenvolveram modelos de programação de *job shop* flexível na fabricação de aeropeças da GKN *Aerospace* na Suécia. Os autores utilizaram um MIP (*Mixed Integer Programming* – modelo inteiro misto) e o *software* de programação matemática integrado com *solver* AMPL-CPLEX para implementar e resolver o problema. Vallhagen et al. (2017) estudaram quais seriam os requisitos necessários para o sistema de informações da GKN *Aerospace* conseguir extrair os dados em tempo real do ambiente de produção e processá-los em modelos matemáticos de otimização. Dar-El e Feuer (1992) utilizaram uma combinação de simulação e heurísticas na programação de máquinas

de usinagem de 5 eixos utilizando modelos de *job shop* na IAI (*Israel Aerospace Industries*). Os autores chamaram a técnica desenvolvida SIBS (*Simulation-Based Scheduler*). Os resultados reportados melhorias nos *lead times*, utilização e capacidade produtiva da ordem de 30%. Zhou et al. (2019) desenvolveram vários métodos heurísticos para realizar a programação em tempo real na fabricação de lâminas de motores aeronáuticos em plantas chinesas. Os autores utilizaram uma combinação de técnicas para coletar, armazenar, processar, apresentar e realimentar os dados da situação da produção em tempo real, com a finalidade de gerar programas de produção com horizontes de tempo de curto prazo. Uma das conclusões da pesquisa é que para a programação em tempo real é mais importante utilizar técnicas que geram soluções rápidas, pois elas se adaptam de forma ágil às mudanças, do que métodos mais lentos com soluções de qualidade maior.

Zhongyi et al. (2010) estudaram a programação da produção de um centro de fabricação de componentes em materiais compósitos. Para isso, desenvolveram um algoritmo genético integrado em um *software* com interface visual e relataram ganhos expressivos com a automatização do processo de programação das tarefas e melhoria de desempenho da manufatura. Azami et al. (2018) também estudaram um sistema de manufatura de compósitos, com várias células e utilização de autoclave. Eles desenvolveram um MIP baseado em *flow shop* híbrido e um algoritmo genético para resolver um caso real de uma indústria aeroespacial no Canadá.

O segundo grupo são os trabalhos de programação de pontes rolantes (*hoist scheduling*). Na manufatura aeronáutica, as pontes rolantes estão presentes nos processos de tratamento de superfície, inspeção por líquido penetrante, usinagem química de alumínio, entre outros. Paul et al. (2007) estudaram a programação de uma linha de tratamento de superfície de peças utilizadas na fuselagem e nas asas de aeronaves da Airbus, com o objetivo de minimizar o *makespan* em condições sem *buffer* e sem espera, (*no-buffer, no-wait*). Os autores combinaram a utilização de simulação de eventos discretos (DES – *Discrete Event Simulation*) com heurísticas para comparar analisar a programação da operação. Os resultados mostraram que a heurística proposta poderia melhorar a produtividade da linha de tratamento de superfície em até 20%. Basán et al. (2017) estudaram um problema semelhante, com algumas restrições diferentes, e também utilizaram DES combinada com heurísticas para minimizar o *makespan*. Aguirre et al. (2013) utilizaram um MIP e uma heurística para fazer a programação de ponte rolante também de uma linha de tratamento de superfícies.

O terceiro grupo são os trabalhos que estudaram problemas de corte e empacotamento. Abuabara (2006) e Abuabara e Morabito (2008, 2009) desenvolveram modelos matemáticos para otimizar o corte linear de tubos de alumínio utilizados na fabricação de aeronaves

agrícolas leves. Lemos e Santoro (2010) desenvolveram heurísticas para o sequenciamento de corte de matéria-prima utilizada na fabricação de aeropeças. Nele et al. (2016) estudaram como organizar a disposição de peças de material compósito em cargas de um forno de autoclave, com o objetivo de diminuir o tempo de processamento de cada carga. Para isso, criaram regras específicas que consideram as características técnicas particulares como questões termodinâmicas e geometria das peças, entre outras.

O quarto grupo são os trabalhos que utilizaram simulação de eventos discretos em vários contextos. Papaioannou (2018) desenvolveu um modelo de simulação de eventos discretos para estudar a fabricação e montagem de componentes de satélites na RUAG *Space*. O objetivo era validar essa técnica para utilizá-la na preparação de aumento na flutuação de demanda em um sistema de produção do tipo ETO (*Engineering-to-order*). Caggiano et al. (2015) estudaram a viabilidade da implantação de robôs para automatizar o carregamento e descarregamento de células de manufatura e a inspeção após fabricação. Para isso, Caggiano et al. (2015) utilizaram DES e conseguiram avaliar quais os efeitos da implantação da automação e o impacto da variação de fatores de produção na capacidade da célula de manufatura, e se essa célula atende à demanda planejada. Johnson et al. (1999a; 1999b) estudou o planejamento de uma operação de remanufatura de componentes dos motores Pratt & Whitney JT8D e Rolls Royce Dart, realizadas pela Air New Zealand Engineering Services. Os motores das aeronaves são desmontados, seus componentes são inspecionados e remanufaturados ou descartados. Para isso, Johnson et al. (1999a; 1999b) criaram um modelo de simulação de eventos discretos e validaram com dados históricos do sistema de informação.

Efthymiou et al. (2018) utilizaram a simulação para estudar os efeitos de variações nos tempos de *setup* e retrabalho no tempo de fluxo e atraso na manufatura de trocadores de calor de motores aeronáuticos. Os autores chamaram a capacidade do sistema de manufatura lidar com essas variações de robustez. Pagone et al. (2019) estenderam o trabalho de Efthymiou et al. (2018), avaliando também os efeitos da utilização de regras de despacho diferentes utilizando simulação. Steringer et al. (2019) utilizaram simulação para analisar a viabilidade de automatizar uma inspeção e definir técnicas de programação em tempo real na produção de painéis compósitos das asas na Airbus. Akhtar et al. (2019) utilizaram simulação integrada com o sistema de informação da ANT Industries para gerar a programação em tempo real da fabricação de componentes de motores aeronáuticos.

O quinto grupo são os trabalhos que não se enquadraram nos grupos anteriores. Huang et al. (2006) estudaram alternativas de *layout* da fabricação de revestimentos aeronáuticos

utilizando simulação. Srinivasan et al. (2003) fizeram um estudo na Woodward, uma empresa americana que fabrica componentes para motores aeronáuticos, utilizando planilhas e modelos analíticos de redes de filas integrados com procedimentos heurísticos para representar um sistema de manufatura de *job shop*, e avaliar a implementação de um sistema de CONWIP, (*Constant work in process*), o dimensionamento do estoque em processo e os lotes de produção.

2.3.3. Montagem Estrutural

Na montagem estrutural, os trabalhos podem ser classificados em três grupos que são balanceamento de linhas de produção, programação da produção e simulação de eventos discretos. Os trabalhos pertencentes a esses grupos são descritos a seguir.

Na manufatura de aviões, as linhas de montagem representam as etapas sequenciais de montagem das aeronaves, em que cada posição da aeronave ou gabarito de montagem é uma estação de trabalho. Boysen et al. (2007) apresentaram uma classificação e revisão dos modelos de linhas de montagem, chamados na literatura de ALB (*assembly line balancing*) e suas variações, em que o objetivo é distribuir um conjunto de atividades de montagem por estações de trabalho, respeitando restrições particulares, como tempo de ciclo, rede de precedência, entre outras. Segundo Boysen et al. (2007), linhas de montagem são sistemas de produção com fluxo sequencial, em que as operações produtivas são executadas sequencialmente em estações de trabalho organizadas de forma linear. Alguns trabalhos utilizaram a abordagem de ALB na montagem estrutural aeronáutica. Dar-El e Rubinovitz (1992) estudaram o balanceamento de linhas de montagem estrutural de materiais compósitos de motores aeronáuticos na IAI. Nesse estudo, os autores consideraram as características clássicas de balanceamento de linhas, como múltiplas estações de trabalho, nivelamento de carga, restrições de precedência baseadas em tecnologias e tempos de início das tarefas. Além disso, eles consideraram as curvas de aprendizagem e as restrições de alocação de tarefas, para não perder a evolução da aprendizagem ao realizar um rebalanceamento da linha, e propuseram um algoritmo heurístico para o problema estudado. Heike et al. (2001) estudaram modelos de alocação de mão de obra em estações de trabalho para linhas de montagem estrutural que produzem vários modelos de aeronaves diferentes ao mesmo tempo. O principal objetivo do estudo era balancear a linha, considerando que os modelos de aeronaves possuem tempos de processamento diferentes. Aeronaves em montagem podem ficar vários dias em estações de trabalho sequenciais e a alocação de atividades em cada estação deve respeitar o tempo de ciclo, para não gerar estações sobrecarregadas ou subutilizadas em excesso. Como no problema estudado existiam dois gabaritos em cada estação, era possível realizar a montagem em paralelo de duas aeronaves diferentes. Os autores avaliaram o custo de mão de obra e de estoque em processo,

considerando a alocação de mão de obra nas estações de trabalho, diferentes visões sobre o tempo de ciclo das montagens, multifuncionalidade dos montadores e programação das atividades. Biele e Mönch (2018) estudaram o problema de alocar aeronaves diferentes na mesma linha de montagem e fazer o balanceamento da linha de montagem, semelhante ao trabalho de Heike et al. (2001). Eles propuseram dois MIP, heurísticas e mateheurísticas para resolver o problema.

Outros trabalhos utilizaram modelos matemáticos baseados em programação de projetos para otimizar a programação de montagens estruturais aeronáuticas. Bautista et al. (1999) implementaram um algoritmo genético integrado com heurísticas para busca local na resolução de um problema de montagem que utiliza robôs e pode ser representado como um RCPSP. Yanasse e Silva (2010), Silva (2010), Silva et al. (2010), Silva e Morabito (2010) e Silva et al. (2011) utilizaram modelos de programação de *job shop* adaptados para representar problemas de montagem de subconjuntos aeronáuticos em um único gabarito, com o objetivo de minimizar o *makespan*. Silva et al. (2011) e Silva et al. (2014a, 2014b) estudaram a mesma montagem considerando a evolução da qualificação da equipe de montagem. Para isso, além do modelo de programação de *job shop*, foi utilizado um modelo de programação de projetos com tempo restrito, visando minimizar a quantidade total de mão de obra.

Silva e Morabito (2015) estudaram uma montagem estrutural com dezenas de gabaritos, considerando as atividades de montagem e selagem, mas de maneira mais simplificada do que o presente trabalho. Silva e Morabito (2018) estudaram a montagem estrutural de aeronaves sob a ótica de um problema de programação de projetos e reportaram resultados parciais da presente pesquisa, considerando apenas o caso com único modo de execução. Borreguero-Sanchidrián et al. (2017) utilizaram um modelo inteiro misto para representar um *job shop* flexível em uma montagem estrutural realizada na Airbus. Nesse caso, uma célula de manufatura com trabalhadores, máquinas e gabaritos são compartilhados entre estruturas aeronáuticas de diversas tipos. O objetivo é minimizar o custo total considerando o custo de mão de obra e de estoque em processo. A presente pesquisa se enquadra nessa categoria de estudo, como uma abordagem de programação de projetos aplicados à montagem estrutural, com características adicionais em relação à literatura, conforme explicado de forma mais detalhada posteriormente na seção 2.4.

Exemplos de pesquisas para otimizar a montagem estrutural de painéis aeronáuticos com a utilização de rebitoras automáticas podem ser encontrados em Cheng et al. (2012), Liu et al. (2012) e Dale (2001). Agnetis e Macchiaroli (1998) desenvolveram uma busca tabu para sequenciar a montagem de painéis aeronáuticos em máquinas rebitoras da Alenia, quando esta fabricava a aeronave MD-80 da McDonnell Douglas. Briggs et al. (2012, 2013) estudaram a

programação de montagens em linhas *flow shop* para máquinas rebitadoras de painéis de fuselagem da Bombardier, na Irlanda. Nesses estudos, foi proposta uma abordagem de programação baseada em linhas de montagem híbridas e simulação de eventos discretos para mostrar que, no caso pesquisado, é possível diminuir o estoque em processo pela metade e o *lead time* em 39%. Os resultados encontrados mostraram ganhos de 26% no tempo de *setup* das máquinas. Liu et al. (2012b) propôs uma abordagem baseada em rede de Petri para analisar a montagem de asas de aeronaves comercial considerando incertezas no processo.

Como exemplo de trabalho que utilizou DES, Lu et al. (2012) utilizaram simulação de eventos discretos para identificar os gargalos e refazer o balanceamento da linha de montagem da fuselagem central de aeronaves comerciais da COMAC, uma empresa aeroespacial Chinesa. Esse é um trabalho que não se enquadra nos grupos descritos pois estudou alguns aspectos específicos da montagem estrutural. Yu e Cai (2015) estudaram como prever de forma estimada a quantidade de homens hora necessária na montagem estrutural utilizando otimização por enxame de partículas.

2.3.4. Montagem Final

Assim como na montagem estrutural, os trabalhos de montagem final utilizam três tipos de abordagens, que são a simulação de eventos discretos, programação da produção e balanceamento de linhas de produção, que são descritas a seguir.

Diversos trabalhos utilizaram ALB na montagem final. Abdinnour (2011) propôs um modelo de balanceamento de linhas de montagem aplicado à montagem da aeronave Hawker 800XP, da antiga empresa Hawker Beechcraft. Para isso, o pesquisador desenvolveu uma heurística gulosa, com o objetivo de minimizar o estoque em processo e operações fora da respectiva estação de montagem. Segundo o autor, a aplicação do modelo na linha de montagem final do Hawker 800XP e de outros dois produtos gerou economias de US\$ 30 milhões. Abdinnour (2011) coletou os dados da rede de precedência e duração das atividades por meio de entrevistas com os operários que realizavam as montagens. Durante o processo de análise das atividades de montagem, o pesquisador teve o cuidado de analisar se as atividades poderiam ser subdivididas em mais atividades. Por exemplo, a atividade “trabalhando nas asas” foi dividida em duas atividades, “trabalhando na asa esquerda” e “trabalhando na asa direita”, e os respectivos tempos de montagem foram atualizados. Isso ajudou no balanceamento das linhas, acrescentando flexibilidade na alocação das atividades nas estações.

Ríos et al. (2012a, 2012b) estudaram como projetar linhas de montagem final de aeronaves (FAL – *Final Assembly Line*) e como nivelar a carga das estações de trabalho, na fase

inicial anterior à produção em série da aeronave. Segundo Ríos et al. (2012a, 2012b), a empresa Airbus utiliza o *software Delmia* para a concepção de *layout* de produção e o *EADS Optimizer* para definir a quantidade de estações de trabalho, com base em programação das atividades de montagem planejadas e estimativas dos tempos de execução das atividades. Esse *software* utiliza uma regra de despacho conhecida na literatura como RPWT (*Ranked Positional Weight Technique*), desenvolvida por Helgeson e Birnie (1961), em que as atividades são organizadas por pesos calculados a partir da soma da duração de cada atividade e do tempo total restante para concluir todas as atividades sucessoras. Gómez et al. (2016) apresentam um método para projetar linhas de montagem final de aeronaves considerando a cadeia de suprimentos, sequência de montagem final, as estações de trabalho e o *layout* produtivo. Para isso, os pesquisadores desenvolveram técnicas baseadas em modelagem matemática e simulação, e implementaram essas técnicas em um *software*. Borreguero-Sanchidrián (2017) estudou a montagem do MRTT (*Multi Role Transport Tanker*), um avião-tanque utilizado para reabastecer aeronaves militares em voo, baseado na versão civil do Airbus A330. A produção da aeronave estava em fase de protótipo e iniciando a produção em série, e a autora estudou como criar e balancear uma linha de produção para montar as aeronaves de produção seriada. A autora propôs um método em três passos para construir a linha de montagem, que envolve o dimensionamento da quantidade de estações, a programação detalhada de cada estação de trabalho e a análise de riscos. Por isso, o trabalho de Borreguero-Sanchidrián (2017) envolve o balanceamento de linhas de produção e programação da produção.

Vários trabalhos utilizaram simulação na montagem final com diferentes objetivos. Ziarnetzky et al. (2013) fizeram um estudo exploratório de aplicação de simulação na montagem final de aeronaves visando analisar quais as relações entre as variáveis do sistema de manufatura. Caggiano et al. (2016) estudaram a linha de montagem de um avião leve, chamado *Skycar*. Utilizando simulação de eventos, rebalanceou a linha de montagem e avaliou alternativas de automação de processos produtivos. Como resultado, mostrou que se as sugestões geradas pelos resultados da pesquisa fossem implementadas, há um significativo potencial de aumento da eficiência e capacidade produtiva da linha de montagem. Lu e Sundaram (2002) fizeram um estudo de simulação para modificar a montagem final do Boeing 747 do *layout* em docas para linha móvel de montagem, redefinindo quais atividades deveriam ser realizadas em quais etapas da montagem final. O estudo permitiu uma redução no *lead time* da montagem final de 24 para 18 dias. Scott (1994) desenvolveu um modelo de simulação de eventos discretos aplicado à análise da montagem final de aeronaves comerciais da Boeing. Em seu estudo, ele abordou o problema considerando as restrições de precedência, de espaço para trabalhos internos na aeronave e a movimentação dos

operários na montagem em cada estação, recursos produtivos como pontes rolantes, entre outros detalhes operacionais. Brown e Canddick (2002) apresentaram múltiplas aplicações de simulação na indústria aeroespacial, incluindo montagem estrutural.

Em vários trabalhos foram reportadas a utilização de programação da produção na montagem final utilizaram principalmente modelos de programação de projetos. Underbrink e Williams (1994) utilizaram algoritmos genéticos para realizar a programação de montagens finais na Boeing. Shan et al. (2017) utilizaram um algoritmo genético para fazer a programação de montagens aeronáuticas na formulação do RCPS e minimizar o tempo de montagem de uma aeronave. Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c) estudaram a montagem final do cargueiro militar A400M Atlas da Airbus. Segundo Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c), na montagem do cargueiro, raramente as atividades são realocadas de uma estação de trabalho para outra após o projeto da linha de montagem ter sido definido durante a fase inicial da produção. Por isso, a estratégia utilizada foi gerar programas de produção otimizados para as atividades de cada estação de trabalho, considerando as restrições técnicas do processo de produção. Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c) propuseram uma nova heurística baseada em programação por restrições e regras de despacho mais sofisticadas para serem utilizadas no EADS *Optimizer*. A formulação completa do modelo matemático é apresentada em Borreguero et al. (2014).

Russel e Taghipour (2019; 2020) desenvolveram vários MIPs para fazer a programação da montagem final de aeronaves comerciais na Bombardier, considerando a possibilidade de atividades que são executadas em uma estação poderem ser executadas nas estações seguintes, ao longo da montagem para serem concluídas, otimização multiobjetivos e utilização ou não de recursos dedicados. Russel e Taghipour (2019; 2020) propuseram vários conjuntos de restrições que podem ser obrigatórias ou opcionais nos modelos, e várias funções objetivo diferentes. Arkhipov et al. (2018a, 2018b) utilizou um MIP baseado no RCPS com restrições de ergonomia em um caso real de montagem final, visando incorporar no modelo de otimização os aspectos humanos além dos econômicos e tecnológicos.

2.3.5. Outros trabalhos correlatos

Além dos trabalhos apresentados, existem outros que são correlatos mas, não se enquadram diretamente nos grupos definidos anteriormente. Alguns trabalhos focaram em integrar decisões de projeto e *design* das estruturas aeronáuticas com as decisões de manufatura, visando otimizar os custos de produção durante a fase de projeto detalhado das aeronaves. Castagne et al. (2009) propuseram um modelo matemático não linear para otimizar o projeto de painéis de

fuselagem com vários objetivos, como reduzir o peso final do produto, maximizar a lucratividade, minimizar o peso ou o custo do painel. Wang (1999) estudou os problemas que ocorrem na montagem das asas de vários aviões de empresas diferentes nos Estados Unidos, com o objetivo de avaliar quais alterações de projeto das asas poderiam facilitar o processo de montagem. Um dos problemas relatados é o constante atraso das montagens em relação às programações realizadas.

Wilson et al. (1982) e Cates et al. (2002) utilizaram simulação de eventos discretos para estudar as operações em solo para a preparação dos lançamentos dos ônibus espaciais que eram operados pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), com o objetivo de identificar os recursos limitantes no processamento que acontecia entre cada voo. A operação dos ônibus espaciais tinha a particularidade de misturar operações de manutenção das espaçonaves e partes reaproveitáveis dos foguetes com a integração de partes novas, que são consumidas em cada lançamento, semelhante à operações de montagem final. A simulação foi também utilizada por Shaw e Li (2000) para analisar a cadeia de suprimentos de componentes eletrônicos utilizados na manutenção de aeronaves. Giribone et al. (2003) aplicaram a simulação de eventos discretos no planejamento da modernização de aeronaves executivas da Piaggio Aero Industries, uma empresa italiana que constrói pequenas aeronaves executivas e de vigilância.

2.4. Quadro comparativo com a presente pesquisa

Os estudos mencionados anteriormente que mais se aproximam da proposta da presente pesquisa são os de Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c), Silva et al. (2010), Silva et al. (2014a, 2014b), Silva e Morabito (2015, 2018), Arkhipov et al. (2018a, 2018b) e Russel e Taghipour (2019, 2020). Todos esses trabalhos aplicaram modelos matemáticos baseados em programação de projetos em montagens aeronáuticas. Entretanto, existem diferenças significativas entre eles. Silva et al. (2014a, 2014b, 2015) utilizaram uma formulação baseada em tempo discreto, enquanto Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c) utilizaram uma formulação baseada em eventos, derivada de Koné et al. (2011) e Zapata et al. (2008). Além disso, Silva et al. (2014a, 2014b) estudaram uma submontagem estrutural pequena, em um único gabarito de montagem e com até 20 pessoas em todos os turnos, enquanto na presente pesquisa são cerca de uma dezena de gabaritos e várias dezenas de pessoas em todos os turnos.

As características do problema estudado por Silva et al. (2014a, 2014b) são distintas do objeto deste estudo. Silva e Morabito (2015) estudaram a montagem estrutural de grandes segmentos, com múltiplos gabaritos e centenas de pessoas envolvidas em todos os turnos. Esse foi

um estudo preliminar da presente pesquisa. Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c) estudaram a montagem final envolvendo múltiplas estações de montagem e dezenas de pessoas.

Russel e Taghipour (2019, 2020) consideram algumas restrições específicas da montagem final que eles estudaram. Por exemplo, os autores chamaram uma dessas restrições de atividades viajantes (tradução de *travel work*), em que atividades que deveriam ser executadas em uma estação da linha de montagem podem ser montadas em estações de trabalho subsequentes, desde que existam trabalhadores disponíveis para fazê-lo. Outras restrições relacionadas ao espaço físico das montagens e de outros tipos foram apresentadas por Russel e Taghipour (2019, 2020), incluindo restrições opcionalmente utilizáveis. No trabalho de Russel e Taghipour (2019, 2020), é estudada uma montagem final de aeronaves de corpo largo (*wide body*) na Bombardier. Essas restrições não estão presentes nesse estudo.

Arkhipov et al. (2018a, 2018b) utilizaram a abordagem clássica de RCPS, em que uma quantidade limitada de recursos está disponível e deve-se encontrar programas de produção que minimizam o tempo necessário para completar o projeto (*makespan*). Além disso, os autores utilizaram restrições ergonômicas, que consideram as diferenças ergonômicas de cada atividade a ser realizada pelos operadores e outras características, tais como especialidade dos trabalhadores, a definição de grupos de atividades, entre outros. O presente estudo não considera as restrições ergonômicas e a quantidade de trabalhadores a ser utilizada na montagem é uma variável de decisão.

No Quadro 1 é apresentada uma comparação entre os estudos de Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c), Silva e Morabito (2015), Arkhipov et al. (2018a, 2018b), Russel e Taghipour (2019, 2020) e esta pesquisa. As principais diferenças são decorrentes da aplicação, montagem final versus montagem estrutural, que gera um conjunto de restrições particulares para representar cada problema. Os problemas RACP (*Resource Availability Cost Problem*) e RLP (*Resource Leveling Problem*) foram definidos em detalhes na seção 2.2. Outras diferenças importantes são os conjuntos de restrições de cada problema, função objetivo e métodos heurísticos utilizados. Embora Arkhipov et al. (2018a, 2018b) e Russel e Taghipour (2019, 2020) tenham reportado a utilização do *software* CPLEX para resolver os modelos matemáticos propostos, eles não especificaram a versão utilizada.

Convém salientar que o estudo preliminar em Silva e Morabito (2015) não abordou diversos aspectos do problema de montagem estrutural. As atividades de selagem tiveram as suas durações respeitadas, mas não foram incluídas as equipes de selagem no cálculo de mão de obra.

Além disso, o modelo também não incorporou as particularidades do tempo de cura do selante após as atividades de selagem, embora respeite o tempo de cura estabelecido. A cura sempre acontece após o seu respectivo processo de selagem, e não é possível programar a cura de forma independente da selagem, pois existe uma relação de precedência imediata entre as atividades de cura e de selagem. No entanto, nem todas as atividades de selagem geram uma atividade de cura. As atividades de cura não precisam de mão de obra, por isso, a cura pode acontecer após os turnos de trabalho se encerrarem ou nos finais de semana. Ela é rigorosamente não preemptiva (i. e., não pode ser interrompida) e não possui múltiplos modos de execução, além de poder exigir que um segmento estrutural permaneça no gabarito de montagem aguardando a cura terminar, ocupando desta forma um recurso produtivo. Silva e Morabito (2015) também não consideraram a distribuição dos trabalhadores em múltiplos turnos de trabalho.

Conforme é apresentado nos próximos capítulos, outro aspecto é considerar o *trade-off* entre mão de obra e estoque em processo na formulação, modificando a função objetivo para minimizar o custo total. Convém salientar que o modelo baseado em programação inteira aqui proposto, pode ser adaptado para representar algumas atividades que não tem uma posição ou um gabarito definido, no caso da gerência de produção decidir que essa atividade deva ser executada na montagem em estudo.

Zhang et al. (2008) afirmam que, para atingir a eficiência que é exigida para a indústria aeronáutica, as montagens devem ser gerenciadas utilizando programação de operações detalhadas para aumentar a capacidade de controle detalhado do processo. Enming (2005), citado por Yu e Cai (2015), afirma que a montagem representa mais da metade do processo de manufatura de uma aeronave. Kalton e Richards (2008) e Xu et al. (2017) relatam que os *softwares* comerciais de programação de projetos utilizam versões muito simples de algoritmos de otimização aplicados a essa finalidade e, por isso, possuem uma capacidade muito limitada de serem utilizados em projetos complexos, como os da indústria aeroespacial. Nos trabalhos são reportados casos em que *softwares* especializados em programação de projetos conseguem ganhos de 30% em duração do projeto.

Quadro 1: Comparação entre as pesquisas apresentadas na literatura e esta pesquisa

Pesquisa	Borreguero et al. (2015a, 2015b, 2015c)	Silva e Morabito (2015)	Arkhipov et al. (2018a, 2018b)	Russel e Taghipour (2019; 2020)	Esta Pesquisa
Objetivo	– minimizar a quantidade de mão de obra alocada;	– minimizar a quantidade de mão de obra alocada – avaliar o <i>trade-off</i> entre mão de obra e estoque em processo	– minimizar <i>makespan</i> – minimizar impacto ergonômico	– múltiplas funções objetivo propostas – funções multiobjetivo	– minimizar a quantidade de mão de obra alocada – avaliar o <i>trade-off</i> entre mão de obra e estoque em processo
Tipo de modelo	RACP / RLP	RLP	RCPS	RACP/RCPS	RLP
Modelo de Base da Pesquisa	Koné et al. (2011) Zapata et al. (2008)	Pritsker et al. (1969)	Própria	Própria	Pritsker et al. (1969)
Heurística	Programação por restrições	Não utilizado	Programação por restrições	Não utilizado	Heurística de programação matemática, construtiva, busca local e múltiplos inícios aleatórios
Restrições particulares	– rede de precedência – múltiplos modos, com preferências – máximo intervalo entre atividades consecutivas – múltiplos tipos de recursos	– rede de precedência – múltiplos modos – processo de selagem e cura parcialmente representados – múltiplos tipos de recursos	– rede de precedência – disponibilidade de trabalhadores – múltiplos tipos de recursos – valor ergonômico da execução de cada atividade	– disponibilidade de recursos – tempo – rede de precedência – espaço físico – início e término mais cedo e mais tarde – múltiplos modos – atividades viajantes	– rede de precedência – múltiplos modos – processo de selagem e cura representados integralmente – múltiplos tipos de recursos – múltiplos turnos de trabalho
Aplicação	Montagem final do cargueiro militar A-400M	Montagem estrutural aeronáutica	Montagem final aeronáutica	Montagem final aeronáutica	Montagem estrutural aeronáutica
Pacote utilizado	CPLEX 12.4	CPLEX 11.2.1	CPLEX	CPLEX	CPLEX 12.5.1

O presente trabalho utiliza como ponto de partida a formulação do modelo matemático apresentado por Silva e Morabito (2015). O modelo é adaptado e estendido para incorporar aspectos da montagem estrutural ainda não representados na literatura. Desta forma, propõe-se aqui um modelo que represente apropriadamente o problema de otimizar a montagem estrutural de jatos, incluindo todas as suas particularidades importantes. O modelo é explorado para o caso de apenas um modo de execução das atividades, e também para o caso em que cada atividade pode ser executada em vários modos de execução, alternativamente. Também são desenvolvidos métodos de solução deste modelo estendido com desempenho para gerar boas soluções em tempo razoável para os tomadores de decisão na prática.

Esse capítulo apresentou brevemente como é a produção de aeronaves, o processo de montagem estrutural e a respectiva literatura diretamente relacionada, incluindo revisões de programação de projetos e aplicação de modelagem e simulação na manufatura da indústria aeroespacial, além de outros trabalhos científicos relacionados com a presente pesquisa.

3. Descrição do Problema

Nesse capítulo é apresentado em mais detalhes o problema presente na operação real de montagem estrutural realizada em uma empresa aeronáutica instalada no Brasil. No entanto, apesar de inspirado em um caso de uma empresa que realiza montagens aeronáuticas, o problema apresentado é característico das montagens estruturais de segmentos aeronáuticos. Acredita-se que, está sendo feita aqui a descrição geral do problema de montagem estrutural com a tecnologia que é utilizada para esse processo produtivo na década de 2010-2020 na maior parte das empresas aeroespaciais do mundo. Nesse capítulo, também é descrita e definida as principais características e termos utilizados no planejamento da produção específico do contexto de montagem aeronáutica.

3.1. Planejamento de montagem aeronáutica

Para facilitar a introdução do problema, começa-se com a discussão de um exemplo ilustrativo de planejamento de montagem aeronáutica. Chao e Graves (1992, 1998) apresentaram um estudo comparando os efeitos do *lead time* na montagem do Boeing 777, comparando os custos de *lead times* com os custos de alocação de mão de obra e de oportunidade. Considere o seguinte exemplo apresentado por Chao e Graves (1992, 1998) para o dimensionamento de uma linha de montagem final de aeronaves. Suponha que a estimativa de carga de trabalho para a produção de cada aeronave seja de 800 horas-homem (HH), e que os estudos técnicos de engenharia apontem para um tamanho ótimo da equipe de montagem de 10 trabalhadores. Considerando um único turno de 8 horas por dia, o tempo de fluxo de cada aeronave pode ser calculado pela expressão (27).

$$\text{Tempo de fluxo} = \frac{800 \text{ HH por aeronave}}{10 \text{ trabalhadores} \times 8 \text{ horas por dia por trabalhador}} = \frac{10 \text{ dias}}{\text{por aeronave}} \quad (27)$$

Considerando que a cadência de produção gera o tempo *takt* de 5 dias, ou seja, a demanda exige que a cada 5 dias uma aeronave deve estar completa, pode-se calcular a quantidade de postos de trabalho pela expressão (28).

$$\text{Estações de Trabalho} = \frac{10 \text{ dias de produção}}{5 \text{ dias}} = 2 \text{ estações} \quad (28)$$

Como cada estação de trabalho tem 10 trabalhadores, a linha terá 20 trabalhadores no total, produzindo uma aeronave a cada 5 dias. Na prática, nem sempre é possível distribuir perfeitamente todas as atividades pelas estações. Considere então esse outro exemplo também apresentado por Chao e Graves (1992, 1998). O tempo de fluxo é de 10 dias, com equipes de 10 trabalhadores em turnos de 8 horas por dia, com um total de 800 HH por avião e o tempo *takt* de 4

dias. Utilizando a expressão (28), calcula-se que são necessárias três estações de trabalho. Dessa forma, segundo os autores, em metade do tempo haverá 3 aviões em manufatura e na outra metade do tempo haverá 2 aviões. Como cada estação de trabalho tem 10 trabalhadores, a linha tem 30 operadores alocados, o que resulta em 960 HH alocadas por aeronave, conforme a expressão (29). Observe que é uma quantidade de HH alocada maior do que a quantidade necessária para montar a aeronave, que é de 800 HH, resultado da ineficiência na alocação das atividades.

$$Qtde\ HH = \frac{10\text{trabalhadores}}{\text{estação}} \times 3\text{estações} \times \frac{8\text{horas}}{\text{dia}} \times \frac{4\text{dias}}{\text{aeronave}} = \frac{960\text{HH}}{\text{aeronave}} \quad (29)$$

Na prática, os responsáveis pela montagem na Boeing relaxaram a restrição de que os 10 trabalhadores precisam ficar rigidamente em cada estação, e tentam programar as atividades de modo a utilizar o mesmo trabalhador em várias estações e assim, diminuir a ineficiência na alocação das atividades. Nesse último exemplo apresentado por Chao e Graves (1992, 1998), a meta da administração da produção é utilizar 25 trabalhadores, para alcançar as 800 HH por aeronave. Uma alternativa seria a engenharia de produção rever o tamanho das equipes de trabalho, digamos, para 9 trabalhadores, alterando o tempo de fluxo para 12 dias, tempo *takt* de 4 dias e três equipes, gerando assim 864 HH para cada aeronave.

Chao e Graves (1992, 1998) explicam que a abordagem utilizada no exemplo ilustrativo ignora os custos do tempo de fluxo, e está apenas preocupada com a “contagem de cabeças” (*head-count*), ou seja, a quantidade de mão de obra alocada. Outros custos relacionados ao tempo de ciclo deveriam ser considerados também. Os autores afirmam que o custo do tempo de ciclo está associado a três categorias. A primeira é formada pelos custos de carregar estoque, nesse caso, estoque em processo. A segunda é a oportunidade de perda de receita. A terceira é o custo de ferramentas para montar mais postos de trabalho.

O custo de estoque é formado pelo custo de oportunidade do dinheiro que está alocado em estoque, e pelos custos de estocagem e manipulação, seguro, perda e obsolescência. Seu componente principal é o custo de oportunidade do estoque em processo. Na Figura 14 é apresentada a curva acumulada de custo em uma aeronave. Caso o tempo de ciclo pudesse ser reduzido em um mês, essa curva seria menor e, conseqüentemente, teria menos custo de oportunidade no estoque em processo.

