

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO E MESTRADO EM ENGENHARIA
MECÂNICA E DE MATERIAIS**

VAGNER ANDRADE DE OLIVEIRA

**PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UM
ESTALEIRO NÁUTICO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2011

VAGNER ANDRADE DE OLIVEIRA

PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UM ESTALEIRO NÁUTICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial à obtenção do título de “Mestre em Engenharia” - Área de Concentração em Engenharia de Manufatura.

Orientador: Prof. Luiz Carlos A. Rodrigues, Dr.

Coorientador: Prof. Leandro Magatão, Dr.

CURITIBA

2011

Aos meus pais Lázaro e Vilma pelo amor, carinho e
constante incentivo ao estudo
A minha esposa e amiga Paula, pelo amor e a
paciência durante este trabalho
e a Deus pela fé

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof. Dr. Luiz Carlos Abreu Rodrigues, pela orientação e paciência durante este período e também pela amizade, carinho e dedicação por acreditar em minha capacidade na execução deste trabalho.

Ao coorientador Prof. Dr. Leandro Magatão, pela amizade iniciada desde os trabalhos de graduação, e servir de exemplo não só a mim, como a muitos dentro da instituição, além do tempo dedicado, e por acreditar na proposta deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo Zibetti pela amizade e todo o incentivo e dicas durante o mestrado.

Ao Eng. Cláudio Glock de Souza pela amizade, e pelo auxílio na busca de um parceiro para este estudo.

Ao Eng. José Maria Cechelero pela abertura de sua empresa fornecendo um estudo de caso e acreditar que parcerias entre, empresas privadas e universidades, beneficiam a todos.

Ao Maurício Kazmierczak e ao Mário Kazmierczak pela ajuda na obtenção dos dados e informações do processo produtivo da empresa.

Ao Msc. Rodrigo Strzelecki Berndsen, pela amizade, parceria, e pelo incentivo constante, além da apresentação e indicação do professor orientador.

À instituição e ao PPGEM por proporcionar um ensino de qualidade.

À banca examinadora.

Aos meus colegas, pelo grande apoio durante o decorrer do mestrado.

Aos meus amigos, à minha família, pela compreensão, força, amor e dedicação.

OLIVEIRA, Vagner A. Programação da Produção de um Estaleiro Náutico. 2011. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

RESUMO

Este trabalho aborda a otimização do planejamento produtivo a curto-prazo de um estaleiro náutico. A atual competitividade deste setor motiva a necessidade do uso otimizado dos recursos fabris. Uma ação nessa direção é implantar sistemas computacionais para auxílio do processo de tomada de decisões operacionais buscando atender pedidos dentro de prazos desejados com uso racional dos recursos produtivos. A matéria prima utilizada é a fibra de vidro, envolvendo assim seus processos de fabricação, na confecção de modelos de produtos que concorrem pela utilização de um número limitado de recursos (e.g. postos de trabalho e moldes de laminação). O objetivo principal é minimizar a ociosidade do posto de trabalho gargalo na fabricação de peças entre um modelo e outro de embarcação. Foi elaborada uma abordagem computacional baseada em Programação Linear Inteira Mista (PLIM), onde o problema original é decomposto em problemas menores, que são facilmente resolvidos. Estes problemas menores consistem em um agrupamento menor de produtos, que foram chamados de campanhas. Após a geração das possíveis campanhas, um modelo matemático permite definir as campanhas que devem ser produzidas para atender à demanda de produtos. Na literatura consultada, evidenciaram-se poucos trabalhos com características similares à realidade da empresa estudada. Os resultados obtidos para as campanhas de produção determinadas e para *mix* de produção variados indicam que a abordagem proposta é capaz de tratar com sucesso o problema real proposto.

Palavras-chave: Planejamento da Produção, Processo de Fabricação, Programação Linear Inteira Mista, Estaleiro.

OLIVEIRA, Vagner A. Production Scheduling in a Nautical Shipyard. 2011. 127f. M.Sc. Thesis - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2011.

ABSTRACT

This work addresses the optimization of short term production planning in a nautical shipyard. The current competitiveness of this sector motivates the need for optimized use of manufacturing resources. An action in this direction is to employ computing systems that can improve the decision making of scheduling activities. It aims to meet the delivery due dates of products with rational use of productive resources. The used raw material is fiberglass, thus involving their manufacturing processes. And the models of products compete for the use of a limited number of resources (eg, workstations and lamination molds). The main objective is to minimize the idleness of the bottleneck workstation in the manufacturing of parts. A computational approach was developed based on Mixed Integer Linear Programming (MILP), where the original problem is decomposed into smaller problems that are easily solved. These smaller problems consist of a smaller cluster of products, which were named as campaigns. After the generation of possible campaigns, a mathematical model allows to define which campaigns should be produced to meet the demand of products. In literature, there are few researches driven to this sector. The results obtained for all the campaigns and for a varied production mix indicate that the proposed approach is able to successfully address this real problem.

Keywords: Production Planning, Manufacturing Process, *Mixed Integer Linear Programming*, Shipyard.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Estrutura de um problema de planejamento, programação e controle da produção de um estaleiro. Fonte: Pinto <i>et al.</i> (2007).	10
Figura 2.2 – Características dos sistemas de produção Fonte: Pinto <i>et al.</i> 2007.....	14
Figura 2.3 - Quadro comparativo dos sistemas de produção Fonte: Pinto <i>et al.</i> 2007.	15
Figura 2.4 - Tipos e padrões de demandas. Fonte: Lustosa <i>et al.</i> (2008).....	20
Figura 2.5 - Previsão de demanda no planejamento da produção. Fonte: Lustosa <i>et al.</i> (2008).....	20
Figura 2.6 – Exemplo da propagação de uma falha (vermelho sobre as demais etapas de fabricação de um produto. Fonte: Rodrigues e Magatão (2006).	22
Figura 2.7 - Esquema do modelo de planejamento agregado da produção e estoques. Fonte: Pinto <i>et al.</i> (2007).	28
Figura 2.8 – Exemplo de modelagem de Programação Linear (variáveis de decisão, dados e função objetivo). Fonte: Pinto <i>et al.</i> (2007).....	29
Figura 2.9 – Exemplo modelagem de Programação Linear (restrições). Fonte: Pinto <i>et al.</i> (2007).....	29
Figura 2.10 – Representação das variáveis $empty(j,k)$ e $wait(j,k)$ com a variável $rank(t,k)$	36
Figura 3.1 – Tipos de Embarcações Produzidas em Estaleiros.	40
Figura 3.2 – Divisão dos Blocos da Estrutura de Produto de um Navio . Fonte: PINTO <i>et al.</i> (2007).....	41
Figura 3.3 – Sequência dos processos de fabricação de uma embarcação de fibra de vidro e seus respectivos sistemas de produção.....	44
Figura 3.4 – Sequência dos processos de fabricação de uma peça de fibra de vidro e respectivo sistema de produção.....	45

Figura 3.5 - Modelos de barcos fabricados pelo estaleiro do estudo. Fonte: www.waybrasil.com.....	47
Figura 3.6 – Modelos de barco de pesca. Fonte: www.waybrasil.com.....	48
Figura 3.7 - Divisão das partes principais de um barco de pesca.	49
Figura 3.8 – Dimensões principais e representação da vista superior dos blocos de uma embarcação analisando a perda de área (escuro) no plano de arranjo físico 2D.	50
Figura 3.9 – Relação de precedência de todas as tarefas de fabricação de um barco de pesca.....	51
Figura 3.10 – Relação de precedência de todas as tarefas de fabricação de um barco de pesca.....	52
Figura 4.1 - Metodologia de desenvolvimento do trabalho.....	56
Figura 4.2 – Detalhamento das etapas e suas equações de processamento.	57
Figura 4.3 - Representação da Interface com o Usuário do Aplicativo de Programação da Produção. Fonte: Autoria Própria	71
Figura 4.4 – Exemplo de entrada de dados da demanda dos produtos na Interface com o Usuário.....	71
Figura 5.1 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q268.	75
Figura 5.2 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q290.	77
Figura 5.3 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação QZ21.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Regras usuais para sequenciamento de tarefas. Fonte: Lustosa <i>et al.</i> , 2008).....	18
Tabela 3.1 – Relação do agrupamento das tarefas,.....	53
Tabela 4.1 – Índices adotados nas expressões matemáticas.	58
Tabela 4.2 – Variáveis adotadas nas expressões matemáticas.....	58
Tabela 4.3 – Parâmetros adotados nas expressões matemáticas.	59
Tabela 4.4 – Possíveis campanhas a serem geradas.....	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5´S	Ferramenta do Sistema Toyota de Produção
ACOBAR	Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos
ATO	<i>Assembly to Order</i>
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CR	<i>Critical Ratio</i>
ERP	<i>Enterprise Resources Planning</i>
ETO	<i>Engeneering to Order</i>
FCS	<i>Continuous Flow System</i>
FIFO	<i>First in, First Out</i>
JIT	<i>Just in Time</i>
LIFO	<i>Last in, First Out</i>
LS	<i>Least Slack</i>
MFA	Menor Fila Adiante
MFD	Menor Folga Dinâmica
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MRP	<i>Material Resources Planning</i>
MRPII	<i>Manufacturing Requirements Planning</i>
MTO	<i>Make to Order</i>
MTS	<i>Make to Stock</i>
OPT	<i>Optimized Production Technology</i>
PCP	Programação e Controle da Produção
PERT	<i>Program Evaluation Review Technique</i>
PI	Programação Inteira

PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIB	Programação Linear Inteira Binária
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PPCPE	Planejamento, Programação e Controle da Produção de um Estaleiro
PT	Posto de Trabalho
RC	Tempo Remanescente
SPT	<i>Shortest Process Time</i>
STP	Sistema Toyota de Produção
UTFPR	Univerisdade Tecnológica Federal do Paraná

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	3
1.2 OBJETIVO.....	4
1.2.1 Objetivos Específicos	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	5
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. CARACTERÍSTICAS DO SETOR NÁUTICO NO BRASIL	7
2.1.2 Indústria Náutica.....	8
2.2 ESTRUTURA GERAL DE UM PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UM ESTALEIRO.....	9
2.2.1 Natureza das Decisões dentro do Planejamento e Programação da Produção de um Estaleiro	10
2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO.....	12
2.3.1 Classificação dos Sistemas de Produção Orientada ao Estoque.....	12
2.3.2 Classificação dos Sistemas de Produção Orientados ao Padrão de Demanda...	13
2.4 PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO	17
2.4.1 Programação da Produção Intermitente	17
2.4.2 Previsão e Planejamento de Demanda.....	19
2.5 ALOCAÇÃO DOS RECURSOS	21
2.6 CONCEITOS DE BASE DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA.....	23
2.7 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA APLICADA AO PLANEJAMENTO AGREGADO DE PRODUÇÃO.....	26
2.7.1 Planejamento Agregado de Produção e Estoques	27
2.8 MODELAGEM PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UM ESTALEIRO NÁUTICO	30
2.9 ANÁLISE DE FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM ESTALEIROS.....	32
2.9.1 Programação da Produção no Cenário de Estudo	33
2.10 ABORDAGENS DA LITERATURA PARA O SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO .	34
2.10.1 Modelo Proposto por Guéret <i>et al.</i> (2000).....	34
2.10.2 Definição do Início do Processamento.....	36
3. ESTUDO DE CASO.....	38
3.1 DEFINIÇÕES DO ESTALEIRO E DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO .	38
3.1.1 O Mercado de Embarcações.....	38

3.1.2	O Processo de Fabricação de Artefatos em Fibra de Vidro (<i>Spray Up</i>) no Cenário Estudado 42	
3.2	MODELOS DE EMBARCAÇÕES DO ESTALEIRO.....	46
3.2.1	Definições das partes.....	48
3.2.2	Relações de Precedência.....	51
3.2.3	Tempos de Processamento.....	53
4	MATERIAL E MÉTODOS	55
4.1	REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	56
4.2	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA PARA A PRIMEIRA ETAPA.....	57
4.2.3	Restrições de Temporização das Peças	61
4.2.4	Restrições de Temporização dos Produtos	64
4.2.4	Restrições de Temporização dos Produtos	66
4.3	ABORDAGEM PROPOSTA PARA A SEGUNDA ETAPA	66
4.3.1	Pós-Processamento da Temporização das Tarefas	69
4.4	INTERFACE COM O USUÁRIO	70
5	RESULTADOS	73
5.1	O USO DE CAMPANHAS: PRIMEIRA ETAPA DO SISTEMA PROPOSTO.....	73
5.1.1	Campanhas com Duas Unidades De Produtos.....	81
5.1.2	Campanhas com Três Unidades De Produtos.....	87
5.2	SEGUNDA ETAPA DO SISTEMA PROPOSTO	96
5.2.1	Cenário 1: Demanda de 7 Unidades	96
5.2.2	Cenário 2: Demanda de 14 Unidades	98
6	CONCLUSÕES.....	101
6.1	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	102
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104
	APÊNDICES	106
	APÊNDICE A – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO Q268	107
	APÊNDICE B – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO Q290	108
	APÊNDICE C – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO QZ21	109
	ANEXOS	110
	ANEXO A – RELAÇÃO DE PRECEDÊNCIA DAS TAREFAS (Q268).....	111
	ANEXO B – RELAÇÃO DE PRECEDÊNCIA DAS TAREFAS (Q290)	112
	ANEXO C – RELAÇÃO DE PRECEDÊNCIA DAS TAREFAS (QZ21).....	113

1 INTRODUÇÃO

A eficiência operacional dos complexos processos de fabricação de embarcações tem atraído um crescente interesse em pesquisas nos últimos anos. Este tipo de indústria está em grande expansão, imersa em uma série de mercados globais de alta competitividade que são caracterizados por serem extremamente dinâmicos.

Esta situação obriga as instalações dos estaleiros em focar seus esforços em atender seus clientes com produtos de qualidade a preços acessíveis, e com um prazo mínimo de entrega, buscando-se cada vez mais baixos tempos de processamento. Devido a complexidade construtiva das embarcações, via de regra de grande porte, ocorre a divisão produtiva em blocos menores.

A fabricação dos blocos é realizada para então iniciar a execução de submontagens e montagens de edificação da embarcação. Uma característica inerente ao processo de fabricação de uma embarcação é que os blocos possuem elevado peso e utilizam áreas de trabalho consideráveis, a falta de sincronia na execução das tarefas pode gerar atrasos na entrega do produto e ocasionar movimentação desnecessária no deslocamento de grandes peças, elevando assim o custo do produto.

O planejamento e programação da produção de um estaleiro não devem ser executados sem o auxílio de ferramentas adequadas aos planejadores, devido à quantidade e complexidade das tarefas. Entretanto, mesmo quando planejadores possuem demasiada experiência na execução de planejamentos/programações, essas tarefas podem consumir grande quantidade de tempo e grandes esforços para produzir apenas resultados satisfatórios.

Embora, em alguns casos, haja gerenciamento dos recursos através da automação do processo de planejamento e programação da produção, estas atividades ainda são problemas críticos para a melhoria da produtividade em estaleiros.

A semelhança da indústria naval com a indústria náutica, motiva o desenvolvimento de uma ferramenta de programação da produção das tarefas de fabricação e montagem de embarcações.

A intenção deste trabalho é analisar as características inerentes aos processos de fabricação de embarcações de fibra de vidro (Setor Náutico) e conciliar pesquisas

recentes sobre planejamento e programação das tarefas de produção em ambientes produtivos semelhantes.

A manufatura de embarcações náuticas em fibra de vidro caracteriza-se por apresentar os sistemas de produção intermitente repetitivo na fabricação das peças em fibra de vidro (blocos), e um sistema de produção intermitente sob encomenda nas operações de montagem. Esta caracterização é detalhada no Capítulo 2. No estudo de caso real, a identificação de um posto de trabalho gargalo dentro destes sistemas de produção permite a exploração de um melhor sequenciamento das ferramentas (moldes) necessário para a fabricação dos blocos principais que compõe uma embarcação. Se houver atrasos na fabricação das peças, essa situação é propagada para as demais tarefas de fabricação e montagem da embarcação.

O estudo do planejamento e programação da produção nos setores naval e náutico dentro da literatura brasileira e mundial ainda é escasso. Geralmente é restrito a alguns resultados de parcerias realizadas entre universidades e empresas do ramo naval, focado para produção de embarcações de grande porte. Por exemplo, o Daewoo¹, um dos maiores estaleiros do mundo localizado na Coreia do Sul, realizou uma parceria com o Instituto de Ciência e Tecnologia Avançado Coreano para desenvolver um sistema de auxílio às tomadas de decisão das atividades de planejamento e programação das tarefas de produção e do arranjo físico de determinadas áreas dentro do estaleiro. Os resultados dos estudos coreanos de KOH *et al.* (2008), LEE *et al.* (1997) e PARK *et al.* (1996) fazem acreditar que soluções similares podem ser empregadas na solução de problemas semelhantes em indústrias brasileiras do setor náutico e naval.