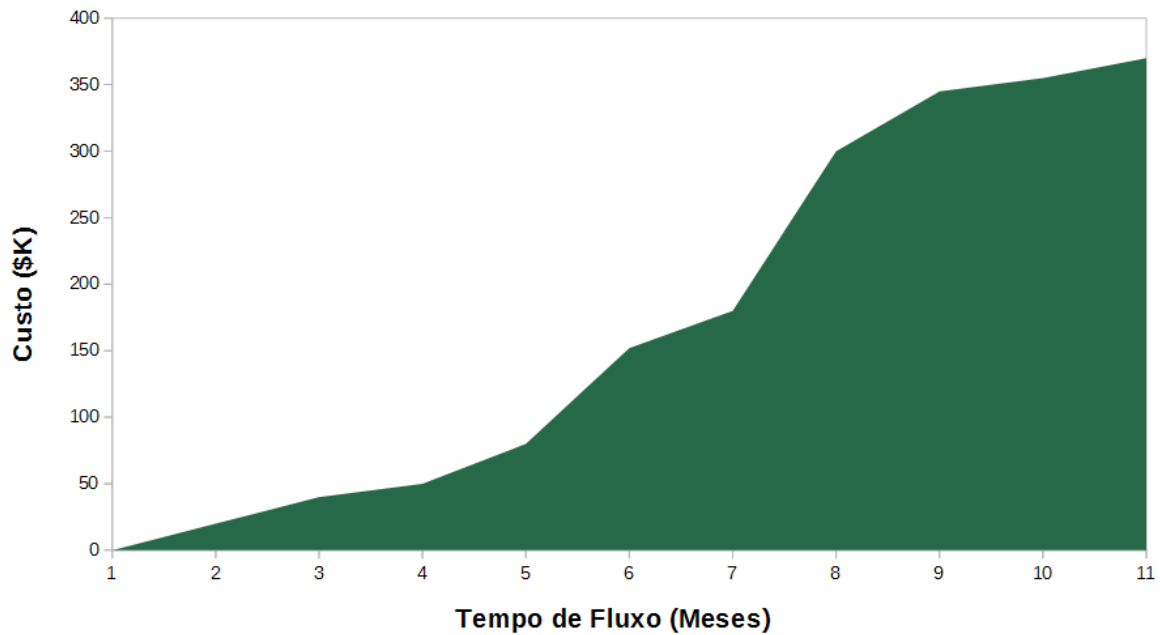


Figura 14: Custo acumulado na aeronave durante todo o processo de manufatura. Fonte: Chao e Graves (1992, 1998)

A perda de oportunidade de receita é decorrente da perda do aproveitamento da entrega antecipada de aeronaves aos clientes. No caso de Chao e Graves (1992, 1998), um cliente que comprasse um Boeing 747-400 em 1990 iria recebê-lo somente perto de 1997. Se a empresa aérea tiver uma demanda que cresce a 4% ao ano, ela pode estar perdendo oportunidades de faturamento ao esperar tanto tempo para aumentar a sua frota. Considerando que a aeronave custa US\$ 50 milhões, que a empresa aérea faz a maior parte do pagamento pela aeronave quando esta é entregue, e que a empresa aérea cliente esteja disposta a receber a aeronave antes do prazo original e pagar por isso, caso o fabricante ofereça essa possibilidade. Então, diminuir o tempo de fluxo em 1 dia significaria receber US\$ 50 milhões um dia antes no fluxo de caixa do fabricante. Com a taxa de 10% ao ano e 250 dias úteis, isso representaria US\$ 20 mil por aeronave. Ao longo de um ano, com o *takt time* de 4 dias ou a produção de 62,5 aeronaves, a redução de um dia do tempo de fluxo representaria US\$ 1,25 milhão por ano, de forma recorrente.

O custo de investir em ferramentas está diretamente associado à quantidade de estações de trabalho adicionais. Segundo Chao e Graves (1992, 1998), cada estação de trabalho adicional custa US\$ 1,2 milhão em ferramentas para os trabalhadores utilizarem. Além desses custos, os autores afirmam que existem outros custos intangíveis. Quanto maior o tempo de fluxo ou *lead time*, mais o sistema de produção demora para responder às mudanças, como alterações no produto, causando problemas de obsolescência, aumento do estoque em processo e um grande esforço de controle da produção, em atividades de correção. Em decorrência, pode aumentar o retrabalho e diminuir a capacidade da empresa de se adaptar às mudanças.

Chao e Graves (1992, 1998) ressaltam que a mentalidade até então utilizada na Boeing era de ignorar o tempo de fluxo e focar apenas no custo da quantidade de mão de obra. O argumento dos autores é que o custo de mão de obra e o custo do tempo de fluxo estão em *trade-off* e, para encontrar uma solução de custo total mínimo, deve-se considerar ambos os custos simultaneamente. Com base na revisão de literatura realizada nessa pesquisa, os autores foram os primeiros a relatarem essa relação na indústria aeroespacial.

Silva e Morabito (2015) também estudaram esse *trade-off*, focando especificamente no custo de oportunidade do estoque em processo e no custo de investir em capacidade que, no caso da montagem estrutural, significa investir em mão de obra. O mesmo *trade-off* é relatado em Gastelum (2002), Borreguero-Sanchidrián et al. (2017) e Biele e Mönch (2018). Em todos os casos, as pesquisas relatam que o foco na minimização da mão de obra é insuficiente para encontrar o custo total mínimo. Alguma ociosidade pode ser vantajosa, considerando os custos de estoque em processo. Chao e Graves (1992, 1998) também lembraram que atividades de melhoria na manufatura podem ser realizadas para diminuir a demanda em HH e o tempo de fluxo, simultaneamente, estudando os processos produtivos.

Na Figura 15 é apresentada a relação entre *lead time* e tempo de ciclo para uma montagem sequencial, conforme os números de série são produzidos. O número de série é um número sequencial único que identifica uma aeronave em produção. O tempo de ciclo é definido como o intervalo entre a conclusão de duas aeronaves consecutivas. Observe que o *lead time* é o período que transcorre entre o início e o fim da montagem de uma aeronave. O *lead time* das montagens está diretamente relacionado com o estoque em processo, é variável e pode ser determinado pelos administradores responsáveis pelo planejamento e produção da montagem estrutural em questão, quando é definido o início e o fim da montagem de cada aeronave. Quanto maior for o *lead time*, mais fácil é nivelar os recursos produtivos, porém, maior é o estoque em processo, conforme apresentado por Chao e Graves (1992, 1998) e Silva e Morabito (2015).

No exemplo apresentado na Figura 15, os *lead times* utilizados são constantes. Dessa forma, é mais fácil a montagem ser balanceada, pois existe menor variação dos intervalos entre inícios e conclusões de aeronaves novas. Nessa tese, todos os exemplares fornecidos pela empresa utilizam *lead time* constantes. Se necessário, é possível utilizar *lead times* diferentes para cada aeronave e calcular um *lead time* ou um tempo de ciclo médio. Russel e Taghipour (2019; 2020) apresentaram uma figura semelhante à Figura 15, demonstrando como são realizados os planos de produção das aeronaves na montagem final que os autores estudaram.

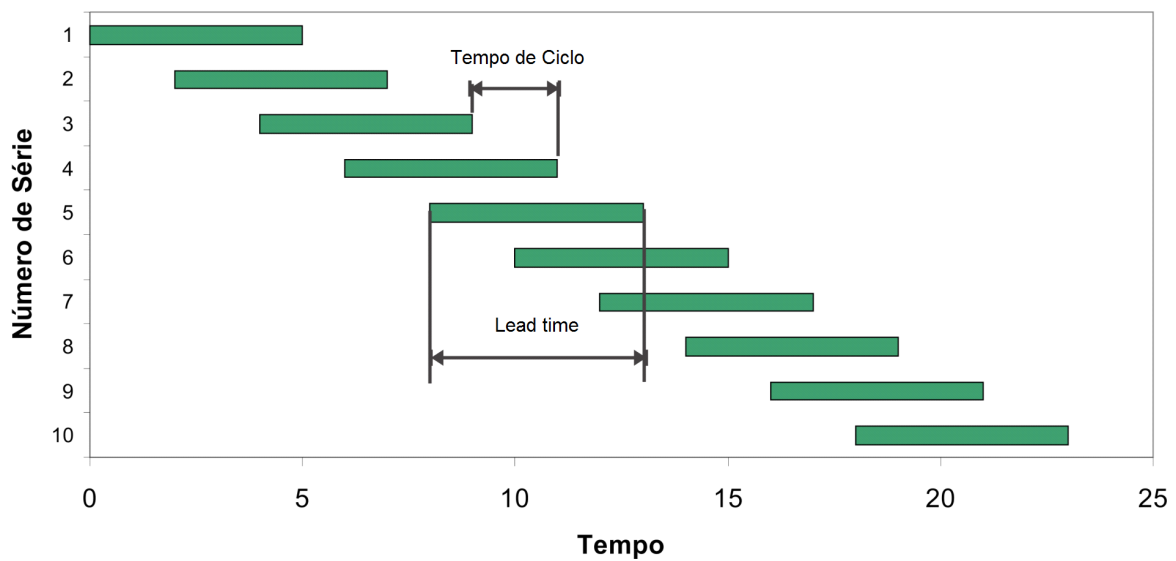


Figura 15: Plano de produção da montagem estrutural. Fonte: Silva e Morabito (2015).

Cada aeronave em montagem apresentada na Figura 15 possui sua própria rede de precedência, com as atividades sendo executadas de acordo com os prazos e disponibilidade de recursos. Na Figura 16 é apresentado como o programa de produção da linha de montagem e o programa de produção detalhado de cada aeronave estão relacionados.

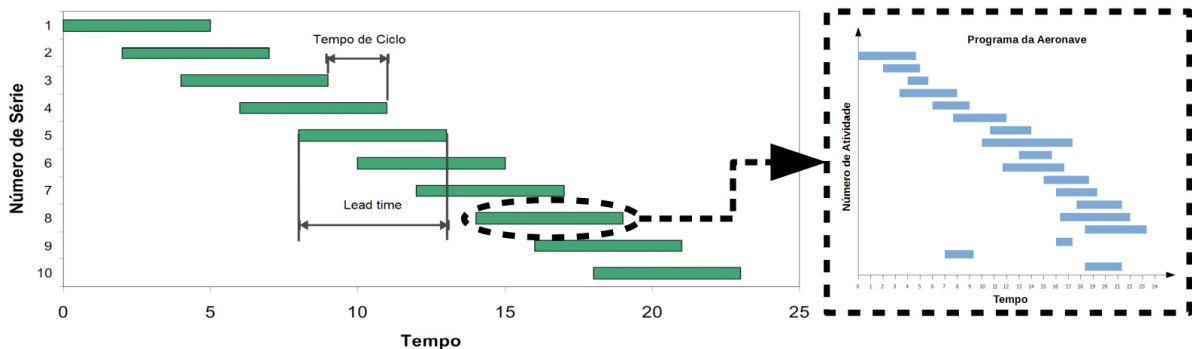


Figura 16: Plano de montagem estrutural e o programa de produção

O tempo de ciclo é muito utilizado para fazer o balanceamento de linhas de produção para ajustar os ritmos de produção das diversas estações de trabalho. Ele pode ser calculado utilizando a expressão (30).

$$\text{Tempo de ciclo} = \frac{\text{tempo disponível}}{\text{demanda}} \quad (30)$$

Silva e Morabito (2015) apresentaram uma forma de calcular o estoque em processo médio dado em número de aeronaves, utilizando a expressão (31), deduzível diretamente da fórmula de Little (LITTLE, 1961). Note que existe uma relação entre tempo de ciclo e *lead time* médio. Note também que o estoque em processo médio depende de duas variáveis, sendo que o

tempo de ciclo depende fortemente da demanda (i. e., um dado de entrada), conforme expressão (30), e o *lead time* pode ser definido pelo planejamento da produção, no caso de montagens aeronáuticas.

$$WIP\ Médio = \frac{Leadtime\ médio}{Tempo\ de\ Ciclo} \quad (31)$$

Observe que pode-se contar a quantidade de aeronaves em montagem em qualquer momento do plano apresentado na Figura 15, O resultado dessa análise é apresentado na Figura 17. Observe que, exceto nas pontas do horizonte de planejamento, em que a linha de montagem inicia e termina vazia, há um período em que o estoque em processo oscila ciclicamente entre 2 e 3 aeronaves. Nesse período, o sistema de produção está em equilíbrio, e desse modo, o estoque em processo médio é calculado pela expressão (31). Como as aeronaves estão em estágios de montagem diferentes, a quantidade de aeronaves em montagem não representa diretamente o estoque em processo.

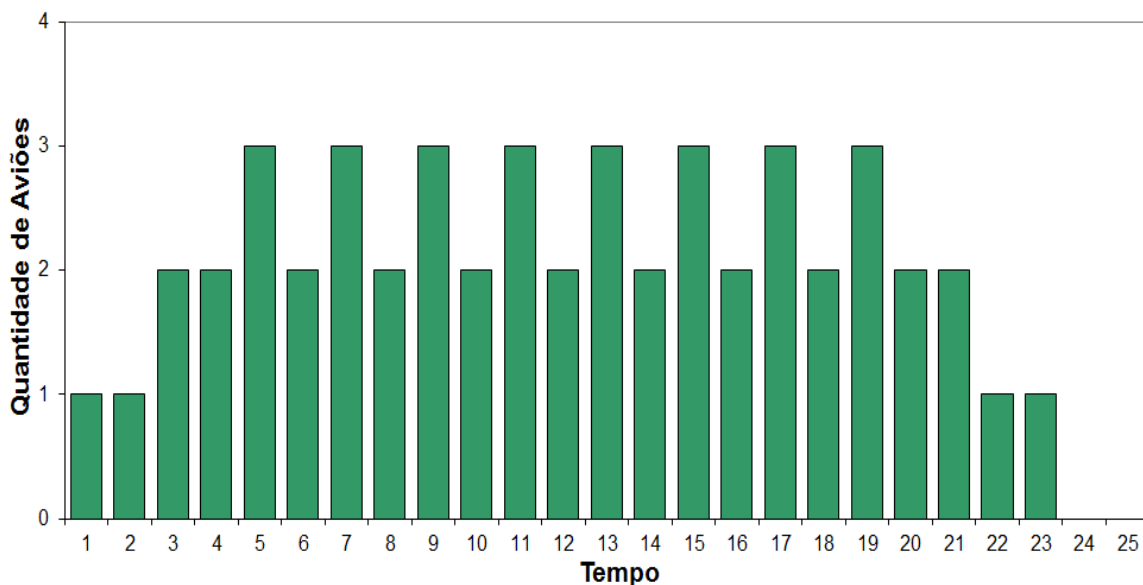


Figura 17: Quantidade de aeronaves em montagem. Fonte: Silva e Morabito (2015)

3.2. Descrição do problema de montagem estrutural aeronáutico

O problema objeto desse estudo é uma linha de montagem de estruturas aeronáuticas de jatos, montados em série. Durante a montagem estrutural, segmentos são gradualmente montados e, nas últimas etapas, ocorre a junção desses segmentos, gerando o produto que deve seguir para a montagem final, na próxima e última etapa. Conforme mencionado anteriormente, o processo de montagem da empresa estudada representa um caso típico de uma indústria do setor e, por isso, o

processo e o problema descritos são semelhantes em todas as indústrias aeronáuticas que realizam montagens estruturais globalmente. Os modelos e os métodos propostos nesta pesquisa podem ser utilizados para resolver o mesmo problema em outras empresas que realizam o mesmo processo de montagem estrutural aeronáutica.

As atividades realizadas pelos trabalhadores podem ser definidas em dois tipos. O primeiro tipo são as atividades de montagem estrutural, ou seja, são aquelas em que os componentes fabricados e os subconjuntos são unidos entre si, realizadas por montadores mecânicos. O segundo tipo são as selagens de interfaces, que vedam as estruturas aeronáuticas para poderem operar em ambiente pressurizado, impedir vazamentos de fluídos e entrada de água, entre outras finalidades, realizados por trabalhadores chamados de seladores. Os detalhes do processo de montagem estrutural foram apresentados na seção 2.1.2.

Como trata-se de uma linha de montagem, cada aeronave, para ser produzida, precisa que uma série de atividades relacionadas por uma rede de precedência sejam concluídas. As atividades são executadas sequencialmente, assim sendo, a linha pode ter atividades de aeronaves diferentes. Cada aeronave que é produzida é identificada por um número de série único e sequencial (NS), começando pela aeronave 01, chamada de NS01 e que representa a primeira aeronave produzida.

A demanda determina o tempo *takt* da linha, e essa decisão está em um nível de planejamento hierarquicamente superior ao do foco desse estudo e, em função disso, não é aqui abordado. As datas de entrega da montagem estrutural seguem um cronograma rígido, pois integram as etapas posteriores de produção, e devem ser seguidas sem atrasos. A data de início é flexível e pode ser escolhida pelo planejamento de produção.

Por exemplo, no caso da linha de produção da empresa aqui estudada, a montagem de cada aeronave é formada por 59 atividades que utilizam 9 gabaritos de montagem diferentes ou vários carros de complementação específicos (que são dispositivos utilizados para apoiar as estruturas aeronáuticas enquanto são montadas, mais simples do que os gabaritos). Os dados relativos a cada atividade são apresentados na Tabela 2 para o caso com único modo de execução das atividades. A coluna “Ativ.” identifica as atividades com um número sequencial, a coluna “Duração” representa o tempo que a atividade demora para ser executada em horas, a coluna “Gabarito” identifica qual o recurso produtivo, nesse caso gabaritos de montagem, é necessário para completar a tarefa, e as duas últimas colunas apresentam a quantidade de trabalhadores por especialidade necessários para realizar cada atividade. Observe que algumas atividades precisam

dos dois tipos de trabalhadores, como as atividades 7, 12, 13, entre outras. O tipo de cada atividade é apresentado na Figura 19.

Na Tabela 3 são apresentadas as durações das atividades e o consumo de recursos conforme o modo de execução. Nesse exemplo, existem dois modos de produção disponíveis, sendo que as atividades descritas na Tabela 3 são as mesmas da Tabela 2, portanto, utilizam os mesmos gabaritos e são do mesmo tipo, com o acréscimo de um modo de execução. A coluna “Ativ.” apresenta o número sequencial que identifica a atividade. A coluna p_{ji} identifica a duração em horas da atividade j no modo i . As duas últimas colunas apresentam as quantidades de trabalhadores por especialidade utilizadas para executar a atividade j no modo i .

Problemas como o descrito nesta seção podem ser chamados de projetos. Os projetos são representados como redes de precedência, em que são apresentadas as relações de precedência entre as atividades. Nahmias (2008) observa que a utilização de redes para representar projetos é mais adequado do que o uso de gráficos de Gantt, pois as redes conseguem representar explicitamente as relações de precedência das tarefas, enquanto que os gráficos de Gantt não (SILVA, 2010). As redes de precedência são representadas como grafos e as respectivas atividades podem ser apresentadas nos nós ou nos arcos da rede. Morton e Pentico (1993) afirmam que a representação de atividades nos nós da rede foi mais amplamente utilizada, mas a representação nos arcos da rede tem sido mais popularmente utilizada nos últimos anos. Na Figura 18 são apresentadas as duas representações da rede de precedência.

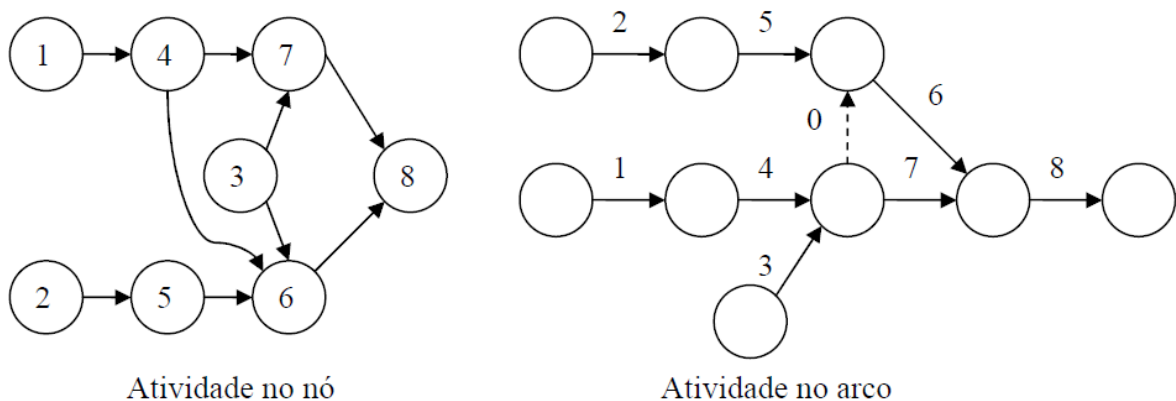


Figura 18: As representações das atividades utilizadas na rede de precedência. Fonte: Pinedo (2005)

Tabela 2: Duração, tipo e recursos das atividades de montagem de uma aeronave em único modo de execução

Ativ.	Duração (horas)	Gabarito	Qtd. Montadores	Qtd. Seladores	Ativ.	Duração (horas)	Gabarito	Qtd. Montadores	Qtd. Seladores	Ativ.	Duração (horas)	Gabarito	Qtd. Montadores	Qtd. Seladores
1	25	G01	2	0	25	7	G05	1	0	49	12	G08	0	0
2	3	G01	0	2	26	4	G05	5	0	50	1	G08	0	3
3	12	G01	0	0	27	7	G05	1	0	51	9	G08	5	0
4	25	G02	2	0	28	6	G05	5	4	52	4	G09	4	0
5	3	G02	0	2	29	3	G05	8	1	53	8	G09	4	5
6	12	G02	0	0	30	5	G05	0	7	54	12	G09	0	0
7	4	G03	5	1	31	12	G05	0	0	55	5	G09	4	0
8	3	G03	5	0	32	2	G05	4	3	56	17	G09	4	3
9	7	G03	1	0	33	6	G05	7	0	57	12	G09	0	0
10	4	G03	5	0	34	2	G05	5	0	58	8	G09	0	0
11	7	G03	1	0	35	25	G06	2	0	59	3	G09	1	0
12	6	G03	5	4	36	5	G06	0	7					
13	3	G03	8	1	37	12	G06	0	0					
14	5	G03	0	7	38	1	G06	2	0					
15	12	G03	0	0	39	1	G07	0	1					
16	2	G03	4	3	40	7	G07	2	0					
17	6	G03	7	0	41	3	G07	0	2					
18	2	G03	5	0	42	12	G07	0	0					
19	25	G04	2	0	43	8	G08	5	0					
20	5	G04	0	7	44	1	G08	0	1					
21	12	G04	0	0	45	4	G08	3	0					
22	1	G04	2	0	46	6	G08	2	2					
23	4	G05	5	1	47	20	G08	5	0					
24	3	G05	5	0	48	8	G08	0	3					

Tabela 3: Duração das atividades e consumo de recursos conforme o modo de execução

Ativ.	Modo 1			Modo 2			Modo 1			Modo 2			Modo 1			Modo 2				
	p_{j1}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.	p_{j2}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.	p_{j1}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.	p_{j2}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.	p_{j1}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.	p_{j2}	Qtde. Mont.	Qtde. Sel.		
1	25	2	0	13	4	0	22	1	2	0	1	0	0	44	1	0	1	1	0	1
2	3	0	2	2	0	4	23	4	5	1	2	10	2	45	4	3	0	2	6	0
3	12	0	0	12	0	0	24	3	5	0	2	10	0	46	6	2	2	3	4	4
4	25	2	0	13	10	2	25	7	1	0	4	2	0	47	20	5	0	10	10	0
5	3	0	2	2	10	0	26	4	5	0	2	10	0	48	8	0	3	4	0	6
6	12	0	0	12	2	0	27	7	1	0	4	2	0	49	12	0	0	12	0	0
7	4	5	1	2	10	0	28	6	5	4	3	10	8	50	1	0	3	2	0	6
8	3	2	0	2	5	0	29	3	8	1	2	16	2	51	9	5	0	5	10	0
9	7	1	0	4	10	8	30	5	0	7	3	0	14	52	4	4	0	2	8	0
10	4	5	0	3	16	2	31	12	0	0	12	0	0	53	8	4	5	4	8	10
11	7	1	0	4	0	15	32	2	4	3	1	8	6	54	12	0	0	12	0	0
12	6	5	4	3	0	0	33	6	7	0	3	14	0	55	5	4	0	3	8	0
13	3	8	1	2	8	6	34	2	5	0	1	10	0	56	17	4	3	9	8	6
14	5	0	7	4	14	0	35	25	2	0	13	4	0	57	12	0	0	12	0	0
15	12	0	0	12	10	0	36	5	0	7	3	0	14	58	8	0	0	8	0	0
16	2	4	3	1	4	0	37	12	0	0	12	0	0	59	3	1	0	2	2	0
17	6	7	0	3	0	14	38	1	2	0	2	1	0							
18	2	5	0	1	0	0	39	1	0	1	1	0	1							
19	25	2	0	13	2	0	40	7	2	0	14	1	0							
20	5	0	7	3	4	0	41	3	0	2	6	0	4							
20	5	0	7	3	4	0	42	12	0	0	12	0	0							
21	12	0	0	12	0	4	43	8	5	0	4	10	0							

Segundo Pinedo (2005), uma desvantagem da representação da atividade no arco é a necessidade de utilizar atividades fantasmas (*dummy*) para manter as relações de precedência. O número de atividades fantasmas pode chegar a 10% em um projeto real. Além de não ter as desvantagens apresentadas pela representação nos arcos, uma vantagem adicional da representação das atividades nos nós é que pode-se utilizar retângulos em escala para representar as atividades, e assim, utilizar as vantagens do diagrama de Gantt com a rede de precedência no mesmo diagrama. Esse trabalho utiliza a representação de atividades nos nós para todos os diagramas de rede de precedência. A rede de precedência da montagem estrutural é apresentada na Figura 19.

Na Figura 19, é possível observar a relação de precedência imediata entre as atividades de selagem e cura, que obrigatoriamente acontecem em sequência, sendo que o início da atividade de cura acontece imediatamente após a conclusão da sua respectiva atividade de selagem. Isso acontece porque a cura é a atividade que representa o tempo necessário para os solventes presentes nos selantes evaporarem e eles atingirem as características físico-químicas definidas em projeto. Para cada aeronave, todas as atividades apresentadas na Tabela 2 ou da Tabela 3, e da Figura 19 devem ser concluídas. Nessa operação são montadas apenas aeronaves de um mesmo modelo. As montagens de cada aeronave são realizadas no mesmo local, em que várias aeronaves são montadas simultaneamente e sequencialmente, porém em diferentes estágios de conclusão e respeitando a sua própria rede de precedência, conforme apresentado na Figura 15.

A quantidade de aeronaves a ser produzida no tempo determina a cadência de produção e, conseqüentemente, o tempo de ciclo. Considere o exemplo apresentado por Silva e Morabito (2015), em que é necessário produzir 10 aeronaves por mês para atender à demanda, e considere a disponibilidade de 20 dias por mês para produzi-las. O tempo de ciclo é calculado pela expressão (32).

$$\text{Tempo de ciclo} = \frac{\text{tempo disponível}}{\text{demanda}} = \frac{20 \text{ dias}}{10 \text{ aeronaves}} = \frac{2 \text{ dias}}{\text{aeronave}} \quad (32)$$

O tempo de ciclo significa que a cada 2 dias, em média, uma aeronave deverá ser produzida e uma forma de planejar a linha de montagem de forma controlada é iniciar a produção de cada aeronave a cada 2 dias também. Dessa maneira, o estoque em processo fica sob controle cíclico, variando dentro de um máximo e mínimo de forma suave. O tempo de ciclo da montagem em questão varia conforme a demanda, e durante a coleta de dados na empresa, estava em 5 dias. A data de início da montagem de cada aeronave pode ser calculada como a data de término, baseada no tempo de ciclo, subtraído do *lead time*.

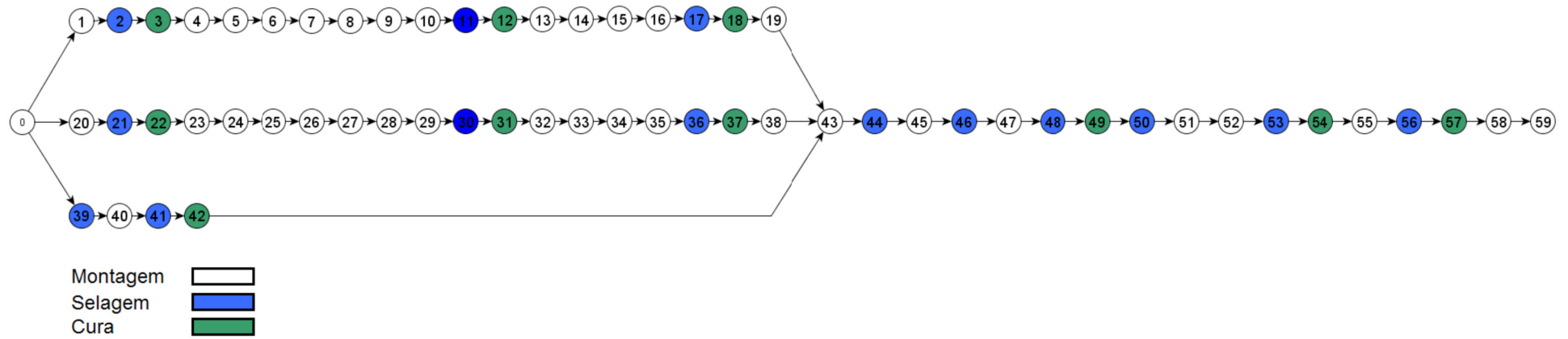


Figura 19: Rede de precedência da montagem estrutural

O estoque em processo médio do plano do exemplo, também apresentado na Figura 17, é calculado conforme (33).

$$WIP \text{ Médio} = \frac{5 \text{ dias}}{\frac{2 \text{ dias}}{\text{aeronave}}} = 2,5 \text{ aeronaves} \quad (33)$$

Conforme apresentado na Tabela 2 e na Tabela 3, no caso estudado são utilizados nove tipos diferentes de gabaritos de montagem, sendo que apenas dois de cada tipo estão disponíveis. O dia de trabalho foi dividido em três turnos de oito horas cada, sendo que os dois primeiros estão ativos enquanto que o terceiro está desativado. Portanto, tipicamente, os dias têm dezesseis horas com operadores trabalhando e oito horas sem trabalhadores. O custo de mão de obra foi considerado unitário e igual para todos os tipos e turnos de trabalho, por simplicidade.

O problema consiste em programar as atividades de montagem apresentadas na Tabela 2 e na Tabela 3, respeitando a rede de precedência da Figura 19, durante um horizonte de tempo em que vigora um plano de produção. Um plano de produção é montado com base nos tempos de ciclo e *lead time* planejados, definindo quantas aeronaves serão montadas, além de suas datas de início e fim. O horizonte de planejamento é de curto prazo, portanto, as decisões de cadência de produção estão em um nível de planejamento hierarquicamente superior e fora do escopo deste problema. As montagens utilizarão gabaritos e mão de obra de dois tipos, distribuídos em dois turnos de trabalho, por isso, a programação da produção deverá considerar a disponibilidade dos recursos necessários para completar cada atividade. O objetivo é utilizar a menor quantidade total possível de mão de obra para completar a montagem de todas as atividades, incluindo todos os tipos e todos os turnos. Outro objetivo é avaliar o *trade-off* entre a quantidade de mão de obra utilizada e o estoque em processo, visando encontrar um equilíbrio entre ambos.

Considere um plano de produção como exemplo. O horizonte de planejamento é de 480 horas, o equivalente a 20 dias úteis de 24 horas cada. Considere uma cadência de produção de 4 aeronaves por mês que, utilizando a expressão (Erro: Origem da referência não encontrada), representa um tempo de ciclo e *takt time* de 120 horas. Na Figura 20 é ilustrado esse plano desdobrado no tempo. Note que o plano de produção tem horizonte de 960 horas, entretanto, o planejamento do exemplo é realizado apenas para 480 horas, destacadas em cinza na Figura 20. Observe também que, apesar de o plano prever a produção de quatro aeronaves por mês, haverá 7 aeronaves diferentes sendo montadas em diferentes estágios ao longo do período de planejamento, e que elas iniciam e terminam a cada 120 dias. Consequentemente, o plano de produção deverá

incluir partes das redes de precedência de cada aeronave, de acordo com o estágio de produção em que ela se encontra no plano.

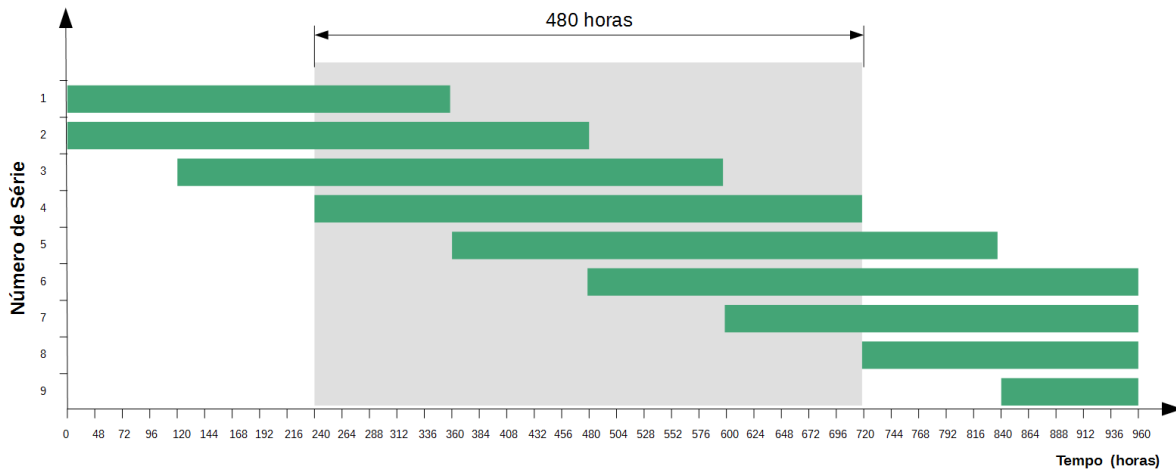


Figura 20: Plano de produção ilustrativo

Os dias de trabalho são divididos em três turnos, de oito horas cada. Os turnos podem ser ativados ou desativados de acordo com a alocação de trabalhadores ou não em cada um deles. Quando o turno é ativo, ele poderá processar atividades que exigem trabalhadores como as montagens e selagens. As atividades de cura podem ser processadas em qualquer turno pois não utiliza trabalhadores. Por exemplo, considere uma atividade j de montagem ou de selagem em um cenário em que o plano de produção utiliza dois turnos de trabalho com 8 horas de duração cada um e um terceiro turno que está desativado. A Tabela 4 apresenta como os horários dos primeiros turnos de trabalho são definidos nesse caso, como exemplo.

Tabela 4: Turnos de trabalho do plano de produção

Dia	Turno	Início	Fim	Estado do Turno
1	1	0	8	Ativado
1	2	8	16	Ativado
1	3	16	24	Desativado
2	1	24	32	Ativado

Na Figura 21 é apresentado como os turnos de produção variam no exemplo ilustrativo apresentado na Figura 20. Os turnos de trabalho se alternam sequencialmente a cada 8 horas. Outra importante característica é que, para diminuir a quantidade de variáveis no problema, os períodos de finais de semana e feriados que existirem no horizonte de planejamento são retirados do modelo. Por exemplo, considere que o plano de produção apresentado na Figura 21 é iniciado na

segunda-feira e, então, a última hora de trabalho da semana na sexta-feira aconteceria após 5 dias de 24 horas, ou 120 horas. Então, a atividade de cura que fosse iniciada na hora 120, iria ser executada durante o final de semana. Entretanto, a hora 120 é o fim da sexta-feira e início da próxima segunda-feira pois o período do final de semana é suprimido. Para respeitar a duração da atividade de cura, é necessário considerar que as durações de cada atividade dependem de quando ela é iniciada ou completada. Essa característica é explicada em detalhes a seguir nessa seção.

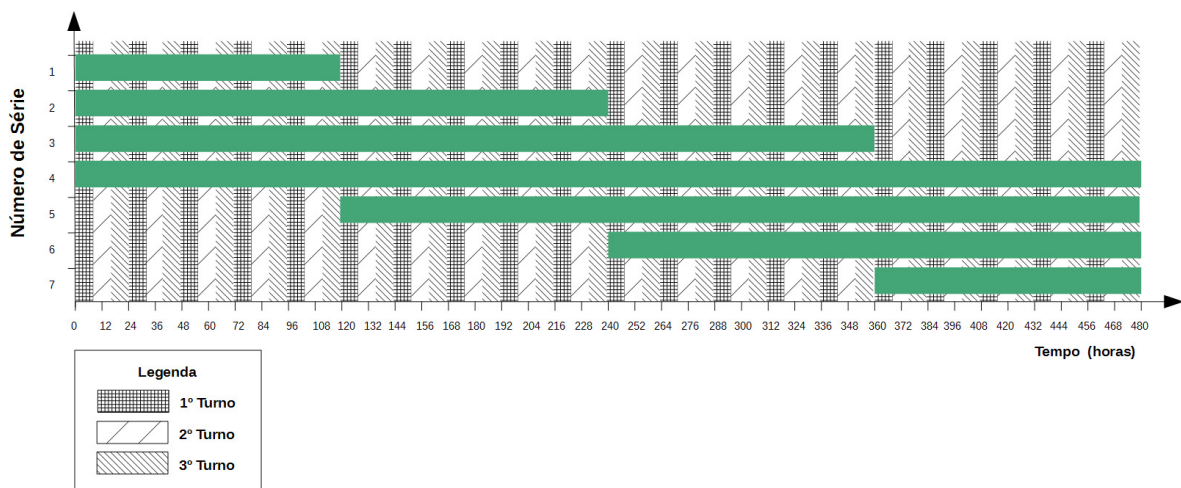


Figura 21: Distribuição dos turnos do trabalho

A quantidade de trabalhadores alocados deve ser considerada por turno, já que os contratos de trabalho não permitem a variação da quantidade de mão de obra no turno em função da programação da produção. Por exemplo, no primeiro turno, deve-se alocar uma quantidade de montadores e seladores que serão utilizados em todos os primeiros turnos dentro do horizonte de planejamento, que geralmente representam algumas semanas de trabalho. Isso significa que alguns tipos de recursos, nesse caso os trabalhadores, estão disponíveis em quantidades diferentes conforme um calendário. Outros tipos de recursos, como os gabaritos, estão disponíveis o tempo todo e em quantidades fixas.

Considere que as durações da atividade j são definidas por $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$. O parâmetro $p1_{jt}$ é a duração da atividade j se ela iniciar no instante t , e $p2_{jt}$ é a duração da atividade se ela é concluída no instante t . A duração da atividade depende do tipo, dos turnos que estão ativos e dos períodos de véspera de feriados e finais de semana. Os parâmetros $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$ podem ser calculados em função das durações das atividades, turnos ativos e finais de semana e feriados que estiverem no horizonte de planejamento.

Considere um exemplo em que a duração original da atividade j é de 12 horas. Então, caso ela seja iniciada na hora 4 do dia 1, ela será concluída na hora 16 ($4 + 12$) do dia 1, ou seja, ao

final do segundo turno de trabalho. Por outro lado, se a atividade j for iniciada na hora 10 do dia 1, portanto, durante o segundo turno, devido à sua duração de 12 horas, não será possível concluir a atividade dentro do segundo turno e, como o terceiro turno está desativado (i. e., não possui trabalhadores alocados), a atividade terá que ser concluída no primeiro turno do próximo dia (dia 2). Dessa forma a duração original da atividade é modificada, acrescentando-se a duração do terceiro turno, que é de 8 horas. O parâmetro p_{1jt} representa a duração da atividade j se ela for iniciada no instante t . Portanto, no primeiro caso, p_{1j4} é de 12 horas, enquanto que no segundo caso, p_{1j10} é de 20 horas (12 + 8). Na Figura 22 são ilustrados os dois exemplos citados, ou seja, a duração da atividade depende de quando ela é iniciada e por isso, é calculada para cada instante de tempo t do horizonte de planejamento.

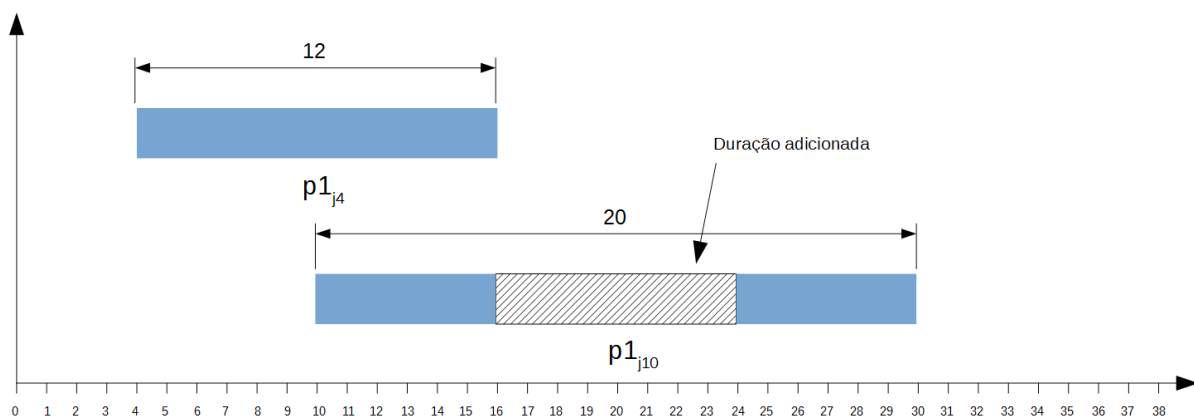


Figura 22: Ajuste da duração das atividades conforme os turnos ativados e desativados

Considere agora um outro caso em que a atividade j é uma atividade de cura. Como ela não depende de mão de obra, ela pode ser realizada em qualquer turno de trabalho, independentemente do turno estar ativo ou não, porque envolve apenas uma atividade de secagem. Portanto, durante os dias úteis, as durações das atividades de cura não são alteradas. Por conveniência, os períodos de finais de semana e feriados foram suprimidos do horizonte de planejamento do modelo matemático, sem perda de generalidade. Atividades de montagem e selagem que não forem concluídas nas vésperas de finais de semana poderão continuar sendo executadas no próximo dia útil. Caso as atividades de selagem terminem na véspera de feriados ou finais de semana, as atividades de cura serão processadas durante os feriados e finais de semana.

Para capturar esse comportamento, considere uma atividade de cura com duração de 12 horas. Caso ela seja iniciada durante uma sexta-feira, na hora 4, será concluída na hora 16 do segundo turno. Caso ela seja iniciada na hora 14, ela será concluída na hora 26, duas horas após o terceiro turno, já no sábado. Portanto, é feito um ajuste na duração da atividade, subtraindo a duração que irá acontecer durante os finais de semana e feriados, de forma que a última hora útil de

uma semana seja seguida pela primeira hora do próximo dia útil após o final de semana. No primeiro caso, $p1_{j4}$ é igual a 12 horas, enquanto que no segundo caso, $p1_{j14}$ é igual a 10 horas, sendo que 2 horas foram removidas da duração por corresponderem ao período de fim de semana suprimido do horizonte de tempo. Na Figura 23 é ilustrado esse exemplo.

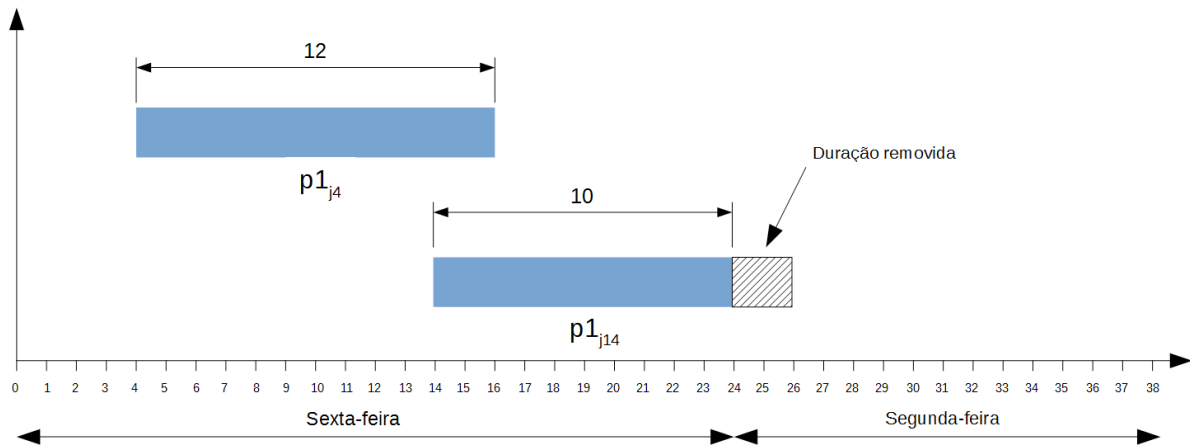


Figura 23: Ajuste da duração das atividades de cura conforme os finais de semana

No caso de $p2_{jt}$, esse parâmetro representa a duração da atividade j se ela for concluída no momento t . Considere o caso em que uma atividade de montagem ou selagem tem duração de 12 horas. Caso ela termine na hora 14 do segundo turno, ela foi iniciada na hora 2 ($14 - 2$) do primeiro turno, portanto, $p2_{j14}$ é de 12 horas. No entanto, se ela for concluída na hora 32, que é o primeiro turno do segundo dia, isso significa que ela foi iniciada na hora 12 ($32 - 12 - 8$) do segundo turno do primeiro dia, e a sua duração deve ser ajustada para incluir o terceiro turno do primeiro dia, que está desativado, portanto, $p2_{j32}$ é de 20 horas. Na Figura 24 é ilustrado o exemplo descrito.

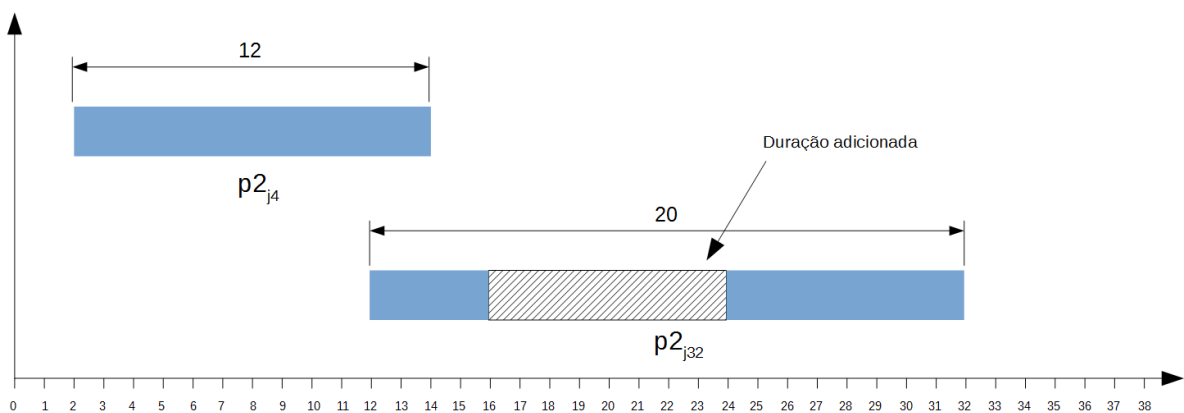


Figura 24: Ajuste da duração das atividades conforme os turnos ativados e desativados

Como as atividades de cura iniciam sempre imediatamente após o término das atividades de selagem, no cenário em que a selagem é concluída no último instante antes de um

final de semana, as atividades de cura são concluídas durante o final de semana, portanto, com duração recalculada excluindo-se a parte que é processada no final de semana. Já no início do primeiro dia útil após um final de semana, só é possível existir um $p2_{jt}$ após a conclusão de uma atividade de selagem adicionado da duração original da atividade de cura.

Uma alternativa a utilização de $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$, poderia ser adicionar as durações dos finais de semana e feriados em turnos de trabalho fictícios e impedir que fossem alocados trabalhadores nesses turnos e, conseqüentemente, atividades que utilizam esses recursos. Dessa forma, não seria necessário utilizar durações que variam em função do tempo. A desvantagem é que essa abordagem utilizaria mais instantes de tempo do modelo matemático com tempo discreto, crescendo o número de variáveis e, possivelmente, o tempo computacional necessário para resolvê-lo.

Importante destacar que, embora seja um problema do tipo RLP, pois as variáveis de decisão são as quantidades de recursos a serem alocados e o tempo é fixo, trata-se de uma variação específica. Uma parte dos recursos, nesse caso os gabaritos de montagem, são fixos ao longo de todo o horizonte de planejamento, como em um RCPSP. Além disso, algumas atividades, como as de montagem e selagem, permitem preempção, enquanto que as atividades de cura são rigorosamente não preemptivas. A alocação dos recursos variáveis pode mudar ao longo do tempo, no entanto, apenas dentro dos subperíodos de cada turno de trabalho, e devem ser iguais ao longo de todo o horizonte de planejamento, para um determinado turno. Os recursos produtivos utilizados na execução de cada atividade permanecem ocupados e indisponíveis durante a toda a execução, sendo liberados apenas após a conclusão da respectiva atividade.

Para ilustrar, considere um exemplo em que uma aeronave deve ser montada em 1 mês, ou 20 dias úteis totalizando 480 horas, em 2 turnos de 8 horas cada ativados e um terceiro turno de 8 horas desativado. O programa de produção desse exemplo é apresentado na Figura 25. Note que as atividades são distribuídas respeitando a rede de precedência apresentada na Figura 19, em que as atividades 1 à 19, 20 à 38 e 39 à 42 são executadas em paralelo. Note que no período, existem folgas nas atividades e elas poderiam ser antecipadas. Por exemplo, a atividade 55 e suas sucessoras poderiam ser antecipadas, sem aumentar a utilização de mão de obra. Como o objetivo nesse programa de produção gerado foi minimizar a utilização de mão de obra, antecipar o início das atividades com folga são soluções alternativas. Planos com cadências de produção maiores acrescentariam aeronaves a serem produzidas no mesmo período e, conseqüentemente, mais atividades para serem executadas dentro do mesmo período. Por isso, iriam exigir mais trabalhadores e haveria menos folga em quando as atividades poderiam ser iniciadas.

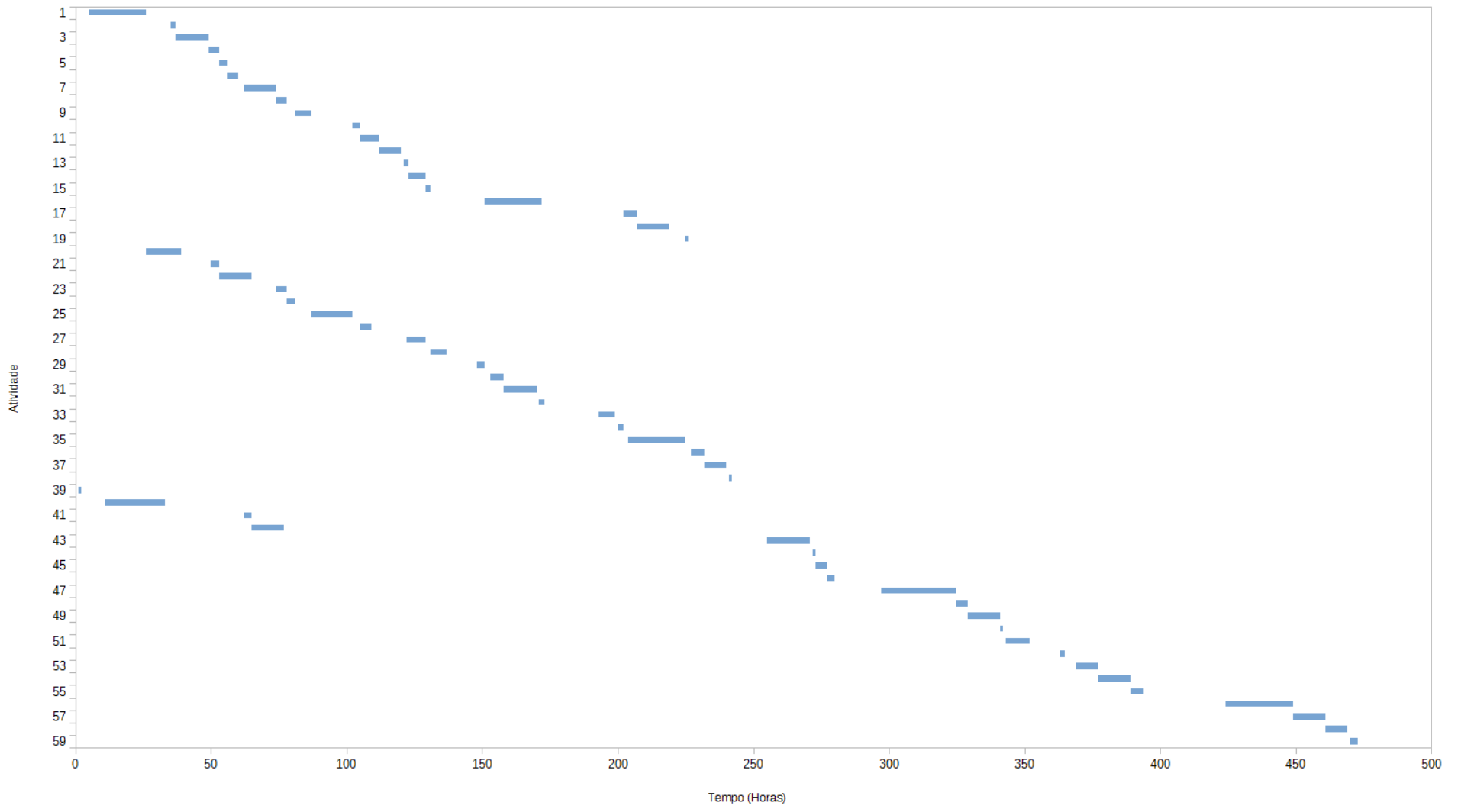


Figura 25: Programação das atividades para um exemplo ilustrativo com a montagem de uma aeronave por mês e 480 horas de *lead time*

Na Figura 26 é apresentada a utilização de mão de obra por tipo ao longo do horizonte de planejamento do exemplo ilustrativo. A cada 16 horas acontece o turno da noite com duração de 8 horas e neste, não existem trabalhadores alocados. Nesse exemplo, foram utilizados 8 e 5 montadores nos turnos da manhã e da tarde respectivamente, e 3 e 7 seladores nos turnos da manhã e tarde respectivamente, totalizando 23 trabalhadores.

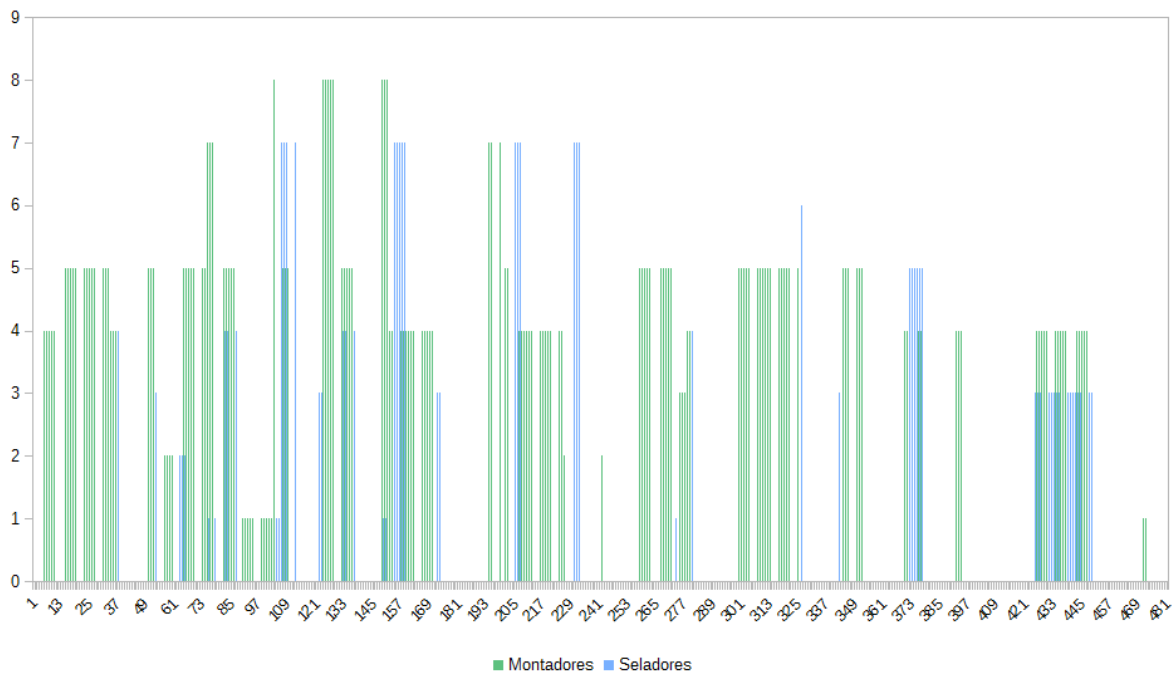


Figura 26: Utilização de mão de obra por tipo no exemplo ilustrativo

4. Modelagem Matemática

Nesse capítulo, apresenta-se o modelo matemático desenvolvido para representar o problema apresentado no capítulo 3. O modelo matemático representa com fidelidade todas as restrições da montagem estrutural estudada.

4.1. Modelo matemático com único modo de execução

O modelo matemático utilizado neste trabalho é baseado no RLP (*Resource Leveling Problem*), conforme descrito na seção 2.2.2, e utilizou como ponto de partida os modelos de Pinedo (2005), Möhring (1984) e Silva e Morabito (2015). Considere que sempre que uma atividade j preceder uma atividade h , será utilizada a notação $j \rightarrow h$.

Considere os seguintes índices e parâmetros:

- j atividade, $j = 1, \dots, J$
- t instante, $t = 1, \dots, T$
- k tipo de recursos (gabaritos), $k = 1, \dots, K$
- l tipo de mão de obra, $l = 1, \dots, L$
- s turno de trabalho, $s = 1, \dots, S$
- r_j instante em que a atividade j está disponível, sendo que $1 \leq r_j \leq T$ e inteiro
- d_j instante de entrega da atividade j , sendo que $1 \leq d_j \leq T$ e inteiro
- c_k quantidade disponível do recurso (gabarito) k
- v_l custo unitário da mão de obra do tipo l
- $p1_{jt}$ duração da atividade j , quando a atividade j iniciar no instante t
- $p2_{jt}$ duração da atividade j , quando a atividade j terminar no instante t
- mo_{jl} quantidade de mão de obra do tipo l utilizada para executar a atividade j
- rec_{jk} quantidade do recurso k (gabarito) necessário para executar a atividade j

Além disso, define-se os seguintes conjuntos. Considere os pares de atividade (h, j) , sendo $h \neq j$.

$H = \{\text{pares de atividade } (h, j) \text{ tal que a atividade } h \text{ precede a atividade } j, \text{ isto é, } h \rightarrow j, \text{ não necessariamente de modo imediato}\}$

$W = \{\text{turnos de trabalho } s \text{ ativos, ou seja, que possuem mão de obra alocada para cumprir as atividades; os turnos que não estão nesse conjunto são os turnos inativos, ou seja, que não possuem mão de obra alocada e executam apenas atividades de cura}\}$

$WST_s = \{\text{instantes } t, \text{ tal que o instante } t \text{ pertence ao turno de trabalho } s\}$

$Curing = \{\text{pares de atividade } (h, j) \text{ tal que a atividade } j \text{ é atividade de cura com precedência imediata em relação à atividade } h\}$

$Cure = \{\text{conjunto de atividades } j, \text{ tal que } j \text{ é uma atividade de cura}\}$

As variáveis de decisão do modelo são:

$$x_{jt} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

a_{ls} quantidade de mão de obra do tipo l alocada no turno s

A formulação do modelo matemático inteiro é dada pela seguinte formulação de programação linear inteira:

$$\text{Minimizar } \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S v_l \cdot a_{ls} \quad (34)$$

$$\sum_{t=r_j}^{d_j} x_{jt} = 1 \quad \text{para } \forall j \quad (35)$$

$$\sum_{t=r_h}^{d_h} (t \cdot x_{ht}) \leq \sum_{t=r_j}^{d_j} (t - p_{2_{jt}}) \cdot x_{jt} \quad \text{para } \forall (h, j) \in H, j \notin Cure \quad (36)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+p_{1_{jt}}-1} (rec_{jk} \cdot x_{jb}) \leq c_k \quad \text{para } \forall (k, t) \quad (37)$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+p_{1_{jt}}-1} (mo_{jl} \cdot x_{jb}) \leq a_{ls} \quad \text{para } \forall t \in WST_s, \forall s \in W \text{ e } \forall l \quad (38)$$

$$\sum_{t=r_h}^{d_h} (t \cdot x_{ht}) = \sum_{t=r_j}^{d_j} (t \cdot x_{jt}) - \sum_{t=r_h}^{d_h} (p_{1_{jt}} \cdot x_{ht}) \quad \text{para } \forall (h, j) \in Curing \quad (39)$$

$$x_{jt} = 0 \quad \begin{matrix} t=1, \dots, r_j + p1_{jt} - 2 \\ t=d_j + 1, \dots, T \end{matrix} \quad \text{para } \forall j \quad (40)$$

$$a_{ls} = 0 \quad \text{para } \forall s \notin W, \forall l \quad (41)$$

$$x_{jt} = 0 \quad \text{para } \forall j \notin \text{Cure}, \forall t \notin \text{WST}_s, \forall s \notin W \quad (42)$$

$$x_{jt} \in \{1, 0\}; a_{ls} \in Z^+; j=1, \dots, J; t=1, \dots, T; l=1, \dots, L; k=1, \dots, K; s=1, \dots, S; \quad (43)$$

A função objetivo (34) minimiza o custo total de alocação de mão de obra. As restrições (35) obrigam que todas as atividades sejam alocadas uma e somente uma vez. As restrições (36) garantem as relações de precedência entre as atividades desde que a segunda atividade não seja de cura. As restrições (37) e (38) garantem que as atividades só serão programadas se existirem os recursos em quantidades c_k e a_{ls} disponíveis. As restrições (39) garantem o início da atividade de cura imediatamente após a conclusão da respectiva atividade de selagem. As restrições (40) eliminam variáveis desnecessárias com base na rede de precedência. As restrições (41) impedem alocação de mão de obra em turnos desativados. As restrições (42) anulam a programação de atividades nos turnos que não estão ativos. Alternativamente, as variáveis das restrições (40), (41) e (42) poderiam não ter sido definidas no modelo e, desta maneira, essas restrições não precisariam ter sido definidas. Essas restrições foram aqui mantidas por simplicidade e facilidade de entendimento do modelo. Note que na implementação computacional do modelo, essas restrições podem ser eliminadas e as respectivas variáveis podem ser pré-fixadas em zero para os domínios dessas restrições. As restrições (43) são referentes ao domínio das variáveis.

Para representar o processo de cura no modelo matemático, é necessário considerar que a cura da selagem iniciará sempre imediatamente após o término da atividade de selagem (relação de precedência imediata), que é uma atividade não preemptiva e que não precisa de funcionários presentes para ser executada. Por isso, a cura pode ocorrer também nos períodos noturnos e finais de semana e feriados, quando não há funcionários trabalhando. Observe que por ter duração padrão de 12 horas, a atividade de cura sempre tem duração maior do que os turnos de 8 horas e, dependendo de quando for iniciada, pode exigir algumas horas de processamento no segundo, terceiro e primeiro turno do dia seguinte.

Os parâmetros $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$ são pré-computados em um *software* implementado em Java e não são necessariamente iguais para uma mesma atividade j em um instante t . O parâmetro $p1_{jt}$ é a duração da atividade j quando ela iniciar no instante t . O parâmetro $p2_{jt}$ é a duração da atividade j quando ela for completada no instante t . O parâmetro $p2_{jt}$ é necessário para ser utilizado nas

restrições de precedência, particularmente nas restrições (36). Note que o cálculo do pI_{jt} é necessário para ser utilizado nas restrições de alocação de recursos do modelo matemático, particularmente as restrições (37) e (38). Considere como exemplo ilustrativo três atividades, com os respectivos parâmetros apresentados na Tabela 5, e que a quantidade de mão de obra disponível do tipo l alocada no turno s (a_{ls}) é 5.

Tabela 5: Parâmetros do exemplo ilustrativo do funcionamento das restrições (37) e (38)

Atividade	mo_{jl}	Início	Fim (x_{jt})	pI_{jt}
1	2	2	$x_{1,7} = 1$	4
2	3	4	$x_{2,12} = 1$	8
3	1	7	$x_{3,14} = 1$	7

Com os dados apresentados na Tabela 5, é possível calcular como as restrições (38) funcionam para o período em que há sobreposição da execução das atividades. A Tabela 6 apresenta o cálculo da restrição (38) para cada instante t do exemplo ilustrativo, considerando a_{ls} como 5. Note que a somatória de b é realizada até $t + pI_{jk} - 1$, o que significa que o instante de término da atividade não é considerado na somatória no início da atividade, já que nesse instante o recurso está liberado. Isso acontece no instante 2, por exemplo, em que $x_{1,7}$ é 1 e não aparece na somatória. As restrições (37) funcionam da mesma forma que apresentado na Tabela 5, porém, com parâmetros diferentes.

Tabela 6: Funcionamento detalhado das restrições (38)

t	$\sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+pI_{jk}-1} (mo_{jl} \cdot x_{jb}) \leq a_{ls}$
2	$mo_{11} \cdot (x_{1,2} + x_{1,3} + x_{1,4} + x_{1,5} + x_{1,6}) + mo_{21} \cdot (x_{2,2} + x_{2,3} + x_{2,4} + x_{2,5} + x_{2,6} + x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9}) + mo_{31} \cdot (x_{3,2} + x_{3,3} + x_{3,4} + x_{3,5} + x_{3,6} + x_{3,7} + x_{3,8}) = 0$
3	$mo_{11} \cdot (x_{1,3} + x_{1,4} + x_{1,5} + x_{1,6} + x_{1,7}) + mo_{21} \cdot (x_{2,3} + x_{2,4} + x_{2,5} + x_{2,6} + x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10}) + mo_{31} \cdot (x_{3,3} + x_{3,4} + x_{3,5} + x_{3,6} + x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9}) = 2$
4	$mo_{11} \cdot (x_{1,4} + x_{1,5} + x_{1,6} + x_{1,7} + x_{1,8}) + mo_{21} \cdot (x_{2,4} + x_{2,5} + x_{2,6} + x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10} + x_{2,11}) + mo_{31} \cdot (x_{3,4} + x_{3,5} + x_{3,6} + x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9} + x_{3,10}) = 2$
5	$mo_{11} \cdot (x_{1,5} + x_{1,6} + x_{1,7} + x_{1,8} + x_{1,9}) + mo_{21} \cdot (x_{2,5} + x_{2,6} + x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10} + x_{2,11} + x_{2,12}) + mo_{31} \cdot (x_{3,5} + x_{3,6} + x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9} + x_{3,10} + x_{3,11}) = 5$
6	$mo_{11} \cdot (x_{1,6} + x_{1,7} + x_{1,8} + x_{1,9} + x_{1,10}) + mo_{21} \cdot (x_{2,6} + x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10} + x_{2,11} + x_{2,12} + x_{2,13}) + mo_{31} \cdot (x_{3,6} + x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9} + x_{3,10} + x_{3,11} + x_{3,12}) = 5$
7	$mo_{11} \cdot (x_{1,7} + x_{1,8} + x_{1,9} + x_{1,10} + x_{1,11}) + mo_{21} \cdot (x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10} + x_{2,11} + x_{2,12} + x_{2,13} + x_{2,14}) + mo_{31} \cdot (x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9} + x_{3,10} + x_{3,11} + x_{3,12} + x_{3,13}) = 5$
8	$mo_{11} \cdot (x_{1,8} + x_{1,9} + x_{1,10} + x_{1,11} + x_{1,12}) + mo_{21} \cdot (x_{2,7} + x_{2,8} + x_{2,9} + x_{2,10} + x_{2,11} + x_{2,12} + x_{2,13} + x_{2,14} + x_{2,15}) + mo_{31} \cdot (x_{3,7} + x_{3,8} + x_{3,9} + x_{3,10} + x_{3,11} + x_{3,12} + x_{3,13} + x_{3,14}) = 4$

Na Figura 27 é apresentado o programa de produção do exemplo ilustrativo, e o consumo de mão de obra ao longo do tempo. A programação das atividades respeitou a quantidade máxima de mão de obra disponível. A atividade 3 é iniciada apenas após a atividade 1 ser concluída, para que a quantidade de mão de obra utilizada seja menor ou igual à quantidade disponível.