Os indícios de uma possível elevação de demanda da produção nos estaleiros brasileiros geram a necessidade de manter o mesmo nível tecnológico frente aos competidores internacionais na produção de embarcações e grandes estruturas. Este estudo objetiva propor uma abordagem de solução para um problema do setor náutico que possui características semelhantes a problemas tratados no planejamento e programação da produção de outros estaleiros.

Devido à fragmentação deste setor em diversas indústrias verifica-se que pouco se tem feito para promover um aumento da produtividade das empresas

¹ Daewoo Shipbuilding Co. – Um dos maiores estaleiros de embarcações navais de todo o mundo, localizado na Coreia do Sul.

responsáveis pela fabricação das embarcações náuticas que irão auxiliar a utilização dos grandes navios e das plataformas de petróleo em alto mar, como também no auxílio de fabricantes de embarcações destinadas a prática do lazer e do turismo. No Brasil é possível perceber que este mercado vem crescendo cada vez mais no decorrer dos anos, na fabricação de embarcações para diversas funções, de produção seriada ou não. Este segmento de apoio é classificado como foco inicial da retomada recente da indústria naval brasileira. (RUAS *et al.* 2009)

Os objetivos do planejamento e programação da produção podem ser variados. Em geral, sistemas de planejamento e programação da produção perseguem objetivos de satisfação da data de entrega, máxima utilização de recursos de mão de obra e máquinas, minimização de tempos de espera entre as tarefas de processamento de uma embarcação e inventário de produto final, bem como minimizar os custos de fabricação.

As restrições típicas a este planejamento incluem a capacidade dos postos de trabalho, disponibilidade hora-homem, prazo de entrega, precedência entre as tarefas, tempos de espera máximos aceitáveis para fabricação dos blocos e operações de montagem e acabamento.

Como consequência, utilizar a estratégia de desenvolvimento de um eficiente sistema de planejamento de curto-prazo torna-se uma das alternativas para alcançar competitividade, respondendo rapidamente às oscilações de demanda do mercado.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O estaleiro náutico abordado produz embarcações por meio da laminação em fibra de vidro. No caso estudado, cerca de 10 a 20 embarcações são produzidas mensalmente. As ordens de produção são geradas no momento do uso com base em políticas ou modelos de reposição. Ao concretizar o pedido de compra do cliente, a ordem é enviada ao programador de produção. Assim, as demandas variam conforme a quantidade a ser produzida e ao modelo de embarcação requerida.

A dimensão de alguns moldes e peças faz com que o fluxo produtivo seja interrompido diversas vezes para disponibilizar espaço suficiente para a produção. Essas interrupções geram um transtorno grande para a eficiência de produção e para a entrega das peças no prazo determinado. Dificultando a utilização em máxima eficiência do posto de trabalho gargalo.

Existe, assim, um desafio de realizar um bom planejamento e programação da produção. Possíveis interrupções geram ineficiência dos postos de trabalho do processo produtivo.

No problema abordado, o fluxo de trabalho envolvendo as ferramentas de fabricação dos blocos (fluxo de moldes) precede o fluxo de peças de montagem. Assim, interrupções em processos em que ferramentas estejam envolvidas impactam em operações seguintes, fato que é detalhado na subseção 2.5 e ilustrado na figura 2.7.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho objetiva propor uma abordagem de solução otimizada para o planejamento e programação da produção de um estaleiro náutico, auxiliando o processo de tomadas de decisões operacionais. Adicionalmente, objetiva-se que a abordagem de solução proposta apresente soluções otimizadas para estudos de caso reais.

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos principais do trabalho são a seguir elencados:

- Encontrar um estudo de caso real, onde a abordagem de solução possa ser analisada, desenvolvida e testada. No Brasil, de modo geral, estaleiros náuticos possuem origem familiar e sequer utilizam ferramentas disponíveis para controle da produção. Assim, abordagens de otimização da produção não são usuais no contexto abordado, havendo necessidade de uma “quebra de paradigma”;
- Realizar a coleta de parâmetros de entrada de conjunto de modelos de embarcações de um estaleiro real, observando-se as características do sistema produtivo. Esta premissa de pautar o trabalho em um estudo de caso real onera consideravelmente a carga de trabalho desta dissertação, demandando a coleta *in loco* das informações necessárias à abordagem proposta;
- Fragmentar o complexo sistema de produção de embarcações náuticas, além de caracterizar as variáveis envolvidas e equacioná-las por meio de um modelo matemático de planejamento e programação da produção. Nesta dissertação,

algumas expressões do modelo foram extraídas de Guéret *et al.* (2000). O modelo matemático proposto utiliza como benefício à existência de um gargalo produtivo;

- Desenvolver uma interface gráfica de auxílio à caracterização das soluções obtidas, demonstrando a temporização inicial e final das tarefas necessárias à confecção de todas as peças em fibra de vidro para cada modelo do conjunto de embarcações náuticas do problema real analisado.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este capítulo inicial introduz e conceitua, de forma sucinta, a proposta do presente trabalho.

Na sequência, o Capítulo 2 de Revisão Bibliográfica, descreve trabalhos que contextualizam e auxiliam o entendimento do problema abordado, apontando-se fontes bibliográficas para eventuais aprofundamentos.

O Capítulo 3, nominado Estudo de Caso, detalha características do estaleiro náutico real abordado, seus produtos, processos de fabricação e características de operação.

No Capítulo 4, Material e Métodos, a metodologia de pesquisa aplicada nesta dissertação é esboçada. Apresenta-se a abordagem de solução desenvolvida, a qual é baseada em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM), e a aplicação desta abordagem em um estudo de caso real. Este estudo envolve a programação das tarefas de fabricação de peças em fibra de vidro de embarcações náuticas do estaleiro descrito no Capítulo 3.

O Capítulo 5, Resultados, apresenta saídas gráficas provenientes de interface desenvolvida para o usuário do sistema, resultados computacionais e discussões a partir de saídas obtidas, geradas a partir de dados reais do estaleiro em estudo.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, incluindo-se sugestões de continuidade para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Durante anos observou-se a estagnação da indústria marítima brasileira. A falta de investimentos no setor obrigou estaleiros nacionais a produzir barcos e navios, somente quando estaleiros estrangeiros não possuíam capacidade em suas instalações ou quando não possuíam interesse em projetos com baixa demanda, resultando, assim, em uma baixa atividade econômica do setor no país (BNDES, 2002; DIEESE, 1998).

A partir dos anos 80 e 90 poucas empresas do setor arriscaram-se a investir na produção de barcos e navios para utilização do mercado interno. Recentemente, a descoberta de novas reservas de petróleo em alto mar no Brasil, segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2006), fez com que os investimentos fossem retomados, reaquecendo o setor e gerando a expectativa de melhores cenários em um futuro próximo. Dessa forma, tornam-se iminente a produção de novos projetos em território nacional, projetos que envolvem navios de transporte de carga, ou barcos que auxiliam a execução das atividades do setor petrolífero até embarcações de lazer. Diversos estaleiros brasileiros estão em crescente busca por melhor eficiência de seus processos produtivos e este provável aumento da produção da indústria naval tem sido objeto de análise de gerências de muitas organizações deste segmento.

O setor da construção naval e marítima é considerado como um setor estratégico. Suas atividades de controle nacional de rotas, frotas e estaleiros podem fazer parte também da estratégia de segurança de países, bem como proporcionar uma atividade altamente lucrativa e vital no desenvolvimento da economia de uma nação.

Devido à fragmentação deste setor em diversas indústrias verifica-se que pouco se tem feito para promover um aumento da produtividade das empresas responsáveis pela fabricação de embarcações náuticas, as quais auxiliam o uso de grandes navios e plataformas de petróleo em alto mar, além de serem destinadas a lazer e turismo. No Brasil é possível perceber que este mercado vem crescendo cada vez mais no decorrer dos anos, na fabricação de embarcações para diversas

funções, de produção seriada ou não. Este segmento de apoio é classificado como foco inicial da retomada recente da indústria naval brasileira (RUAS *et al.*, 2009).

Segundo Coutinho *et al.* (2006), o setor de construção naval, similarmente ao setor náutico, emprega uma quantidade enorme de trabalhadores e promove a demanda de diversos outros segmentos na cadeia de suprimentos navais. Além disto, os países que disputam o mercado mundial no setor direcionam seu foco cada vez mais na necessidade de um corpo técnico capacitado para o segmento, focando na pesquisa, desenvolvimento e projeto de novos produtos e novas estratégias organizacionais e produtivas. Segundo Weiss (1990), a competitividade das empresas navais é proveniente de sua capacidade de gestão do processo produtivo, já que necessitam de mão de obra qualificada e treinada para maior integração com sua cadeia de suprimentos. Essa mão de obra dentro da indústria marítima nacional é encontrada em três segmentos de processos que atuam na fabricação de embarcações. Assim, de acordo com Weiss (1990), destacam-se os mercados de:

- I) Construção naval para navios de grande porte e para transporte de pessoas e objetos;
- II) O mercado da indústria de construção naval militar; e,
- III) O mercado da indústria de construção náutica, onde são fabricados barcos menores para auxiliar o transporte da tripulação dos navios, e também embarcações de lazer.

O objeto de estudo da presente dissertação classifica-se no segmento de mercado de construção náutica. Características principais deste segmento de embarcações serão elencadas na subseção 2.1.

2.1. CARACTERÍSTICAS DO SETOR NÁUTICO NO BRASIL

Este setor engloba atividades que são uma importante fonte de emprego e renda e se desenvolve continuamente para suprir as necessidades crescentes da náutica e do turismo náutico no Brasil e no mundo.

Segundo o relatório da ACOBAR (2005), o segmento náutico no Brasil tem sua origem na criação de pequenos estaleiros. Apenas entre as décadas de 70 e início

de 80 o setor começa a ganhar ares mais sólidos para a consolidação desse mercado no cenário nacional. Neste período, inicia-se a fabricação profissional das embarcações por estaleiros especializados, assim como empresas que abasteciam o mercado de insumos e acessórios.

O crescimento vertiginoso deste segmento é evidenciado na década de 90 na abertura do mercado nacional. Logo no início desta abertura de mercado, o segmento náutico nacional insere-se na avaliação das melhores práticas de processos, produtos e tecnologias internacionais empregadas no setor náutico industrial. Com isso, várias adaptações foram implantadas nos fabricantes nacionais que contribuíram para a evolução do setor e aumento da competitividade dos produtos nacionais frente aos produtos importados (MOURA, 2008).

A frota nacional em embarcações de esporte e lazer está estimada em cerca de 53.000 unidades, mas levando em consideração apenas embarcações acima de 14 pés, que corresponde a aproximadamente 4,30 metros. Nesta classificação estão inclusos embarcações movidas à vela e a motor, pequenos barcos de apoio, monotipos e barcos de competição *offshore*. Aproximadamente 85% da frota nacional de esporte e lazer, é composta por embarcações de até 32 pés, correspondem a aproximadamente 9,75 metros. Esses números são oriundos de estudos realizados pela Associação Brasileira dos Construtores de Barcos e seus Implementos, em marinas, iates-clubes, estruturas de apoio náutico, fábrica e revendedores de todo o segmento náutico brasileiro no ano de 2005 (ACOBAR, 2005).

2.1.2 Indústria Náutica

Os estudos de estratégia competitiva relatados por Porter (1980) caracterizam que nos Estados Unidos a indústria de embarcações de fibra de vidro, material de uso comum na maioria das indústrias brasileiras do segmento náutico, é um típico exemplo de uma indústria fragmentada. Ou seja, é uma atividade onde a quantidade de produtores é alta e onde a concentração da produção por poucas empresas é improvável.

Tipicamente, no entanto, cada país, ou região, tem os seus modelos de embarcações características que atendem aos requisitos específicos de seus modelos culturais, formas e maneiras de uso, além do clima e da geografia locais.

No caso brasileiro, a indústria de embarcações, caracterizadas como um bem de consumo semidurável sofre grandes variações de demanda. Somam-se à variação sazonal anual da demanda, onde as vendas tendem a ser maiores em meses mais quentes e nos períodos que antecedem férias escolares, variações relativas aos desequilíbrios da economia e ainda efeitos de período. Devido à grande variedade de modelos, e à variação da demanda, os sistemas de produção utilizados pelos estaleiros são complexos, fato que dificulta o planejamento e a programação da produção.

Na indústria naval e náutica, as empresas estão cada vez mais propensas a despendar esforços para aplicar novos conceitos produtivos, baseados em técnicas de otimização, ao processo de fabricação de barcos, navios e grandes estruturas como, por exemplo, plataformas de petróleo.

Com isso, a busca por ferramentas que auxiliem as decisões do planejamento e programação de produção, transforma-se em fator inestimável dentro do processo de edificação de uma embarcação.

2.2 ESTRUTURA GERAL DE UM PROBLEMA DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO DE UM ESTALEIRO

Planejar é executar uma ação a fim de evitar eventuais desvios no futuro. Em uma abordagem *top down*, as decisões de alto nível tendem a ser de longo prazo e mais abrangentes além de serem tomadas anteriormente às decisões de níveis inferiores, pois estas possuem horizonte temporal menor e maior detalhamento.

O trabalho realizado por Pinto *et al.* (2007) do Centro de Estudos de Gestão Naval, da Universidade de São Paulo, indica que o problema de planejamento e programação da produção de um estaleiro é abordado de forma análoga à realizada em empresas do setor metal-mecânico. Em um primeiro momento é necessário analisar conceitos de longo prazo, chamados de estratégicos.

As decisões referentes à estratégia de planejamento direcionam as definições de médio prazo, chamado planejamento tático. Este, por sua vez, direciona as

decisões de nível operacional, de prazo curto e maior detalhamento. O setor de Planejamento, Programação e Controle da Produção de um Estaleiro (PPCPE) se enquadra no planejamento tático e operacional, deixando, o planejamento estratégico global e das funções para pessoas da alta administração. A figura 2.1, ilustra a hierarquia de planejamento.

Dentro desta hierarquia de planejamento, será apresentada a seguir (seção 2.2.1) uma breve descrição de filosofias, métodos, variáveis e soluções que regem a eficiência e precisão do planejamento e programação de sistemas produtivos, com base nos trabalhos de diversos autores.

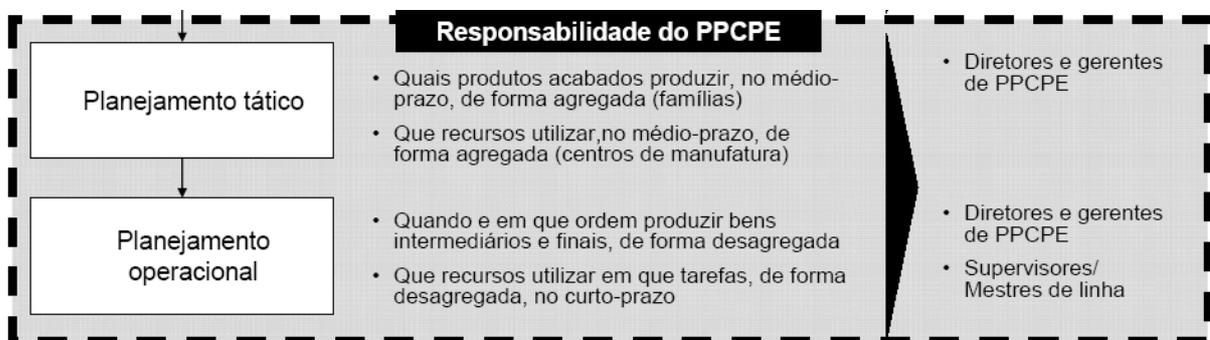


Figura 2.1 – Estrutura de um problema de planejamento, programação e controle da produção de um estaleiro. Fonte: Pinto *et al.* (2007).

2.2.1 Natureza das Decisões dentro do Planejamento e Programação da Produção de um Estaleiro

Em um planejamento define-se onde se quer chegar, o que deve ser feito, quando fazer, como fazer e em que sequência executar o trabalho. Os conceitos tradicionais de planejamento estratégico originaram-se na área militar e no século XX começaram a ser executados no mundo empresarial.

Dentro de uma empresa, as principais diretrizes, decisões, metas e objetivos de longo prazo fazem parte da estratégia competitiva. A partir dela é realizado o planejamento estratégico global, definindo quais são os clientes e quais necessidades serão atendidas pelo bem ou serviço ofertado.

Os diversos setores dentro de uma empresa devem cumprir os objetivos, políticas e procedimentos orientados pela estratégia competitiva. Determinam-se, assim, estratégias para cada um dos setores quanto ao planejamento de suas

funções. O corpo administrativo da empresa é responsável por garantir a execução desta estratégia e coerência prática das decisões tomadas nos diversos níveis e setores. Diversos processos decisórios de planejamento e programação da produção cooperam e atuam em diferentes níveis dentro de uma empresa. A seguir, será apresentada uma lista de decisões no escopo de cada nível hierárquico da estratégia de produção, segundo (LUSTOSA *et al.*, 2008):

No nível Estratégico:

Qual é a demanda do mercado?