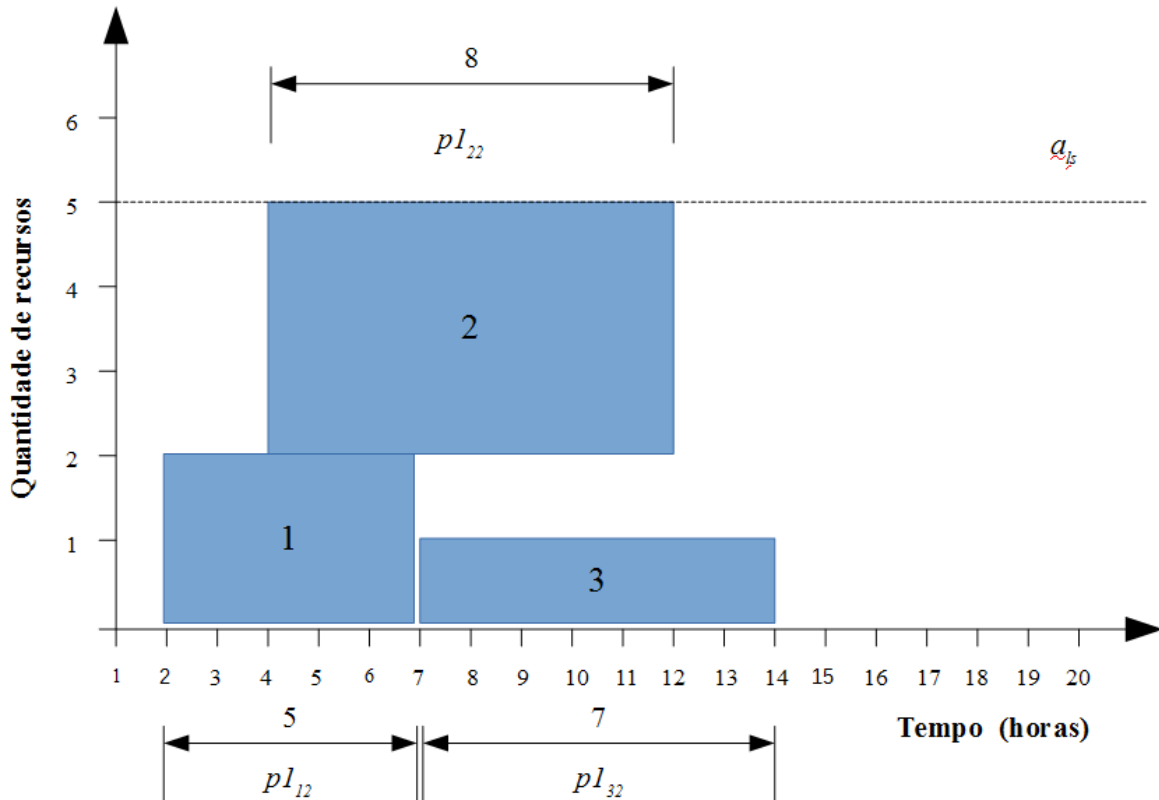


Figura 27: Funcionamento das restrições de consumo de recursos

Embora as restrições (36) e (39) são relacionadas às restrições de precedência, elas funcionam de formas diferentes. Nas restrições (39), o fim da atividade h deve ser igual ao fim da atividade j , menos a sua respectiva duração, considerando que h precede j de forma imediata. Convém observar que as restrições (36) poderiam ser escritas da mesma forma, trocando o sinal de igualdade pela desigualdade, entretanto, não seria facilmente generalizada para o caso com múltiplos modos, conforme apresentado na próxima seção. Considere um exemplo ilustrativo, com duas atividades h e j , em que j tem relação de precedência imediata com h . Na Figura 28 é apresentado um programa de produção do exemplo ilustrativo.

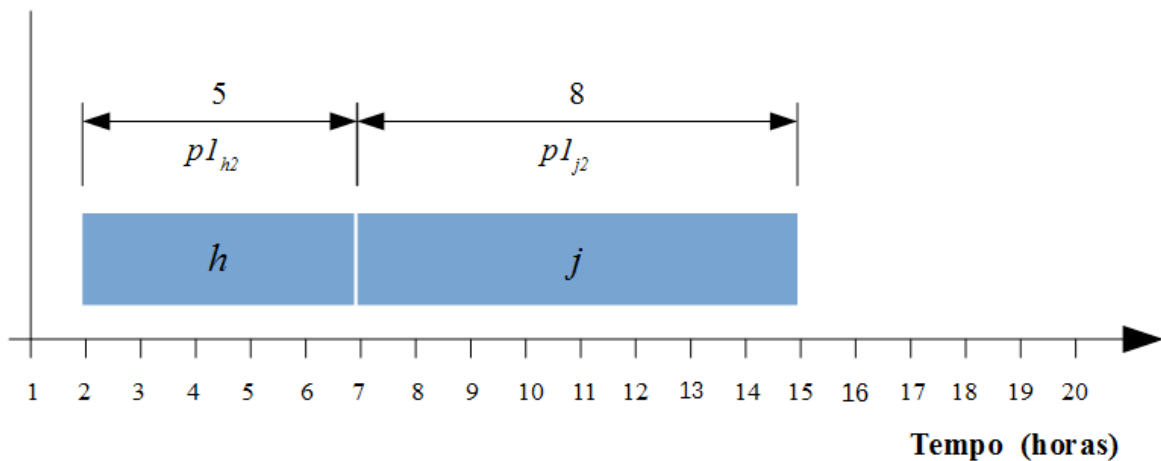


Figura 28: Exemplo ilustrando o funcionamento da restrição de precedência imediata

As restrições (39) para o exemplo ilustrativo estão descritas de forma detalhada na Tabela 7. Por simplicidade, foram omitidos os instantes em que não foram concluídas nenhuma atividade, pois são multiplicados por zero, e são apresentados os casos em que a variável x_{jt} ou x_{ht} é um. Dessa forma, a restrição de precedência imediata está garantida.

Tabela 7: Equação de precedência imediata para o exemplo ilustrativo

$$7 \cdot x_{h,7} = 15 \cdot x_{j,15} - 8 \cdot x_{h,7}$$

Um exemplo ilustrativo com duas atividades h e j em que h precede j , conforme as restrições (36) é apresentado na Figura 29. Note que por ser apenas uma restrição de precedência, não é necessário que a atividade j seja iniciada exatamente no instante em que a atividade h é concluída.

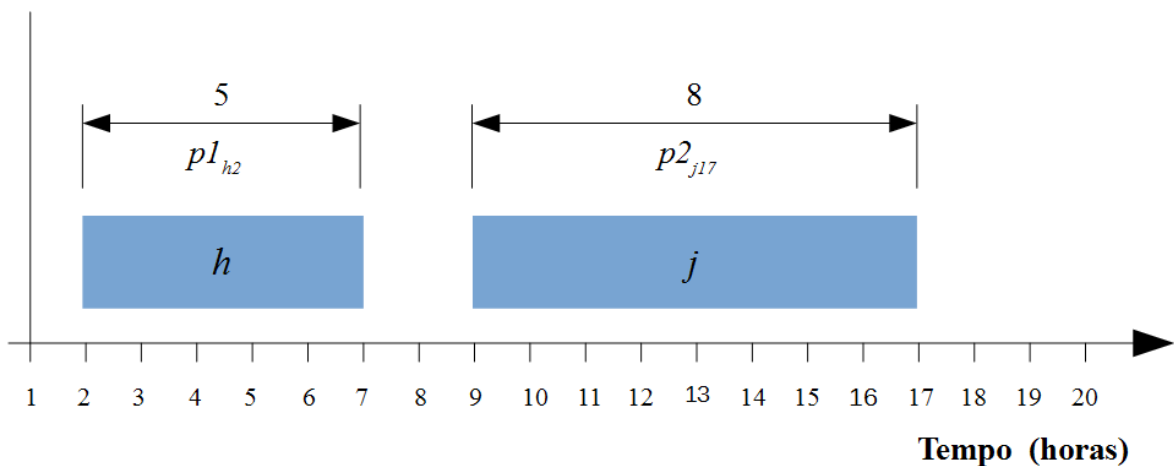


Figura 29: Exemplo ilustrando o funcionamento da restrição de precedência

As restrições (36) para o exemplo ilustrativo estão descritas de forma detalhada na Tabela 8. Por simplicidade, foram omitidos os instantes em que não foram concluídas nenhuma

atividade, pois são multiplicados por zero, e são apresentados os casos em que a variável x_{jt} ou x_{ht} é um. Dessa forma, a restrição de precedência está garantida.

Tabela 8: Equação de precedência para o exemplo ilustrativo

$$7 \cdot x_{h,7} \leq (17 - 8) \cdot x_{j,17}$$

Nessa seção, foi descrito o modelo matemático com único modo de execução, baseado em programação de projetos, que representa o problema desta pesquisa. Na próxima seção, é apresentado o modelo matemático na versão com múltiplos modos de execução.

4.2. Modelo matemático com múltiplos modos de execução

O modelo (34)-(43) foi estendido para o caso com múltiplos modos de execução. Considere os parâmetros apresentados na seção 4.1, além dos novos índices e parâmetros apresentados a seguir.

i modos de execução disponíveis, $i = 1, \dots, I$

$p1_{jit}$ duração da atividade j , quando a atividade j iniciar no momento t e for utilizada no modo i

$p2_{jit}$ duração da atividade j , quando a atividade j terminar no momento t e for utilizada no modo i

mo_{jli} quantidade de mão de obra do tipo l utilizada para executar a atividade j no modo i

Os parâmetros $p1_{jit}$ e $p2_{jit}$ são definidos da mesma forma que $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$ foram descritos na seção 4.1, com a diferença de que agora existem várias durações diferentes, uma para cada modo i . As novas variáveis de decisão são:

$$x_{jti} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

A formulação do modelo matemático com múltiplos modos é dada pela seguinte formulação de programação linear inteira:

$$\text{Minimizar } \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S v_l \cdot a_{ls} \quad (44)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=r_j}^{d_j} x_{jti} = 1 \quad \text{para } \forall j \quad (45)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=r_h}^{d_h} t \cdot x_{hti} \leq \sum_{i=1}^I \sum_{t=r_j}^{d_j} (t - p2_{jit}) \cdot x_{jti} \quad \text{para } \forall (h, j) \in H, j \notin \text{Cure} \quad (46)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j \in 1}^J \sum_{b=t}^{t+p1_{ji}-1} (rec_{jki} \cdot x_{jbi}) \leq c_k \quad \text{para } \forall (k, t) \quad (47)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{b=t}^{t+p1_{ji}-1} (mo_{jli} \cdot x_{jbi}) \leq a_{ls} \quad \text{para } \forall t \in WST_s, \forall s \in W \text{ e } \forall l \quad (48)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=r_h}^{d_h} (t \cdot x_{hti}) + \sum_{i=1}^I \sum_{t=r_h}^{d_h} (p1_{jti} \cdot x_{hti}) = \sum_{i=1}^I \sum_{t=r_j}^{d_j} (t \cdot x_{jti}) \quad \text{para } \forall (h, j) \in Curing \quad (49)$$

$$x_{jti} = 0 \quad \begin{matrix} t=1, \dots, r_j + p1_{jti} - 2 \\ t=d_j + 1, \dots, T \end{matrix} \quad \text{para } \forall j, \forall i \quad (50)$$

$$a_{ls} = 0 \quad \text{para } \forall s \notin W, \forall l \quad (51)$$

$$x_{jti} = 0 \quad \text{para } \forall j \notin Cure, \forall t \notin WST_s, \forall s \notin W, \forall i \quad (52)$$

$$x_{jti} \in \{1, 0\}; a_{ls} \in Z^+; j=1, \dots, J; t=1, \dots, T; l=1, \dots, L; k=1, \dots, K; s=1, \dots, S; i=1, \dots, I; \quad (53)$$

A função objetivo (44) minimiza o custo total de alocação de mão de obra. As restrições (45) obrigam que todas as atividades sejam alocadas uma e somente uma vez em um único modo, dentre os disponíveis. As restrições (46) garantem as relações de precedência entre as atividades. As restrições (47) e (48) garantem que as atividades só serão programadas nos seus respectivos modos de execução, se existirem os recursos em quantidades c_k e a_{ls} disponíveis. As restrições (49) garantem o início da atividade de cura com o término imediato da respectiva atividade de selagem. As restrições (50) eliminam variáveis desnecessárias com base na rede de precedência em qualquer que seja seus modos de execução. As restrições (51) impedem alocação de mão de obra em turnos desativados. As restrições (52) anulam a programação de atividades nos turnos que não estão ativos. Alternativamente, as variáveis das restrições (50), (51) e (52) poderiam não ter sido definidas no modelo. Essas restrições foram aqui mantidas por simplicidade. Similarmente ao modelo anterior com único modo, essas restrições podem ser eliminadas e as respectivas variáveis podem ser pré-fixadas em zero para os domínios dessas restrições. As restrições (53) são referentes ao domínio as variáveis.

Note que a extensão do modelo (34)-(43) para múltiplos modos é relativamente simples. Foi necessário modificar apenas alguns parâmetros, acrescentar o índice i na variável de decisão x_{jt} e adaptar as restrições devido à presença desse índice novo. É possível adaptar os

modelos (34)-(43) e (44)-(53) para, em vez de minimizar o custo de alocação de mão de obra, utilizar a função objetivo de minimizar o *makespan*, de forma semelhante à proposta por Pritsker et al. (1969), discutido no capítulo 2. No entanto, a mudança nas datas de entrega das aeronaves podem ter consequências importantes no plano de produção da montagem estudada e dos próximos estágios e, por isso, essa abordagem está fora do escopo de estudo dessa pesquisa.

5. Métodos Heurísticos

Nesse capítulo são apresentadas as heurísticas desenvolvidas como alternativas a métodos exatos de solução dos modelos matemáticos apresentados no capítulo 4. São apresentadas as heurísticas construtivas, busca local, múltiplos inícios aleatórios, de programação matemática e métodos combinados.

5.1. Métodos heurísticos

Müller-Merbach (1981) definiu heurísticas como algoritmos iterativos utilizados para encontrar soluções dos problemas mas que não necessariamente convergem para soluções ótimas ou factíveis de um problema. Zanakis e Evans (1981) definem heurísticas como procedimentos simples, frequentemente baseados no senso comum, que supostamente oferecem uma boa solução não necessariamente ótima, a problemas difíceis, de um modo fácil e rápido. Segundo Müller-Merbach (1981), os principais motivos para a utilização das heurísticas são quatro. O primeiro é que não é conhecido um método eficiente para resolver um problema em um tempo aceitável, o que torna a heurística o único método possível. O segundo motivo é que, embora possam existir algoritmos exatos que resolvam um problema, heurísticas podem acelerar o processo. O terceiro é que as heurísticas podem ser utilizadas para definir limitantes, necessários em algoritmos que utilizam árvores de busca como o *branch-and-bound*. Por último, muitos algoritmos exatos possuem heurísticas dentro do processo de solução.

Métodos heurísticos podem ser classificados de acordo com a forma que buscam e constroem suas soluções. Nas heurísticas construtivas, elementos individuais à solução são adicionados até que se obtenha uma solução completa, em geral, garantindo-se sua factibilidade. As heurísticas de decomposição dividem o problema em subproblemas menores, sendo que a solução de um subproblema é utilizada como entrada do seguinte, de forma que ao serem todos resolvidos, obtém-se uma solução para o problema completo. Nas heurísticas de redução, identifica-se alguma característica que presumivelmente deva aparecer na solução ótima, fixa-se a mesma na solução, simplificando-se o problema. As heurísticas de busca local, por sua vez, partem de uma solução inicial factível, e mediante alterações nessa solução, geram novas soluções factíveis semelhantes à solução inicial. Essas soluções correspondem a uma vizinhança da solução inicial. Em geral, dentre as soluções vizinhas que tiverem o valor de função objetivo melhor que de a solução inicial, escolhe-se a melhor, e o processo se repete a partir da nova solução até que se obtenha uma

vizinhança que não apresente nenhuma melhoria. Quando isso acontece, a heurística encontrou um ótimo local na vizinhança utilizada, e o método é finalizado.

Segundo Glover (1986), metaheurísticas são métodos heurísticos que sobrepõem outros métodos heurísticos, ou seja, são métodos que comandam uma heurística subordinada. As metaheurísticas possuem mecanismos de superação dos ótimos locais, de maneira a permitir a continuidade da busca. Colomi et al. (1996) apresentaram heurísticas que foram criadas com inspiração em processos naturais descritos, por exemplo, na física e na biologia. Entre os exemplos, os autores citaram os algoritmos genéticos, busca tabu, redes neurais, *simulated annealing* e colônia de formigas. De acordo com Glover (1986), a busca tabu, por outro lado, incorpora conceitos selecionados de inteligência artificial, com o objetivo de emular usos inteligentes de memória. Blum et al. (2011) fizeram uma revisão de literatura sobre metaheurísticas híbridas. Segundo os autores, metaheurísticas são algoritmos não exatos de otimização não especializados em um problema específico. As metaheurísticas híbridas são os métodos que misturam diferentes metaheurísticas entre si ou metaheurísticas com outros métodos de solução. Blum et al. (2011) revisaram várias formas de hibridização que tem sido utilizadas em múltiplos trabalhos na literatura.

Segundo Martí et al. (2013), as heurísticas de múltiplos inícios aleatórios consistem na utilização repetida de métodos construtivos. De acordo com os autores, os primeiros trabalhos que utilizaram essa estratégia datam da década de 1960. Ainda segundo Martí et al. (2013), abordagens mais recentes utilizam métodos construtivos com geração aleatória de soluções, para gerar diversidade, combinados com métodos de melhoria. Essa é uma estratégia de duas etapas, sendo que a primeira utiliza métodos para gerar soluções factíveis enquanto a segunda etapa melhora essas soluções. As formas e complexidades dos métodos utilizados nas etapas de construção e de melhoria variam de heurísticas à metaheurísticas e métodos exatos.

Métodos heurísticos e metaheurísticos têm sido largamente utilizados em pesquisas de programação de projetos. Boctor (1990) fez uma revisão da utilização de diversos métodos heurísticos, isolados ou combinados, em problemas de programação de projetos com recursos restritos e minimização de tempo total de duração. Um dos resultados recomendados pelo autor é primeiro utilizar a heurística conhecida que for mais eficiente para o problema. Caso os resultados não sejam satisfatórios, recomenda-se utilizar uma segunda heurística que faça uma combinação eficiente com a primeira. Se os resultados ainda forem insatisfatórios, Boctor (1990) sugeriu utilizar uma terceira heurística e assim sucessivamente.

Kolisch e Hartman (1999) estudaram vários métodos heurísticos diferentes para o RCPSP e fizeram várias comparações dos resultados computacionais, utilizando inclusive testes estatísticos e métodos aleatórios como base de comparação. Os resultados mostraram que algumas heurísticas podem ter resultados significativamente melhores que outras, e que o desempenho geral delas depende de várias características do problema a ser otimizado. Kolisch e Hartman (2006) atualizaram o trabalho citado, utilizando novas heurísticas desenvolvidas desde então em experimentos computacionais padronizados. Os resultados sugerem que as metaheurísticas e abordagens utilizando métodos populacionais têm desempenho significativamente melhor do que outros métodos. Lancaster e Ozbayrak (2007) fizeram uma revisão da utilização de algoritmos evolutivos em problemas de programação de projetos.

Su et al. (2018) propuseram duas heurísticas construtivas para resolver o RACPT (*Resource Availability Cost Problem with Tardiness*), sendo que uma das heurísticas é determinística e a outra é probabilística. De modo simplificado, as heurísticas alocam as atividades no instante mais cedo possível que não gera um novo pico de utilização de recursos, sendo que a seleção das atividades pode ser determinística ou aleatória com viés, dependendo da versão da heurística. Os experimentos computacionais mostraram que as heurísticas são capazes de encontrar soluções de boa qualidade rapidamente. Zhu et al. (2016) propuseram uma heurística de múltiplos inícios aleatórios para o RACP, separando a geração de soluções em duas etapas. Na primeira, as atividades são sequenciadas e na segunda, são considerados os recursos em utilização. Os experimentos computacionais mostraram que a heurística proposta é significativamente melhor do que outros três algoritmos. Van Peteghem e Vanhoucke (2014) utilizaram uma metaheurística chamada Infestação de Ervas Daninhas (IWO – *Invasive Weed Optimization*) para resolver o RACP e o RACPT. Os resultados computacionais reportados demonstraram que o procedimento criado pode gerar boas soluções para ambos os problemas.

5.1.1. Heurística construtiva

A heurística construtiva aqui utilizada é uma versão modificada da regra de despacho pela data de entrega mais cedo das atividades (EDD – *Earliest Due Date*). De modo geral, as atividades são ordenadas em ordem não decrescente de data de entrega (*due date*) e alocadas no instante mais cedo possível no respectivo gabarito, utilizando o modo de execução mais rápido de cada atividade, considerando que a mão de obra é ilimitada. Dessa forma, as atividades são alocadas o quanto antes, o que irá gerar soluções com picos de consumo de mão de obra no início do período do horizonte de planejamento contudo, com menor chance de gerar soluções ineficazes por violarem as *due dates* das atividades. A alocação das atividades já leva em consideração a rede de

precedência, tipo de gabarito que a atividade utiliza e datas de liberação (*release date*). Considere os seguintes parâmetros e variáveis.

j : atividades, com $j \in J$.

k : gabarito de montagem, com $k \in K$.

t_j^{prec} : instante em que a última atividade precedente da atividade j é completada.

t_j^{start} : instante de início da atividade j .

fix_k : instante em que o gabarito k está livre para receber uma nova atividade.

Z^{const} : valor da função objetivo da solução construída, MIP^{const} .

MIP^{const} : solução construída.

d_j : data de entrega (*due date*) da atividade j .

r_j : data de liberação (*release date*) da atividade j .

$$x_{jti} = \begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Na Figura 30 é apresentado o pseudocódigo da heurística construtiva proposta. Na linha 2, o instante em que cada gabarito k está disponível é inicializado em 0. Na linha 3, as atividades são ordenadas em ordem não decrescente de data de entrega (*due date*). Entre as linhas 4 e 12, cada atividade é programada para iniciar no instante mais cedo possível, de acordo com as restrições do problema. Na linha 5, o maior instante de término das atividades que precedem j é calculado. Na linha 6 é calculado o instante de início da atividade j como o máximo entre fix_k , t_j^{prec} e r_j . Na linha 7, o instante em que o gabarito k está disponível é atualizado considerando o início da atividade j e sua duração. Na linha 8, a programação da atividade j é armazenada na variável x_{jti} . Nas linhas 9 a 11, é verificada se a data de entrega da atividade j é atendida e, caso não seja, a heurística é interrompida e nenhuma solução é retornada. Na linha 13, é calculado o valor da função objetivo da solução construída e esta é retornada.

- 1: **Heurística Construtiva**
- 2: $fix_k = 0$, para todos os gabaritos k ;
- 3: Ordene as atividades $j \in J$ em ordem não decrescente de data de entrega;
- 4: Para $j = 1$ até J , faça:
 - 5: Calcule t_j^{prec} , para todas as atividades com precedência imediata de j ;
 - 6: Faça $t_j^{start} = \text{Máximo} \{fix_k, t_j^{prec}, r_j\}$;
 - 7: Faça $fix_k = (t_j^{start} + p1_{jti})$, em que i é o modo de execução mais rápido;
 - 8: Faça $x_{jti} = 1$, para $t = fix_k$;
 - 9: Se $t > d_j$, problema infactível, então:
 - 10: Interrompa o algoritmo;
 - 11: Fim Se;
 - 12: Fim Para;
- 13: Calcule Z^{const} e retorne MIP^{const} e Z^{const} ;

Figura 30: Pseudocódigo da heurística construtiva

5.1.2. Heurística de busca local

A heurística de busca local utiliza a estratégia de identificar os picos de utilização de cada tipo de mão de obra para cada turno ativo e atrasar os instantes de início das atividades, com o objetivo de diminuir esses picos. A vizinhança de uma dada solução consiste nas soluções que resultam de atrasos de atividades selecionadas por um determinado número de períodos. Como as equipes são definidas pelos picos de mão de obra, esta estratégia pode diminuir a quantidade total de operadores e o custo total deles. Uma vez identificados os picos de utilização de mão de obra, é possível determinar as atividades que estão sendo executadas durante os picos. Uma atividade j dentre as atividades que estão nos períodos de pico é escolhida para ser atrasada por um determinado tempo. Todas as atividades que estiverem programadas antes do início de j tem sua programação fixada como uma solução corrente, e todas as atividades que iniciam em um instante igual ou após o instante de início de j na solução corrente são liberadas para serem reprogramadas. A heurística construtiva apresentada na Figura 30 é então utilizada para reprogramar as atividades liberadas considerando o atraso imposto a j , finalizando a construção de uma solução vizinha. Considere os seguintes parâmetros:

h e j : atividades, com $(h, j) \in J$.

l : tipo de mão de obra (montador ou selador), $l \in L$.

i : modo de execução da atividade, em que $i \in I$.

s : turno de trabalho, $s \in S$.

W : turnos de trabalho s que estão ativos, ou seja, possuem mão de obra alocada.

$WST_s = \{ \text{instantes } t, \text{ tal que o instante } t \text{ pertence ao turno de trabalho } s \}$

$peak_{ws}$: conjunto de atividades que estão nos picos da mão de obra do tipo w no turno s , em que

$|peak_{ws}|$ é a quantidade de atividades ou a cardinalidade do conjunto.

Δ : limite superior de tempo que as atividades podem ser atrasadas.

st_j : instante de início da atividade j .

st_h : instante de início da atividade h .

ft_j : instante de término da atividade j .

ft_h : instante de término da atividade h .

$MaxInter$: número máximo de iterações.

t^{Shake} : tempo que o início da atividade será atrasado na iteração.

$x_{jt_i} \text{ e } x_{ht_i} : \begin{cases} 1 \text{ se a atividade } j \text{ ou } h \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$x_{jt_i}^{Iter} : \begin{cases} 1 \text{ se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \text{ na solução atual da iteração} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$x_{jt_i}^{Const} : \begin{cases} 1 \text{ se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \text{ na solução na solução inicial} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$x_{jt_i}^{Best} : \begin{cases} 1 \text{ se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \text{ na solução na solução incumbente} \\ 0, \text{ caso contrário} \end{cases}$

$CList$: lista de soluções candidatas, factíveis e seu respectivo valor da função objetivo.

Z^{best} : valor da função objetivo da solução incumbente.

Z^{iter} : valor da função objetivo da solução construída na atual iteração.

$Z^{bestCandidate}$: valor da função objetivo da melhor solução na lista de soluções candidatas.

Z^{const} : valor da função objetivo da solução inicial construída.

MIP^{best} : solução incumbente.

MIP^{iter} : solução da iteração, podendo estar em construção ou ser completa.

$MIP^{bestCandidate}$: solução da iteração, podendo estar em construção ou ser completa.

MIP^{const} : solução da heurística construtiva.

O pseudocódigo da heurística de busca local é apresentado na Figura 31. Nas linhas 2, 3 e 4 são carregados os valores da solução incumbente. A solução inicial pode ser gerada por qualquer método e nesse trabalho, foi utilizada a heurística construtiva apresentada na Figura 30. Entre as linhas 5 e 38, são realizadas as iterações da heurística até um número máximo pré-definido como *MaxInter*. Na linha 6 e 7 são calculadas os picos de utilização de mão de obra para cada turno e tipo. Nas linhas 8 a 10 é verificado se a heurística encontrou um ótimo local, interrompendo as iterações caso não for encontrada uma nova solução melhor. Na linha 11, a lista de soluções candidatas é inicializada vazia e a variável que armazena se houve melhoria na iteração é inicializada como falso. Na linha 12 estão as iterações que percorrerão todos os tipos de mão de obra e na linha 13, os turnos de trabalho. Na linha 14, é iniciada a seleção das atividades j que estão na lista de atividades em execução durante os picos para cada tipo de mão de obra e turno de trabalho. Na linha 15, começam as iterações que modificam o instante de início da atividade j . Nas linhas 16 a 32, se a atividade h tiver início anterior ao original da atividade j , sua programação será mantida conforme a solução incumbente. Caso contrário, entrará na lista de atividades em que a heurística construtiva irá programar após a movimentação da atividade j em t^{shake} unidades para frente. Caso a solução em construção seja infactível, a iteração será abortada e a próxima iteração se será iniciada, caso contrário, uma solução nova será gravada na lista de candidatas nas linhas 31 a 32, caso contrário. Nas linhas 35 a 38, a melhor solução da lista de candidatas é comparada com a incumbente e atualizada se for o caso. O algoritmo termina após percorrer todos os tipos de mão de obra e turnos de trabalhos por um número pré-determinados de vezes ou não encontrar nenhuma solução melhor após iterar todas as atividades, tipos de mão de obra e turnos de trabalho.


```

1: Heurística de Busca Local
2:  $MIP^{best} = MIP^{Constr}$ : armazena a solução incumbente a partir da solução inicial;
3:  $Z^{best} = Z^{Constr}$ : armazena o valor da função objetivo da solução incumbente;
4:  $x_{jti}^{best} = x_{jti}^{Const}$ : armazena a programação da solução incumbente;
5: Para  $iteração = 1$  até  $MaxIter$ , faça:
6   Calcule as atividades que estão nos picos de consumo de mão de obra para cada
7   turno  $w$  e tipo de mão de obra  $s$  da solução  $MIP^{best}$  e armazene em  $peak_{ws}$ ;
8   Se  $Improvement = false$ , então:
9     Termine o algoritmo (Um ótimo local foi encontrado);
10: Fim Se;
11:  $CList = \emptyset$ ,  $Improvement = false$ ;
12: Para  $l = 1$  até  $L$ , faça:
13:   Para  $s = 1$  até  $S$ , faça:
14:     Para  $j = 1$  até  $|peak_{ws}|$ , faça:
15:       Para  $t^{Shake} = 1$  até  $\Delta$ , faça:
16:          $st_j = st_j + t^{Shake}$ ;
17:         Para  $h = 1$  até  $J$ , faça:
18:           Se  $st_h > st_j$  e  $h \neq j$ , então:
19:             Utilize a heurística construtiva e calcule  $ft_h$ ;
20:             Faça  $x_{hti}^{Iter} = 1$  para  $t = ft_h$ ;
21:             Se  $h = j$ , então:
22:               Calcule  $ft_j$  utilizando o modo  $i$ ;
23:               Faça  $x_{jti}^{Iter} = 1$  para  $t = ft_j$  e o modo  $i$ ;
24:             Senão,
25:                $x_{hti}^{Iter} = x_{hti}^{Best}$ , para todo  $t$  e  $i$ ;
26:             Fim Se;
27:             Se  $t > d_h$  ou  $t \in WST_s \notin W$ ,  $MIP^{iter}$  é infactível, então:
28:               Termine a iteração;
29:             Fim Se;
30:           Fim Para;
31:         Calcule o valor da função objetivo da solução da iteração,  $Z^{iter}$ ;
32:         Adicione  $Z^{iter}$  e o  $MIP^{iter}$  construído na  $CList$ ;
33:       Fim Para;
34:     Fim Para;
35:     Escolha a solução com menor custo dentre as candidatas,  $Z^{bestCandidate}$ ;
36:     Se  $Z^{bestCandidate} < Z^{best}$ , então:
37:       Faça  $Z^{best} = Z^{bestCandidate}$  e  $MIP^{best} = MIP^{bestCandidate}$ ,  $Improvement = true$ ;
38:     Fim Se;
39:   Fim Para;
40: Fim Para;

```

Figura 31: Pseudocódigo da heurística de busca local

5.1.3. Heurística de múltiplos inícios aleatórios

A heurística de múltiplos inícios aleatórios (RMH – *Random Multistart Heuristic*) consiste em utilizar uma heurística de construção de soluções que possui um componente aleatório

cada vez que a solução é construída. Dessa forma, ela pode ser executada múltiplas vezes partindo de soluções iniciais vazias, e chegar a soluções diferentes. Durante esse processo, as soluções geradas são comparadas com a incumbente e essa é atualizada se for o caso.

A heurística de múltiplos inícios aleatórios proposta é baseada na heurística construtiva apresentada na Figura 30. A principal diferença é que a heurística construtiva gera apenas uma única solução e idêntica, enquanto que a RMH gera soluções diferentes cada vez em que é executada e por essa razão, a RMH é uma heurística iterativa e precisa de um critério de parada, sendo que nessa pesquisa, foi utilizado um critério baseado em qualidade de solução. Isso acontece porque na heurística construtiva, as atividades são sempre programadas no modo de produção mais rápido de produção, enquanto que na RMH, o modo de cada atividade é sorteado durante o processo de construção. Dessa forma, cada vez que a RMH estiver construindo uma solução nova, ela provavelmente será diferente de outras já geradas. Considere os seguintes parâmetros:

MaxIter: número máximo de iterações do algoritmo.

maxIterWithoutImpr: número máximo de iterações sem melhoria na incumbente.

candidateListSize: tamanho máximo da lista de soluções candidatas.

j: atividade, tal que $j \in J$.

k: gabarito, tal que $k \in K$.

i: modo de execução da atividade, tal que $i \in I$.

t: instante de tempo no horizonte de planejamento, tal que $t \in T$.

fix_k: instante em que o gabarito *k* está liberado para receber uma nova atividade.

pI_{jit}: duração da atividade *j*, se iniciada no instante *t* no modo *i*.

CList: lista de soluções factíveis e candidatas.

Z^{cand}: valor da função objetivo da solução corrente.

Z^{bestCandidate}: valor da função objetivo da melhor solução candidata na *CList* corrente.

Z^{best}: valor da função objetivo da solução incumbente.

MIP^{Cand}: solução candidata corrente.

MIP^{bestCandidate}: melhor solução candidata em *CList* corrente.

MIP^{Best} : solução incumbente.

Na Figura 32 é apresentado o pseudocódigo da heurística. Na linha 1, a função objetivo da solução incumbente é armazenada com um número positivo muito grande. Na linha 2, começam as iterações da heurística. Na linha 3, toda nova iteração deve inicializar as variáveis que representam os critérios de parada. Na linha 4 começa a etapa que busca soluções novas melhores, até um limite máximo de iterações sem melhorar a solução incumbente. Entre as linhas 5 e 23 está a etapa que calcula uma lista de soluções candidatas. Na linha 5, $CList$ é inicializada como vazia e Z^{best} como um número positivo muito grande. Na linha 6, é iniciado preenchimento da lista de soluções candidatas.

Na linha 7, o instante em que os gabaritos de montagem estão livres para receber novas atividades é inicializado. Na linha 8, as atividades a serem programadas são ordenadas em ordem não decrescente de *due date*. Entre as linhas 9 e 19, uma nova solução candidata é construída. Nas linhas 10 a 13, o tempo de início da atividade j é atualizado para ser igual ao instante em que o respectivo gabarito dessa atividade está disponível e as atividades precedentes concluídas. Na linha 11, é realizado um sorteio de qual o modo da atividade deve ser utilizado dentre os disponíveis, utilizando uma distribuição uniforme, ou seja, todos os modos têm iguais chances de serem sorteados. Nas linhas 14 e 15, o instante em que gabarito k é liberado e a atividade j é concluída são atualizados, utilizando o parâmetro pI_{jt} , que é a duração da atividade j utilizando o modo i quando iniciada no instante t . Nas linhas 16 a 18, é verificado se a data de entrega da atividade j é respeitada. Caso não seja, esse candidato é ineficaz e é rejeitado da lista de candidatos. Nas linhas 20 e 21, o valor da função objetivo da solução candidata é calculado e armazenado. Na linha 23, é encontrada a melhor solução dentre a lista de candidatas e nas linhas 24 a 28, a solução incumbente e outras variáveis são atualizadas caso a candidata seja a nova incumbente. Nas linhas 29 a 31, as variáveis são atualizadas caso a melhor candidata não seja uma nova incumbente e iterações são repetidas, até atingir o critério de parada.

```

1: Faça  $Z^{best} = +\infty$ ;
2: Para  $iter = 0$  até  $MaxIter$ , faça:
3:    $newIncumbent = false$ ;  $lastImprovement = 0$ ;
4:   Enquanto  $lastImprovement < maxIterWithoutImpr$ , faça:
5:      $CList = \emptyset$ ,  $Z^{bestCandidate} = +\infty$ ;
6:     Para  $candidate = 0$  até  $candidateListSize$ , faça:
7:        $fix_k = 0$ , para todos os gabaritos  $k$ ;
8:       Ordene as atividades em ordem não decrescente de  $due\ date$ ;
9:       Para  $j = 1$  até  $J$ , faça:
10:        Calcule  $t_j^{prec}$ , para todas as atividades com precedência imediata de  $j$ ;
11:        Sorteie um dos modos disponíveis para a atividade  $j$  e armazene em  $i$ ;
12:        Faça  $t_j^{start} = \text{Máximo} \{fix_k, t_j^{prec}, r_j\}$ . Caso exista mais do que um gabarito
13:        do tipo  $k$  disponível, utilize o que estiver disponível mais cedo;
14:        Faça  $fix_k = (t_j^{start} + p1_{jti})$ ;
15:        Faça  $x_{jti} = 1$ , para  $t = fix_k$ ;
16:        Se  $t > d_j$ ,  $MIP^{Cand}$  é infactível, então:
17:          Interrompa a iteração ( $candidate$ );
18:        Fim Se;
19:      Fim Para;
20:      Calcule a função objetivo,  $Z^{cand}$ ;
21:      Armazene o valor de  $Z^{cand}$  e  $MIP^{Cand}$  na  $CList$ ;
22:    Fim Para;
23:    Encontre a solução com menor custo dentre as candidatas,  $Z^{bestCandidate}$ ;
24:    Se  $Z^{bestCandidate} < Z^{best}$ , então:
25:      Faça  $Z^{Best} = Z^{bestCandidate}$  e  $MIP^{Best} = MIP^{bestCandidate}$ ;
26:      Faça  $lastImprovement = 0$ ;
27:      Faça  $newIncumbent = true$ ;
28:    Fim se;
29:    Se  $newIncumbent = false$ , então:
30:      Faça  $lastImprovement = lastImprovement + 1$ ;
31:    Fim Se;
32:  Fim Enquanto;
33: Fim Para;

```

Figura 32: Pseudocódigo da heurística de múltiplos inícios aleatórios

Note que a RMH proposta possui características da heurística construtiva apresentada na Figura 30 como o método de construção baseado em início mais cedo. No entanto, a RMH possui um caráter aleatório e iterativo, que permite uma exploração mais ampla do espaço de soluções.

5.2. Heurística de programação matemática (MIP-Heuristics)

As heurísticas de programação matemática, também chamadas de MIP-Heurísticas, são algoritmos que utilizam modelos matemáticos nos seus procedimentos de solução, e são resolvidos utilizando métodos de solução de problemas inteiros mistos. De modo simplificado,

essas heurísticas decompõem um problema inteiro misto em partes menores ou relaxam, mesmo que parcialmente, alguma restrição do problema original. É um método heurístico por não garantir otimalidade da solução encontrada. São geralmente utilizadas como alternativa mais rápida aos métodos baseados em *branch-and-bound* puros, com finalidade de encontrar uma solução factível ou melhorar uma solução já conhecida. Wolsey (1998) afirma que em geral as heurísticas podem ser utilizadas por diversos motivos, sendo os principais são:

- Uma solução é necessária rapidamente, em segundos ou minutos;
- O problema é tão grande e complicado que não pode ser formulado matematicamente como um modelo matemático linear ou inteiro misto;
- O problema pode ser formulado como inteiro misto, mas ele é difícil ou impossível de ser resolvido com *softwares* que utilizam *branch-and-bound* para encontrar boas soluções;
- Em alguns problemas, é possível construir soluções factíveis rapidamente, explorando conhecimento da estrutura do problema.

Segundo Pochet e Wolsey (2006), existem dois tipos de heurísticas de programação matemática. O primeiro tipo são as heurísticas construtivas, que tem por objetivo construir soluções factíveis iniciais. As heurísticas *LP-and-Fix*, também chamadas de *Cut-and-fix*, e *Relax-and-Fix* são exemplos de heurísticas construtivas. O segundo tipo são as heurísticas de melhoria, que buscam melhorar uma solução conhecida. As heurísticas *Relaxation Induced Neighborhood Search* (RINS), *Local Branching* (LB) e *Exchange* (EXCH), também conhecida como *Fix-and-Optimize*, são exemplos de heurísticas de melhoria. As notações utilizadas nessa seção são as mesmas utilizadas por Pochet e Wolsey (2006). Define-se MIP (*Mixed Integer Programming*), LP (*Linear Programming*), LP (\hat{x}, \hat{y}) como a solução ótima de um LP, (\bar{x}, \bar{y}) é uma solução factível de um MIP e que $y \in \{0,1\}$.

A heurística *Relax-and-Fix* consiste em dividir o problema original em R conjuntos disjuntos, chamados Q^1, \dots, Q^R . Então, é possível resolver os R MIPs, chamados de MIP^r com $1 \leq r \leq R$, para encontrar uma solução para o MIP original. Em cada MIP^r , impõe-se a integralidade das variáveis que fazem parte do conjunto Q^r , e relaxa-se a integralidade das variáveis dos outros conjuntos em Q . Assim, os MIPs são resolvidos sequencialmente a partir de $r = 1$, as soluções inteiras (x^r, y^r) encontradas em cada Q^r são fixadas, e passa-se para o próximo conjunto Q^{r+1} , repetindo o processo até concluir todos os conjuntos Q^R . Caso MIP^r seja infactível para algum $r \in \{1, \dots, R\}$, a heurística falhou. Caso contrário, (x^R, y^R) é uma solução heurística para o MIP original.

A heurística *Fix-and-Optimize*, explora uma ideia semelhante da *Relax-and-Fix*. O MIP é decomposto em subconjuntos de variáveis Q^r com $1 \leq r \leq R$. A cada iteração r , todas as variáveis são fixadas no valor que possuem na solução incumbente (\bar{x}, \bar{y}) , exceto as variáveis do conjunto Q^r da iteração atual, que são livres para assumir valores inteiros. Dessa forma, é gerado um subproblema em que apenas uma parte das variáveis inteiras são livres resultando em $MIP^{EXCH,r}$, um problema menor do que o MIP original e que pode ser resolvido por procedimento de *branch-and-bound*. O procedimento de fixar e liberar os valores das variáveis inteiras pode ser repetido indefinidamente, e os passos entre $1 \leq r \leq R$ são independentes entre si e podem ser realizados em qualquer ordem. Note que esse procedimento heurístico não gera soluções infactíveis nas iterações, pois sempre parte de uma solução viável e se, no pior cenário, não conseguir melhorá-la, basta o algoritmo retornar a solução inicial.

Na literatura, existem alguns trabalhos que utilizaram MIP-heurísticas em contextos de programação de recursos. Fitzsimmons (2015) estudou a programação do embarque de tripulações dos navios da marinha dos Estados Unidos da América chamados de LCS (*Littoral Combat Ship*) utilizando uma heurística *Relax-and-Fix*. O problema consiste em planejar meses à frente como os militares serão escalados para operarem no LCS, o que resultou em um problema intratável sem procedimentos heurísticos. Rodrigues et al. (2016) aplicaram a heurística *Relax-and-Fix* e uma heurística de decomposição temporal em vários subproblemas menores em um problema de roteirização de navios petroleiros. A diferença das duas estratégias é que a *Relax-and-Fix* de alguma forma guarda relação entre a parte inteira e a partição com a integralidade relaxada, pois as variáveis não geram problemas disjuntos e o problema a ser otimizado é uma mistura da parte com integralidade relaxada com a parte com a integralidade exigida. Na estratégia de decomposição, os subproblemas são separados e resolvidos de forma míope, sendo que a solução de um subproblema afeta as condições iniciais dos próximos subproblemas. Escudero e Salmeron (2005) estudaram o sequenciamento e programação de projetos de investimento para melhoria da infraestrutura de distribuição de energia na Espanha. Segundo os autores, foi necessário utilizar uma heurística de *Relax-and-Fix* porque o problema de tamanho real era muito grande para resolver com *branch-and-bound* tradicional, e a utilização de heurísticas baseadas em regras produziram resultados ruins, principalmente devido à dificuldade de garantir factibilidade quando a heurística explorava o espaço de solução.

Durante a pesquisa bibliográfica, não foi encontrado nenhum trabalho que utilizasse heurísticas de programação matemática em problemas de programação de projetos e, em particular, aplicados na manufatura da indústria aeronáutica. Portanto, com o melhor conhecimento do autor

dessa pesquisa, esse é o primeiro trabalho que reporta a utilização desse tipo de heurística em problemas de programação de projetos.

5.2.1. Heurística de programação matemática proposta

Com o modelo matemático nas versões com único e múltiplos modos desenvolvido e com os objetivos de encontrar boas soluções em tempos computacionais pequenos, melhorar soluções conhecidas que possuem GAP de otimalidade (definido a seguir) e ser capaz de resolver problemas realistas de grande porte, foi desenvolvida uma heurística de programação matemática. Optou-se por também desenvolver métodos baseados em programação matemática por serem mais fáceis de implementar no modelo matemático já validado e é uma representação formal do problema real, além das vantagens conhecidas desses métodos como, por exemplo, a possibilidade de encontrar soluções factíveis rapidamente ou melhorar a qualidade de soluções conhecidas (Wolsey, 1998). Além dessas vantagens, é possível explorar a estrutura do problema devido à sua característica temporal e as montagens sequenciais das aeronaves. Considere que a melhor solução inteira é aquela solução factível que tem o menor valor de função objetivo, e o limitante inferior é o maior valor possível para a função objetivo até um ponto do processamento. Então, o GAP de otimalidade pode ser calculado utilizando a equação (54).

$$GAP = \frac{(\text{Melhor solução inteira} - \text{limitante inferior})}{(\text{Melhor solução inteira})} \quad (54)$$

Na implementação utilizada, optou-se por criar uma MIP-heurística com duas etapas principais. Na primeira etapa, é utilizada uma heurística construtiva do tipo *Relax-and-Fix*, visando construir uma solução factível. A função objetivo utilizada nessa etapa é diferente daquela que deve ser utilizada na solução final e é apresentada na equação (55). Essa função objetivo minimiza a soma dos tempos de término de cada atividade, combinada com o consumo de mão de obra com um peso menor (igual a 0,2) como critério de desempate. Desta forma, a etapa de construção tem como objetivo encontrar soluções que iniciem a programação das atividades no instante mais cedo possível. Optou-se por essa abordagem pois nos experimentos computacionais realizados durante o desenvolvimento da heurística, ela gerou soluções mais rapidamente e factíveis do que quando foi utilizada a função objetivo (44).

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^J \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I t \cdot x_{j,t,i} + \sum_{l=1}^L \sum_{s=1}^S v_l \cdot a_{ls} \cdot 0,2 \quad (55)$$

Na segunda etapa, a solução factível gerada é então utilizada em duas heurísticas de melhoria do tipo *Fix-and-Optimize* utilizando a função objetivo (44), sendo, portanto, uma etapa de

melhoria da solução construída. As variáveis x_{jit} , a_{ls} são as mesmas definidas no modelo apresentado na seção 4.1. Considere as seguintes definições de parâmetros e variáveis:

j : atividade, tal que $j \in J$.

k : gabarito, tal que $k \in K$.

i : modo de execução da atividade, tal que $i \in I$.

t : instante de tempo no horizonte de planejamento, tal que $t \in T$.

r : índice do subproblema, com $1 \leq r \leq R$.

av : índice que identifica a aeronave, com $1 \leq av \leq AV$.

$ActivityAV$: conjunto que identifica as atividades j que pertencem a cada aeronave av .

Q^r : subproblema r , sendo parte do problema completo.

P_{min}^r : limite inferior do instante de tempo do subproblema r .

P_{max}^r : limite superior do instante de tempo do subproblema r .

MIP^{RAF} : problema inteiro misto gerado pela heurística *Relax-and-Fix*.

MIP_{tempo}^{FAO} : problema inteiro misto gerado pela heurística *Fix-and-Optimize*, decomposto por tempo.

MIP_{av}^{FAO} : problema inteiro misto gerado pela heurística *Fix-and-Optimize*, decomposto por aeronave.

Z^{RAF} : valor da função objetivo da heurística *Relax-and-Fix*.

Z_{av}^{FAO} : valor da função objetivo da heurística *Fix-and-Optimize*, decomposto por aeronave.

Z_{tempo}^{FAO} : valor da função objetivo da heurística *Fix-and-Optimize*, decomposto por tempo.

Z^{best} : valor da função objetivo da solução incumbente.

a_{ls}^{best} : quantidade de mão de obra do tipo l no turno s na solução incumbente.

x_{jit}^{best} : $\begin{cases} 1 & \text{se a atividade } j \text{ termina exatamente no tempo } t \text{ no modo } i \text{ na solução na solução} \\ & \text{incumbente;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

a_{ls}^{RAF} : quantidade de mão de obra do tipo l no turno s na solução gerada pela heurística *Relax-and-Fix*.

$$x_{jti}^{RAF} : \begin{cases} 1, \text{ se a atividade } j \text{ termina no instante } t \text{ no modo } i \text{ na solução gerada pela heurística} \\ \text{Relax-and-Fix}; \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

a_{ls}^{FAOav} : quantidade de mão de obra do tipo l utilizada no turno s na solução gerada pela heurística *Fix-and-Optimize*, no problema decomposto por aeronave.

$$x_{jti}^{FAOav} : \begin{cases} 1, \text{ se a atividade } j \text{ termina no instante } t \text{ no modo } i \text{ na solução gerada pela heurística} \\ \text{Fix-and-Optimize, no problema decomposto por aeronave}; \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

$a_{ls}^{FAOtempo}$: quantidade de mão de obra do tipo l utilizada no turno s na solução gerada pela heurística *Fix-and-Optimize*, no problema decomposto por tempo.

$$x_{jti}^{FAOtempo} : \begin{cases} 1, \text{ se a atividade } j \text{ termina no instante } t \text{ no modo } i \text{ na solução gerada pela} \\ \text{heurística Fix-and-Optimize, no problema decomposto por tempo}; \\ 0, \text{ caso contrário.} \end{cases}$$

O pseudocódigo da heurística de programação matemática é apresentado na Figura 33. Na etapa de construção da solução definida entre as linhas 1 e 15 da Figura 33, a heurística *Relax-and-Fix* decompõe o problema original em R subproblemas, formados por subperíodos de igual duração. O algoritmo então percorre o tempo do plano de produção, começando do instante inicial até o final do horizonte de planejamento, ou seja, até percorrer todos os subperíodos, conforme o laço descrito entre as linhas 4 e 12 do pseudocódigo. Em cada iteração, as variáveis que pertencem ao subperíodo da iteração r (definido como todo t entre P_{min}^r e P_{max}^r) têm as suas integralidades exigidas (veja linha 5), enquanto as variáveis pertencentes aos subperíodos posteriores (definido como todo t maior P_{max}^r) têm as suas integralidades relaxadas (veja linha 6). Então, o problema com parte das variáveis inteiras e parte das variáveis com a integralidade relaxada, chamado MIP^{RAF} , é resolvido (veja linha 7). Após a resolução do problema, caso ele seja infactível, a execução do algoritmo é interrompida e concluída (veja linhas 8 a 10). Após resolver o problema relaxado, as variáveis que estão com a integralidade fixada têm os seus valores inteiros fixados (veja linha 11). Então, a heurística construtiva passa para o próximo subperíodo r e repete o processo, até que chegue ao último subperíodo ou uma solução infactível seja encontrada. Como todas as variáveis do problema estão no MIP^{RAF} que é resolvido em cada iteração, espera-se com essa heurística que, as informações das variáveis com a integralidade relaxada em cada iteração influenciem na otimização de cada subproblema, seja melhorando a qualidade da solução final ou diminuindo a possibilidade de infactibilidade. Um ponto a destacar é que não existe garantia que

esse algoritmo construirá uma solução factível. Caso o algoritmo encontre uma solução infactível, ele finalizará e é necessário iniciá-lo novamente utilizando uma subdivisão de tempo diferente. A etapa de melhoria só pode ser iniciada caso exista uma solução inicial factível. Na linha 14, a solução construída é salva como a solução incumbente.

Na etapa de melhoria, descrita entre as linhas 16 e 33, foram utilizados dois algoritmos do tipo *Fix-and-Optimize*. Nessa etapa, a função objetivo é trocada de (55) para a função (39). A ideia geral é que algumas variáveis tenham os seus valores fixados, enquanto outras têm seus valores liberados, porém com a restrição de integralidade. Assim, são criados subproblemas menores e que podem ser resolvidos rapidamente pelo CPLEX. Durante esse processo, qualquer solução encontrada melhor que a incumbente será gravada como a nova incumbente.

O primeiro algoritmo de melhoria (descrito entre as linhas 16 e 24), dividiu o problema em AV subproblemas agrupados pelas atividades das aeronaves. Todas as variáveis x_{jt} , em que j são as atividades de uma aeronave em particular, têm a integralidade imposta e valores liberados (veja linha 18), enquanto as demais têm os seus valores inteiros mantidos fixos gerando o subproblema MIP_{av}^{FAO} . Então, caso o MIP_{av}^{FAO} seja resolvido (veja linha 19) e a solução encontrada for melhor do que a solução incumbente, esta é atualizada (veja linha 20 a 23). Esses passos são repetidos até que todas as atividades j definidas no conjunto AV , ou seja, que representam aeronaves em montagem, tenham passado pelo algoritmo de melhoria. O segundo algoritmo de melhoria (veja linhas 25 a 34) utiliza a mesma divisão temporal utilizada na etapa construtiva (em R subperíodos), com a diferença de que em vez de relaxar a integralidade das variáveis que estão fora do subperíodo da iteração, essas variáveis são mantidas com os valores inteiros fixos. Apenas as variáveis que pertencem a cada subperíodo têm os valores liberados para otimização, embora tenham a integralidade ainda exigida (veja linha 26). Então, é resolvido o MIP_{tempo}^{FAO} (veja linha 27) e, caso a solução encontrada seja melhor do que a incumbente, esta é atualizada e a nova solução fixada (veja linhas 28 a 33). O processo então é repetido, até terminar todos os subperíodos do horizonte de planejamento.

1: Etapa Construtiva

2: $Z^{best} = +\infty$;

3: Seja R o número de subperíodos R o horizonte de planejamento será dividido;

4: Para $r = 1$ até R , faça:

5: Fixe a integralidade de x_{jt} se $P_{min}^r \leq t \leq P_{max}^r$;

6: Relaxe a integralidade de x_{jt} se $t > P_{max}^r$;

7: Resolva MIP^{RAF} ;

8: Se MIP^{RAF} infactível, então:

9: Pare a execução;

10: Fim Se;

11: Fixe $x_{jti} = x_{jti}^{RAF}$ se $P_{min}^r \leq t \leq P_{max}^r$;

12: Fim Para;

13: Se $Z^{RAF} < Z^{best}$, então:

14: Faça $Z^{best} = Z^{RAF}$, $a_{ls}^{best} = a_{ls}^{RAF}$ e $x_{ijt}^{best} = x_{ijt}^{RAF}$;

15: Fim Se;

16: Etapa de Melhoria

17: Para $av = 1$ até AV , faça:

18: Libere os valores e fixe a integralidade de x_{jti} se $j \in ActivityAV$;

19: Resolva MIP_{av}^{FAO} ;

20: Se $Z_{av}^{FAO} < Z^{best}$, então:

21: Faça $Z^{best} = Z_{av}^{FAO}$, $a_{ls}^{best} = a_{ls}^{FAOav}$, $x_{jti}^{best} = x_{jti}^{FAOav}$;

22: Fixe $x_{jti} = x_{jti}^{FAOav}$ se $j \in ActivityAV$;

23: Fim Se;

24: Fim Para;

25: Para $r = 1$ até R , faça:

26: Libere os valores e imponha a integralidade de x_{jti} se $P_{min}^r \leq t \leq P_{max}^r$;

27: Resolva MIP_{tempo}^{FAO} ;

28: Se $Z_{tempo}^{FAO} < Z^{best}$, então:

29: Faça $Z^{best} = Z_{tempo}^{FAO}$, $a_{ls}^{best} = a_{ls}^{FAOtempo}$, $x_{jti}^{best} = x_{jti}^{FAOtempo}$;

30: Fixe $x_{jti} = x_{jti}^{FAOtempo}$, se $P_{min}^r \leq t \leq P_{max}^r$;

31: Caso contrário,

32: Fixe $x_{jti} = x_{jti}^{best}$, se $P_{min}^r \leq t \leq P_{max}^r$;

33: Fim Se;

33: Fim Para;

Figura 33: Algoritmo da heurística de programação matemática

6. Resultados Computacionais

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados dos experimentos computacionais para os modelos matemáticos com único modo e múltiplos modos do Capítulo 4 e das heurísticas apresentadas no Capítulo 5. Os experimentos foram todos realizados em um computador com processador Intel Xeon Silver 4110 e 8 Gb de RAM RDIMM 2666 MHz e o GAMS 24.1.3 e CPLEX 12.5.1 para implementar e resolver os modelos matemáticos e MIP-heurísticas. Os parâmetros utilizados no GAMS e no CPLEX foram tempo computacional máximo de 4 ou 10 horas e a disponibilização de 8 núcleos do processador (*thread* configurada como 0). No caso das outras heurísticas, foi utilizado Java.

6.1. Resultados dos experimentos computacionais do modelo com único modo

Foram realizados experimentos computacionais com o modelo (34)-(43) apresentado na seção 4.1, utilizando os dados apresentados na Tabela 2 para definir MO_{jl} e a rede de precedência apresentada na Figura 19 com 59 atividades, ambos apresentados na seção 3.2. Considere para o caso em que uma única aeronave será programada, o *lead time* é o tempo transcorrido entre o início e o término da montagem dessa aeronave. Considere os seguintes índices e parâmetros apresentados no Quadro 2.

Quadro 2: Índices e parâmetros utilizados nos experimentos computacionais

$j = 1, \dots, 59; k = 1, \dots, 9; l = 1, \dots, 2;$	$r_j = 1, d_j = \textit{lead time};$
$t = 1, \dots, \textit{lead time};$	$c_k = 2, \text{ para todos } k;$
$s = 1, \dots, 3, \text{ sendo o terceiro turno desativado};$	$v_{ls} = 1, \text{ para todo } l \text{ e } s.$

Outros parâmetros são extensos e de difícil apresentação no texto desta pesquisa e por isso não foram detalhados. Esses parâmetros foram pré-calculados utilizando uma implementação em Java que gera os arquivos do GAMS a partir dos dados de entrada. Os parâmetros $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$, com as durações das atividades foram calculados considerando 3 turnos de 8 horas, 5 dias úteis na semana, início na segunda-feira e os dados apresentados na Tabela 2. Cada atividade utiliza apenas um único gabarito quando é executada, portanto, o parâmetro rec_{jk} é definido como 1 para cada atividade j que utilizar o gabarito k , conforme a Tabela 2.

O primeiro experimento consistiu em variar o *lead time* de montagem de uma única aeronave, com o objetivo de avaliar a relação entre o *lead time* e a quantidade de operadores. Isso foi feito definindo o tamanho do horizonte de planejamento T com os diferentes valores de *lead*

times dos experimentos. O tempo mínimo de montagem da rede de precedência é de 396 horas, com dois turnos de trabalho e a montagem sendo iniciada em uma segunda-feira e foi obtido utilizando o modelo matemático com a função objetivo de minimizar o *makespan* para uma única aeronave. Por isso, variou-se o *lead time* entre 400 horas e 480 horas, variando d_j em cada exemplar. Na Figura 34 é apresentada a variação da quantidade de mão de obra de montadores e seladores em função do *lead time* para a cadência de uma aeronave por mês, ou tempo de ciclo de 480 horas. Essas soluções são ótimas e os detalhes delas são apresentadas na Tabela 9. Observe que a quantidade de mão de obra utilizada diminui com o aumento do *lead time*, resultado semelhante ao encontrado em Silva e Morabito (2015) em um estudo exploratório que motivou a presente pesquisa, conforme discutido no Capítulo 2.

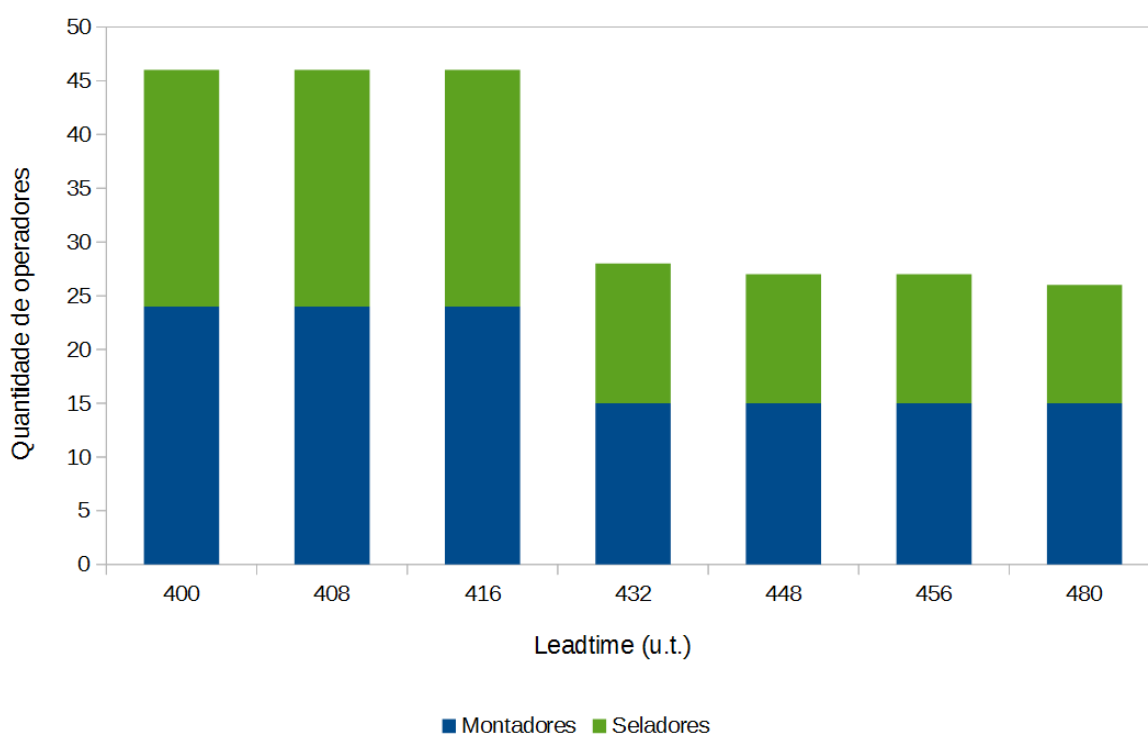


Figura 34: Variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando o modelo com único modo

Um novo experimento foi realizado para avaliar o que acontece com a programação quando ela é iniciada em dias da semana diferentes no caso de montagem de uma única aeronave. Quando o *lead time* é 396 horas e a montagem começa na quinta-feira, o problema de montagem é infactível. No entanto, se a montagem for iniciada nos outros dias da semana, existem soluções factíveis. Na Figura 35 é ilustrada a variação de mão de obra conforme o dia da semana em que ela foi iniciada. As soluções apresentadas na Figura 35 são ótimas e descritas em detalhes na Tabela 9, como os experimentos de 1 até 5, começando na segunda-feira até a sexta-feira, nessa ordem. A diferença na utilização de mão de obra e na factibilidade do problema é causada pela diferença entre

os valores de $p1_{jt}$ e $p2_{jt}$, que na prática geram problemas em que as durações das atividades são diferentes de acordo com o instante em que o final de semana aparece no plano. Embora esses resultados fossem esperados, o comportamento identificado pode ter consequências importantes, como a própria viabilização ou não de um plano de produção.

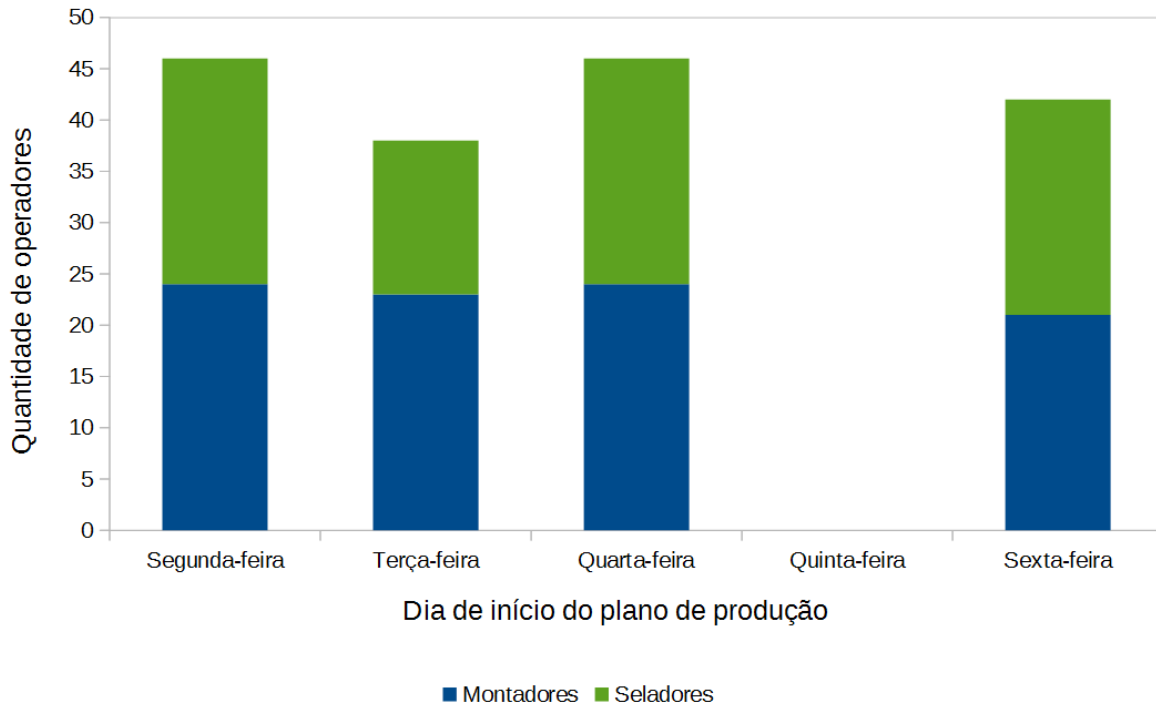


Figura 35: Variação da quantidade de mão de obra em função do dia da semana de início da produção para uma aeronave utilizando um único modo e *lead time* 396 horas

Foram realizados experimentos computacionais com um cenário em que a cadência de produção era de duas aeronaves por mês, iniciando sempre às segundas-feiras, com dois turnos de trabalho ativos para todos os tipos de mão de obra e com *lead times* diferentes. Nesse caso, os parâmetros do exemplar mudam, com o número de atividades, j , variando até de 1 até 177, e os r_j e d_j foram ajustados para representar a entrada de cada aeronave em produção, conforme o tempo de ciclo de 240 horas. Os resultados dos experimentos são apresentados na Figura 36 e na Tabela 9. O experimento com *lead time* 432 se mostrou infactível. Observe que a quantidade de mão de obra diminuiu com o aumento do *lead time*, mesmo comportamento verificado para os planos com uma única aeronave sendo produzida por mês. Entretanto, é importante destacar que os resultados apresentados não têm garantia de otimalidade, pois o CPLEX não conseguiu zerar o GAP de otimalidade (veja equação (54)) dentro dos recursos disponibilizados. Comparando as soluções apresentadas na Figura 34 e na Figura 36, é possível notar que no último são necessários mais operadores que no primeiro para um mesmo *lead time*. Esse resultado é esperado, pois na Figura 36 são retratados os resultados para a produção de duas aeronaves por mês, que naturalmente, exigirá mais operadores.

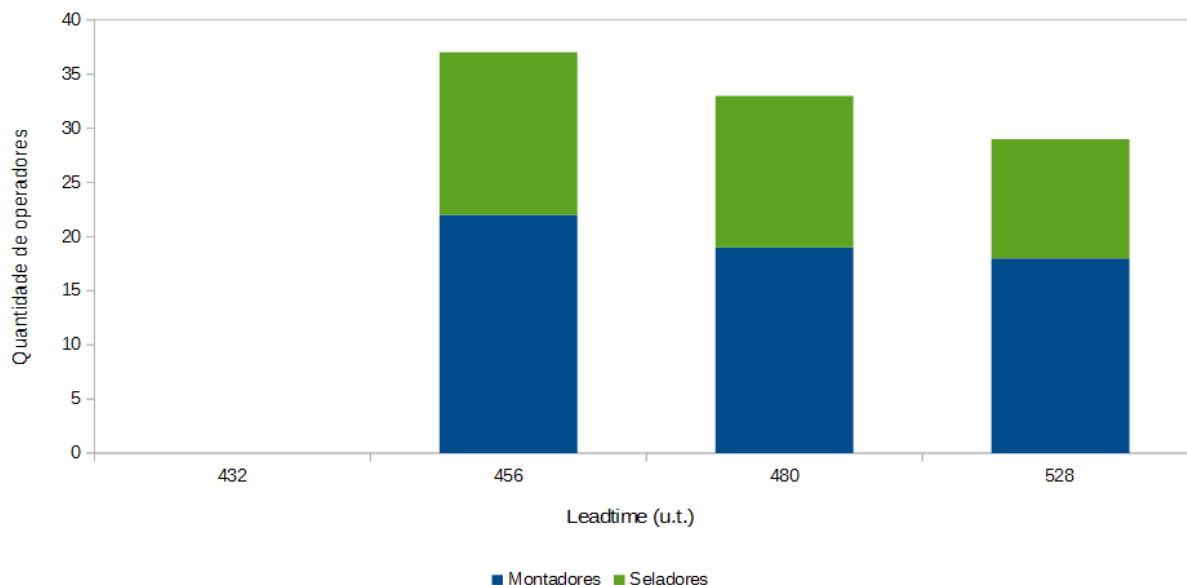


Figura 36: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do *lead time* de produção para 2 aeronaves por mês com um único modo

Foram realizados experimentos com planos de produção utilizando um cenário em que a cadência de produção é de três aeronaves por mês, iniciando sempre às segundas-feiras, com dois turnos de trabalho ativos para todos os tipos de mão de obra e com *lead times* diferentes. Os resultados são apresentados na Figura 37. Note que a quantidade de mão de obra alocada diminui com o aumento do *lead time*, comportamento semelhante aos dos planos de produção com cadência de uma ou duas aeronaves por mês. Conforme esperado, os planos de produção para a cadência de 3 aeronaves por mês utilizam mais trabalhadores que os planos com cadências menores para um mesmo *lead time*.

Os detalhes das soluções dos experimentos apresentados na Figura 34, Figura 35, Figura 36 e na Figura 37 são apresentados na Tabela 9. A coluna “Exp.” identifica o experimento, “Qtde. de aeronaves” define qual é a cadência de produção no plano, “Qtde. De Variáveis Inteiras” e “Qtde. de Restrições” definem a quantidade total de variáveis inteiras e de restrições no modelo matemático e “Qtde. De Oper.” define a quantidade total de operadores, que é o valor da função objetivo do modelo. A mão de obra do tipo 1 são os montadores, do tipo 2 são os seladores, o turno 1 é o período da manhã e o turno 2 é o turno da tarde. Então, a_{ls} significa a quantidade de mão de obra do tipo l utilizada no turno s . Por exemplo, a_{12} significa a quantidade utilizada de montadores no turno da tarde e assim, sucessivamente.