Qual a estratégia organizacional para atender as demandas do mercado?

Qual é a capacidade da planta a ser instalada?

Como implantar a gestão da produção? (tecnologia, instalações, financiamento, etc.)

Quais riscos inerentes a operação que impactam no custo?

Que indicadores de desempenho devem ser empregados para o planejamento e o controle dos sistemas de produção?

Qual o composto (ou mix de produtos a ser produzido)?

Qual o valor agregado ao cliente (e aos acionistas)?

No nível Tático:

Que políticas de produção podem ser empregadas? Exemplo: variação da mão de obra? Produção a uma taxa constante? Minimizar Estoques? Aceitar atraso nas entregas?

Quais os referenciais de excelência para orientar as premissas de projeto e de operação para processos e produtos?

Quais os insumos necessários (pessoas, instalações, materiais, fornecedores, etc.)?

Que processos irão compor o sistema produtivo?

Qual a organização do Planejamento e Controle da Produção?

Qual o tipo do sistema de produção? Empurrar a produção? Puxar? Gerenciar Gargalos?

Qual o tipo de organização da produção?

Qual é o tipo de arranjo físico?

Qual o preço final e os custos de produção?

Qual a qualidade do produto ou serviço?

Qual o grau de flexibilidade da produção?

Qual o espaço necessário para produzir determinada demanda?

No nível Operacional:

Qual o tipo de organização da produção?

Qual o tamanho do lote?
Quando deve ser produzido?
Em qual máquina deve ser produzido?
Qual o sequenciamento da produção nas máquinas?

A dificuldade em realizar um bom planejamento e programação das tarefas de produção depende da variedade de produtos a se fabricar e da quantidade a se produzir.

Dessa forma, é importante destacar que cada tipo de sistema de produção possui métodos, ferramentas e maneiras diferentes de tratar a programação da produção e o planejamento do espaço físico para execução das tarefas de fabricação dos produtos. No setor naval e náutico, identificam-se, majoritariamente, os sistemas de produção por projetos e intermitente (Por ordem, Por Lotes e Em Linha). A subseção 2.3 detalha estes sistemas de produção.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS SISTEMAS DE PRODUÇÃO

Existem algumas maneiras de classificar os sistemas de produção. Neste estudo são utilizados os critérios orientados à relação de estocagem do produto, e ao padrão de demanda e fluxo de produção.

2.3.1 Classificação dos Sistemas de Produção Orientada ao Estoque

Uma maneira de classificar o sistema de produção de uma empresa é caracterizar a posição dos estoques que compõe o processo produtivo, além de informar sobre a complexidade do fluxo de materiais. Orientado por critérios baseados em condições de estocagem, Lustosa *et al.* 2008 apresentam a classificação a seguir elencada:

MTS – Make to Stock: Significa “produzir para estoque”. São produtos padronizados, com rápido atendimento ao cliente. O sistema baseia-se fortemente em previsões de demanda e apresenta alto custo de estoque. Exemplos: produtos de prateleira e de consumo geral.

ATO – Assemble to Order: Significa “montagem sob encomenda”. São produtos cuja característica é a possibilidade de pré-fabricar subconjuntos

(ou módulos) que serão posteriormente montados de acordo com o pedido do cliente. Tal característica pode levar à diferenciação, com aumento da variabilidade. Possuem prazo médio de atendimento ao cliente, incidindo custos razoáveis de estoque. Exemplo: computadores pessoais.

MTO – Make to Order: Significa “produzir sob encomenda”. A etapa de produção só se inicia após o recebimento formal do pedido do cliente. O prazo de atendimento é alto, e os estoques concentram-se no início da cadeia (entradas do processo).

ETO – Engineer to Order: Significa “engenharia sob encomenda”. É aplicado a projetos dos quais o cliente participa desde o início, antes mesmo da colocação do pedido. Não há estoque de matéria prima antecipada, até mesmo porque, na maioria das vezes, a definição da matéria-prima faz parte do projeto. A complexidade do fluxo de materiais é altíssima, pois a variabilidade é alta e o volume baixo. O prazo de entrega é muito longo. Os custos com estoque em processo costumam ser elevados, dada a dificuldade de sincronismo na cadeia produtiva. Exemplo: construção de navios, obras públicas.

Portanto, o padrão de forma de chegada dos pedidos define a maneira como deve ser analisado e programado o sistema de produção. Em estaleiros é comum encontrar a forma ATO (*Assembly to Order*) e ETO (*Engineer to Order*).

2.3.2 Classificação dos Sistemas de Produção Orientados ao Padrão de Demanda

As formas básicas de produção em um sistema de manufatura podem ser classificadas conforme Pinto *et al.* (2007): **produção contínua, produção intermitente (repetitiva ou sob encomenda) e produção por projetos**. A determinação da melhor forma de produção é função do padrão da demanda, características do produto, tecnologias disponíveis, tipo de fluxo de produção, entre outros.

Os tipos de fluxo de produção utilizados majoritariamente por empresas do setor que trabalham com produção intermitente (repetitiva ou sob encomenda) são de acordo com (PINTO *et al.*, 2007):

- i) **flow-shop**, onde o arranjo físico é sequencial e o roteiro de produção é bem definido;
- ii) **job-shop**, onde o processo é muitas vezes irregular, ocorrendo retornos ou repetição de ordens de operações numa mesma máquina

Nas empresas que utilizam sistemas de produção **por projetos**, o produto a ser manufaturado é único ou de muito baixa demanda. Neste caso, via de regra, não é permitido estoque ao final da produção, sendo um sistema de difícil planejamento na organização das inúmeras atividades. A figura 2.2 ilustra as características principais dos sistemas de produção contínua, intermitente e por projetos.

A figura 2.3 apresenta um comparativo os sistemas de produção contínua, intermitente e por projetos, ilustrando a importância de algumas variáveis envolvidas acerca de cada um dos sistemas de produção.

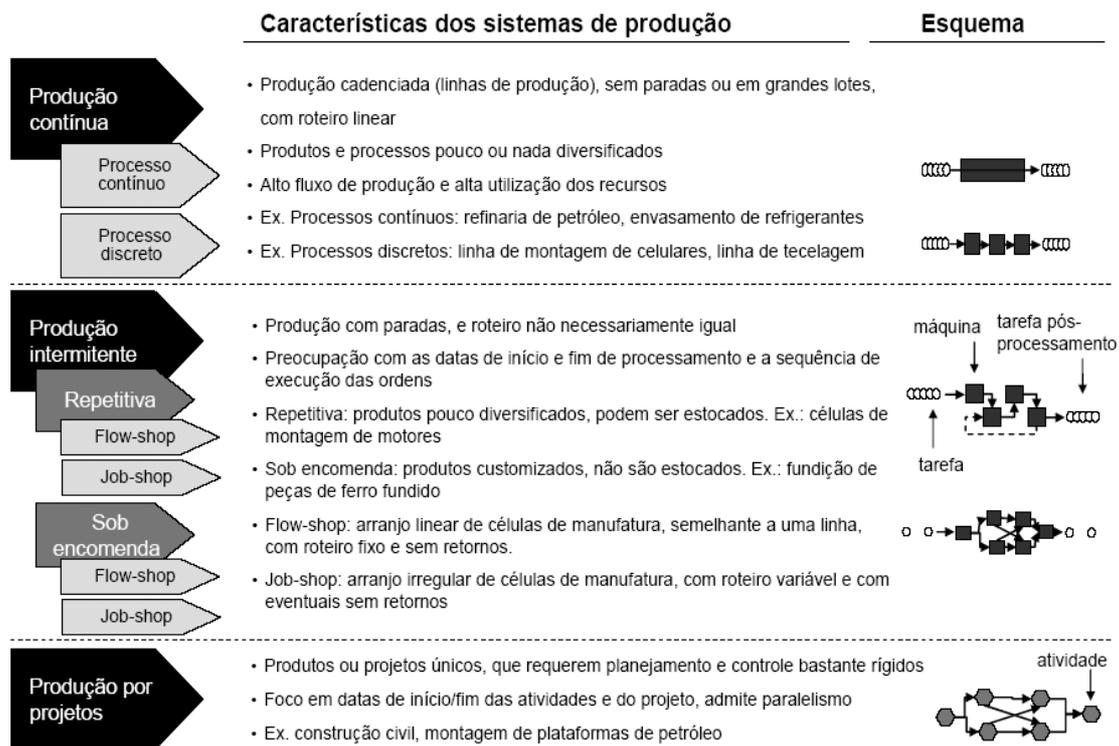


Figura 2.2 – Características dos sistemas de produção Fonte: Pinto *et al.* 2007.

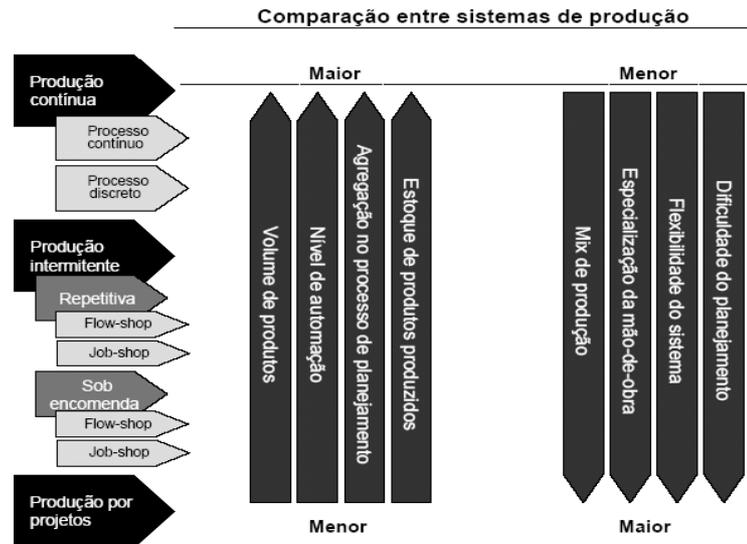


Figura 2.3 - Quadro comparativo dos sistemas de produção Fonte: Pinto *et al.* 2007.

Com base nos estudos realizado por Pinto *et al.* (2007) por serem dirigidos à indústria naval, as subseções 2.3.2.1, 2.3.2.2 e 2.3.2.3 descrevem os tipos de sistemas de produção identificados pelos autores, os quais aplicam-se à realidade produtiva de estaleiros. Há de se lembrar, contudo que em uma indústria de fabricação de embarcações é possível encontrar combinadamente a utilização de mais de um sistema de produção no processo produtivo da embarcação.

2.3.2.1 Modelagem em sistemas de produção por projetos

Este tipo de sistema objetiva minimizar o tempo de projeto. Deve-se respeitar os limites de utilização dos recursos, programando as atividades do projeto em função das necessidades do cliente e dos recursos disponíveis. Geralmente, a execução deste tipo de sistema é única ou envolve poucas unidades de produto. Deve ser dada bastante atenção às datas de execução das atividades (ou tarefas), principalmente as que fazem parte do caminho crítico de produção.

2.3.2.2 Modelagem em sistemas de produção intermitente repetitiva

Ocorre quando a produção é realizada de maneira descontínua, por meio de ordens processadas em diversas máquinas ou em células de manufatura. A

produção dessas ordens é feita em lotes, obtendo-se maior volume de produção e padronização que nos sistemas de produção intermitente sob encomenda. Devido à sua complexidade e diversificação do *mix* de produção, há um número elevado de diferentes tempos de fabricação e trocas de ferramentas a serem observados. Estas diferenças de tempos podem ser oriundas de, por exemplo, processamento de tarefas distintas em um mesmo posto de trabalho. Assim, é importante observar as datas de início e fim do processamento de cada tarefa, necessitando-se de critérios e métodos de sequenciamento das ordens nos postos de trabalho.

Dependendo da configuração do sistema e do roteiro de produção, pode-se classificar esses sistemas em *flow-shop* ou *job-shop*. Em sistemas *job-shop* cada tarefa tem seu próprio roteiro pré-definido, podendo ocorrer vários retornos para uma etapa (ou posto de trabalho) anterior. Os sistemas *flow-shop*, possuem o roteiro de fabricação fixo, e sem retornos, formando a lógica de “linha de produção”. A formação de estoques intermediários ou formação de fila entre estações pode ocorrer tanto no *job-shop* quanto no *flow-shop*.

Assim, sequenciamentos, produtivos otimizados podem diminuir tempos de espera para a execução de tarefas, fato relevante, principalmente em um recurso gargalo, ou seja, aquele que dita o ritmo de todo o sistema. Contudo os problemas a serem abordados tendem a ser complexos de serem resolvidos, envolvendo um número elevado de possibilidades de soluções.

2.3.2.3 Modelagem em sistemas de produção intermitente sob encomenda

Neste sistema, a fabricação ocorre somente por encomendas e o produto final não é estocado. Assim, possui um volume de produção menor e um grau de customização alto em relação aos sistemas por projetos e por produção intermitente repetitiva.

Quando é recebida uma encomenda, ela atua como um disparo para a linha de produção, tendo o mesmo efeito de uma ordem de produção. Se há muitas ordens de produção a serem feitas, a programação da produção deve ser capaz de sequenciar de maneira eficiente uma produção intermitente repetitiva. A utilização de uma lista FIFO (*First in, First Out*) acaba sendo assumida como um padrão.

2.4 PLANEJAMENTO E PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO

Conhecidas as políticas de gerenciamento e as naturezas de decisões, deve-se definir os recursos necessários à produção de um determinado produto. Adicionalmente deve ser realizada a programação (agendamento) das tarefas necessárias à produção do mesmo. Isto é, definir quando e onde executar cada tarefa de modo que estas execuções não comprometam os prazos de entrega.

Desta forma evidencia-se que a programação da produção é uma atividade operacional, ou seja, que apresenta detalhamentos sobre as atividades a serem realizadas no chão de fábrica. No caso de estaleiros que produzem embarcações de maneira seriada, destaca-se o sistema de produção intermitente repetitiva para fabricação das peças da embarcação e o sistema de produção intermitente sob encomenda para as tarefas de montagem.

2.4.1 Programação da Produção Intermitente

Lustosa *et al.* (2008) indicam que no sistema de produção intermitente é possível encontrar diferentes tipos de decisões referentes à programação das tarefas, conforme a seguir elencado:

1. Designação (*assignment*): Determinação de onde (ou quem) executará a tarefa.
2. Sequenciamento (*sequencing*): Determinação da sequência (ou ordem) em que as tarefas devem ser executadas em um dado recurso.
3. Programação (*scheduling*): Determinação de quando a tarefa deverá ser iniciada e terminada, não apenas a sequência.
4. Despacho (*dispatching*): Quando e para quem (processador) a ordem deverá ser emitida (ou liberada).
5. Controle (*control*): Acompanhamento dos trabalhos para garantir que a programação se mantenha válida e determinação de eventuais necessidades de intervenção ou de reprogramação.
6. Apressamento (*expediting*): Acelerar a ordem de produção pelo aumento de sua prioridade para manter o programa válido ou para atender a necessidade específica.
7. Carregamento de oficinas (*shop loading*): Definição dos roteiros e programação das tarefas dentro de uma fábrica, ou seção de um sistema produtivo.

Estas decisões são norteadas por regras de prioridade que possibilitam a construção de diferentes seqüências de operações em máquinas, gerando-se, assim resultados diferentes nos indicadores de desempenho do processo produtivo. Para alguns problemas específicos, essas regras geram soluções ótimas, mas de forma geral, são métodos heurísticos que em sua simplicidade, não garantem a otimização completa do problema da programação da produção.

Destacam-se como regras de sequenciamento ou liberação (*dispatching*): o FIFO (*First in, First Out*), onde as primeiras encomendas recebidas serão processadas antes; LIFO (*Last in, First Out*), onde as últimas encomendas serão processadas antes; Menor data de entrega, onde a encomenda que deve ser entregue primeiro é processada antes; Menor tempo de processamento primeiro, onde é processada primeiramente a atividade que ficará menor tempo na linha de produção, entre outras regras que serão observadas mais adiante nesta subseção.

A seguir, a tabela 2.1 apresenta algumas das regras mais usuais. Vale lembrar que na tentativa de obtenção de melhores resultados dentro do chão de fábrica, é possível aplicar mais de uma regra simultaneamente.

Tabela 2.1 – Regras usuais para sequenciamento de tarefas. Fonte: Lustosa *et al.*, 2008).

SIGLA	ESPECIFICAÇÃO	DEFINIÇÃO	PRIORIDADE DAS ORDENS DE PRODUÇÃO
PEPS <i>FIFO</i>	Primeira a entrar, Primeira a sair <i>First In First Out</i>	Na mesma ordem de chegada na máquina (Obtém-se uma variedade desta regra, considerando-se a ordem de chegada na máquina).	Prioridade às ordens (clientes) que chegarão antes. Busca minimizar a variância do tempo de permanência na máquina (ou na fábrica)
MTP <i>SPT</i>	Menor Tempo de Processamento <i>Shortest Process Time</i>	Em ordem crescente de tempo de processamento no recurso	Prioridade às ordens de menor tempo, propiciando uma redução das filas e aumento do fluxo
MDP <i>EDD</i>	Menor Data Entrega <i>Earliest Due Date</i>	Em ordem crescente de prazo de entrega prometido	Prioridade às ordens mais urgentes, visando reduzir atrasos
MF <i>LS</i>	Menor Folga <i>Least Slack</i>	Em ordem crescente de folgas (data prometida menos tempo total de processamento)	Idem
MFD	Menor Folga Dinâmica	Idem, considerando apenas o tempo total restante de processamento	Idem, um pouco mais complicada de aplicar que a versão estática
MFA	Menor Fila Adiante	Próxima ordem é aquela com destino à estação com menor fila no momento	Busca evitar a parada de um processo subsequente.
RC <i>CR</i>	Razão Crítica <i>Critical Ratio</i> RC=Tempo remanescente	Executar a tarefa com menor RC. Se a RC de alguma tarefa for negativa (i.e.tarefa atrasada) executar a atrasada de menor tempo de processamento	Regra dinâmica que procura combinar a MDP, que considera apenas a data prometida, com a MTP, que considera apenas o tempo de processamento

Para o problema proposto neste estudo, que trabalha com sistema de produção intermitente será utilizada a regra FIFO (*First in, First Out*). Procurando minimizar o tempo de permanência no molde e a ocupação do posto de trabalho gargalo.

2.4.2 Previsão e Planejamento de Demanda

De acordo com Lustosa *et al.* (2008), existem dois tipos principais de situações de demanda: a pontual e a repetitiva. A demanda pontual caracteriza-se pela presença de um pico de demanda concentrado em algum lugar no tempo, o qual, na sequência do tempo, desaparece ou diminui significativamente. A demanda repetitiva caracteriza-se pela presença de picos cíclicos de demanda.

Dentro do escopo de demanda repetitiva, há a classificação de itens com demanda dependente e a independente. No primeiro, a demanda de um item depende de outro produto, e no segundo utiliza-se o conceito de ciclo de vida do produto, que representa a evolução típica das vendas de um produto ao longo do tempo. Essa variação de demanda de um item independente pode ser estacionária ou com tendência. No caso estacionário, observam-se algumas variações aleatórias nas vendas, porém há um patamar de demanda constante ao longo do tempo. Por outro lado, a demanda com tendência exibe crescimento (ou redução) sistemático, típico da fase de crescimento (ou declínio) das vendas.

Outro aspecto que pode caracterizar a demanda é a sazonalidade, que consiste em oscilações regulares da demanda ao longo do ano ou “ciclo sazonal” (LUSTOSA *et al.*, 2008). Desta forma, destacam-se quatro diferentes padrões de demanda independente, conforme figura 2.4 a seguir.

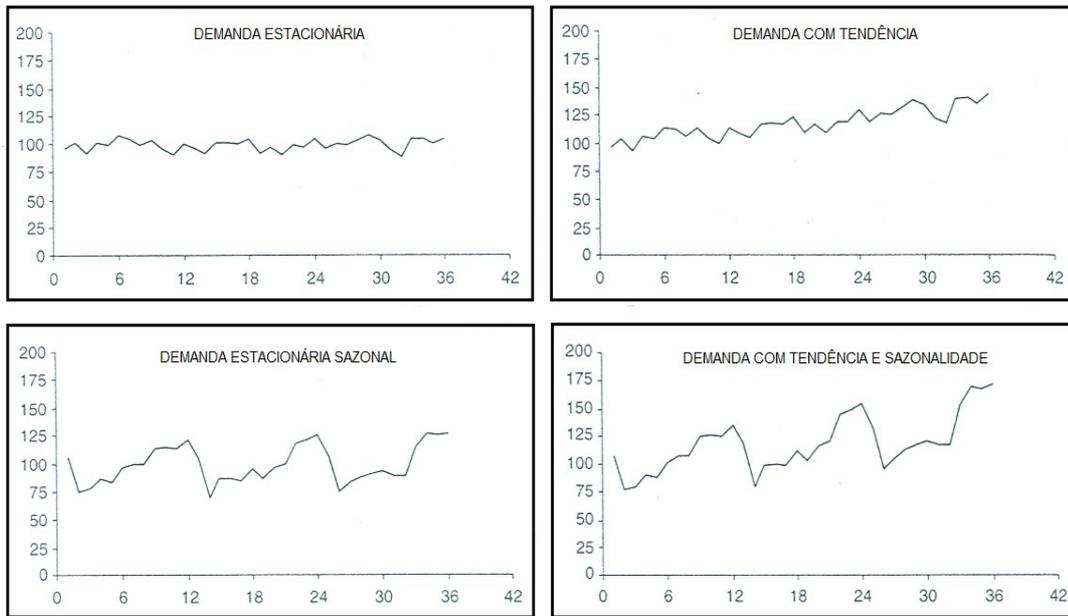


Figura 2.4 - Tipos e padrões de demandas. Fonte: Lustosa *et al.* (2008).

Do ponto de vista do PCP (Planejamento e Controle da Produção), as previsões de demanda são utilizadas nas decisões referentes ao planejamento dos recursos de produção (planejamento de capacidade), às metas de produção e estoques (planejamento agregado de produção) e às prioridades de produção e expedição de produtos (programação e controle da produção). A figura 2.5 apresenta informações de demanda em relação ao horizonte de previsão abordado.

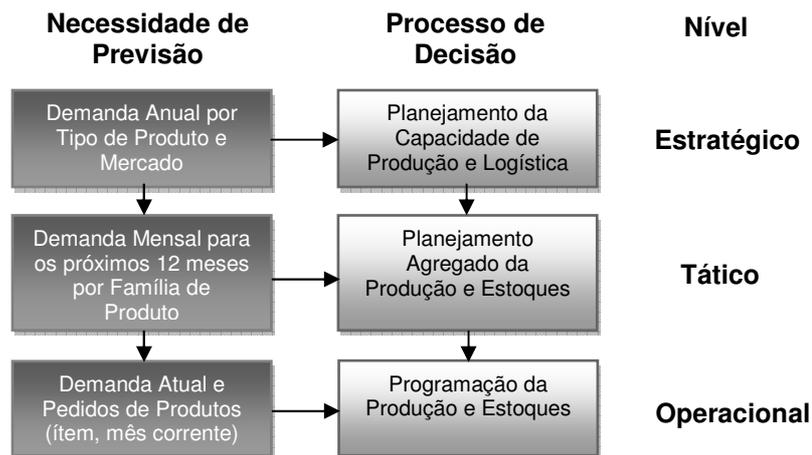


Figura 2.5 - Previsão de demanda no planejamento da produção. Fonte: Lustosa *et al.* (2008).

Como o processo de planejamento é dinâmico, com necessidade de revisão periódica dos planos, o processo de previsão também deve ser repetido,

ciclicamente, gerando-se informações atualizadas conforme a necessidade do planejamento.

Conhecidas as formas de estratégia de produção, torna-se oportuno expor funções ligadas ao setor de produção, conforme seções 2.5 e 2.6 a seguir apresentadas.

2.5 ALOCAÇÃO DOS RECURSOS

Conforme figura 2.6, anteriormente apresentada, as decisões de médio prazo (nível tático) não possuem detalhamentos quanto a recursos utilizados no chão de fábrica e datas de produção. É usual agrupar os produtos em famílias, os recursos em centros de manufatura ou centros de trabalho ou serviços, e o tempo em meses, anos. Dentre as ferramentas utilizadas para repassar à produção as decisões de médio prazo destacam-se o plano de produção e o plano de compras, gerando-se assim informações de entrada para a execução do que deve ser produzido.

As decisões de produção e estoques de curto prazo (nível operacional) exigem um maior detalhamento que os níveis anteriores. São decisões que normalmente são tomadas por um supervisor/responsável do chão de fábrica. Se estas decisões forem planejadas de maneira correta gera-se um menor número de falhas (ou atrasos) dentro do processo produção. Estas falhas podem se propagar para os demais níveis do processo, causando efeitos difíceis de serem contornados, como por exemplo, atrasos nos prazos de entrega dos produtos finais.

Na figura 2.6 ilustra-se um exemplo de propagação de uma falha. Nesta situação da figura existem diferentes atividades que dependem ou não umas das outras para a manufatura de um determinado produto. No eixo vertical, estão listadas as tarefas que devem ser executadas para a produção do produto inteiro e a sequência como estas tarefas devem ser processadas. Por exemplo, a tarefa TB1-3/02 (destacada em vermelho), deve ser executada antes da tarefa TB2-2/02, que por sua vez deve ser executada antes da tarefa TB3-1/03. No eixo horizontal, é ilustrado o tempo que cada operação leva para ser executada (unidades temporais u.t.). Ao ocorrer algum atraso no início da execução de uma tarefa devido a, por exemplo, falta de material ou quebra de máquina ou ainda sequenciamento inadequado, deve-se verificar o quanto este atraso impacta na execução de todas as

outras tarefas que dependem da data de início da atividade atrasada. Este atraso pode impactar na data de entrega do produto acabado ao cliente final.

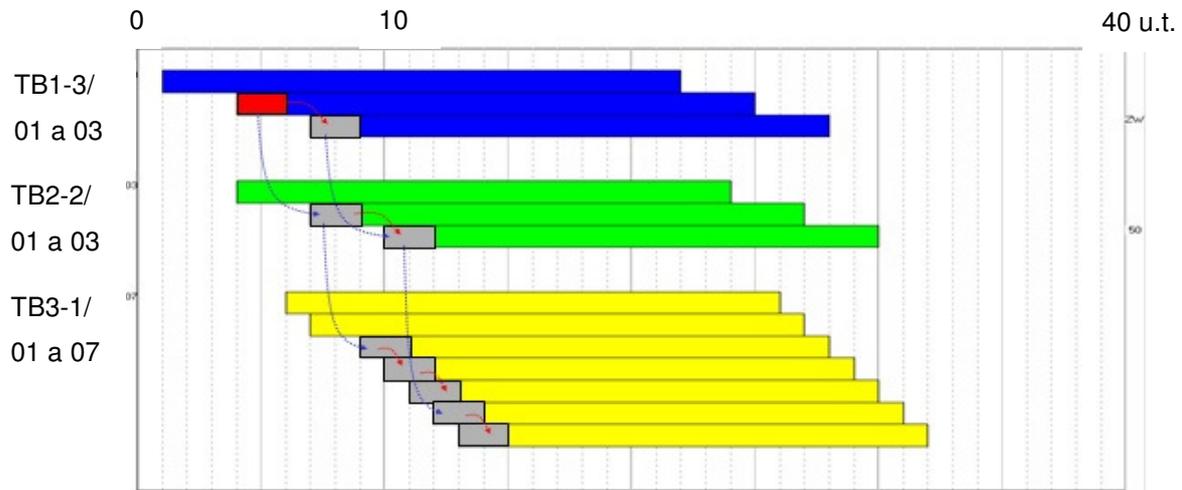


Figura 2.6 – Exemplo da propagação de uma falha (vermelho sobre as demais etapas de fabricação de um produto. Fonte: Rodrigues e Magatão (2006).

Dentro do estaleiro náutico abordado no presente trabalho observa-se uma dificuldade em programar as atividades operacionais de curto prazo, mesmo com a experiência do responsável por tomar as decisões de planejamento e sequenciamento. Assim, via de regra, ocorrem falhas dentro do processo de programação da produção e do sequenciamento dos itens/partes que devem ser priorizados dentro da produção. Estas falhas ocasionam uma perda de eficiência no uso de máquinas/postos de trabalho e excessos/folgas de pessoas dentro do processo produtivo. Geram-se, em determinados momentos, ociosidades de recursos (postos de trabalho/trabalhadores) e atrasos na entrega do produto final. Adicionalmente, é necessária a utilização de um elevado número de horas-extras a fim de recuperar o tempo perdido pelas falhas na programação.

Embora o planejamento de curto prazo dependa muito do tipo de sistema de produção, existem diferentes abordagens destes problemas. É possível definir o planejamento e a programação da produção em duas etapas segundo Pinto *et al.* (2007):

- I) Emissão de ordens de fabricação e compras – definição dos itens e quantidades a serem fabricadas e compradas (matéria-prima, itens intermediários, e itens finais), a partir do plano de produção e plano de compras;

- II) Programação da produção e compras – determina quando cada ordem de fabricação e compra será processada, em função de objetivos e restrições do sistema.

As duas etapas são alimentadas pelo apontamento (quantidade produzida) de produção e pelo controle de estoques. Eventualmente o controle de estoques é um indicador responsável por mostrar que o que foi planejado, não foi realizado no período, tornando necessárias correções na programação. Dependendo do processo produtivo, os maiores ganhos obtidos em uma programação correta e eficiente são do processo gargalo.

A programação de um processo não gargalo gera ganhos localizados, possibilitando maior utilização dos recursos, porém não há maior volume de produção. Contudo, independentemente de recursos gargalos ou não-gargalos, conforme sugerido por Rodrigues e Magatão (2006), o uso de uma abordagem de solução baseada em modelos matemáticos de otimização tende a minorar as falhas nas decisões operacionais de curto prazo, contribuindo para a eficácia do sistema produtivo. As subseções 2.6 e 2.7 apresentam conceitos de base de modelos matemáticos, principalmente no contexto do trabalho abordado.

2.6 CONCEITOS DE BASE DE PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA

Segundo Goldberg e Luna (2000), o campo da Programação Matemática é amplo e suas técnicas consagraram-se em face à sua grande utilidade na solução de problemas de otimização. Em virtude das várias peculiaridades inerentes aos diversos contextos de programação (planejamento), os métodos de solução sofreram especializações e particularizações. Algumas técnicas de solução que estão agrupadas em subáreas como PL (Programação Linear), PNL (Programação Não Linear), PI (Programação Inteira) e PLIM (Programação Linear Inteira Mista).

Segundo Dantzig, (1963) a programação linear é uma das mais importantes e mais utilizadas técnicas de Pesquisa Operacional. Essa técnica é amplamente utilizada, pois viabiliza a modelagem de problemas importantes e complexos de decisão, gerando soluções rapidamente. O problema geral de Programação Linear é

utilizado para melhorar (maximizar ou minimizar) uma função linear de variáveis, sujeita a uma série de equações ou inequações lineares chamadas de restrições.

Assim de maneira simplificada, um problema de PL é composto por (GOLDBARG e LUNA, 2000):

- 1) Uma função linear formada com variáveis de decisão chamada de “função objetivo (z)”, cujo valor deve ser otimizado;
- 2) Relações de interdependência entre as variáveis de decisão que se expressam por um conjunto de equações ou inequações lineares, chamadas de restrições do modelo;
- 3) Variáveis de decisão que, via de regra, devem ser positivas ou nulas.

A Programação Inteira (PI) é utilizada quando alguns problemas requerem o uso de variáveis que assumem valores inteiros. Quando isso acontece tem-se um problema de Programação Inteira. Este problema pode ser caracterizado por meio da formulação a seguir apresentada:

Maximize (ou minimize)

$$z = g_0(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sujeito a (s.a.)

$$z = g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) (\leq \text{ou} = \text{ou} \geq) b_i, i \in M = \{1, 2, \dots, m\}$$

$$x_j \geq 0, j \in N = \{1, 2, \dots, n\}$$

$$x_j \text{ inteira}, j \in I \subseteq N$$

No qual x_j , para $j \in N$, são as variáveis e g_i , para $i \in M \cup \{0\}$, são funções das variáveis x_1, x_2, \dots, x_n e $b_i, i \in M$, são constantes conhecidas. Se $I = N$, isto é, todas as variáveis são inteiras, então o problema é dito PI. Caso contrário, se $I \subset N$, então chama-se de problema de Programação Inteira Mista (PIM).

Em muitos problemas abordados em PI, as funções g_i , para $i \in M \cup \{0\}$, são lineares e o modelo pode, então, ser descrito como mostra a formulação a seguir:

Maximize (ou minimize)

$$z = \sum_{j \in N} c_j x_j, N = \{1, \dots, n\}$$

Sujeito a

$$\sum_{j \in N} a_{ij} x_j (\leq, \geq \text{ ou } =) b_i, i \in M = \{1, \dots, M\}$$

$$x_j \geq 0, j \in N$$

$$x_j \text{ inteira}, j \in I \subseteq N$$

Onde x_j são variáveis não negativas e c_j, a_{ij}, b_i são constantes conhecidas, para todo i e j . Se $I = N$, isto é, todas as variáveis são inteiras então temos um problema de Programação Linear Inteira (PLI). Se $I \subset N$, então o problema é de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

Em alguns modelos práticos de PLI existem restrições para algumas variáveis inteiras para assumirem somente valor “0” ou “1”. Neste caso, tem-se um problema de Programação Linear Inteira Binária (PLIB). Utilizam-se estas variáveis para tomadas de decisão, por exemplo: sim, quando a variável assume valor (“1”) e não quando a variável assume valor (“0”).