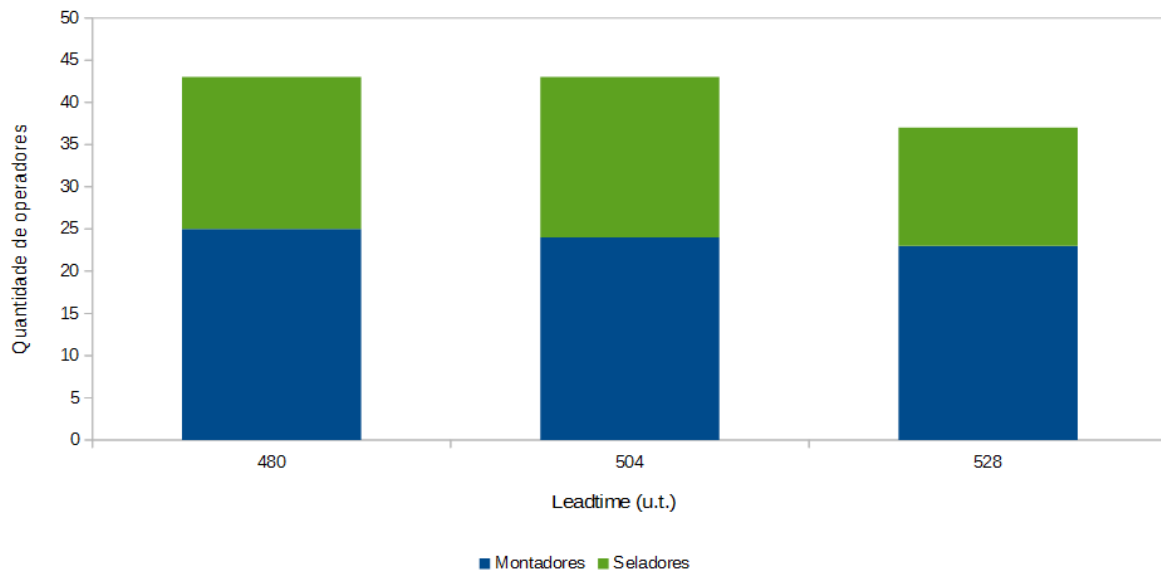


Figura 37: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do *lead time* de produção para 3 aeronaves por mês com um único modo

Note que as soluções dos experimentos são comprovadamente ótimas somente em alguns casos. Para os planos de produção com cadência de uma aeronave por mês, as soluções encontradas são comprovadamente ótimas e os tempos computacionais foram no máximo cerca de 10 minutos. Nos experimentos 6 até 12 é possível observar o efeito da variação do *lead time* na quantidade de mão de obra necessária para montar uma aeronave por mês. Observe que todas as soluções são ótimas, e as soluções dos experimentos com *lead time* mais longos utilizam menos mão de obra. A solução do experimento 6 é uma solução factível do experimento 12, mas o inverso não é verdadeiro. Isso significa que é mais fácil fazer o nivelamento de mão de obra com *lead time* maior e que o espaço de solução do problema cresce com o aumento do *lead time*.

Nos planos de produção com cadência de duas aeronaves por mês, apenas algumas das soluções encontradas foram provadas ótimas, e em vários experimentos foram necessárias as 10 horas de processamento disponíveis para encontrar uma solução não comprovadamente ótima. Nos planos de produção com cadência de três aeronaves por mês, nenhuma solução comprovadamente ótima foi encontrada e o GAP de otimalidade médio foi de 26,83%, com 10 horas de processamento. Outro ponto a destacar é o aumento da quantidade de variáveis inteiras e restrições no modelo em função do aumento do *lead time*, demonstrando que o problema cresce significativamente conforme cresce o horizonte de planejamento. A quantidade de restrições dos experimentos variou entre cerca de 24,2 mil a 200 mil.

Tabela 9: Resultados computacionais dos experimentos realizados com o modelo de único modo

Exp.	Qtde. de Aeronaves	Lead time	Tempo de Ciclo	Qtde. de Variáveis Inteiras	Qtde. de Restrições	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	Qtde de Oper.	GAP de Otimalidade (%)	Tempo Computacional
1	1	396	480	7.374	24.230	14	10	14	8	46	0,00%	00:00:12
2	1	396	480	7.386	23.430	11	12	7	8	38	0,00%	00:00:13
3	1	396	480	7.320	23.430	14	10	14	8	46	0,00%	00:00:13
4	1	396	480	-	23.430	-	-	-	-	-	Infactível	00:00:04
5	1	396	480	7.285	23.430	14	7	14	7	42	0,00%	00:00:12
6	1	400	480	7.394	24.274	14	10	14	8	46	0,00%	00:00:13
7	1	408	480	7.396	25.377	14	10	14	8	46	0,00%	00:00:12
8	1	416	480	7.410	25.610	14	10	14	8	46	0,00%	00:00:12
9	1	432	480	8.533	26.801	6	9	5	8	28	0,00%	00:01:54
10	1	448	480	9.482	27.122	6	9	4	8	27	0,00%	00:05:59
11	1	456	480	9.488	28.225	6	9	4	8	27	0,00%	00:06:52
12	1	480	480	9.967	29.649	6	9	4	7	26	0,00%	00:09:54
13	2	432	240	-	112.546	-	-	-	-	-	Infactível	00:00:16
14	2	456	240	19.118	109.536	11	11	7	8	37	0,00%	00:11:41
15	2	480	240	20.613	106.729	10	9	7	7	33	18,18%	10:00:49
16	2	528	240	25.626	114.281	10	8	4	7	29	27,59%	10:00:35
17	3	480	160	31.891	183.676	13	12	10	8	43	18,60%	11:43:40
18	3	504	160	34.676	192.643	14	10	7	12	43	34,88%	10:01:55
19	3	528	160	37.501	201.610	14	9	7	7	37	27,02%	11:00:11

6.2. Resultados dos experimentos computacionais do modelo com múltiplos modos

Foram realizados experimentos com o modelo (44)-(53), apresentado na seção 4.2, que é a versão do modelo matemático utilizando múltiplos modos de produção. Na Figura 38 é apresentada a variação da quantidade de mão de obra em função do *lead time* para a montagem de apenas uma única aeronave, utilizando múltiplos modos de execução apresentados na Tabela 3. Note que o comportamento geral é o mesmo do caso com único modo de execução, ou seja, a quantidade de mão de obra utilizada para montar a aeronave diminui conforme o *lead time* aumenta. Os detalhes dos experimentos são apresentados na Tabela 10.

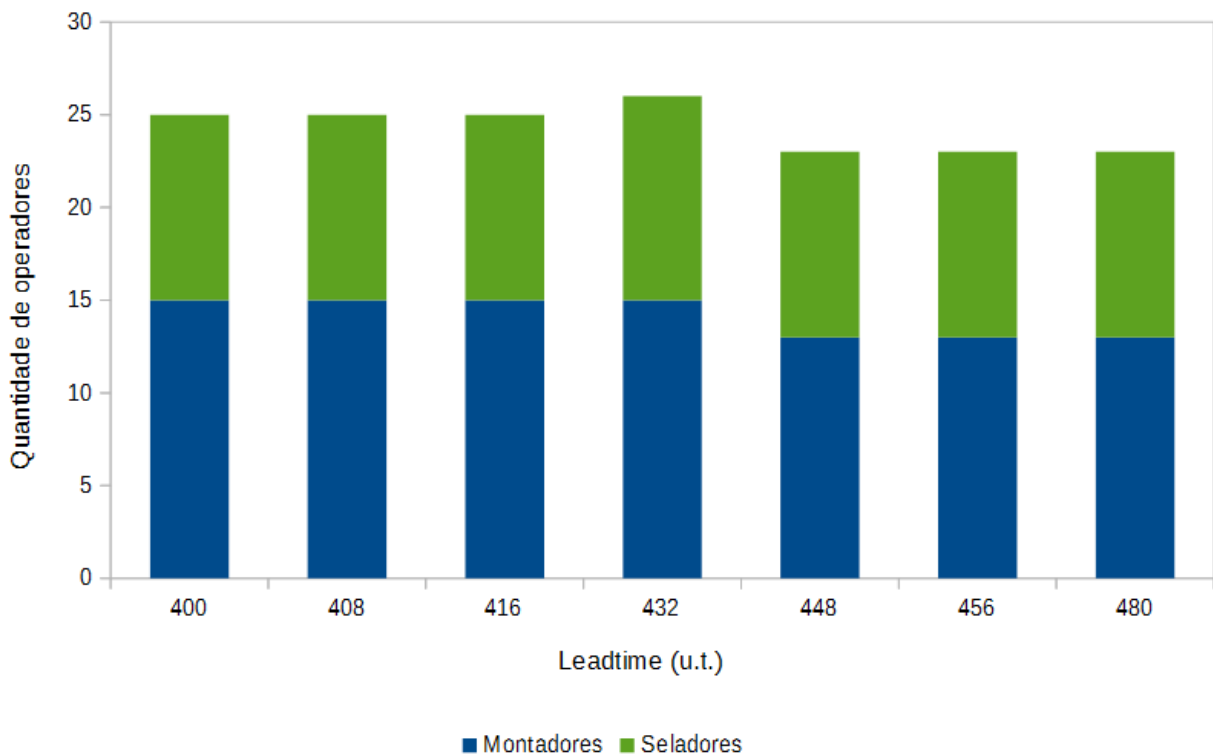


Figura 38: Variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando múltiplos modos de execução

Na Figura 39 é apresentada a comparação da variação da quantidade de operadores utilizando um único modo e múltiplos modos para executar as atividades para a produção de uma única aeronave por mês. Os resultados mostraram que planos com múltiplos modos de execução utilizaram de 7% a 45% menos mão de obra do que os planos com único modo de execução, o que significa que a utilização de múltiplos modos de execução utiliza menos operadores para cumprir o mesmo plano, conforme o esperado.

Se existissem mais modos de produção disponíveis, é possível que os planos com múltiplos modos fossem ainda melhores que os planos com único modo.

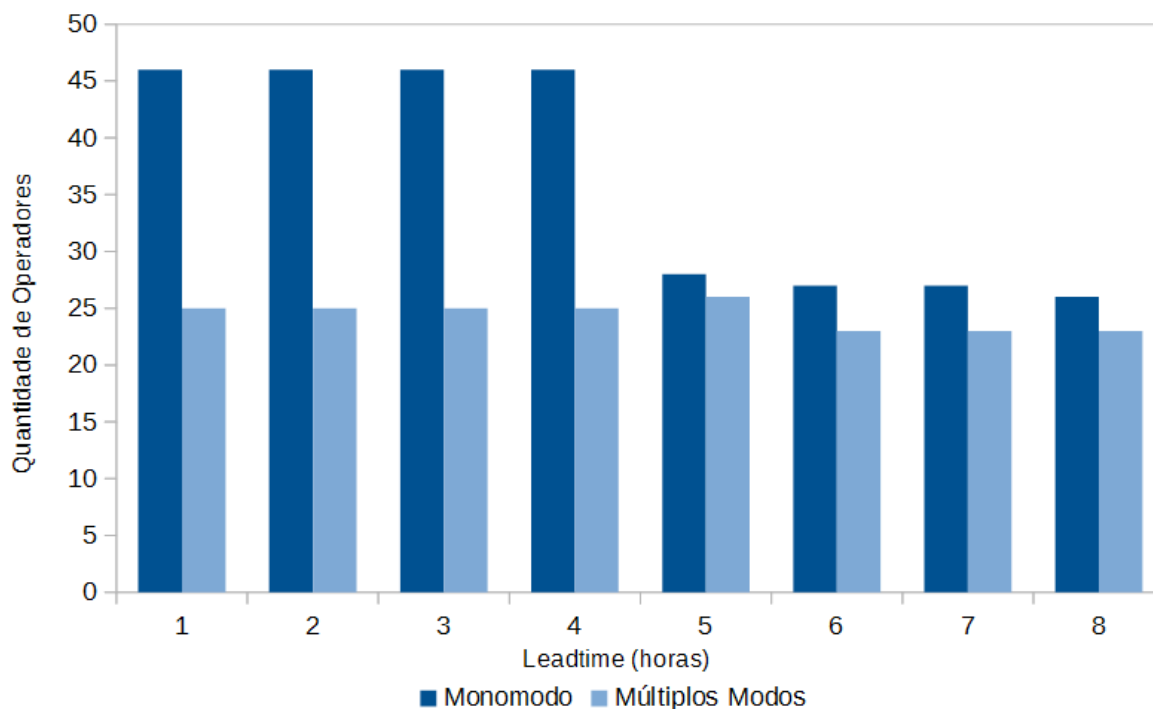


Figura 39: Comparação da variação da quantidade de mão de obra para a montagem de uma única aeronave utilizando um único modo e múltiplos modos de execução

Na Figura 40 é apresentada a variação da quantidade de mão de obra em função do dia da semana, utilizando o *lead time* de 396 horas. Na Tabela 10, os experimentos 20 a 24 apresentam os detalhes das soluções, começando na segunda-feira até sexta-feira. Note que o caso em que o plano começa na quinta-feira, que era infactível para um único modo, se torna viável com múltiplos modos. A quantidade utilizada de operadores por turno de trabalho variou entre os experimentos, assim como a quantidade total. Os resultados apresentados na Figura 40 demonstram que ter mais opções de duração das atividades, permite a geração de programas de produção que se adaptam melhor às implicações geradas pela variação do dia da semana em que o plano começou.

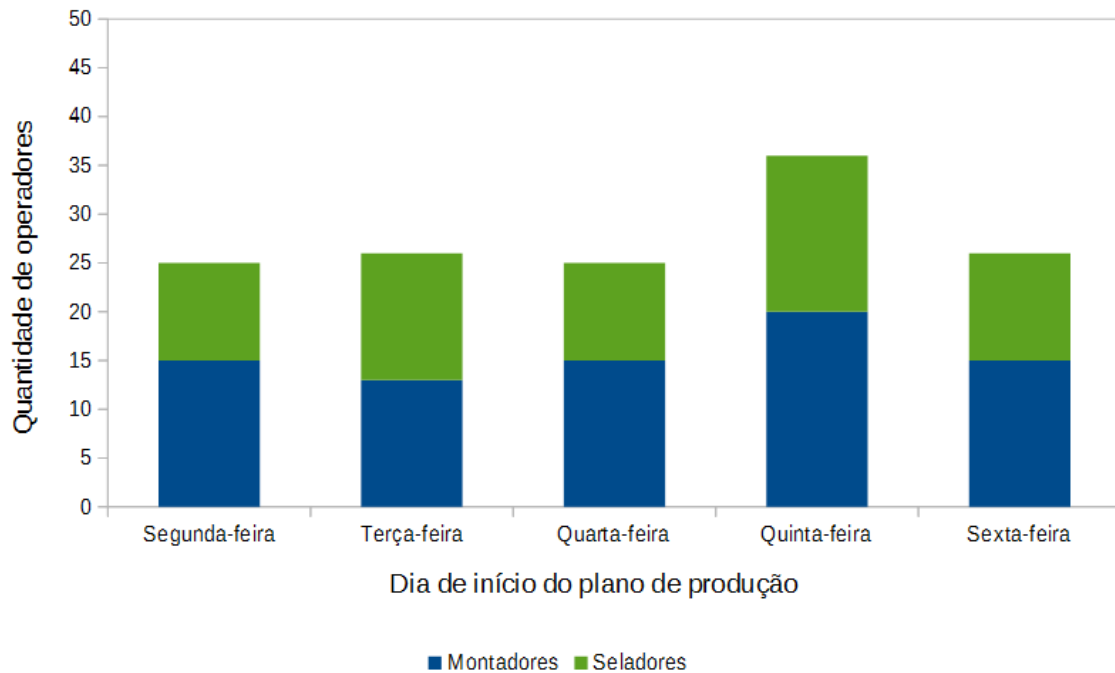


Figura 40: Variação da quantidade de mão de obra em função do dia da semana de início da produção com múltiplos modos e uma aeronave no plano com *lead time* 396 horas

Na Figura 41 são apresentados os resultados computacionais da variação da quantidade de mão de obra em função do *lead time* para planos de produção com cadência de duas aeronaves por mês. Os resultados do aumento do *lead time* não apresentaram a mesma variação como os resultados apresentados na Figura 36. A explicação é que os experimentos com duas aeronaves geram problemas maiores e mais difíceis de resolver, o que resultou em GAP de otimalidade alto, entre 30% e 40%, para o tempo computacional disponibilizado. Os resultados computacionais detalhados são apresentados na Tabela 10.

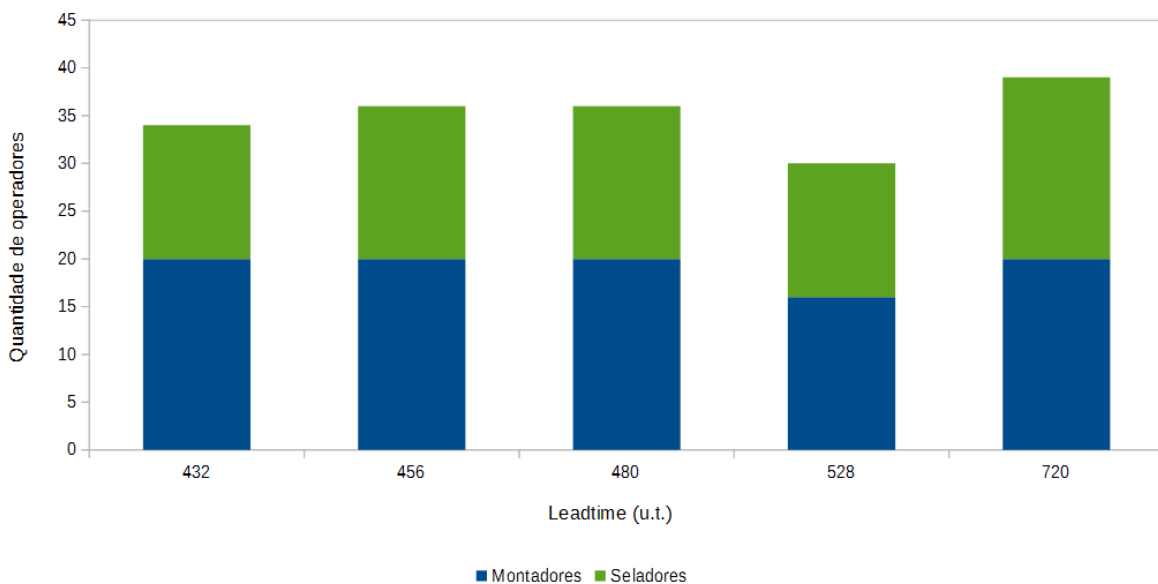


Figura 41: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do *lead time* de produção para 2 aeronaves por mês utilizando múltiplos modos

Na Figura 42 são apresentados os resultados computacionais da variação da quantidade de mão de obra em função do *lead time* para planos de produção com três aeronaves por mês. Nesse caso, as quantidades de operadores foram muito maiores do que as geradas nos casos com único modo, entretanto, o GAP de otimalidade é muito maior, entre 35% e 50%.

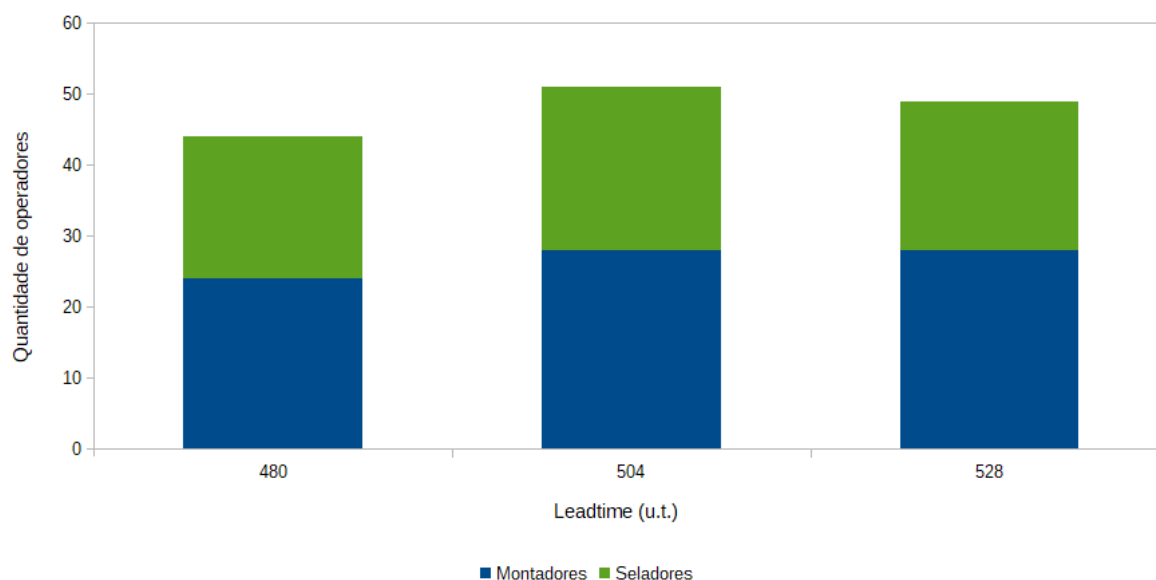


Figura 42: Variação da quantidade de mão de obra utilizada em função do *lead time* de produção para 3 aeronaves por mês utilizando múltiplos modos

Os resultados computacionais detalhados dos experimentos apresentados na Figura 38, Figura 40, Figura 41 e na Figura 42 são apresentados na Tabela 10. De forma semelhante à Tabela 9, na Tabela 10 a coluna “Exp.” identifica o experimento, “Qtde. de aeronaves” define qual é a cadência de produção no plano, “Qtde. De Variáveis Inteiras” e “Qtde. de Restrições” definem a quantidade total de variáveis inteiras e de restrições no modelo matemático e “Qtde. De Oper.” define a quantidade total de operadores, que é o valor da função objetivo do modelo. A mão de obra do tipo 1 são os montadores, do tipo 2 são os seladores, o turno 1 é o período da manhã e o turno 2 é o turno da tarde. Então, a_{ls} significa a quantidade de mão de obra do tipo l utilizada no turno s . Por último, “Tempo Computacional” define o tempo computacional utilizado no experimento. É possível observar na Tabela 10 que o desempenho computacional do CPLEX diminui muito com o aumento da quantidade de aviões e do horizonte de planejamento, representado pelo *lead time*. Esse efeito deve-se principalmente ao aumento do tamanho do problema em quantidade de variáveis e restrições.

Portanto, os resultados computacionais mostraram que a utilização de múltiplos modos de execução apresenta uma oportunidade de reduzir a quantidade total de mão de obra utilizada em vários casos, e que o modelo com múltiplos modos é computacionalmente mais difícil de resolver, o que sugere a utilização de métodos alternativos, com melhores desempenhos

computacionais. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva e Morabito (2015) em um problema similar porém, mais simplificado.

Os resultados também demonstraram que existe um *trade-off* entre mão de obra e estoque em processo, que o tomador de decisão deve escolher, de forma a administrar recursos humanos, físicos, dinheiro, prazos e riscos. Esses resultados podem ser mais evidenciados caso sejam encontradas soluções com GAP de otimalidade menores nos exemplos maiores. Os trabalhos de Chao e Graves (1998) e Borreguero et al. (2015b) encontraram resultados semelhantes.

Foi analisado como os limitantes superior e inferior convergem nos experimentos em que a solução comprovadamente ótima não foi encontrada, visando entender qual deles tem maior dificuldade para convergir. Na Figura 43 é apresentada a convergência dos limitantes para o experimento 34 sendo que, os outros experimentos sem comprovação de otimalidade possuem curvas de convergência semelhantes e, por simplicidade, foram omitidos. Note que em duas horas, o limitante superior chega ao seu valor mínimo, e que o limitante inferior possui valores iniciais muito ruins e uma convergência lenta. De forma recorrente nesses experimentos, o limitante superior diminui significativamente ao longo da execução do CPLEX, no entanto, o limitante inferior aumenta muito pouco. Métodos e técnicas que gerassem limitantes inferiores mais apertados poderiam ajudar na diminuição do GAP de otimalidade ou mesmo provar a otimalidade de algumas soluções.

Tabela 10: Resultados computacionais dos experimentos realizados com múltiplos modos

Exp.	Qtde. de Aeronaves	Lead time	Tempo de Ciclo	Qtde. de Variáveis Inteiras	Qtde. de Restrições	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	Qtde de Oper.	GAP de Otimalidade (%)	Tempo Computacional
20	1	396	480	18.761	56.824	10	5	3	7	25	0,00%	00:38:07
21	1	396	480	18.781	56.824	5	8	5	8	26	7,69%	10:03:52
22	1	396	480	18.751	56.824	8	7	3	7	25	0,00%	03:56:03
23	1	396	480	15.448	56.824	3	4	8	6	21	0,00%	00:00:43
24	1	396	480	18.701	56.824	8	7	4	7	26	19,23%	10:04:47
25	1	400	480	18.783	63.809	8	7	3	7	25	0,00%	02:21:51
26	1	408	480	18.783	62.864	10	5	3	7	25	0,00%	00:51:16
27	1	416	480	18.829	61.921	10	5	3	7	25	0,00%	00:51:47
28	1	432	480	20.559	60.033	5	10	7	4	26	23,08%	10:00:16
29	1	448	480	22.310	58.145	8	5	3	7	23	0,00%	00:54:37
30	1	456	480	22.310	57.201	8	5	3	7	23	0,00%	00:54:41
31	1	480	480	24.022	54.369	8	5	3	7	23	0,00%	00:23:26
32	2	432	240	37.130	170.438	10	10	7	7	34	36,69%	11:09:32
33	2	456	240	41.763	170.438	10	10	6	10	36	39,75%	11:17:30
34	2	480	240	54.464	249.891	10	10	6	10	36	38,92%	10:01:21
35	2	528	240	27.212	93.807	9	7	7	7	30	34,69%	10:01:32
36	2	720	240	72.351	427.094	10	11	7	14	42	58,52%	10:16:57
37	3	480	160	41.248	360.167	12	12	10	10	44	43,64%	10:12:37
38	3	504	160	52.323	372.453	14	14	10	13	51	52,94%	10:10:12
39	3	528	160	47.232	505.908	18	10	7	14	49	48,34%	10:21:01

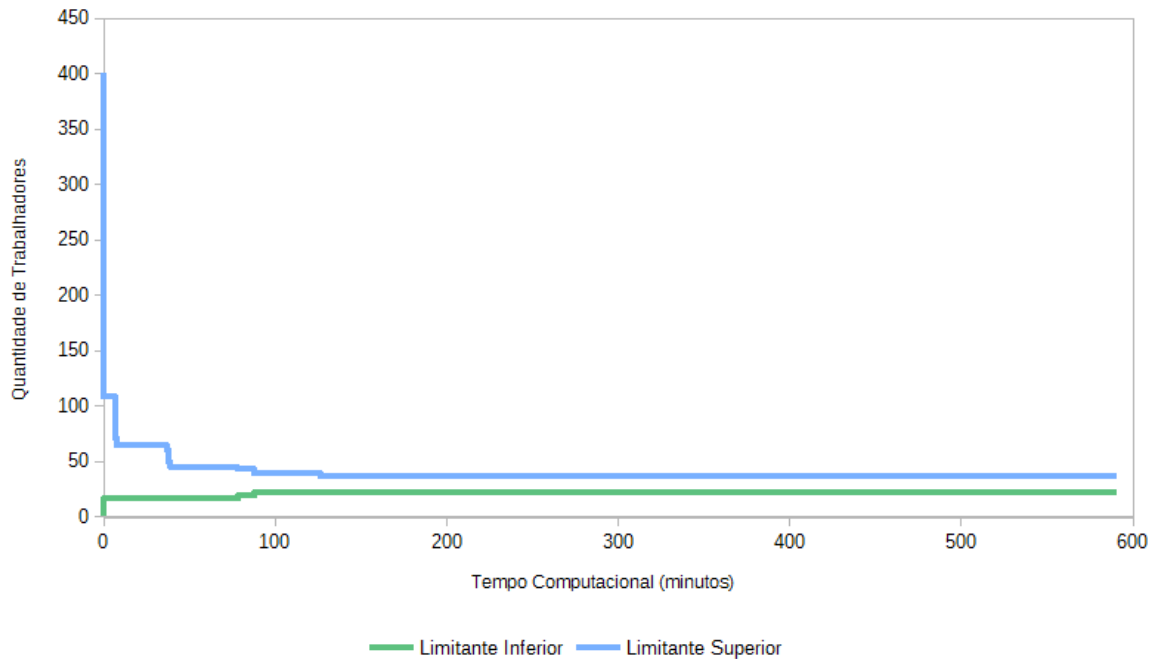


Figura 43: Convergência dos limitantes inferior e superior do experimento 34

6.3. Resultados dos experimentos computacionais da heurística construtiva

Foram realizados experimentos computacionais utilizando a heurística construtiva apresentada na seção 5.1.1. A heurística construtiva aloca as atividades de uma lista em ordem não decrescente de data de entrega no instante de início mais cedo possível, considerando todas as restrições do problema. Os resultados são apresentados na Tabela 11. Note que o objetivo dessa heurística é gerar soluções rapidamente, ainda que com qualidade inferior. O tempo computacional foi cerca de 5 segundos, mesmo para os experimentos que utilizam maior quantidade de dados. A qualidade da solução encontrada é apresentada na coluna GAP BKS (*Best Know Solution*, Melhor Solução Conhecida), calculada utilizando a expressão (56), e pode ser até duas vezes pior que a melhor solução conhecida.

$$GAP = \frac{(\text{Melhor solução conhecida} - \text{Solução comparada})}{(\text{Melhor solução conhecida})} \quad (56)$$

Tabela 11: Resultados computacionais dos experimentos com a heurística construtiva

Lead time (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Qtde Montadores	Qtde Seladores	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
480	160	44	40	84	4 s	90,91%
504	160	39	34	73	4 s	43,14%
528	160	44	40	84	5 s	71,43%
720	240	44	40	84	6 s	100,00%

Pela forma como a heurística foi criada, ela tem maior facilidade de encontrar soluções factíveis, pois ela sempre utiliza o modo de execução mais rápido, mesmo que mais caro, e alocar as atividades no instante mais cedo de início, pois seu objetivo é construir soluções factíveis rapidamente e os resultados apresentados na Tabela 11 demonstram que esse objetivo foi alcançado. Essa estratégia explica porque as soluções possuem qualidades ruins. Na Figura 44 é apresentada a variação dos dois tipos de mão de obra para um dos experimentos. Note que o padrão de utilização é bastante irregular, criando vários picos e vales de consumo de mão de obra. Os pontos máximos de utilização de mão de obra por tipo e turno de trabalho dimensionarão o total de mão de obra que será utilizada nesse plano de trabalho. Note que o consumo de mão de obra é maior no início do horizonte de planejamento. Isso acontece porque as atividades são iniciadas no instante mais cedo possível, o que no caso do resultado apresentado na Figura 44, gerou uma folga na programação ao final do horizonte de planejamento.

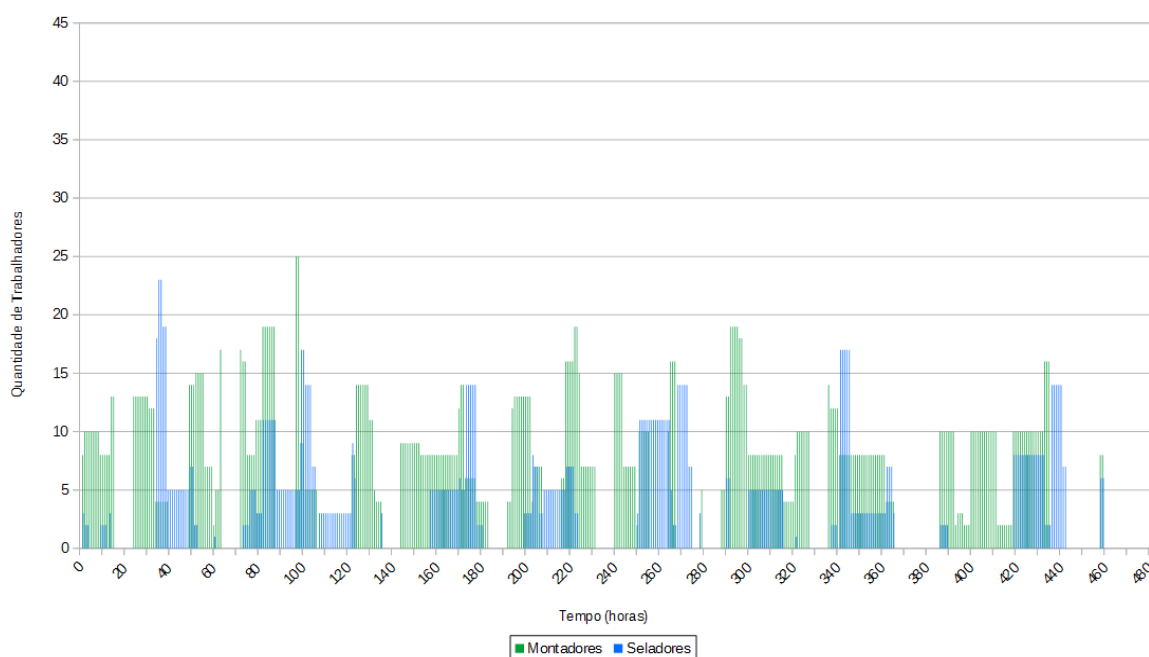


Figura 44: Utilização de mão de obra para o experimento com *lead time* 480 e tempo de ciclo de 160

Na Figura 44 também é possível notar os períodos com nenhuma mão de obra alocada, que acontecem em geral a cada 16 horas. Esses períodos são o terceiro turno, em que atividades que consomem mão de obra não podem ser alocadas. Padrão semelhante ao descrito foram encontrados nos outros experimentos realizados com a heurística construtiva. Portanto, o atual desempenho computacional e os resultados gerados pela heurística construtiva atingiram os objetivos propostos, que é ser um método rápido de gerar soluções factíveis para o problema objeto dessa pesquisa.

6.4. Resultados dos experimentos computacionais da heurística de busca local

A heurística de busca local apresentada na seção 5.1.2 deve ser utilizada em uma solução previamente construída por outra heurística, como uma etapa de melhoria. Particularmente, sua estratégia consiste em atrasar as atividades que estão nos picos de consumo, reprogramar as atividades afetadas por essa alteração e verificar se a nova solução é melhor que a incumbente. Considerando que as soluções construídas utilizando a heurística apresentada na seção 5.1.1 estão com as atividades programadas para o momento de início mais cedo, portanto, atrasar algumas atividades pode melhorar a solução construída. Na Tabela 12 são apresentados os resultados dos experimentos com a heurística de busca local. Esses resultados foram gerados executando a heurística de busca local por um número de iterações, *MaxIter*, suficientemente grande para que o algoritmo terminasse apenas quando a busca na vizinhança não gerasse mais melhoria. Experimentos utilizando mais iterações demonstraram que a heurística não gerava as soluções melhores e apenas consumiam tempo computacional. O tempo computacional menor do experimento com *lead time* 528 aconteceu por haver menos atividades nos picos e conseqüentemente, menos cálculos para serem realizados em cada iteração. Note que a qualidade da solução ficou entre cerca de 20% e 60% da melhor solução conhecida, calculada conforme equação (56).