Existem muitos problemas de programação da produção (scheduling) que podem ser abordados como problemas de Programação Linear Inteira Mista, pois os modelos matemáticos de otimização correspondentes envolvem variáveis contínuas e discretas que devem satisfazer um conjunto de restrições lineares de igualdade e desigualdade (MORO, 2000).

A resolução de modelos de Programação Linear Inteira Mista, entendida como a obtenção de uma solução ótima, pode ser difícil, pela natureza combinatória do processo de obtenção de solução dos modelos gerados. Segundo Williams (1999), a resolução de modelos com variáveis inteiras ainda não possui um algoritmo com desempenho similar ao *Simplex* (DANTZIG, 1963), utilizado na resolução de PL. Ainda de acordo com Williams (1999), é comum construir modelos com variáveis inteiras somente para descobrir que a carga computacional para resolvê-los é proibitiva. Assim, abordagens que explorem características do problema abordado com o intuito de diminuir a carga computacional inerente de modelos de PLIM são relevantes.

De maneira simplificada, diferentes abordagens de solução têm apresentado desempenhos superiores para diferentes classes de problemas envolvendo variáveis inteiras, geralmente explorando estruturas e características peculiares. O método

branch-and-bound (Nemhauser e Wolsey, 1988) tem se mostrado como um dos mais utilizados para a resolução de modelos PLIM. Em suma, este método inicialmente relaxa as restrições de integralidade das variáveis inteiras e soluciona o modelo original como sendo um modelo de PL. Se a solução relaxada não violar as restrições de integralidade, a solução é ótima. Caso contrário, precede-se a construção de uma árvore de enumeração.

O método *branch-and-bound* realiza um sucessivo particionamento do espaço de soluções válidas até encontrar a melhor solução inteira (se existir) e provar a sua otimalidade.

O desenvolvimento de algoritmos especializados para a resolução de modelos de PLIM está muito além do escopo da presente dissertação. Ao invés disso, faz-se o uso de ferramentas comerciais como, por exemplo, o solver IBM CPLEX (IBM, 2011).

2.7 PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA APLICADA AO PLANEJAMENTO AGREGADO DE PRODUÇÃO

O desenvolvimento da presente subseção baseia-se nos estudos realizados por Pinto *et al.* (2007) e em Lustosa *et al.* (2008). De acordo com esses autores, no setor metal-mecânico e em estaleiros de produção seriada, em geral, as atividades de planejamento de médio prazo estabelecem algumas metas a serem atingidas na programação de curto prazo, tais como prazos de entrega de produtos e quantidades a serem produzidas.

Os processos produtivos trabalham com lotes de produção, os quais orientam a execução das tarefas nos postos de trabalho. Entretanto, estas metas de médio prazo são, em geral, estabelecidas dentro de uma visão temporal agregada, o que pode impor indicadores difíceis de serem cumpridos no nível operacional. Além disso, devem-se considerar também atividades de manutenção, quebra de equipamentos, modificação dos pedidos dos clientes, entre outros, exigindo-se alterações no plano de produção.

Desta forma, a programação no chão de fábrica deve ser flexível para poder atender aos requisitos impostos pelas decisões de médio prazo e, ao mesmo tempo, incorporar algumas dessas eventuais situações operacionais. Com isso, uma

decisão tomada por um setor pode impactar o trabalho de diversos outros setores.

2.7.1 Planejamento Agregado de Produção e Estoques

Em uma empresa com modelos de produção contínuo ou intermitente, várias decisões devem ser tomadas a fim de melhorar o desempenho operacional. Destacam-se decisões de quanto produzir, estocar, contratar e horas-extras. Torna-se essencial que as decisões de curto prazo sejam boas, para que as decisões de médio prazo tenham sucesso.

Para encontrar uma solução que obtenha sucesso, é recomendável o uso de Programação Matemática no planejamento agregado, especificamente, trabalhar com a modelagem de Programação Linear (PINTO *et al.*, 2007). Em se tratando de programação da produção e estoques, um problema de modelagem de Programação Linear consiste basicamente em definir quais serão as variáveis de decisão, ou *outputs* (produção, estoque, homem-hora, horas-extras, contratações, demissões em determinado período), e quais os parâmetros do modelo, *inputs* (demanda por período, custos de produção, de estoques, de homens-hora, de horas-extras, etc.).

Torna-se necessário formular a função objetivo, por exemplo, maximizar ocupação de postos de trabalho, minimizar custos e maximizar o lucro. Além disso, é necessário inserir as restrições do modelo, como, atendimento obrigatório de demanda, capacidade máxima de estocagem, máximo de homens-hora por período, conforme ilustrado na figura 2.7.

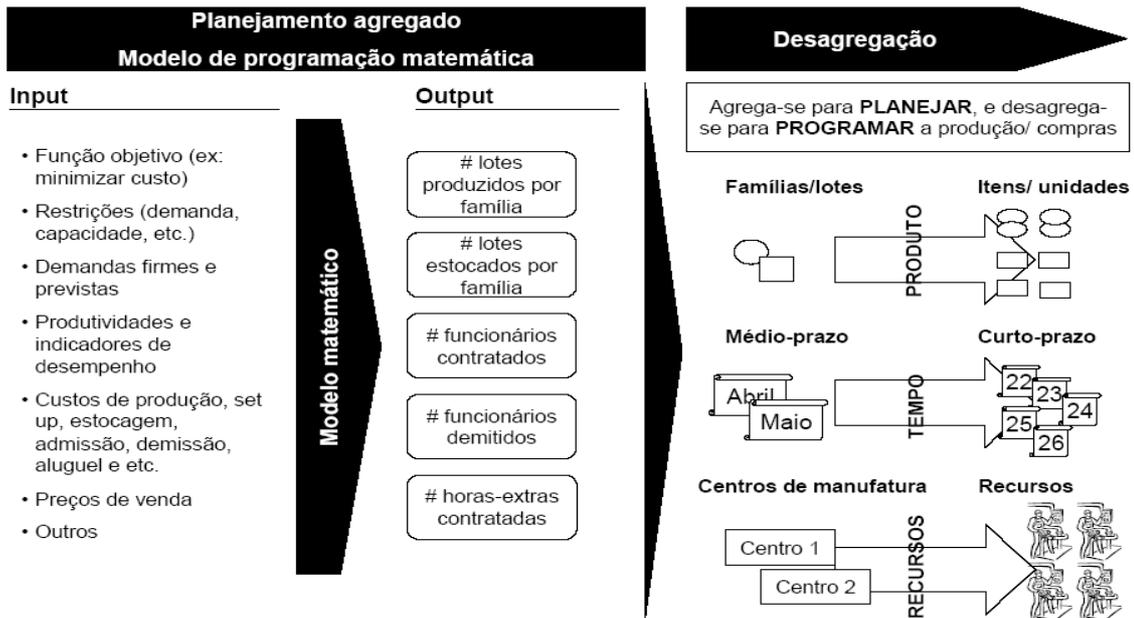


Figura 2.7 - Esquema do modelo de planejamento agregado da produção e estoques. Fonte: Pinto *et al.* (2007).

Hoje, existem *softwares* que tornam possível a inserção de uma estrutura de programação em determinada linguagem e resolver um problema por meio de algoritmos de otimização. A utilização deste recurso deve-se ao fato do ERP (*Enterprises Resources Planning*) não considerar situações inerentes ao processo, como por exemplo, carregar a matéria prima comprada de um mesmo fornecedor em um mesmo caminhão, minimizando assim o *lead time*² de compra do produto e disponibilizando-o em tempo hábil à produção. Desta forma, é observado que têm sido utilizados com maior freqüência métodos de Programação Linear na solução de problemas de planejamento agregado das operações. A seguir, conforme exemplo de variáveis é apresentado um modelo de Programação Linear genérico, que pode ser adaptado a diversos sistemas de produção (2.8 e 2.9), extraído de Pinto *et al.* (2007).

² *Lead time* é o jargão usado nas indústrias de manufatura para identificar o tempo requerido entre a liberação de uma ordem de produção (e, conseqüentemente, seu início de produção) até a sua conclusão.

Variáveis de decisão:	Dados:
x_t^p Produção do produto p no período t	D_t^p Demanda pelo produto p no período t
y_t^p Quantidade estocada do produto p no período t	Cx^p Custo de produção do produto p
v_t^r Uso de horas-extras do recurso r no período t	Cy^p Custo de estocagem do produto p por 1 período
c_t^r Contratações do recurso r no período t	Cu^r Custo fixo do recurso r
d_t^r Demissões do recurso r no período t	Cv^r Custo de hora-extra do recurso r
Variáveis auxiliares:	Cc^r Custo de contratação do recurso r
w_t^r Recursos r disponíveis do período t	Cd^r Custo de demissão do recurso r
	u^r Horas de trabalho de r em cada período
	H_r^p Horas necessárias de r para produzir 1 unidade de p
	e_0^p Estoque inicial do produto p
Função objetivo:	e_T^p Estoque final do produto p
$K = \sum_{t=1}^T \left(\sum_{p=1}^{Np} x_t^p Cx^p + \sum_{p=1}^{Np} y_t^p Cy^p + \sum_{r=1}^{Nr} w_t^r Cu^r + \sum_{r=1}^{Nr} v_t^r Cv^r + \sum_{r=1}^{Nr} c_t^r Cc^r + \sum_{r=1}^{Nr} d_t^r Cd^r \right)$	

Figura 2.8 – Exemplo de modelagem de Programação Linear (variáveis de decisão, dados e função objetivo). Fonte: Pinto *et al.* (2007).

Restrições:		
Atendimento de demanda	$D_t^p \leq x_t^p + y_{t-1}^p$	$p=1,2,\dots Np, t=1,2,\dots T$
Ligação entre produção e estoques	$y_t^p = x_t^p + y_{t-1}^p - D_t^p$	$p=1,2,\dots Np, t=1,2,\dots T$
Ligação entre produção e horas trabalhadas	$x_t^p = \sum_{r=1}^{Nr} \left(\frac{u^r + v_t^r}{H_r^p} \right)$	$p=1,2,\dots Np, t=1,2,\dots T$
Ligação entre funcionários disponíveis, contratações e demissões	$w_t^r = w_{t-1}^r + c_t^r - d_t^r$	$r=1,2,\dots Nr, t=1,2,\dots T$
Máximo de horas-extras	$v_t^r \leq M^r$	$r=1,2,\dots Nr, t=1,2,\dots T$
Estoque inicial	$y_0^p = e_0^p$	$p=1,2,\dots Np$
Estoque final	$y_T^p = e_T^p$	$p=1,2,\dots Np$
Variáveis positivas		

Figura 2.9 – Exemplo modelagem de Programação Linear (restrições). Fonte: Pinto *et al.* (2007).

A formulação apresentada permite evidenciar que muitas das restrições exemplificadas correspondem a condições difíceis de resolver, por envolverem recursos como alocação (atendimento de demanda), armazenamento (estoque final e inicial, ligação entre produção e estoques), planejamento e programação (ligação entre produção e horas trabalhadas, mão de obra (ligação entre funcionários

disponíveis, contratações e demissões, máximo de horas extras). Algumas tentativas inevitavelmente acabam por abordar restrições, funções objetivos, e/ou variáveis de forma linear, embora esta condição tenha sido imposta para aproximar superficialmente situações gerais. O uso de métodos baseados em Programação Linear Inteira Mista pode trazer maior detalhamento à modelagem realizada, contudo acaba, dificultando o processo de resolução computacional.

Em outros casos, os problemas podem apresentar características não-lineares, sendo, em casos práticos, via de regra, complexos de serem solucionados. Além disso, cada método citado assume quantidades determinísticas, havendo problemas em solucionar condições com algum efeito estocástico.

O mercado mundial de fabricação de embarcações é dominado por Japão, Coréia do Sul, Europa e China, nessa ordem. Os estudos realizados por Lee *et al.* (1997) e Park *et al.* (1996) na indústria naval da Coréia do Sul, confirmam a tendência de uso de heurísticas e programação linear para auxiliar o planejamento, programação e controle da produção e o planejamento de espaços em docas dos estaleiros.

Não há dúvidas de que esses métodos vêm produzindo excelentes resultados durante os últimos anos, mas por causa deste sucesso, existe a tendência de modelar situações cada vez mais complexas para diversos problemas (PINTO *et al.* 2007). As premissas inerentes de cada modelo são quase sempre somente uma aproximação da realidade operacional, conduzindo a soluções próximas das melhores soluções.

2.8 MODELAGEM PARA PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM UM ESTALEIRO NÁUTICO

Segundo Pinto *et al.* (2007), as características significativas do processo de edificação de uma embarcação, que devem ser consideradas na configuração de um estaleiro são: grande porte; alta complexidade, grande número e variedade de componentes; alto valor; baixo volume de produção (número de unidades); feito sob encomenda; customizado ou semi-customizado; e prazo reduzido de entrega em relação ao conteúdo de trabalho.

Estas características revelam a complexidade do processo de programação da produção e do arranjo físico em estaleiros. Objetiva-se garantir uma construção, que cumpra adequadamente os requisitos dos clientes, e apresente eficiência na utilização de recursos produtivos. O enfrentamento correto deste problema é condição necessária ao sucesso do estaleiro. Desta forma, pode-se considerar que durante a construção de uma embarcação náutica de fibra de vidro pode-se identificar em um estaleiro, via de regra, muitas vezes de forma combinada, **sistemas de produção intermitente repetitivo e sistemas de produção intermitente sob encomenda.**

Um ponto fundamental no início do processo de modelagem da programação da produção de um estaleiro é verificar se sua produção é seriada ou não. O passo seguinte para modelar um sistema produtivo deste setor é definir os produtos que fazem parte do *mix* de produção e identificar as demandas de cada modelo. A partir destas premissas, listam-se os objetivos estratégicos principais que norteiam as decisões de produção do estaleiro: A partir disto, o processo produtivo do estaleiro deve respeitar uma sequência de trabalho.

Torna-se importante que a estratégia competitiva defina os objetivos do sistema de produção. Pinto *et al.* (2007) destacaram, em ordem prioritária, os seguintes objetivos estratégicos:

1. **Minimizar atrasos:** reduzir a diferença entre a data esperada e a data de entrega, tanto na produção completa da embarcação quanto nos processos de fabricação ou montagem de itens intermediários (blocos, painéis, etc.). Caso o estaleiro seja flexível para entender a diferentes demandas, mas o faça com atrasos, sua vantagem comparativa desaparece;
2. **Minimizar a oscilação dos níveis de produção:** permite a operação da produção com equipamentos e ferramentas de menor capacidade, bem como uma menor força de trabalho, menores custos de admissão, demissão, horas-extras e ociosidade;
3. **Minimizar estoques:** seja de matéria prima, componentes comprados e materiais em processo. A redução no estoque auxilia na redução do *lead time* médio do processo e conseqüentemente, na redução do tempo de atendimento ao cliente. Como as empresas do setor, via de regra, não trabalham com estoques de produtos acabados e os produtos possuem estruturas complexas, esse objetivo depende de ferramentas que permitam a sincronização do processo de produção e os prazos de entrega;

4. **Maximizar a eficiência operacional do estaleiro:** ser eficiente no uso de materiais, utilização de equipamentos de produção, transporte e armazenagem, ocupação de espaços, utilização de recursos humanos e obtenção dos níveis de qualidades do projeto.

Ao tentar atender todos esses aspectos de forma simultânea, é possível notar que, ao atingir um objetivo, uma decisão pode ser conflitante a outra. Assim, é de extrema importância respeitar a priorização desses aspectos.

Os objetivos da operação sugerem processos de tomada de decisões de operação dinâmicos, com base em pedidos ou mesmo previsões. A estratégia de operação do estaleiro deve alinhar-se à estratégia competitiva e objetivos estabelecidos.

2.9 ANÁLISE DE FERRAMENTAS DE PROGRAMAÇÃO DA PRODUÇÃO EM ESTALEIROS

As ferramentas de programação, gerenciamento de projetos e o *Material Requirements Planning* (MRPs), integrados às ferramentas de *Enterprise Resources Planning* (ERP) estão presentes em grandes estaleiros nacionais e estrangeiros, seja em *softwares* específicos ou inclusos em pacotes que incluem outras ferramentas.

É importante ressaltar que um estaleiro também decide, por vezes, desenvolver seus próprios sistemas, em detrimento dos *softwares* disponíveis para comercialização no mercado. Essa decisão é tomada ou porque não encontra no mercado um sistema que atenda a todas as expectativas, ou porque considera que a ferramenta que desenvolveu é estratégica para o seu sucesso e possui atributos que não podem ser copiados pelos concorrentes. Cada um desses sistemas tem suas especificidades, as quais não serão abordadas na presente dissertação. A empresa pode, eventualmente, ter encontrado um sistema adequado, porém a um custo proibitivo.

As principais ferramentas utilizadas são as de análise de caminho crítico (*Critical Path Method* - CPM) e nivelamento de recursos, frequentemente apontadas como determinantes na escolha do *software* a ser utilizado. Para a indústria naval, o

mais importante é a análise do caminho crítico, cujo domínio é necessário para que se cumpram os prazos associados à construção.

Em geral, os recursos disponíveis são mais utilizados ao longo do planejamento e programação do que em seu controle (PINTO *et al.*, 2007). Entretanto, na indústria náutica o que é relevante é um bom gerenciamento dos recursos gargalos. Um posto de trabalho com um número maior de máquinas pode suprir uma elevação de demanda, porém um gerenciamento ineficiente gera ociosidade na utilização de máquinas e afeta também a mão de obra.

Para que um *software* seja efetivamente utilizado no controle da produção, é recomendável a existência de atualizações constantes dos parâmetros de entrada, o que é bastante trabalhoso. Muitas vezes apenas valores médios são utilizados, minorando esforços de atualização.

Apesar do grande número de usuários de *softwares* de programação e gerenciamento da produção, quase a totalidade dos mesmos julga necessárias pesquisas com vistas a melhorias na qualidade dos produtos. O nivelamento (ou balanceamento) de recursos e a programação (ou scheduling) das atividades são apontados como os aspectos a serem mais desenvolvidos (PINTO *et al.* 2007).

Devem ser ponderadas as necessidades de produção e o tamanho do modelo. No caso da construção naval, isso corresponde à definição do nível de demanda (número de atividades e projetos em paralelo), de quais parte do fluxo de construção é contemplada pela programação em rede, bem como do porte da embarcação e grau de detalhamento da sua estrutura de produto considerada na programação.

2.9.1 Programação da Produção no Cenário de Estudo

A estrutura organizacional do estaleiro deste estudo é de origem familiar e não há utilização de alguma ferramenta que auxilie a programação da produção. Isso gera uma diminuição da eficiência da utilização de recursos e de mão de obra, já que essa programação é realizada baseada da experiência do gestor. Este fato evidenciou o potencial de aplicação de uma abordagem baseada em modelos de otimização no contexto estudado.

Na subseção 2.10 é apresentada a descrição de uma abordagem de programação matemática presente na literatura que serviu de base para a implantação do modelo de auxílio à tomada de decisões operacionais da presente dissertação, o qual é detalhado no capítulo 4.

2.10 ABORDAGENS DA LITERATURA PARA O SEQUENCIAMENTO DA PRODUÇÃO

Alguns problemas de sequenciamento da produção podem ser modelados com base no modelo matemático aplicado a linhas de produção configuradas em arranjos *Flow Shop*. Neste tipo de linha, toda peça produzida passa por uma mesma sequência de produção, visitando cada estação de trabalho uma única vez. Outras características que, segundo Guéret *et al.* (2000), devem ser observadas são: o fato de que cada máquina só consegue produzir uma peça de cada vez; a limitação de que uma peça não pode passar para a estação de trabalho seguinte enquanto a peça anterior estiver sendo manufaturada em uma máquina (ou Posto de Trabalho).

Existem diversos modelos na literatura que abordam problemas de sequenciamento de uma linha de produção do tipo *Flow Shop*. No item 2.10.1, é revisado o modelo proposto por Guéret *et al.* (2000). Este modelo foi escolhido pela semelhança em relação ao modelo proposto no presente trabalho, o qual é detalhado no Capítulo 4.

2.10.1 Modelo Proposto por Guéret *et al.* (2000)

Guéret *et al.* (2000) propõe a utilização da variável binária $rank(t,k)$, que será igual a um quando a tarefa t for executada na posição k na sequência de produção; caso contrário, $rank(t,k)$ terá valor zero. O número total de posições k é o mesmo que o número de peças (NT). A restrição 2.1, segundo Guéret *et al.* (2000), impõe que cada posição na sequência de produção deve ser ocupada por apenas uma peça. De forma similar, a restrição 2.2 impõe que cada peça deve ser alocada em uma única posição na sequência de produção, desde que a demanda seja unitária. Esta restrição é alterada no modelo proposto, no Capítulo 4, já que as demandas das peças podem ser maiores que um.

Para o modelamento é utilizada a nomenclatura MAQ , onde $MAQ=\{1,\dots,NM\}$, para definir o número total (NM) de máquinas (m) e TAR , onde $TAR=\{1,\dots,NT\}$, para definir o número total de (NT) de tarefas (t) que devem ser realizadas para completar a produção de todas as peças. O tempo de processamento da tarefa (t) na máquina (m) é definido por $DUR(m,t)$.

O número total de posições de início (RANKS) é o mesmo que o número de tarefas, pois cada tarefa deve ser alocada em uma única posição na sequência de produção. Essa restrição segundo Guéret *et al.* (2000), pode ser definida pela equação 2.1. Ainda, cada posição na sequência de produção deve ser ocupada por apenas uma tarefa, que, segundo Guéret *et al.* (2000), é restrito pela equação, 2.2.

$$\sum_p rank(p,k) = 1 \quad \forall k \quad (2.1)$$

$$\sum_k rank(p,k) = 1 \quad \forall p \quad (2.2)$$

Para simplificar a formulação, Guéret *et al.* (2000) introduziram a notação $dur(m,k)$, que identifica a duração do processamento da peça na posição k na máquina m . Na equação 2.3, $TP(m,p)$ representa o tempo de processamento da peça p na máquina m . Como, pela equação 2.1, haverá uma única peça p associada à posição k , então a variável $dur(m,k)$ assumirá o valor do tempo de processamento desta peça nesta máquina, $TP(m,p)$.

$$dur(m,k) = \sum_p TP(m,p) * rank(p,k) \quad \forall m, k \quad (2.3)$$

É necessário ainda identificar o tempo em que a máquina m fica parada ou ociosa. Isto é feito, por meio da variável não negativa $empty(m,k)$, isto é, após o processamento da peça na posição k da sequência de produção, espera-se o início do processamento da peça na posição $k+1$. Outra variável não negativa a ser utilizada é a variável $wait(m,k)$, que identifica o tempo que a peça na posição k da sequência de produção, após ter sido processada na máquina m , ficará esperando até iniciar-se o seu processamento na máquina seguinte, ($m+1$).

Um aspecto bastante importante da abordagem de Guéret *et al.* (2000) é relacionar as variáveis $empty(m,k)$ e $wait(m,k)$ com a variável $rank(t,k)$. A figura 2.10 mostra um exemplo de uma transição da máquina m para a máquina $m+1$, entre as peças nas posições k e $k+1$, auxiliando na formulação da expressão que define a relação entre as variáveis. Segundo, Guéret *et al.* (2000), a relação entre as variáveis $wait(m,k)$ e $empty(m,k)$ com a variável $rank(p,k)$, que define o valor de $dur(m,k)$ através da equação 2.3, pode então ser escrita como na equação 2.4. A equação 2.4 é gerada para toda máquina, exceto a última (NM), e para toda posição da sequência de produção, exceto a última (NT).

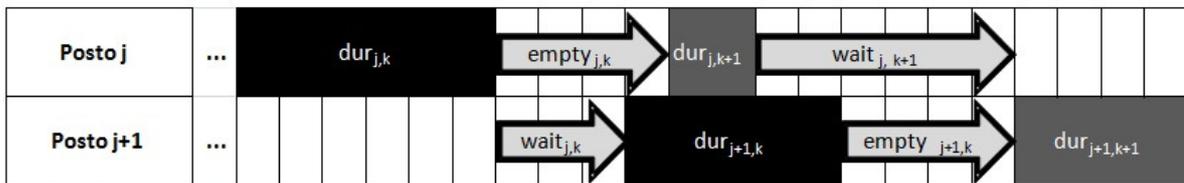


Figura 2.10 – Representação das variáveis $empty(j,k)$ e $wait(j,k)$ com a variável $rank(t,k)$

Fonte: (Adaptado de GUERET *et al.*, 2000)

$$empty(m,k) + wait(m,k+1) + dur(m,k+1) = wait(m,k) + empty(m+1,k) + dur(m+1,k) \quad \forall m = 1, \dots, NM - 1; k = 1, \dots, NT - 1 \quad (2.4)$$

Guéret *et al.* (2000) definiram como função objetivo minimizar o tempo de início da primeira peça da sequência de produção na última máquina, somado com o tempo de máquina parada, $empty(m,k)$, na última máquina, NM . Note que esta função objetivo é equivalente à minimização do tempo total de execução de todas as peças, já que a soma dos tempos de todas as peças processadas na última máquina é uma constante.

$$\text{Minimizar: } \sum_{m=1}^{NM-1} dur(m,1) + \sum_{k=1}^{NT-1} empty(NM,k) \quad (2.5)$$

2.10.2 Definição do Início do Processamento

O problema de sequenciamento ótimo da produção num sistema do tipo *Flow Shop* pode ser resolvido apenas com as expressões 2.1 a 2.5. Porém, para que esta

formulação tenha uma aplicação prática, é preciso definir o instante de início do processamento da peça que ocupa a posição k da sequência de produção em qualquer máquina m , $start(m,k)$. As equações 2.6 e 2.7 cumprem esta tarefa. A equação (2.6) impõe que, numa máquina m , o início do processamento da peça na posição $k+1$, $start(m,k+1)$, é dado pela soma do início do processamento da peça na posição k , dado por $start(m,k)$, mais a duração do processamento desta peça nesta máquina, dado por $dur(m,k)$, mais o tempo em que esta máquina permaneceu parada após o processamento da peça na posição k , dado por $empty(m,k)$.

Com a inserção das equações 2.6 e 2.7, a função objetivo apresentada na expressão 2.5 poderá ser substituída pela expressão 2.8, que representa o fim do processamento da peça na última posição da sequência de produção (NT) na última máquina (NM). Minimizar este instante significa minimizar o tempo total de execução de todas as peças.

$$start(m, k + 1) = start(m, k) + dur(m, k) + empty(m, k) \quad \forall m; k = 1, \dots, NT - 1 \quad (2.6)$$

$$start(m + 1, k) = start(m, k) + dur(m, k) + wait(m, k) \quad \forall m = 1, \dots, NM - 1; k \quad (2.7)$$

$$\text{Minimizar: } start(NM, NT) + dur(NM, NT) \quad (2.8)$$

3. ESTUDO DE CASO

Este capítulo detalha o problema de planejamento e programação da produção do estaleiro abordado.

3.1 DEFINIÇÕES DO ESTALEIRO E DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO

Para realizar um estudo de caso real é necessário firmar parcerias com estaleiros de fabricação de embarcações náuticas. Inicialmente a busca concentrou-se no litoral de Santa Catarina, um estado que possui diversos estaleiros e portos marítimos em atividade. Após algumas pesquisas no pólo marítimo deste estado, foram realizados diversos contatos com empresas do setor. Porém, nenhuma parceria acabou por se concretizar.

No estado do Paraná, existem em atividade poucos estaleiros e os portos de Paranaguá e Antonina, os quais possuem uma grande atividade comercial do setor dentro do país. Detectou-se no estado que as empresas do setor náutico entraram no ramo de fabricação de embarcações, via de regra, a menos de 15 anos.

De mais antigos, foram encontrados estaleiros que trabalham na manutenção de embarcações, efetuando reparos e ações corretivas nos problemas pertinentes ao uso. Após exaustivas pesquisas foi encontrado um estaleiro do ramo náutico na cidade de Curitiba - PR. Depois de alguns contatos, e algumas visitas ficou identificado o interesse do mesmo em participar e realizar a parceria para o desenvolvimento do estudo. Este estaleiro é denominado Estaleiro Way Brasil. Informações acerca da empresa podem ser obtidas em (www.waybrasil.com).

3.1.1 O Mercado de Embarcações

Anteriormente observou-se que os estaleiros incorporavam em seu processo produtivo a fabricação de todas as partes que compõe uma embarcação (ACOBAR, 2005). Contudo, à medida que as empresas cresciam, surgiam inúmeras dificuldades na gestão dos processos e a eficiência da utilização dos recursos não

resultava em um desempenho satisfatório. Esse panorama foi sendo alterado, para uma desverticalização em toda a indústria.

Muitos estaleiros direcionaram seus esforços nas áreas de maior competência realizaram parcerias estratégicas com fornecedores, de forma similar ao ocorrido na indústria automobilística. Apenas uma demanda regular de embarcações justifica a introdução no processo produtivo de oficinas, que dependem da função ou do item que produzem.

Uma embarcação pode ser caracterizada por seu tamanho e sua função. Existem barcos utilizados somente para pesca, sendo assim de menor porte, e de simples fabricação. Já os barcos para transporte de pessoas, como *catamarans*, *ferry boats*, lanchas e iates, destacam-se pela qualidade no acabamento e aproveitamento do espaço interno.

Há ainda, os barcos de grande porte, como rebocadores, navios cargueiros, entre outros. Estes se destacam pelas diversas funcionalidades e complexidade do produto. Devido ao seu grande porte, possuem processo produtivo complexo, elevado número de mão de obra e tempo de fabricação. A figura 3.1 ilustra exemplos de modelos de embarcações.

O estaleiro parceiro deste estudo atua na área de embarcações náuticas para a prática de esportes e transporte de pessoas e utiliza como matéria-prima principal no processo de fabricação das embarcações a fibra de vidro. Destacam-se, ainda como materiais utilizados neste segmento a madeira, *kevlar*³ e os metais.

A definição do processo de edificação de uma embarcação em um estaleiro pode ser primariamente padronizada como sendo composta de três tipos de montagem de blocos a se considerar:

- I) Submontagem dos blocos, feita pela montagem de peças menores em peças de um porte maior;
- II) A montagem de um bloco unitário, consiste em agrupar as várias sub-montagens para formar um bloco unitário principal;
- III) A montagem dos grandes blocos, unindo vários blocos unitários que irão formar a embarcação.

³ *Kevlar* – Material polimérico composto que consiste de longas cadeias de *poly-paraphenylene terephthalamide*, com uma orientação paralela desenvolvido e patenteado pela empresa Dupont.



Figura 0.1 – Tipos de Embarcações Produzidas em Estaleiros.

A figura 3.2 ilustra a divisão de sub-blocos e blocos de um navio para a edificação dos blocos da sua casa de máquinas e do restante dos sub-blocos e blocos que compõe o restante da embarcação.

As operações que demandam maior tempo no processo de construção, chamada de *Outfitting*⁴, são aquelas onde são feitas as montagens internas e montados os dutos e tubulações, bem como fiação elétrica, instalação de componentes eletrônicos e acabamento.

No estudo realizado por Pinto *et al.* (2007), o modelo do sistema de produção é por projetos e o objetivo é orientar a formação de células de manufatura paralelas para fabricação da estrutura de um navio. A produção seriada de componentes é agrupada em processos semelhantes de manufatura e compras, reduzindo sensivelmente o tempo de entrega e custos. Estes são os fundamentos da tecnologia de grupo, configuração de processos recomendada para estaleiros, em que existem diversos itens intermediários que passam por processos produtivos semelhantes, ainda que existam pequenas diferenças nos produtos. Essa padronização de processos implica em produção eficiente e acelerada melhorando a produtividade do estaleiro.

⁴ *Outfitting* – Processo no qual são montadas as tubulações internas da embarcação, além dos conduítes de cabos elétricos, instalação de componentes eletrônicos e acabamento.