Tabela 12: Resultados dos experimentos computacionais com a heurística de busca local

Lead time (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Qtde. Montadores	Qtde. Seladores	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
480	160	34	35	69	00:22:04	56,82%
505	160	33	28	61	00:31:40	19,61%
528	160	43	33	76	00:06:06	55,10%
720	240	38	30	68	00:36:51	61,90%

Na Tabela 13 é apresentada a melhoria que cada experimento foi capaz de fazer em relação à solução construída originalmente. As melhorias estão entre 9% e 19%, utilizando cerca de 30 minutos de tempo computacional. Conforme previsto, as melhorias são decorrentes da alteração do início das atividades que estão nos períodos de picos de consumo, após utilizar uma heurística construtiva que aloca as atividades no instante de início mais cedo possível. Outros movimentos como antecipar uma atividade que tiver folga para tal, ou modificar o modo em que as atividades são executadas não foram considerados no algoritmo de busca local utilizado.

Tabela 13: Comparação da melhoria da busca local em relação à solução inicial

<i>Lead time</i> (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Solução Inicial	Solução Busca Local	Melhoria
480	160	84	69	17,86%
505	160	73	61	16,44%
528	160	84	76	9,52%
720	240	84	68	19,05%

6.5. Resultados dos experimentos computacionais da heurística de múltiplos inícios aleatórios

A heurística de múltiplos inícios aleatórios, ou RMH, gera novas soluções utilizando a heurística construtiva apresentada na seção 5.1.1, ou seja, aloca as atividades no instante mais cedo possível e sorteia o modo de execução das atividades sendo alocadas. A RMH constrói várias soluções aleatoriamente a cada iteração, adiciona as soluções factíveis em uma lista de soluções candidatas, compara a melhor solução dessa lista com a solução incumbente e atualiza como nova incumbente, se for o caso. Entre as soluções geradas, algumas são infactíveis e, neste caso, não entram na lista de soluções candidatas, sendo simplesmente descartadas.

Foram realizados vários experimentos iniciais para investigar qual a quantidade de iterações que gera soluções de boa qualidade com o menor tempo computacional. Para os experimentos apresentados na Tabela 14, foram utilizadas 100 iterações, sendo que em cada iteração são construídas soluções aleatoriamente até que não exista uma nova solução melhor após 10 soluções construídas. Os resultados apresentados na Tabela 14 mostram que a RMH pode encontrar soluções de alta qualidade, com tempo computacional de até 10 minutos.

Tabela 14: Resultados da Heurística de Múltiplos Inícios Aleatórios

Lead time (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Qtde. Montadores	Qtde. Seladores	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
480	160	43	33	76	00:08:44	72,73%
504	160	42	30	72	00:07:48	41,18%
528	160	40	33	76	00:08:37	55,10%
720	240	40	32	72	00:09:21	71,43%

A qualidade das soluções encontradas é maior do que as da heurística construtiva porque a RMH varia os modos de produção das atividades e por isso, explora um espaço de soluções muito maior. Na Tabela 15 é apresentada uma comparação entre a solução gerada pela RMH e a heurística construtiva.

Tabela 15: Comparação da melhoria da busca local em relação à solução inicial

Lead time (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Solução Inicial	Solução Busca RMH	Melhoria
480	160	84	76	9,52%
505	160	73	72	1,37%
528	160	84	76	9,52%
720	240	84	72	14,29%

6.6. Resultados dos experimentos computacionais da combinação da heurística de múltiplos inícios aleatórios com *Fix-and-Optimize*

Baseado nos resultados apresentados para a MIP heurística e a heurística de múltiplos inícios, uma abordagem investigada foi combinar as duas heurísticas para verificar se a qualidade das soluções e tempos computacionais poderiam ser melhorados ao mesmo tempo. Para isso, a etapa construtiva da MIP heurística, apresentada na seção 5.2, foi substituída pela heurística de múltiplos inícios apresentada na seção 5.1.3. Dessa forma, a solução gerada pela RMH é utilizada como solução inicial para a etapa de melhoria da MIP heurística. Na Tabela 16 é apresentado o resultado dos experimentos da MIP heurística combinada com a heurística de múltiplos inícios aleatórios.

Na coluna “GAP Múltiplos Modos”, é apresentada a qualidade da solução em relação a melhor solução conhecida utilizando múltiplos modos de execução para cada exemplar. A qualidade da solução diminui conforme os exemplares aumenta o *lead time*, devido ao aumento do horizonte de planejamento e, conseqüentemente, da quantidade de variáveis no problema. Note que

a variação do tamanho do subproblema não afetou a qualidade da solução na maioria dos casos. Por outro lado, experimentos que geraram mais subproblemas utilizaram maiores tempos computacionais em decorrência de ter uma quantidade maior de compilação e resolução para ser executada pelo CPLEX.

Na Tabela 17 é apresentada a síntese com as melhores soluções da heurística combinada para cada grupo de dados. A qualidade da solução é apresentada na coluna “GAP (BKS)” e é calculada utilizando a equação (56). Note que a qualidade da solução no exemplar 504 está próxima da melhor solução conhecida para um dos exemplares dentre os quatro utilizados nos experimentos, enquanto as outras estão relativamente distantes. Os tempos computacionais variam entre cerca de 1h e 2h.

Comparando-se a Tabela 14 com a Tabela 17, é possível notar que a combinação da RMH com a *Fix-and-Optimize* gera soluções melhores em alguns casos, porém, utilizando um tempo computacional significativamente maior. Esse resultado era esperado, pois a *Fix-and-Optimize* é utilizada como uma etapa de melhoria da solução gerada pela RMH. Em outros casos, a *Fix-and-Optimize* não conseguiu melhorar a solução da RMH.

Tabela 16: Desempenho computacional da heurística de RMH combinada com *Fix-and-Optimize* para planos com múltiplos modos

Exp.	Lead time	Tempo de Ciclo	Quantidade de iterações	Intervalo do Subproblema	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	Total	Tempo Computacional	GAP Múltiplos Modos
40	480	160	8	60	13	17	7	17	54	01:11:22	22,73%
41	480	160	6	80	13	17	7	17	54	01:08:14	22,73%
42	480	160	5	96	13	17	7	17	54	01:07:13	22,73%
43	480	160	4	120	13	17	7	17	54	01:05:08	22,73%
44	480	160	3	160	13	17	7	17	54	01:02:38	22,73%
45	480	160	2	240	13	17	7	17	54	01:02:32	22,73%
46	504	160	8	63	16	15	7	14	52	02:55:45	1,96%
47	504	160	6	84	16	15	7	14	52	02:59:05	1,96%
48	504	160	5	101	16	15	7	14	52	02:48:38	1,96%
49	504	160	4	126	16	15	7	14	52	02:48:35	1,96%
50	504	160	3	168	16	15	7	14	52	02:47:04	1,96%
51	504	160	2	252	16	15	7	14	52	02:45:41	1,96%
52	528	160	8	66	24	19	16	17	76	01:24:42	55,10%
53	528	160	6	88	24	19	16	17	76	01:17:04	55,10%
54	528	160	5	105	24	19	16	17	76	01:17:21	55,10%
55	528	160	4	132	24	19	16	17	76	01:17:06	55,10%
56	528	160	3	176	24	19	16	17	76	01:14:10	55,10%
57	528	160	2	264	24	19	16	17	76	01:07:17	55,10%
58	720	240	8	90	23	17	11	21	72	02:38:53	71,43%
59	720	240	6	120	23	17	11	21	72	02:33:20	71,43%
60	720	240	5	144	23	17	11	21	72	02:28:40	71,43%
61	720	240	4	180	23	17	11	21	72	02:24:21	71,43%
62	720	240	3	240	23	17	11	21	72	02:21:15	71,43%
63	720	240	2	360	23	17	11	21	72	02:18:29	71,43%

Tabela 17: Resultados da Heurística de Múltiplos Inícios Aleatórios combinada com a *Fix-and-Optimize*

<i>Lead time</i> (dias)	Tempo de Ciclo (dias)	Qtde. Montadores	Qtde. Seladores	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
480	160	30	24	54	01:02:32	22,73%
504	160	31	21	52	02:45:41	1,96%
528	160	43	33	76	01:07:17	55,10%
720	240	40	32	72	02:18:29	71,43%

6.7. Resultados dos experimentos computacionais com a heurística de programação matemática

Nessa seção são apresentados os resultados dos experimentos computacionais realizados com a heurística apresentada na seção 5.2. Essa heurística tem uma etapa construtiva, em que uma solução inicial é gerada dividindo-se o problema em subproblemas e minimizando o tempo de conclusão do projeto. Em seguida, a próxima etapa é a de melhoria, em que grupos de atividades que representam aeronaves em montagem tem os seus valores liberados e fixados, e o problema é dividido em subproblemas com durações iguais e as respectivas variáveis têm seus valores liberados e fixados em cada iteração. O tempo limite dos experimentos computacionais foi de 20 minutos para cada iteração das etapas construtivas e de melhoria, e 8 núcleos disponíveis.

Para avaliar o desempenho da heurística, os experimentos se limitaram aos exemplares em que o método exato teve mais dificuldade para encontrar uma boa solução, ou atingiu o limite de tempo computacional máximo com GAP de otimalidade grande, ou seja, os exemplares que possuem planos de produção com cadência de três aeronaves por mês ou horizontes de planejamento mais longo e múltiplos modos de execução.

Com o objetivo de avaliar como o tamanho do intervalo de tempo dos subproblemas influenciam nos resultados, foram gerados vários experimentos com diferentes quantidades de subproblemas para cada exemplar. Os subproblemas foram gerados dividindo-se o horizonte de planejamento em partes iguais, que são utilizadas em cada iteração do algoritmo na etapa de melhoria.

Na Tabela 18 são apresentados os resultados computacionais dos experimentos. A coluna GAP refere-se à diferença relativa da solução encontrada em relação a melhor solução conhecida, utilizando a equação (56). Na Tabela 18, a coluna quantidade de iterações apresenta a quantidade de subproblemas em que o problema original foi dividido, conforme o tamanho do

intervalo temporal de cada subperíodo. Por exemplo, o experimento 1 tem *lead time* de 480, foi dividido em 8 subproblemas com duração de 60 horas cada, e assim sucessivamente.

Comparando-se os resultados apresentados na Tabela 18 com a Tabela 10, pode-se observar que para os exemplares menores, o tempo computacional da MIP-heurística é muito menor do que o modelo matemático com múltiplos modos completo. Os experimentos com *lead time* de 480 e 504 horas possuem tempo computacional inferior a cerca de uma hora, embora com qualidade de solução inferior ao apresentado pelo modelo (44)-(53) em 10 horas de processamento. Já para os exemplares de 528 e 720 horas, a qualidade da solução foi significativamente menor, embora os tempos computacionais sejam cerca de uma hora também.

Na Tabela 19 é apresentada a comparação dos resultados gerados para as duas MIP heurísticas implementadas. As colunas de melhoria são calculadas proporcionalmente em relação à MIP heurística original. Isso significa que valores negativos representam piora da função objetivo. De modo geral, a MIP heurística combinada com a RMH encontra soluções piores e com tempos computacionais maiores. Os resultados mostraram que a utilização de uma solução inicial melhor não necessariamente resulta em tempos computacionais menores ou solução melhores e que, soluções iniciais diferentes geraram grandes impactos na etapa de melhoria, sendo que as soluções iniciais geradas utilizando o método de *Relax-and-Fix* resultaram soluções melhores do que as geradas pela RMH.

Tabela 18: Desempenho computacional da heurística de programação matemática para planos com múltiplos modos

Exp.	Lead time	Tempo de Ciclo	Quantidade de iterações	Intervalo do Subproblema	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
64	480	160	8	60	13	17	7	17	54	00:47:03	22,73%
65	480	160	6	80	13	17	7	17	54	00:43:49	22,73%
66	480	160	5	96	13	17	7	17	54	00:42:24	22,73%
67	480	160	4	120	13	17	7	17	54	00:40:26	22,73%
68	480	160	3	160	13	17	7	17	54	00:40:07	22,73%
69	480	160	2	240	13	17	7	17	54	00:38:27	22,73%
70	504	160	8	63	16	15	7	14	52	01:14:48	1,96%
71	504	160	6	84	16	15	7	14	52	01:10:57	1,96%
72	504	160	5	101	16	15	7	14	52	01:08:36	1,96%
73	504	160	4	126	16	15	7	14	52	01:06:33	1,96%
74	504	160	3	168	16	15	7	14	52	01:02:33	1,96%
75	504	160	2	252	16	15	7	14	52	01:01:11	1,96%
76	528	160	8	66	20	20	15	18	73	01:00:57	48,98%
77	528	160	6	88	20	20	15	18	73	00:56:23	48,98%
78	528	160	5	106	20	20	15	18	73	00:52:48	48,98%
79	528	160	4	132	20	20	15	18	73	00:52:58	48,98%
80	528	160	3	176	20	20	15	18	73	00:50:30	48,98%
81	528	160	2	264	20	20	15	18	73	00:48:43	48,98%
82	720	240	8	90	20	18	15	15	68	01:38:04	38,24%
83	720	240	6	120	20	20	15	15	70	01:30:56	40,00%
84	720	240	5	144	20	18	15	15	68	01:29:25	38,24%
85	720	240	4	180	20	18	15	15	68	01:24:26	38,24%
86	720	240	3	240	20	18	15	15	68	01:21:12	38,24%
87	720	240	2	360	20	18	15	15	68	01:18:11	38,24%

Tabela 19: Comparação da qualidade das soluções e duração das duas MIP Heurísticas

Exp.	MIP Heurística Original		Exp.	Múltiplos Inícios + MIP Heurística		Melhoria na Solução	Melhoria no Tempo Computacional
	Função objetivo	Tempo Computacional		Função objetivo	Tempo Computacional		
40	54	00:47:03	64	54	01:11:22	0,00%	-51,68%
41	54	00:43:49	65	54	01:08:14	0,00%	-55,72%
42	54	00:42:24	66	54	01:07:13	0,00%	-58,53%
43	54	00:40:26	67	54	01:05:08	0,00%	-61,09%
44	54	00:40:07	68	54	01:02:38	0,00%	-56,13%
45	54	00:38:27	69	54	01:02:32	0,00%	-62,64%
46	52	01:14:48	70	52	02:55:45	0,00%	-134,96%
47	52	01:10:57	71	52	02:59:05	0,00%	-152,41%
48	52	01:08:36	72	52	02:48:38	0,00%	-145,82%
49	52	01:06:33	73	52	02:48:35	0,00%	-153,32%
50	52	01:02:33	74	52	02:47:04	0,00%	-167,09%
51	52	01:01:11	75	52	02:45:41	0,00%	-170,80%
52	73	01:00:57	76	76	01:24:42	-4,11%	-38,97%
53	73	00:56:23	77	76	01:17:04	-4,11%	-36,68%
54	73	00:52:48	78	76	01:17:21	-4,11%	-46,50%
55	73	00:52:58	79	76	01:17:06	-4,11%	-45,56%
56	73	00:50:30	80	76	01:14:10	-4,11%	-46,86%
57	73	00:48:43	81	76	01:07:17	-4,11%	-38,11%
58	68	01:38:04	82	72	02:38:53	-5,88%	-62,02%
59	70	01:30:56	83	72	02:33:20	-2,86%	-68,62%
60	68	01:29:25	84	72	02:28:40	-5,88%	-66,26%
61	68	01:24:26	85	72	02:24:21	-5,88%	-70,96%
62	68	01:21:12	86	72	02:21:15	-5,88%	-73,95%
63	68	01:18:11	87	72	02:18:29	-5,88%	-77,13%

Portanto, os resultados dos experimentos e a comparação com outros resultados mostraram que a combinação de *Relax-and-Fix* com a *Fix-and-Optimize* funcionou melhor do que a combinação RMH com a *Fix-and-Optimize*.

6.8. Comparação dos resultados computacionais dos diversos métodos

Na Figura 45 são apresentados os resultados gerados pelos experimentos computacionais de forma sintética com todos os métodos desenvolvidos. A coluna “Método de Solução Utilizado”, define a abordagem de solução utilizada no experimento. A coluna “Lead time” define o tempo de montagem de cada aeronave e a coluna “Tempo de Ciclo”, define o tempo de

ciclo utilizado no plano de produção. A mão de obra do tipo 1 são os montadores, do tipo 2 são os seladores, o turno 1 é o período da manhã e o turno 2 é o turno da tarde. Então, a_{ls} significa a quantidade de mão de obra do tipo l utilizada no turno s . “GAP BKS” define a diferença em relação a melhor solução conhecida, utilizando a equação (56).

Em todos os exemplares a melhor solução conhecida foi gerada utilizando o modelo matemático com métodos exatos e um tempo computacional longo, sem comprovação de otimalidade. Em termos de qualidade de solução, é possível notar que a heurística de programação matemática é o método que mais se aproximou da melhor solução conhecida e que possui tempos computacionais da ordem de uma hora.

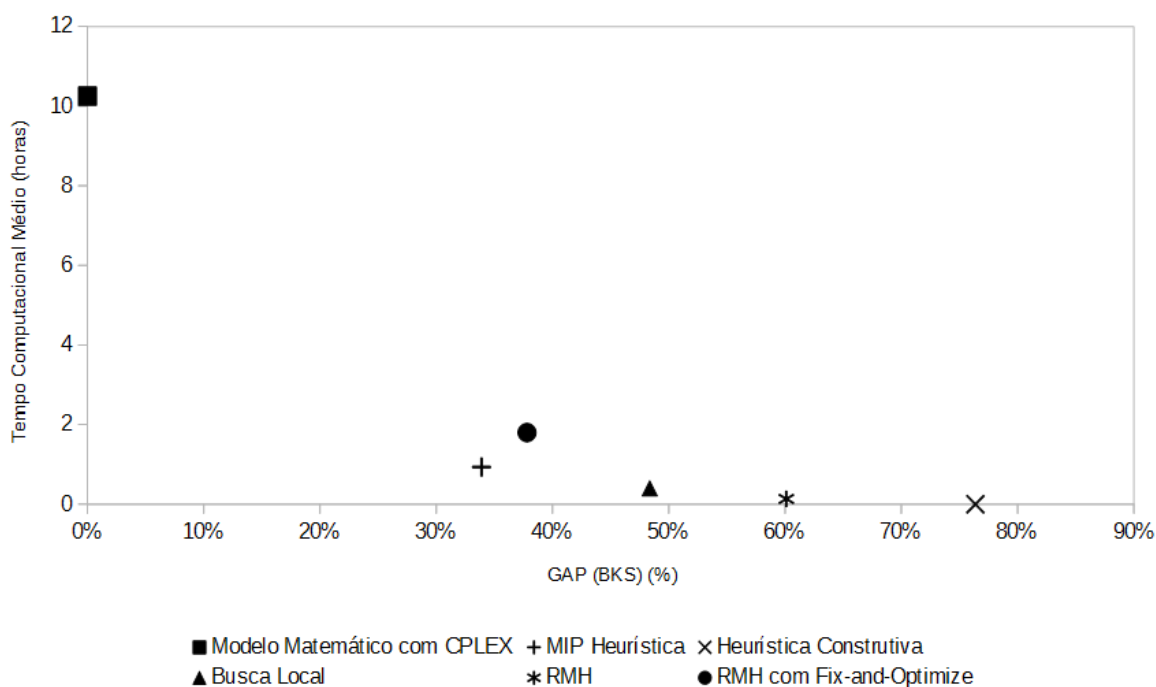


Figura 45: Comparação do desempenho computacional e da qualidade das soluções para os vários métodos utilizados

Na Figura 45 é apresentado o tempo computacional médio e o GAP médio em relação a melhor solução conhecida para cada um dos métodos desenvolvidos. De modo geral, pode-se observar três grupos de métodos. O primeiro grupo é formado pela heurística construtiva, a RMH e a busca local, sendo estes os métodos rápidos e com baixa qualidade de solução. O segundo grupo é o Modelo Matemático com CPLEX, com alto tempo computacional e a melhor qualidade de solução. O terceiro grupo é formado pelas heurísticas de programação matemática, sozinhas ou combinadas e formam os métodos que geram boas soluções médias utilizando tempos computacionais aceitáveis. Importante salientar que os dados da Figura 45 são médios e não consideram a dispersão dos dados.

Um ponto a destacar é que caso o modelo matemático resolvido pelo CPLEX fosse interrompido em 1 hora de tempo computacional, as soluções geradas pela MIP heurística são um pouco melhores nos exemplares menores, sendo que a vantagem da MIP heurística aumenta conforme o tamanho dos exemplares aumentaram. Portanto, para o mesmo tempo computacional e o mesmo equipamento de computação, a MIP heurística ainda é mais vantajosa.

Com base em todos os resultados apresentados nesse capítulo, pode-se afirmar que os métodos desenvolvidos possuem vantagens e desvantagens diferentes que, se utilizados de forma combinada, são capazes de gerar soluções para o problema de montagem estrutural aeronáutica. O Modelo Matemático com CPLEX se mostrou viável para problemas menores e foi a base para a criação de heurísticas de programação matemática, que mostraram bons resultados em até uma hora. De forma geral, as soluções geradas possuem boa qualidade e podem ser geradas em tempos aceitáveis para tomadores de decisão que trabalhem com o problema prático.

Tabela 20: Resultados dos experimentos nos melhores casos para todos os exemplares e métodos utilizados

Método de Solução Utilizado	Lead time	Tempo de Ciclo	a_{11}	a_{12}	a_{21}	a_{22}	Total	Tempo Computacional	GAP (BKS)
Modelo Matemático	480	160	12	12	10	10	44	10:12:37	0,00%
Heurística de Programação Matemática	480	160	13	17	7	17	54	00:38:27	22,73%
Construtiva	480	160	25	19	17	23	84	00:00:04	90,91%
Busca Local	480	160	19	15	14	21	69	00:22:04	56,82%
Múltiplos Inícios Aleatórios	480	160	24	19	16	17	76	00:08:44	41,18%
Múltiplos Inícios Heurística e Programação Matemática	480	160	13	17	7	17	54	01:02:32	22,73%
Modelo Matemático	504	160	14	14	10	13	51	10:10:12	0,00%
Heurística de Programação Matemática	504	160	16	15	7	14	52	01:01:11	1,96%
Construtiva	504	160	20	19	17	17	73	00:00:04	43,14%
Busca Local	504	160	18	15	14	14	61	00:31:40	19,61%
Múltiplos Inícios Aleatórios	504	160	21	21	15	15	72	00:07:48	41,18%
Múltiplos Inícios Heurística e Programação Matemática	504	160	16	15	7	14	52	02:45:53	1,96%
Modelo Matemático	528	160	18	10	7	14	49	10:21:01	0,00%
Heurística de Programação Matemática	528	160	20	20	15	18	73	00:48:43	48,98%
Construtiva	528	160	25	19	17	23	84	00:00:05	71,43%
Busca Local	528	160	24	19	16	17	76	00:06:06	55,10%
Múltiplos Inícios Aleatórios	528	160	24	19	16	17	76	00:08:37	55,10%
Múltiplos Inícios Heurística e Programação Matemática	528	160	24	19	16	17	76	01:07:17	55,10%
Modelo Matemático	720	240	10	11	7	14	42	10:16:57	0,00%
Heurística de Programação Matemática	720	240	20	18	15	15	68	01:18:11	61,90%
Construtiva	720	240	25	19	17	23	84	00:00:06	100,00%
Busca Local	720	240	19	19	14	16	68	00:36:51	61,90%
Múltiplos Inícios Aleatórios	720	240	23	17	11	21	72	00:09:21	71,43%
Múltiplos Inícios Heurística e Programação Matemática	720	240	23	17	11	21	72	02:18:29	71,43%

7. Conclusões e Perspectivas

Nesta pesquisa foi estudado o problema de programação de montagens estruturais aeronáutica, utilizando abordagens de programação de projetos, otimização matemática e métodos heurísticos. Foram utilizados dados de um caso real da indústria aeronáutica brasileira e implementados vários métodos de solução, buscando encontrar boas soluções com tempos computacionais pequenos.

Foi desenvolvido um modelo matemático, inspirado na literatura de programação de projetos mas com várias particularidades. Alguns tipos de atividades consomem recursos que estão disponíveis somente mediante um calendário, enquanto outras atividades consomem recursos que estão disponíveis durante todo o tempo. Esse último tipo de atividade pode acontecer em feriados, finais de semana e períodos noturnos. Portanto, foi necessário criar um modelo em que a duração das atividades varia ao longo do tempo em função do instante de início da atividade. Outra diferença é que o modelo utiliza restrições de precedência imediata e tradicionais, dependendo dos tipos de atividades envolvidas na programação.

Os resultados apresentados nas seções 6.1 e 6.2 mostram que os modelos matemáticos propostos com único e múltiplos modos e resolvidos pelo CPLEX possuem desempenho computacional razoável para exemplares de pequeno e médio porte. Contudo, possuem um desempenho limitado para os exemplares maiores. Os modelos conseguem capturar com fidelidade as restrições propostas para representar o problema. A utilização do modelo com múltiplos modos permitiu encontrar soluções melhores do que com único modo. Entretanto, a dificuldade de resolver o problema aumentou consideravelmente, conforme reportado na seção 6.2.

Métodos aproximados como as heurísticas construtiva, de busca local e de múltiplos inícios aleatórios conseguiram encontrar soluções rapidamente, entretanto, com baixa qualidade, conforme resultados reportados na seção 6.3, 6.4 e 6.5. A heurística de múltiplos inícios aleatórios, na sua versão combinada com a MIP-heurística, gerou soluções com qualidades de solução significativamente melhores que a construtiva, a busca local e a RMH, conforme resultados reportados na seção 6.6. Os resultados dos experimentos computacionais com as heurísticas de programação matemática reportados na seção 6.7 demonstraram que elas podem gerar soluções de boa qualidade e reduzir significativamente o tempo computacional em alguns experimentos, gerando a melhor combinação de tempo computacional e qualidade de solução. A comparação dos

resultados para todos os métodos apresentados na seção 6.8 mostrou que os métodos conseguiram encontrar soluções com boa qualidade em com tempos computacionais de cerca de uma hora, que é um tempo aceitável para realizar análises práticas e diárias em montagens estruturais aeronáuticas. Com essa duração, o tomador de decisão consegue utilizar dados atualizados da situação das montagens estruturais e analisar, de forma iterativa, diferentes estratégias no mesmo dia.

De modo geral, o modelo proposto com único e múltiplos modos foi capaz de representar todas as restrições técnicas do problema de programação de montagens estruturais aeronáuticas, presente na prática das indústrias aeronáuticas do mundo. As soluções geradas, mesmo para os exemplares com maior quantidade de tarefas ou horizonte de planejamento mais longo, por exemplo, com até 72 mil variáveis, possuem boa qualidade comparada com as melhores soluções conhecidas. Portanto, o objetivo de desenvolver métodos capazes de gerar soluções boas em tempos aceitáveis foi atingido. Essa pesquisa também tem como resultado a comprovação de que, embora o problema objeto de estudo seja complexo e de difícil solução utilizando métodos exatos e *solvers* comerciais como o CPLEX, a utilização de métodos heurísticos facilita a resolução desses problemas.

Como perspectivas futuras de pesquisa, outros métodos de solução baseados em metaheurísticas ou mateheurísticas poderiam ser utilizados com o objetivo de encontrar soluções de mais alta qualidade em tempos computacionais menores. Encontrar soluções melhores, ou seja, com GAP de otimalidade nulo ou pequeno, para problemas de grandes dimensões mesmo que seja necessário utilizar tempos computacionais grandes, ajudaria a analisar a qualidade das soluções geradas pelos métodos aproximados desenvolvidos.

Outros exemplos reais de montagens estruturais aeronáuticas desta e de outras empresas do setor poderiam ser investigados, para avaliar melhor a adequação do modelo proposto ou a incorporação de novas restrições, representando outras particularidades desse processo produtivo realizado em outras empresas do setor. Também se poderia aplicar os modelos e métodos desenvolvidos nesse trabalho em situações reais, para avaliar os seus benefícios na prática. Outra perspectiva interessante de pesquisa futura é incluir a análise de incertezas nos parâmetros do problema, utilizando técnicas de otimização robusta, programação estocástica ou simulação de eventos discretos, com o objetivo de avaliar os efeitos dessas incertezas na programação das atividades. Entre as incertezas a serem abordadas, poder-se-ia estudar a duração das atividades, disponibilidade de mão de obra dada a ausência de trabalhadores por motivos diversos, momento de início das atividades por disponibilidade de componentes ou outros.

Outras funções objetivo também poderiam ser investigadas, como equilibrar o *trade-off* entre o estoque em processo e o custo com mão de obra, assim como considerar custos de atraso, para poder avaliar o quanto vale a pena atrasar a data de entrega para obter outros benefícios. Uma outra perspectiva de pesquisa poderia ser realizar pesquisas avaliando a utilização de *lead times* diferentes para cada aeronave em um plano de produção e se isso geraria algum ganho significativo. Um aspecto interessante seria realizar esses estudos de otimização de programação estrutural aeronáutica em um contexto de curvas de aprendizagem, em que a quantidade de pessoas e gabaritos de montagem poderiam ser decididos com um horizonte de planejamento mais longo, inclusive, incorporando incertezas na variação das curvas de aprendizagem.

Por fim, é importante destacar que a literatura científica de aplicação de métodos de pesquisa operacional e, especialmente, programação de projetos nas montagens estruturais, é ainda escassa e estudos nessa área constituem uma oportunidade de pesquisa no mundo todo.

Referências

Abdinnour, S., Hawker Beechcraft uses a new solution approach to balance assembly lines. **Interfaces**, v. 41, n 2, p. 164-179, 2011.

Abuabara, A. Otimização no corte de tubos estruturais: Aplicação na indústria aeronáutica agrícola. 2006. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

Abuabara, A., Morabito, R., Modelos de programação inteira mista para o planejamento do corte unidimensional de tubos metálicos na indústria aeronáutica agrícola. **Gestão & Produção**, v. 15, p. 605-617, 2008.

Abuabara, A., Morabito, R., Cutting optimization of structural tubes to build agricultural light aircrafts. **Annals of Operation Research**, v. 169, p. 149-165, 2009.

AIA – Aerospace Industries Association. **2019 Facts & Figures. U. S. Aerospace & Defense**. Disponível em: <<https://www.aia-aerospace.org/report/2019-facts-figures/>>. Acesso em 20 abr. 2020.

AIAB – Associação das Indústrias Aeroespaciais do Brasil. **Números da AIAB**. Disponível em: <<http://www.aiab.org.br/numeros-da-aiab.asp>>. Acesso em: 26 set. 2018.

Airchive. Disponível em:<<http://airchive.com/blog/wp-content/uploads/2013/08/Everett-Boeing-777-Final-Assembly-Line-Positions-1-2-and-3-2011.jpg>>. Acesso em: abr. 2017.

Agnetis, A., Macchiaroli, R., Modelling and optimization of the assembly process in a flexible cell for aircraft panel manufacturing. **International Journal of Production Research**, v. 36, n. 3, p. 815-836, 1998.

Aguirre, A. M., Méndez, C. A., García-Sanches, A., Ortega-Mier, M., Applying MILP/heuristic algorithms to automated job-shop scheduling in aircraft-part manufacturing. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v. 5, n. 10, p. 26-41, 2013.

Akhtar, M., Al-Bazi. A., Adediran, T., Rowley, S., An integrated real-time autonomous production planning and scheduling system for aerospace manufacturing systems. 4Th International Conference on Innovation in Business, Economics & Marketing Research. IBEM 2019, Mai. 2019, Tabarka, Tunísia, 2019.

Allerding, F., Premm, M., Shukla, P. K., Schmeck, H., Electrical load management in smart homes using evolutionary algorithms In. EUROPEAN CONFERENCE EVOLUTIONARY COMPUTATION IN COMBINATORIAL OPTIMIZATION, 12, 2012, Málaga, Espanha. **Proceeding...** Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, p. 99-110.

Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra, J., Lazarev, A., Operator assignment problem in aircraft assembly lines: a new planning approach taking into account economic and ergonomic constraints. **Procedia CIRP**, vol. 76, p. 63-66, 2018a.

Arkhipov, D., Battaia, O., Cegarra, J., Lazarev, A., Work planning in low-volume assembly lines under ergonomic constraints. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 786-789, 2018b.

Artigues, C., Brucker, P., Knust, S., Koné, O., Lopez, P. A note on “event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problems. **Computers & Operations Research**, v. 40, p. 1060-1063, 2013.

ASD – Aerospace and Defence Industries Association of Europe. **Aerospace and Defence Industries Facts & Figures 2019**. Disponível em: <<https://www.asd-europe.org/sites/default/files/atoms/files/ASD%202019%20Facts%20and%20Figures.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

Asian Defence News. How Sukhoi produces SU-34 in Russia. Disponível em: <<http://asian-defence-news.blogspot.com.br/2015/10/how-sukhoi-produces-su-34-in-russia.html>>. Acesso em: abr. 2017.

AviationCV. Disponível em: <https://www.aviationcv.com/aviation-blog/wp-content/uploads/2016/09/first-777-at-new-rate-body-join-2_28431.jpg>. Acesso em: abr. 2017.

Avia.pro. Disponível em: <http://avia.pro/sites/default/files/pictures/katastrofi2/awl1nlwzvdgtplnlhbmrlec5yds9nzxqvndeymc83mzgzmqtq3ns5llzbfogfmywzfodvky2e5yylftc5qcgc_x19pzd0yotulma.jpg>. Acesso em: abr. 2017.

Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning, 1999.

Azami, A., Demirli, K., Bhuiyan, N., Scheduling in aerospace composite manufacturing systems: a two-stage hybrid flow shop problem. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, p. 3259-3274, 2018.

Basán, N. P., Pulido, R., Cóccola, M. E., Méndez, C. A., Aerospace manufacturing industry: a simulation-based decision support framework for scheduling of complex hoist lines. **Iberoamerican Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 17, p. 100-117, 2017.

Bautista, J., Lusa, A., Suárez, R., Mateo, M., Pastor, R., Carominas, A., Application of genetic algorithms to assembly sequence planning with limited resources. In. International Symposium on Assembly and Task Planning, Assembly and Tasking Planning, 1999, Porto. **Proceeding... PORTO: IEEE 1999**, p. 411-416.

Barret, B., Fraile, L., Lean at the C-5 Galaxy depot: Essential elements of success – Lean Aerospace Initiative (LAI Report). Cambridge: Sociotechnical Systems Research Center, 2005. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82006>>. Acesso em: abr. 2017.

Bartels, J. H., Zimmermann, J., Scheduling tests in automotive R&D projects. **European Journal of Operational Research**, v. 193, p. 805-819, 2009.

Bertrand, J. W., Fransoo, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations and Production Management**, vol. 22, n. 2, 2002, pág. 241-264, 2002.

Biele, A., Mönch, L., Hybrid approaches to optimize mixed-model assembly lines in low-volume manufacturing. **Journal of Heuristics**, v. 24, n 1, p. 49-81, 2018.