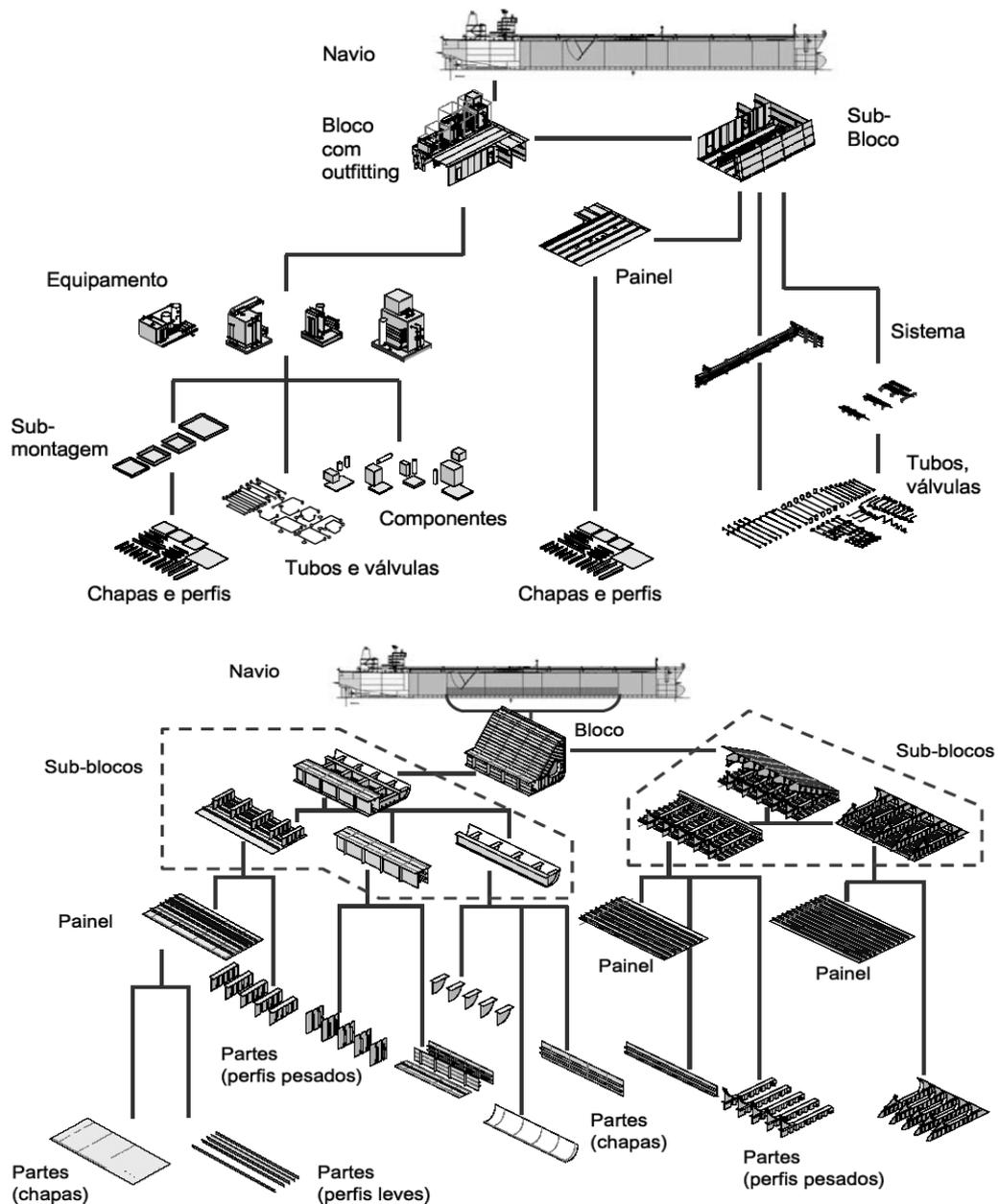


Figura 0.2 – Divisão dos Blocos da Estrutura de Produto de um Navio . Fonte: PINTO *et al.* (2007).

Conforme mostra a figura 3.2, cada item intermediário da estrutura corresponde a um pacote de trabalho associado à sua montagem e junção com as demais peças. No caso da indústria naval, essa estrutura é complexa e a ordem de quantidade dos itens necessários para cada embarcação (demanda) indica que a abordagem do planejamento e programação da produção não deve tratar da mesma forma todos os processos. Ou seja, a modelagem de um estaleiro envolve uma composição de diferentes modelos de sistemas produtivos.

Neste trabalho, os modelos de sistema de produção identificados serão tratados separadamente, já que as restrições de cada um deles são diferentes.

3.1.2 O Processo de Fabricação de Artefatos em Fibra de Vidro (*Spray Up*) no Cenário Estudado

Para fabricar peças em fibra de vidro é necessário confeccionar uma ferramenta em madeira e aço (ou molde) com o formato inverso do desejado na peça. Portanto, o molde acaba se tornando o limitador do processo já que não é muito comum fabricar mais de uma ferramenta para determinada peça, exceto quando a mesma possui uma demanda elevada que justifique o investimento e fabricação de uma nova ferramenta.

O procedimento operacional do trabalho com moldes para laminação em fibra de vidro armazena uma peça em seu interior. E a própria peça armazenada funciona como elemento de proteção ao molde. Este procedimento evita eventuais danos, como riscos e acúmulo de sujeiras durante a armazenagem.

A particularidade de extrair a peça do molde gera algumas peculiaridades ao processo. Uma, quanto ao espaço disponível na instalação que deve ser suficiente para acomodar todas as peças e moldes. A outra é que após o processo de desmoldagem, peça e molde seguem caminhos distintos.

O processo de fabricação das partes da embarcação em fibra de vidro inicia-se com a etapa de preparação da ferramenta para pintura. O molde é encaminhado a operação que consiste em espalhar a resina desmoldante e aplicar massa nos cantos desgastados/danificados devido ao uso do molde. Após a preparação, o molde é encaminhado ao processo de pintura com *gelcoat*, e posterior cura (tempo de secagem da tinta utilizada).

Segundo observações práticas do processo em estudo, a cura do *gelcoat* ocorre, em torno de 10 a 15 minutos, dependendo da temperatura do ambiente. Com a tinta aplicada a ferramenta (molde), o mesmo é encaminhado ao posto de laminação da fibra de vidro, onde a mesma é laminada em camadas. Primeiro, laminam-se duas a três camadas de fibra de vidro picotada adicionada de resina, e espera-se o tempo de cura parcial. Após a cura parcial, a ferramenta retorna ao posto de trabalho de laminação da fibra de vidro para que sejam laminadas, mais

duas ou três camadas adicionais. Além disto, ocorre a colocação de mantas de fibra de vidro trançadas e madeiras de reforço para maior rigidez do bloco/peça.

Finalizada a laminação da fibra de vidro, deve-se encaminhar a ferramenta com a peça recém laminada à doca de armazenamento, onde é realizada a cura final, desta vez da resina utilizada na laminação das madeiras e mantas em fibra de vidro. Finalizada a cura da resina a peça é então retirada da ferramenta por uma talha e alguns colaboradores no processo de desmoldagem. A seguir a peça é encaminhada para as operações de acabamento e montagem.

A ferramenta (molde) retorna então, para o processo de preparação da ferramenta para novas pinturas e laminações. As peças em fibra de vidro são posteriormente encaminhadas a operação de lixamento, processo de cortes, furações e lixamento/acabamento, são realizadas as retiradas de excesso de material, e montagem estrutural das edificações da cabine e do convés.

Ao terminar as operações de lixamento, a peça é movimentada para as operações seguintes: o polimento com cera e as pré-montagens. No polimento, a peça recebe o acabamento adequado para atender aos padrões de qualidade da empresa, no que se refere a brilho e textura da peça e pré-montagens hidráulicas

Tanto para as peças maiores como para as peças menores, a sequência de execução das tarefas é semelhante. Altera-se somente a maneira como é feita a laminação de fibra de vidro. A utilização de uma pistola tipo *spray up* pode gerar muito desperdício de matéria prima na laminação de peças pequenas. Assim, nestes casos, opta-se então pela laminação manual, com manta pré-fabricada de fibra de vidro.

A figura 3.3 ilustra, no contexto do estudo de caso realizado, a sequência dos processos de fabricação de uma embarcação de fibra de vidro. Adicionalmente, esta figura também indica os sistemas de produção utilizados. Até a operação de cura da resina após a laminação *spray up*, o processo de fabricação caracteriza-se pelo sistema de produção intermitente repetitivo e deve ser programado diferentemente das demais operações que possuem características de sistema de produção intermitente sob encomenda.

O fluxo das peças no chão de fábrica é iniciado nas operações de lixamento. A seguir as peças são encaminhadas para o polimento, e, finalizado este processo, devem ser realizadas as operações de montagem (*Outfitting*) da embarcação. A

embarcação deve receber também os acabamentos finais, como as tubulações hidráulicas, a cablagem elétrica, caixas, estofamento, entre outros.

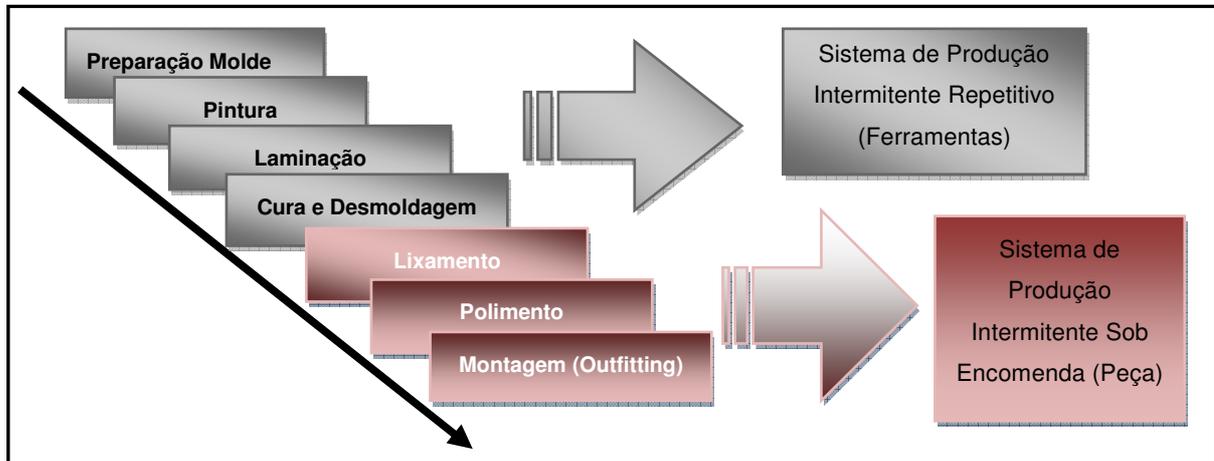


Figura 3.4 – Sequência dos processos de fabricação de uma embarcação de fibra de vidro e seus respectivos sistemas de produção.

Na empresa analisada, conforme descrição realizada, o processo produtivo que utiliza fibra de vidro é dependente da ferramenta (molde) para confecção de peças, sendo pouco automatizado. Exceção a essa dependência do molde é a execução das operações de acabamento das peças e sua posterior montagem. Esses procedimentos são chamados de processos de edificação da embarcação.

No caso de estudo do setor náutico, devido à menor complexidade da estrutura de produto em relação aos navios, considera-se que a edificação, montagem dos sub-blocos nos blocos e dos blocos uns nos outros, faz parte das montagens finais. Muitas operações de *Outfitting* são realizadas somente pouco antes do fechamento das partes principais, ou seja, o casco e o convés.

A estrutura de produto das operações de montagem é mais complexa que nas oficinas e não será abordada nesta dissertação por considerar recursos diferentes das oficinas. Os Apêndices A, B e C ilustram as estruturas de produto das peças que compõe cada embarcação, destacando em vermelho as partes pequenas, que não serão envolvidas neste trabalho, por não utilizarem o mesmo posto de trabalho gargalo.

Devido às relações de precedência entre montagens, deve-se respeitar a execução de determinadas tarefas antes de outras. Caso isso não seja respeitado, determinada tarefa pode, por exemplo, ser inviabilizada pela dificuldade de trabalho

em espaços restritos. Nas operações de montagem há uso de alguns itens comprados.

O número de operações executadas nas oficinas é menor que no sistema intermitente sob encomenda. Porém, os tempos de processamento das operações são maiores que nas montagens e a sequência de sua execução é dependente da sequência pré-estabelecida de produtos e da ocupação dos moldes e postos de trabalhos. Estas são as justificativas principais da escolha em pesquisar os processos que utilizam ferramentas, oficinas no decorrer deste trabalho.

Esta sequência deve permitir a execução de mais de uma tarefa ao mesmo tempo em postos de trabalhos distintos, porém sem sobreposições de operações no mesmo posto de trabalho. Desta forma, a otimização das operações de fabricação (oficinas) tende a trazer benefícios para o processo produtivo como um todo. Assim, a presente dissertação foca a otimização destas operações de fabricação de peças em fibra de vidro, ou seja, as operações do sistema intermitente repetitivo. A figura 3.4, detalha os processos de fabricação, indicando inclusive, os postos de trabalho (PT) que realizam os processos no chão de fábrica.

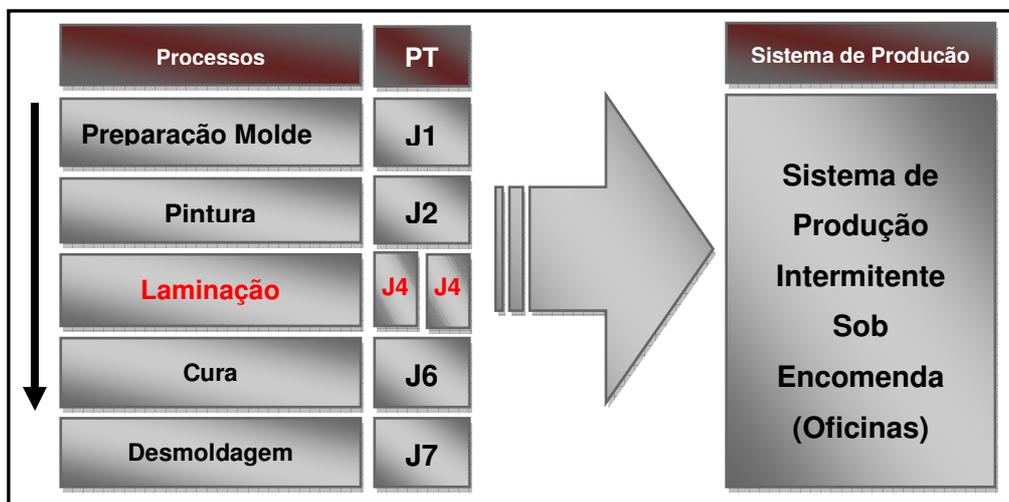


Figura 3.5 – Sequência dos processos de fabricação de uma peça de fibra de vidro e respectivo sistema de produção.

Os processos destacados na figura 3.4 dependem da disponibilidade do molde (ferramenta), considerando-se a execução de uma quantidade maior que uma unidade para cada modelo de produto.

Preparação, pintura, laminação, cura e desmoldagem compõem os processos de fabricação do sistema. Neles há pouca variedade de matéria-prima utilizando-se somente aquelas necessárias à fabricação e acabamento da parte bruta da embarcação em fibra de vidro. Destacam-se os seguintes materiais: mantas trançadas ou fios, resina, *gelcoat isoftálico*, madeira naval, e cera.

Na figura 3.4, pode-se observar que o posto de trabalho, de laminação de fibra de vidro (J4), está destacado em vermelho. Isto ocorre porque, dentre os postos em análise, é este o que possui os tempos de processamento mais elevados, restringindo a quantidade de peças a serem confeccionadas para a produção das embarcações. Devido a este fato, este posto de trabalho é, na prática, duplicado, buscando-se minimizar o seu impacto na fabricação das peças. De fato, a duplicação do posto J4 fez-se estritamente necessária para que a empresa pudesse cumprir metas de venda.

No presente trabalho, contudo, somente parte dos produtos fabricados pela empresa é considerada. Assim, um dos postos J4, é dedicado aos outros modelos do *mix* de produção da empresa, e que não fazem parte, no momento, do escopo de observação deste trabalho. Na prática, somente um dos postos J4 é disponibilizado para o processamento dos modelos considerados. A seção de resultados, apresentada no capítulo 5, detalha esta consideração que, em essência, tem intuito de facilitar o entendimento dos resultados da abordagem de solução adotada.

3.2 MODELOS DE EMBARCAÇÕES DO ESTALEIRO

O estaleiro náutico, objeto deste estudo, é capaz de produzir diversos modelos de embarcações em fibra de vidro para lazer e transporte, que possuem dimensões entre 5 e 12 metros de comprimento, conforme ilustrado na figura 3.5.

A empresa considerada possui uma linha embarcações para pescas pluviais e uma linha de lanchas marítimas. Na presente dissertação, somente os modelos de barco de pesca, serão considerados. Estes possuem um menor número de peças que as lanchas marítimas apresentando uma estrutura de produto mais simples (Apêndices A, B e C), o que facilita o entendimento e a modelagem do problema de planejamento e programação de produção abordada.

De acordo com Lustosa *et al.* (2008) os principais parâmetros necessários para execução do planejamento e programação da produção são: a quantidade de tarefas necessárias para a manufatura do produto, a quantidade de processadores para execução das tarefas, bem como suas disponibilidades, a relação de precedência entre as tarefas, o tempo de processamento das mesmas, a estrutura de produto, a lista dos materiais e componentes necessários para a confecção do produto e o *lead time* da compra dos materiais e componentes do pedido aos fornecedores até a entrega dos mesmos na empresa. Assim, para realizar a tarefa de programação de produção das peças que compõe cada modelo de embarcação, foi realizada a coleta *in loco* de informações que parametrizam cada modelo de barco. Por exemplo, os Anexos A, B e C elencam algumas das informações obtidas.



Figura 3.6 - Modelos de barcos fabricados pelo estaleiro do estudo. Fonte: www.waybrasil.com

Outro parâmetro que deve ser definido é a quantidade de modelos de produto fabricados, ou seja, o *mix* de produtos que a empresa possui, bem como a demanda média de cada modelo em um determinado período de tempo. Em problemas de planejamento e programação da produção, uma dificuldade é fazer uso racional dos recursos diante de variações que podem ocorrer no *mix* de produção.