Biele, A., Mönch, L., Decomposition methods for cost and tardiness reduction in aircraft manufacturing flow lines. **Computers & Operations Research**, v. 103, p. 134-147, 2019.

Billon, A. PERT: novo sistema de planejamento e controle. **Revista Administração de Empresas**, vol. 4, n. 10, p. 91-110, 1964.

Blazewicz, J., Lenstra, J. K., Rinnooy Kan, A. H. G., Scheduling subject to resource constraints: classification and complexity. **Discrete Applied Mathematics**, v. 5, p. 11-24, 1983.

Blum, C., Puchinger, J., Raidl, G. R., Roli, A., Hybrid metaheuristic in combinatorial optimization: A survey. **Applied Soft Computing**, v. 11, p. 4135-4151, 2011.

Boeing. Família Boeing 737 NG. Disponível em:<<http://www.boeing.com.br/produtos-e-servicos/avioes-comerciais/737-ng.page>>. Acesso em: abr. 2017a.

Boeing. Boeing 737 Facts. Disponível em: <<http://www.boeing.com/farnborough2014/pdf/BCA/fct%20-737%20Family%20Facts.pdf>>. Acesso em: abr. 2017b.

Boctor, F. F., Some efficient multi-heuristic procedures for resource-constrained project scheduling. **European Journal of Operational Research**, v. 49, p. 1-13, 1990.

Borreguero, T., Garcia, A., Ortega, M., A MILP event based formulation for a real-world multimode RCSP with generalized temporal constraints. *Managing Complexity*, Springer, p. 113-120, 2014.

Borreguero, T., García, A., Ortega, M., Scheduling in the aeronautical industry using a mixed integer linear problem formulation. **Procedia Engineering**, v. 132, p. 982-989, 2015a.

Borreguero, T., Artigues, C., Sánchez, A. G., Mier, M. O., Lopez, P., Multimode time-constrained scheduling problems with generalized temporal constraints and labor skills. 7Th Multidisciplinary International Scheduling Conference: Theory and Applications (MISTA 2015), Ago. 2015, Praga, República Tcheca, p. 809-813, 2015b.

Borreguero, T., Mas, F., Menéndez, J. L., Barreda, M. A., Enhanced assembly line balancing and scheduling methodology for aeronautical industry. **Procedia Engineering**, v. 132, p. 990-997, 2015c.

Borreguero-Sanchidrián, T, Scheduling of an aeronautical final assembly line: a case study. Manufacturing Engineering Society International Conference 2017 (MESIC 2017), Jun. 2017, Vigo, Espanha. **Procedia Manufacturing**, v. 13, p. 1167-1174, 2017.

Borreguero-Sanchidrián, T., Pulido, R., García-Sánchez, A., Ortega-Mier, M., Flexible job shop scheduling with operators in aeronautical manufacturing: a case study. *IEEE Access*, v. 6, p. 224-233, 2017.

Boysen, N., Fliedner, M., Scholl, A., A classification of assembly line balancing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 183, p. 674-693, 2007.

Briggs, J., Jin, Y., Price, M., Scheduling a hybrid flowshop with parallel machines for aircraft assembly production. *Air Transport and Operations*. In: AIR TRANSPORT AND OPERATIONS SYMPOSIUM, Amsterdam: IOS Press, 2012, p. 149-161.

Briggs, J., Jin, Y., Price, M., Burcke, R., Mixed-model production system design for aircraft assembly. In: PROCEEDINGS OF THE 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON MANUFACTURING RESEARCH (ICMR2013), Cranfield University, UK, 2013, p. 537-542.

Bronnikov, S., Dolgui, A., Lazarev, A., Morozov, N., Petrov, A., Sadykov, R., Sologub, A., Werner, F., Yadrentsev, D., Musatova, E., Khusnullin, N., **Approaches for planning the ISS cosmonaut**

training. Disponível em: <<http://www.math.uni-magdeburg.de/~werner/preprints/p15-12.pdf>>. Acesso em: out. 2017.

Brown, R., Caddick, J. M., The factory is virtual... the savings are real. 2002. Disponível em:<<http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/p014151.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

Brucker, P., Drexl, A., Möhring, Neumann, K., Pesch, E., Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods. **European Journal of Operational Research**, v. 112, p. 3041, 1999.

Bryman, A. Research methods and organizations studies. Londres: Unwin Hyman, 1989. _____
Burgess, R. G. Reflections on qualitative data analysis. In. Analyzing qualitative data. Londres; Routledge, 1994.

Buford, G., Comer, T., Haider, F., Khaki, H., Richardson, B., Shade, E., Georgia Institute of Technology. **Orbiter / External Tank (ET) Mate Operations Final Report**. 2004. Disponível em: <<https://smartech.gatech.edu/handle/1853/19890?show=full>>. Acesso em: out. 2017.

Burnett, G., **Multiple objective assembly scheduling with spatial resources and recurring tasks**. 2011. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção de Pesquisa Operacional) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual da Pensilvânia, State College, 2011.

Caggiano, A., Caiazzo, F., Teti, R., Digital factory approach for flexible and efficient manufacturing systems in the aerospace industry. CIRP – **Understanding the life cycle implications of manufacturing**, v. 37, p. 122-127, 2015.

Caggiano, A., Marzano, A., Teti, R., Resource efficient configuration of an aircraft assembly line. **Procedia CIRP**, v. 41, p. 236-241, 2016.

Calhoun, K. M., **A tabu search for scheduling and rescheduling combat aircraft**. 2000. 122 f. Dissertação (Mestrado em Pesquisa Operacional) - Graduate School of Engineering and Management, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, 2000.

Castagne, S., Curran, R., Collopy, P., Implementation of value-driven optimization for the design of aircraft fuselage panels. **International Journal of Production Economics**, v. 117, p. 381-388, 2009.

Cates, G. R., Steele, M. J., Mollaghasemi, M., Rabadi, G., Methods and tools for aerospace operations modeling and simulation: modeling the space shuttle. In: WINTER SIMULATION

CONFERENCE, 34, 2002, San Diego, California. **Proceeding of the 2002 Winter Simulation Conference...**: Association for Computing Machinery, 8-11 dez, 2002. p. 754-762.

Chao, J. S., Graves, S. C., Reducing flow time in aircraft manufacturing. MIT Sloan School Working Paper 3539-93, 1992. Disponível em: <<http://web.mit.edu/sgraves/www/papers/chaograves/chaograves.htm>>. Acesso em: 23 out. 2018.

Chao, J. S., Graves, S. C., Reducing flow time in aircraft manufacturing. **Production and Operations Management**, v. 7, n. 1, p. 38-52, 1998.

Cheng, H., Li, Y., Zhang, K., Luan, C., Xu, Y., Li, M., Optimization method of fixture layout for aeronautical thin-walled structures with automated riveting. **Assembly Automation**, vol. 32, n. 4, p. 323-332, 2012.

Christ, D. K., Theory of constraints project management in aircraft assembly. Boeing, 2001. Disponível em: <<http://www.public.navy.mil/airfor/nae/AIRSpeed%20Documents/TOC%20Project%20Management%20in%20Aircraft%20Assembly.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

Colomi, A., Dorigo, M., Maffioli, F., Maniezzo, V., Righini, G., Trubian, M., Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems. **International Transactions Operations Research**, v. 3, n. 1, p. 1-21, 1996.

Composites World. **A400M cargo door: Out of the autoclave**. Disponível em: <<http://www.compositesworld.com/articles/inside-manufacturing-a400m-cargo-door-out-of-the-autoclave>>. Acesso em: abr. 2017.

Couch, J., **Performance robust project scheduling polices for naval ship maintenance**. 2016. 89f. Dissertação (Mestrado em Ciências Aplicadas) - Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de Dalhousie, Halifax, 2016.

Crute, V., Ward, Y., Brown, S., Graves, A., Implementing Lean in aerospace – challenging the assumption and understanding the challenges. **Technovation**, v. 23, p. 917-928, 2003.

Dale, R., Offline programming and simulation help Boeing use giant automated riveter on C-17 aircraft. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 28, n. 6, p. 478-482, 2001.

Davidz, H., Nightingale, D., Lean effects on aerospace program (LEAP) project: AMRAAM case study report – Lean Aerospace Initiative (LAI Report). Cambridge: Sociotechnical Systems Research Center, 2002. Disponível em: <http://lean.mit.edu/downloads/doc_download/225-lean-effects-on-aerospace-programs-leap-project-amraam-case-study-report>. Acesso em: abr. 2017.

Dar-El, E. M. Feuer, Z., SIBS – a job shop simulation-based scheduler. **Computer integrated Manufacturing Systems**, v. 5, n. 1, fev., p. 15-20, 1992.

Dar-El, E. M., Rubinovitz, J., Using learning theory in assembly lines for the new products. **International Journal of Production Economics**, v. 25, p. 103-109, 1991.

De Boer, R., Resource-Constrained Multi-Project Management: A Hierarchical Decision Support System. 1998. 187 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade de Twente, Enschede, 1998.

Deckro, R. F., Hebert, J. E., Resource constrained project crashing. **International Journal of Management Science**, v. 17, n. 1, p. 69-79, 1989.

Deloitte, US Aerospace & Defense Labor Market Study. Employment outlook upbeat, reversing job losses, February 2016. Disponível em: <<https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/us/Documents/manufacturing/us-ad-labor-market-study-2016.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

Demeulemeester, E., Minimizing resource availability costs in time-limited project networks. **Management Science**, v. 41, n. 10, p. 1590-1598, 1995.

Dorndorf, U., **Project scheduling with time windows**. Ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002.

Easa, S. M., Resource leveling in construction by optimization. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 115, n. 2, 1989.

Efthymiou, K., Shelbourne, B., Greenhough, M., Turner, C., Evaluating manufacturing systems robustness: an aerospace case study. **Procedia CIRP**, v. 72, p. 653-658, 2018.

Embraer. **Industrial Embraer Day 2006**. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/embraerri/industrial-embraer-day-2006>>. Acesso em: abr. 2017.

Enming, G., Flexible assembly technology of foreign aircraft. **Aeronautical Manufacturing Technology**, n. 9, p. 28-33, 2005.

Escudero, L. F., Salmeron, J., On a fix-and-relax framework for a class of project scheduling problems. **Annals of Operations Research**, v. 140, p. 163-188, 2005.

Fayaweera, N., Webb, P., Automated assembly of fuselage skin panels. **Assembly Automation**, v. 24, n. 4, p. 343-355, 2007.

Ferdowsi, B., Haggerty, A., Lean effects on aerospace program (LEAP) project: 737 fuselage case study report – Lean Aerospace Initiative (LAI Report). Cambridge: Sociotechnical Systems Research Center, 2002. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82034>>. Acesso em: abr. 2017.

Ferdowsi, B., Stanke, A., Lean effects on aerospace program (LEAP) project: F16 case study report – Lean Aerospace Initiative (LAI Report). Cambridge: Sociotechnical Systems Research Center, 2005. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/82009>>. Acesso em: abr. 2017.

Figeac-Aero. Disponível em: <<http://www.figeac-aero.com/>>. Acesso em: abr. 2017.

Fitzsimmons, V. R., **Littoral combat ship crew scheduling**. 2015. 43 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Pesquisa Operacional) – Naval Postgraduate School, Monterey, 2015.

Gastelum, V. E., Application of lean manufacturing techniques for the design of aircraft assembly line. 2002. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Sloan School of Management – Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2002.

Gemcor. Fuselage Fastening Systems. Disponível em: <<http://www.gemcor.com/wp/automation-products/fuselage-fastening-systems/>>. Acesso em: abr. 2017.

Giribone, P., Melioli, R., Cotto, S. P., Tonelli, F., Simulation models for the feasibility and reworking study of aircrafts. In: THE MODERN TECHNOLOGY IN THE INNOVATION PROCESS OF THE INDUSTRIAL ENTERPRISES, 5, Saabruecken, set., 2003. p. 21-26.

Glover, F., Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. **Computers & Operations Research**, v. 13, n. 5, p. 533-549, 1986.

Gómez, A., Ríos, J., Mas, F., Vizán, A., Method and software application to assist in the conceptual design of aircraft final assembly lines. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 40, p. 37-53, 2016.

Guldemon, T. A., Hurink, J. L., Paulus, J. J., Schutten, J. M. J., Time-constrained project scheduling. **Journal of Scheduling**, vol. 11, p. 137-148, 2008.

Guyon, I., Amine, R., Tamayo, S., Fontane, F., Analysis of the opportunities of industry 4.0 in the aeronautical sector. 10Th International Multi-Conference on Complexity, Informatics and Cybernetics. IMCIC 2019, Mar. 2019, Orlando, Estados Unidos da América, 2019.

Hartmann, S., Briskorn, D., A survey of variants and extensions of resource-constrained project scheduling problem. **European Journal of Operational Research**, vol. 207, p. 1-14, 2010.

Helgeson, W. B., Birnie, D. P., Assembly line balancing using ranked positional weight technique. **Journal of Industrial Engineering**, vol. 12, p. 394-398, 1961.

Heike, G., Ramulu, M., Sorenson, E., Shanahan, P., Moinzadeh, K., Mixed model assembly alternatives for low-volume manufacturing: The case of the aerospace industry. **International Journal of Production Economics**, v. 72, p. 103-120, 2001.

History. Disponível em: <http://cdn.history.com/sites/2/2014/01/woman_rivets_airplane_wing-P.jpeg>. Acesso em: abr. 2017.

Herroelen, W., Reyck, B., Demeulemeester, E., Resource-constrained project scheduling: a survey of recent developments, **Computers and Operations Research**, vol. 25, n. 4, p. 279-302, 1998.

Herroelen, W., Demeulemeester, E., Reyck, B., An integrated classification scheme for resource scheduling. Research Report, Department of Applied Economics, K.U. Leuven Belgium, 1999.

Herroellen, W., Demeulemeester, E., Reyck, B., A note on the paper “Resource-constrained project scheduling: Notation, classification, models and methods” by Brucker et al., **European Journal of Operational Research**, vol. 128, p. 679,688, 2001.

Herroelen, W., Leus, R., Robust and reactive project scheduling: a review and classification of procedures. **International Journal of Production Research**, v. 42, n. 8, 1599-1620, 2004.

Herroelen, W., Leus, R., Project scheduling under uncertainty: Survey and research potential. **European Journal of Operational Research**, v. 165, p. 289-306, 2005.

Hindelang, T. J., Muth, J. F., A dynamic programming algorithm for decision CPM networks. **Operations Research**, v. 27, n. 2, p. 225-241, 1979.

Horio, M., Suzuki, A., A solution method for manpower scheduling problems by RCPSP/ τ . In: THE NINTH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OPERATIONS RESEARCH AND ITS APPLICATIONS, 2010, Chengdu-Jiuzhaigou. **Proceedings...** Chengdu-Jiuzhaigou, China: 2010. p. 249-261.

Huang, C., Chang, H., Lin, C., Simulation and analysis for layout of aerospace sheet metal process with lean concept. **Materials Science Forum**, v. 505-507, p. 907-912, 2006.

Hurink, J. L., Kok, A. L., Paulus, J. J., Schutten, J. M. J., Time-constrained project scheduling with adjacent resources. **Computers & Operations Research**, v. 38, p. 310-319, 2011.

Johnson, P., Kulasiri, D., Sedcole, R., SIMMAT: An aircraft materials remanufacturing system simulation model. Part I: Background and Concept. Research Report No: 99/14, Lincoln University, 1999a.

Johnson, P., Kulasiri, D., Sedcole, R., SIMMAT: An aircraft materials remanufacturing system simulation model. Part II: Implementation and Evaluation. Research Report No: 99/15, Lincoln University, 1999b.

Kalton, K., Richards, R. A., Advanced scheduling technology for more efficient (Shorter) resource constrained schedules. In: AEROSPACE CONFERENCE, 2008, **IEEE**, mar. 2008.

Knust, S., Scheduling non-professional table-tennis leagues. **European Journal of Operational Research**, v. 200, p. 358-367, 2010.

Kolisch, R., Hartmann, S.: Heuristic algorithms for solving the resource-constrained project scheduling problem: Classification and computational analysis. In: Weglarz, J. (ed.) **Handbook on recent advances in project scheduling**, p. 147–178. Kluwer, Dordrecht (1999).

Kolisch, R., Hartmann, S., Experimental investigation of heuristics for resource-constrained project scheduling: An update. **European Journal of Operational Research**, v. 174, p. 23-37, 2006.

Kolisch, R., Padman, R., An integrated survey of deterministic project scheduling. **Omega**, vol. 29, p. 249-272, 2001.

Koné, O., Artigues, C., Lopez, P., Mongeau, M., Event-based MILP models for resource-constrained project scheduling problem. **Computer & Operations Research**, v. 38, n. 1, p. 3-13, 2011.

Lancaster, J., Ozbayrak, M., Evolutionary algorithms applied to project scheduling problems – a survey of the state-of-the-art. **International Journal of Production Research**, v. 45, n. 2, p. 425-450, 2007.

Lemos, F. K., Santoro, M. C., Sequenciamento de ordens com operações em lotes bidimensionais não-guilhotinados considerando atendimento de datas e ocupação da matéria-prima. In: 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2010. Bento Gonçalves. 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional - Livro de Resumos, 2010.

Lennox, K. M., Implementing pull production within an aerospace assembly operation. 2006. 42 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Sloan School of Management – Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2006.

- Little, J. D. C., A proof for the queuing formula: $L = \lambda W$. **Operations Research**, vol. 9, n. 3, p. 383-387, 1961.
- Liao, Y. Deschamps, F., Loures, E. F. R., Ramos, L. F. P., Past, present and future of Industry 4.0 – a systematic literature review and research agenda proposal. **International Journal of Production Research**, v. 55, n. 12, p. 3609-3629, 2017.
- Liu, P., Li, Y., Zhang, K., Cheng, H., Based on region division setup planning for sheet metal assembly in aviation industry. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers Part B: **Journal of Engineering Manufacture**, v. 227, 2012a.
- Liu, X., Ye, W., Wei, B., Leng, S., Research on multi-level modeling method for aircraft assembly line. **Advanced Materials Research**, v. 490-495, p. 538-542, 2012b.
- Lu, H., Liu, X., Pang, W., Ye, W., Wei, B., Modeling and simulation of aircraft assembly line based on Quest. **Advanced Materials Research**, v. 569, p. 666-669, 2012.
- Lu, R. F., Sundaram, S., Manufacturing process modeling of Boeing 747 moving line concepts. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2012, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 2002, p. 1041-1045.
- Lu, Y. Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. **Journal of Industrial Information Integration**, v. 6, p. 1-10, 2017.
- Malcon, D. G., Roseboom, J. H., Clark, C. E., Fazar, W., Application of a technique for research and development program evaluation. **Operations Research**, vol. 7, p. 646-669, 1959.
- Maniezzo, V., Mingozzi, A., A., Heuristic procedure for the multi-mode project scheduling problem based on Bender's decomposition. In: Węglarz, J. (Ed.), **Project Scheduling: Recent Models, Algorithms and Applications**. Kluwer, Dordrecht, p. 179-196, 1999.
- Martí, R., Resende, M. G. C., Ribeiro, C. C., Multi-start methods for combinatorial optimization. **European Journal of Operational Research**, v. 226, p. 1-8, 2013.
- Martins, R. A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In _____. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**, P. Cauchick (ed.), Editora Campus/Elsevier, Rio de Janeiro, 2009.
- Mingozzi, A., Maniezzo, V., Ricciardelli, S., Bianco, L., An exact algorithm for the resource-constrained project scheduling based on a new mathematical formulation. **Management Science**, v. 44, n. 5, 1998.

Morabito, R., Pureza, V. Modelagem e Simulação In _____. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção**, P. Cauchick (ed.), Editora Campus/Elsevier, Rio de Janeiro, 2009.

Möring, R. H., Minimizing costs of requirements in project networks subject to a fixed completion time. **Operations Research**, v. 32, n. 1, p. 89-120, 1984.

Morton, T. E., Pentico, D. W., **Heuristic scheduling systems: with applications to production systems and project management**. New York: John Wiley & Sons, 1993.

Müller-Merbach, H., Heuristics and their design: a survey. **European Journal of Operational Research**, v. 8, p. 1-23, 1981.

Murman, E. M., Walton, M., Rebentisch, E., Challenges in the better, faster, cheaper era of aeronautical design, engineering and manufacturing – Lean Aerospace Initiative (LAI Report). Cambridge: Sociotechnical Systems Research Center, 2000. Disponível em: <<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/1651>>. Acesso em: abr. 2017.

Nahmias, S., **Production and operation analysis**. 4 ed., McGraw-Hill: New York, 2008.

Nele, L., Caggiano, A., Teti, R., Autoclave cycle optimization for high performance composite parts manufacturing. **Procedia CIRP**, v. 57, p. 241-246, 2016.

Pagone, E., Efthymiou, K., Mahoney, B., Salonitis, K., The effect of operational policies on production systems robustness: an aerospace case study. **Procedia CIRP**, v. 81, 1337-1341, 2019.

Papaioannou, G., **A discrete event simulation framework for flexible job-shops with re-entrant flows**. A case study at RUAG Space AB Gothenburg, a satellite component manufacturer. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Department of Industrial and Materials Science, Chalmers University of Technology, Gothenburg, 2018.

Paul, H. J., Bierwirth, C., Kopfer, H., A heuristic scheduling procedure for multi-item hoist production lines. **International Journal of Production Economics**, v. 105, p. 54-69, 2007.

Platzer, M. D., U. S. aerospace manufacturing: Industry overview and prospects. Congressional Research Service, 2009.

Pinha, D. C., Rashpal, S. A., Senna, P., The combinatorial multi-mode resource constrained multi-project scheduling problem. **International Journal of Supply and Operations Management**, v. 3. n. 3, p. 1391-1412, 2016.

Pinedo, M. L., **Planning and scheduling in manufacturing and services**. New York: Springer, 2005.

Pinedo, M. L., **Scheduling: theory, algorithms and systems**. 3 ed., New-Jersey: Prentice-Hall, 2008.

Pochet, Y., Wolsey, L. A., **Production Planning by Mixed Integer Programming**. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer, 2006.

Pritsker, A. A. B., Watters, L. J., Wolfe, P. M., Multiproject scheduling with limited resources: a zero-one programming approach. **Management Science**, v. 16, n. 1, p. 93-108, 1969.

Reuters. Boeing delays plans for record 737 production until 2021. Disponível em: <<https://www.reuters.com/article/us-boeing-737max-production-exclusive/exclusive-boeing-delays-plans-for-record-737-production-until-2021-sources-idUSKBN1YG2H3>>. Acesso em: 20 abr. 2020.

Ríos, J., Mas, F., Menéndez, J. L., Aircraft final assembly line balancing and workload smoothing: a methodological analysis. **Key Engineering Materials**, v. 502, p. 19-24, 2012a.

Ríos, J., Mas, F., Menéndez, J. L., A review of the A400M final assembly line balancing methodology. In: THE 4th MANUFACTURING ENGINEERING SOCIETY INTERNATIONAL CONFERENCE: MESIC11, 21-23 Set 2011, Cadiz, Espanha. **Proceedings...** Melville, EUA: AIP, 2012b, v. 1431, p. 601.

Rodrigues, V. P., Morabito, R., Yamashita, S., Silva, B. J. V., Ribas, P. C., Ship routing with pickup and delivery for a maritime oil transportation system: MIP model and heuristics. **Systems**, vol. 4, n. 31, 2016.

Rooks, B., Automatic wing box assembly developments. **Industrial Robot: An International Journal**, vol. 28, n. 4, p. 297-302, 2001.

Russell, A., Taghipour, S., Multi-objective optimization of complex scheduling problems in low-volume low-variety productions systems. **International Journal of Production Economics**, v. 208, p. 1-16, 2019.

Russell, A., Taghipour, S., Multi-parallel work centers scheduling optimization with shared or dedicated resources in low-volume low-variety production systems. **Applied Mathematical Modelling**, v. 80, p. 472-505, 2020.

Schultmann, F., Sunke, N., Resource allocation in construction project: the contribution of resource-constrained project planning models. In: CONSTRUCTION MANAGEMENT AND ECONOMICS 'PAST, PRESENT AND FUTURE', 2007, Reading, Reino Unido. **Proceedings...** Reading, Reino Unido: Universidade de Reading, 2008. p. 1215-1226.

Schultz, S. R., Atzmon, J., A simulation based heuristic approach to resource investment problem (RIP). In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014, Savannah, Estados Unidos. **Proceedings...** Savannah: IEEE, 2014, p. 3411-3422.

Scott, H. A., Modeling aircraft assembly operations. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1994, Lake Buena Vista, EUA. **Proceedings...** Lake Buena Vista, EUA: IEEE, 1994, p. 920-927.

Schwedest, H. F., The Final Assembly of Aeroplanes. **Aircraft Engineering and Aerospace Technology**, v. 12, n. 3, p. 83-86, 1940.

Silva, B. J. V. da, **Programação de montagens em gabaritos com restrições de adjacência na indústria aeronáutica**. 2010. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Programação de Montagens em Gabaritos com Restrições de Adjacência na Indústria Aeronáutica. In: XV Elavio – Escuela Latino Americana de Investigación Operativa, 2010, Pacoti, Ceará. XV Elavio, 2010.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Yanasse, H. H., Programação da produção de montagens em gabaritos com restrições de adjacência na indústria aeronáutica. In: XLII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Bento Gonçalves, Rio Grande de Sul. **Proceedings...**, 2010, p. 1110-1120, ISSN 1518-1731, Publicado em CD, arquivo 72224.pdf.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Yanasse, H. H., Programação da produção de gabaritos de montagem com restrições de adjacência na indústria aeronáutica. **Revista Produção**, v. 21, n. 4, p. 696-707, 2011.

Silva, B. J. V., da, Morabito, R., Yamashita, D. S., Yanasse, H. H., Production scheduling of assembly fixtures in the aeronautical industry. **Computers & Industrial Engineering**, n. 67, p. 195-203, 2014a.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Yamashita, D. S., Otimização na programação de montagens na indústria aeronáutica. **Gestão & Produção**, v. 21, n. 1, p. 33, 2014b.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Planejamento de uma montagem estrutural aeronáutica de jatos utilizando abordagens de programação de projetos com recursos restritos e múltiplos modos. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 2, p. 254-266, 2015.

Silva, B. J. V. da, Morabito, R., Programação de Montagem Estrutural Aeronáutica Utilizando Programação de Projetos com Nivelamento de Recursos. In: XXV SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2018, Bauru, São Paulo. *Anais...* Bauru: Unesp, 2018.

Slack, N. Johnston, R., Chambers, S., Administração da Produção, 3ª ed. São Paulo, Atlas, 2009, 703p.

Shan, S., Hu, Z., Liu, Z., Shi, J., Wang, L., Bu, Z., An adaptive genetic algorithm for demand-driven and resource-constrained project scheduling in aircraft assembly. **Information Technology Management**, v. 18, p. 41-53, 2017.

Shaw, W. H., Li, Y. E., Provisioning avionics components in an e-business environment. In: ENGINEERING MANAGEMENT SOCIETY, Albuquerque, EUA. **Proceedings...** Albuquerque, EUA: IEEE, 15 ago. 2000.

Sonmez, R., Gurel, M., Hybrid optimization method for large-scale multimode resource-constrained project scheduling problem. **Journal of Management in Engineering**, vol. 32, n. 6, 2016.

Srinivasan, M. M., Ebbing, S. J., Swearingen, A. T., Woodward aircraft engine systems sets work-in-process levels for high-variety, low-volume products. **Interfaces**, v. 33, n. 4, p. 61-69, 2003.

Steringer, R., Zörrer, H., Zambal, S., Eitzinger, C., Using discrete event simulation in multiple system life cycle to support zero-defect composite manufacturing in aerospace industry. **IFAC PapersOnLine**, v. 52-13, p. 1467-1472, 2019.

Su, C. T., Santoro, M. C., Mendes, B. A., Constructive heuristics for project scheduling resource availability cost problem with tardiness. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 144, n. 8, 2018.

Talbot, F. B., Resource-constrained project scheduling with time-resource tradeoffs: The nonpreemptive case. **Management Science**, v. 28, n. 10, p. 1197-1210, 1982.

Tinker. **Tinker Air Force Base**. Disponível em: <<http://www.tinker.af.mil/News/Photos.aspx?igphoto=2001641027>>. Acesso em: abr. 2017.

The Whichita Eagle. **Textron Aviation prepping for the Longitude**. Disponível em: <<http://www.kansas.com/news/business/aviation/article60970892.html>>. Acesso em: abr. 2017.

Thörnblad, K., Strömberg, A. Patriksson, M., Almgren, T., Scheduling optimization of a real flexible job shop including side constraints regarding maintenance, fixtures, and night shifts. Chalmers University of Technology e Universidade de Gothenburg, Gothenburg, Suécia, 2013.

Disponível em: <<http://www.math.chalmers.se/Math/Research/Preprints/2013/11.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

Thörnblad, K., Strömberg, A., Patriksson, M., Almgren, T., Scheduling optimization of a real flexible job shop including fixture availability and preventive maintenance. **European Journal of Industrial Engineering**, v. 9, n. 1, 2015.

USA Today. **Boeing will boost 737 production, slow 777 rates**. Disponível em: <<https://www.usatoday.com/story/travel/flights/todayinthesky/2016/01/28/boeing-boost-737-production-but-slow-777-rates/79450198/>>. Acesso em: abr. 2017.

Underbrink, A. J., Williams, G. P. W., Genetic algorithms applied to assembly operations. **Proceedings SPIE 224, Knowledge-Based Artificial Intelligence Systems in Aerospace and Industry**, 1994.

Vallhagen, J., Almgren, T., Thörnblad, K., Advanced use of data as an enabler for adaptive production control using mathematical optimization – an application of Industry 4.0 principles. **Procedia Manufacturing**, v. 11, p. 663-670, 2017.

Vandenheede, L., Vanhoucke, M., Maenhout, B., A scatter search for the extended resource renting problem. **International Journal of Production Research**, v. 54, n. 16, 2016.

Van Peteghem, V., Vanhoucke, M. 2015. Heuristic methods for the resource availability cost problem. In Vol. 1 Handbook on project management and scheduling, ed. C. Schwindt e J. Zimmermann, 339-359. Cham, Suíça: Springer.

Verbeeck, C., Peteghem, V. V., Vanhoucke, M., Vansteenwegen, P., Aghezzaf, E., A metaheuristic solution approach for the time-constrained project scheduling problem. **OR Spectrum**, v. 39, n. 2, p. 335-371, 2017.

Wang, A., **Design and Analysis of production systems in aircraft assembly**. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1999.

Węglarz, J., Józefowska, J., Mika, M., Waligóra, G., Project scheduling with finite or infinite number of activity processing modes – A survey. **European Journal of Operational Research**, v. 208, p. 177-205, 2011.

Wilson, J. R., Vaughan, D. K., Naylor, E., Voss, R. G., Analysis of Space Shuttle ground operations. **Simulation**, v. 38, p. 187, 1982.

Wright, T. P., Factors Affecting the Cost of Airplanes. **Journal of the Aeronautical Sciences**, Vol. 3, n. 4, p. 122-128, 1936.

Wolters II, J. A., Optimizing the assembly sequence of an aerospace manufacturing process. 2000. 89 f. Dissertação (Mestrado de Ciências em Aeronáutica e Astronáutica) – Sloan School of Management – Department of Aeronautics and Astronautics, Massachusetts Institute of Technology, Boston, 2000.

Wolsey, L. A., **Integer Programming**. Willey-Interscience Series in Discrete Mathematics and Optimization. John Wiley&Sons, 1998.

Wuliang, P., Chengen, W., A multi-mode resource-constrained discrete time-cost trade-off problem and its genetic algorithm based solution. **International Journal of Project Management**, v. 27, p. 600-609, 2009.

Xiong, J., Leus, R., Yang, Z., Abbass, A. H., Evolutionary multi-objective resource allocation and scheduling in the Chinese navigation satellite system project. **European Journal of Operational Research**, v. 251, p. 662-675, 2016.

Xu, S., Stottler, R., Richards, R., Intelligent scheduling at NASA: application to ground operations at Kennedy Space Center. Stottler & Henke Associates, 2017. Disponível em: <<https://www.stottlerhenke.com/wp-content/uploads/2017/03/Intelligent-Scheduling-at-NASA-Application-to-Ground-Operations-at-Kennedy-Space-Center.pdf>>. Acesso em: abr. 2017.

Yamashita, D. S., Armentano, V. A., Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost. **Journal of Scheduling**, v. 10, p. 67-76, 2007.

Yamashita, D. S., Morabito, R., Um algoritmo exato para o problema de programação de projetos com custo de disponibilidade de recursos e múltiplos modos. **Pesquisa Operacional**, v. 27, n. 1, p. 27-49, 2007.

Yamashita, D. S., Morabito, R., A note on time/cost tradeoff curve generation for project scheduling with multi-mode resource availability costs. **International Journal of Operational Research**, v. 5, n. 4, 2009.

Yanasse, H. H., Silva, B. J. V., A production scheduling problem on an aerospace assembly fixture. In: 24th European Conference on Operational Research – EURO, 2010, Lisboa, Portugal. EURO XXIV, 2010. v. 1, p. 102-102.

Yu, T., Cai, H., The prediction of the man-hour in aircraft assembly based on support vector machine particle swarm optimization. **Journal of Aerospace Technology Management**, v. 7, n. 1, p. 19-30, jan.-mar., 2015.

Zanakis, S. H., Evans, J. R., Heuristic "Optimization": Why, When and How to Use It. **INFORMS Journal on Applied Analytics**, v. 11, n. 5, p. 84-91, 1981.

Zapata, J. C., Hodge, B. M., Reklaitis, G. V., The multimode resource constrained multi-project scheduling problem: alternative formulations, **AIChE Journal**, vol. 54, n. 8, 2008.

Ziarnetzky, T., Mönch, L., Biele, A., Simulation of low-volume mixed model assembly lines: modeling aspects and case study. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2014 Savannah, EUA. **Proceedings...** Savannah, EUA: IEEE, 2014, p. 1 – 12.

Zhang, J., Li, Y., Yu, J., Zhang, K., A new method for generating work breakdown structure on aircraft assembly scheduling. In: 4th INTERNATIONAL WIRELESS COMMUNICATION, NETWORKING AND MOBILE COMPUTING, Dalian, China. **Proceedings...**, Dalian, China: IEEE, 2008, p 1-4.

Zhongyi, M., Younus, M., Yongjin, L., Production planning and scheduling for the composite component manufacturing workshop. In: WORLD CONGRESS ON ENGINEERING AND COMPUTER SCIENCE, San Francisco, EUA. **Proceedings...** San Francisco, EUA: IAENG, out. 2010, p. 20-22.

Zhou, Y., Yang, J., Zheng, L., Multi-agent based hyper-heuristics for multi-objective flexible job shop scheduling: a case study in aero-engine blade manufacturing plant. **IEEE, Access**, v. 7, 2019.

Zhu, X., Ruiz, R., Li, S., Li, X., An effective heuristic for project scheduling with resource availability cost. **European Journal of Operational Research**, v. 257, n. 3, p. 746-762, 2017.