A figura 3.6 ilustra os três modelos de barcos de pesca, os quais fazem parte do *mix* de produção da empresa. Inicialmente foram identificados os componentes de cada modelo de embarcação da figura, analisando-se detalhadamente peças e processos envolvidos.

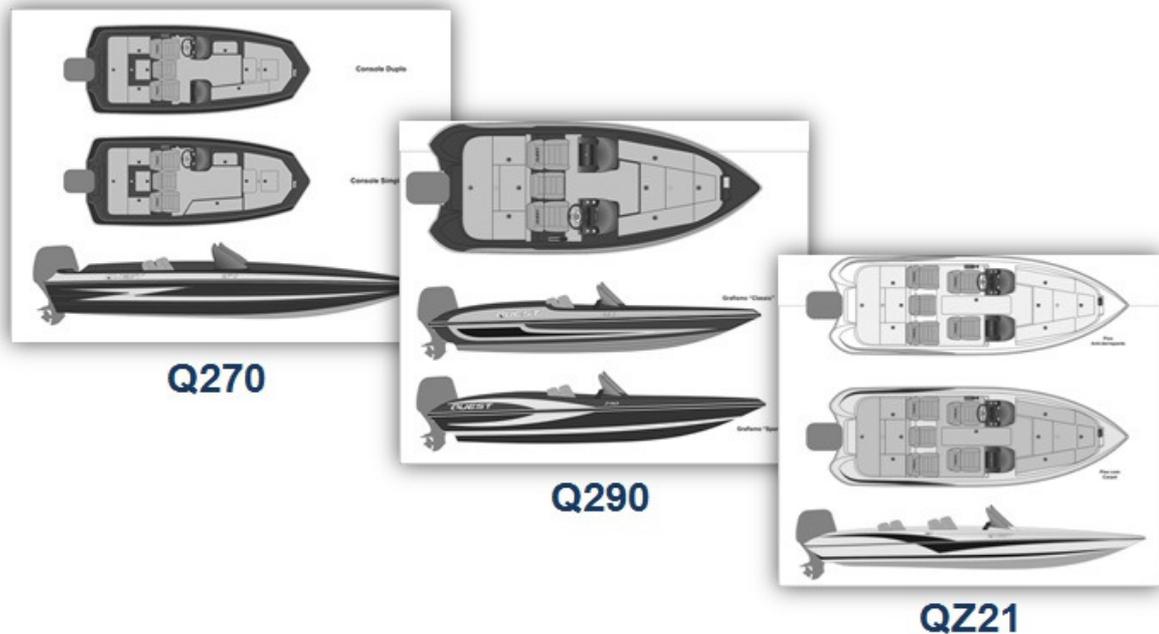


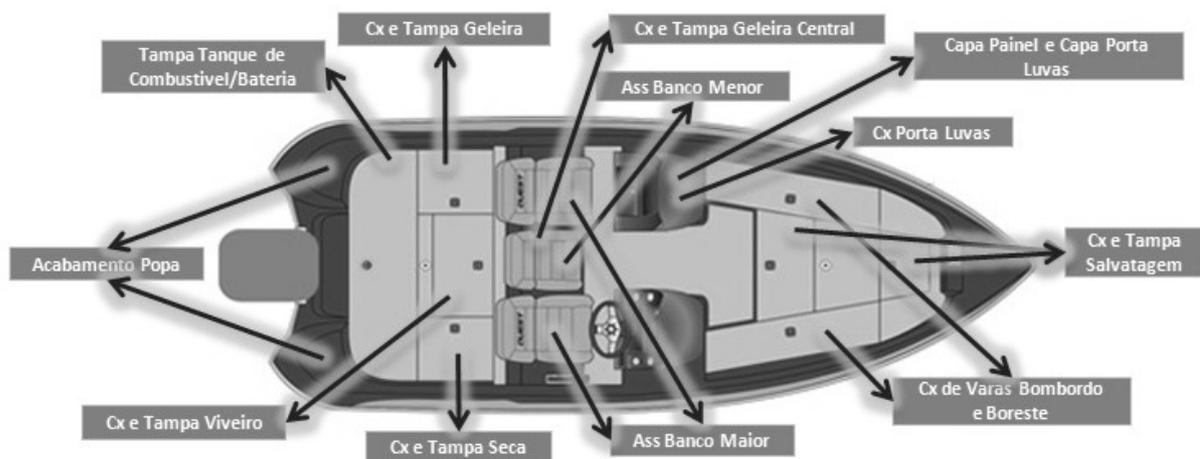
Figura 3.7 – Modelos de barco de pesca. Fonte: www.waybrasil.com.

3.2.1 Definições das partes

Cada peça pode ser interpretada como um sub-bloco ou bloco e seu agrupamento torna-se necessário para a edificação da embarcação. Respectivamente, cada modelo possui diferentes quantidades de tarefas que demandam tempos na fabricação. Cada tarefa possui algumas particularidades, como equipamentos e mão de obra especializada.

A maneira de analisar a quantidade de peças de uma embarcação náutica pode ser análoga à figura 2.13 da montagem dos blocos de um navio realizada por (PINTO *et al.* 2007). As peças possuem processos muito similares. Os barcos de pesca estão divididos em partes maiores as partes principais e peças secundárias, que são os blocos menores. Essa divisão pode ser observada na porção inferior da figura 3.7.

As partes secundárias são as peças de menor porte e são compostas principalmente por caixas, tampas e peças de acabamento. Estas peças possuem diversas funções como, por exemplo, caixa chave geral, barzinho, porta copos, encosto do convés, banco do piloto, entre outras. Todas elas são laminadas manualmente no posto (J5) e não ocupam o posto de trabalho gargalo (J4). Assim, podem ser mais facilmente programadas em função da ocupação das tarefas maiores nos postos de trabalho.



Partes Secundárias - Utilizam Laminação Manual



Partes Principais - Utilizam Laminação Spray Up (Posto de Trabalho Gargalo - J4)

Figura 3.8 - Divisão das partes principais de um barco de pesca.

As partes principais, as quais possuem geometria de tamanho considerável: casco, convés, e reforço do casco (parte interna). Todas as peças seguem um roteiro de fabricação dentro das oficinas (sistema de produção intermitente repetitivo) até chegarem aos processos de acabamento e montagem final (sistema de produção intermitente sob encomenda). Entretanto, algumas das peças menores em fibra de vidro também necessitam de operações extras, como estofamento com espuma e tecido, montagem de acrílicos, pintura adicional na outra face da peça,

entre outros. As peças maiores participam da edificação parcial da embarcação, e nelas são feitas submontagens e estruturação de sistemas hidráulicos, elétricos e de entradas de ar. As peças grandes da embarcação fazem parte dos estudos realizados na presente dissertação devido à necessidade de um tempo maior de processamento e de cura da fibra de vidro em relação aos itens menores, provocando assim a existência de um posto de trabalho gargalo, o posto de laminação spray up, J4.

Conforme a figura 3.8, que ilustra uma vista superior de uma embarcação, a dimensão apresentada influi na área total a ser laminada. Assim, conforme a necessidade de laminação, os principais recursos de fabricação, máquinas e moldes são ocupados por mais tempo, diminuindo-se a produtividade do estaleiro.

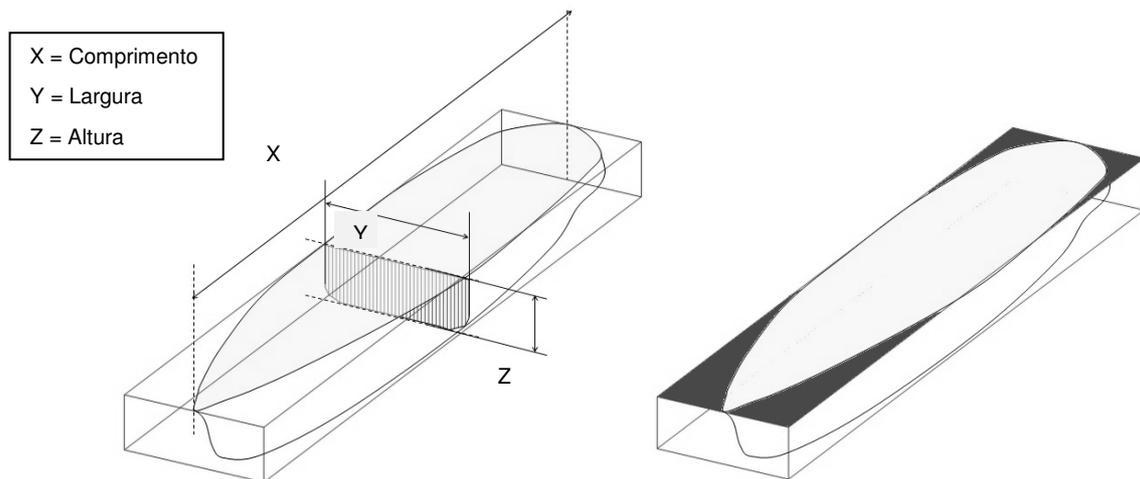


Figura 0.9 – Dimensões principais e representação da vista superior dos blocos de uma embarcação analisando a perda de área (escura) no plano de arranjo físico 2D.

A proposta deste trabalho aborda três modelos de barcos de pesca da empresa, denominados Q268 (Q1), Q290 (Q2) e QZ21(Q3). E cada barco é composto por três partes principais, convés, casco e reforço do casco. O convés e o casco são divididos em dois estágios, devido a maior complexidade de processamento destas peças. Desta forma, o total de peças de acordo com cada modelo pode ser esquematicamente elencado conforme a seguir:

Q1 = {Convés - p01,p02; Casco - p21,p22; Reforço Casco - p3}

Q2 = {Convés - p41,p42; Casco - p51,p52; Reforço Casco - p6}

processamento de, respectivamente, 0,8h, 2,22h e 0,1h, devem ser processadas no posto J1, em diferentes tempos. Ou seja, somente uma tarefa é executada em um posto de trabalho em um dado instante temporal. Nesta figura também é possível observar que cada peça, ou componente da embarcação, possui um número específico de tarefas de processamento. Por exemplo, a peça denominada “reforço do casco” da embarcação Q268 (Q1) é a peça (p3) envolve as tarefas i29 a i32. A sequência de processamento das tarefas deve respeitar a estrutura de produto de cada embarcação. Os instantes de início são definidos pela disponibilidade do posto de trabalho e do molde da peça a ser produzida. Os instantes de término de processamento serão definidos pelo instante de início e pelo tempo de processamento de cada tarefa.

A tabela 3.1 relaciona as peças consideradas para o sequenciamento produtivo com as tarefas reais a serem executadas na empresa. As tarefas foram agrupadas em peças ou “blocos construtivos” para melhorar o desempenho computacional da abordagem de solução adotada.

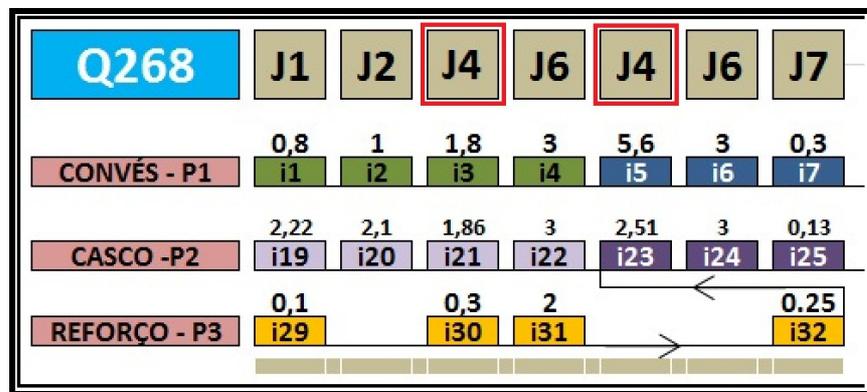


Figura 3.110 – Relação de precedência de todas as tarefas de fabricação de um barco de pesca.

Opta-se por utilizar essa forma de codificação da divisão e correlação entre as tarefas e peças visando minimizar o número de variáveis em virtude da carga computacional acrescida imposta em sua utilização de maneira mais detalhada ao processamento das equações matemáticas que buscam encontrar o melhor resultado do estudo de caso em foco.

Tabela 3.1 – Relação do agrupamento das tarefas, formando as peças que serão sequenciadas.

Modelo	Peça	Tarefas			
Q268	P01	I1	I2	I3	I4
	P02	I5	I6	I7	
	P21	I19	I20	I21	I22
	P22	I23	I24	I25	
	P3	I29	I30	I31	I32
Q290	P41	I33	I34	I35	I36
	P42	I37	I38	I39	
	P51	I51	I52	I53	I54
	P52	I55	I56	I57	
	P6	I61	I62	I63	I64
QZ21	P71	I65	I66	I67	I68
	P72	I69	I70	I71	
	P81	I83	I84	I85	I86
	P82	I87	I88	I89	
	P9	I93	I94	I95	I96

3.2.3 Tempos de Processamento

Cada posto de trabalho leva determinado espaço de tempo para execução de uma tarefa. Este tempo depende, por exemplo, da dimensão do molde e do acabamento a ser efetuado. Nas figuras 3.9 e 3.10 anteriormente apresentadas, os tempos exigidos nos postos de trabalho aparecem logo acima das tarefas. Por exemplo, a tarefa i1 consome, aproximadamente, 0,8h para execução em J1.

Segundo Slack (1997), *lead time* é o tempo de processamento da matéria prima até que a mesma esteja pronta para ser entregue ao cliente. Segundo o autor, há a uma busca incessante pela redução do *lead time*, o que conduz a uma maior automatização dos processos de planejamento e programação de sistemas produtivos, a uma redução do tempo de preparação das máquinas, a uma padronização das ferramentas empregadas e a uma redução dos ciclos de fabricação.

Este estudo foca a parte do processo de fabricação dos moldes. Considerando assim, somente os tempos dos processadores J1 a J7. Desconsiderando assim os tempos coletados nas montagens da embarcação. Na produção dos itens que passam pelas oficinas existe a necessidade de respeitar a capacidade do processador ou da ferramenta, dado que os itens irão competir para ocuparem os postos do setor de fabricação das peças em fibra de vidro. Ressalta-se que somente uma tarefa pode ser executada por vez em um dado posto de trabalho, e que um

atraso na confecção das peças em fibra de vidro impacta na programação das tarefas de montagens dos barcos.

Esta característica de processo evidencia a necessidade de realizar o sequenciamento da produção. Este sequenciamento deve estar alinhado às decisões de planejamento estratégico da empresa. O não alinhamento pode gerar desperdício de mão de obra e tempos de equipamentos, aumentando, desta forma, os custos de processamento do produto. Portanto, o parâmetro de tempo de processamento deve ser criteriosamente coletado.

No estudo de caso realizado utilizou-se a cronoanálise para determinação dos tempos de cada operação. Essa tarefa foi minuciosa e contou com a experiência do relator desta dissertação dentro da indústria náutica em estudo. Foram realizadas medições temporais *in loco* no ambiente produtivo durante meses, coletando-se tempos do processo em diferentes condições de operação e em diferentes momentos dos turnos de trabalho. Objetivou-se obter tempos médios representativos da realidade operacional. Ressalta-se esta tarefa devido ao tempo consumido. Houve necessidade de acompanhar a fabricação de diferentes unidades de um mesmo modelo de embarcação diversas vezes, devido à simultaneidade de execução das operações. A cronoanálise permitiu estimar este importante parâmetro do processo de programação da produção. A relação completa das tarefas de processamento de cada modelo de embarcação e seus respectivos tempos de fabricação das partes pode ser encontrada nos Anexos A, B e C.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo apresenta-se a abordagem de solução proposta. Esta abordagem é aplicada em um estudo de caso da programação das tarefas de fabricação de peças de fibra de vidro de embarcações náuticas de pequeno e médio porte. A metodologia de pesquisa aplicada a essa dissertação é esboçada, conforme mostra a figura 4.1.

Na **primeira fase** do desenvolvimento do trabalho (figura 4.1), após ser vinculada a parceria com o estaleiro, tornou-se necessário a identificação dos modelos do *mix* de produção, do roteiro de fabricação das peças, dos postos de trabalho, dos tempos de processamento e das relações de precedência entre as tarefas de fabricação das peças em fibra de vidro.

Na **segunda fase** do desenvolvimento do trabalho (figura 4.1), foi necessário realizar pesquisas sobre estudos similares, que possuíam como objetivo melhorar a eficiência da programação das tarefas de fabricação de uma embarcação seja ela náutica ou naval. Necessário identificar e analisar os tipos de sistemas de produção possíveis de serem encontrados em um estaleiro, bem como, registrar as políticas que norteiam a programação da produção de peças de um sistema intermitente. Esta etapa é apresentada neste trabalho nos capítulos 2 e 3.

Na **terceira fase**, trabalhou-se no desenvolvimento do modelo matemático considerado mais apropriado para alcançar a solução do problema. Tornou-se necessário adaptar um modelo da literatura para que a abordagem do problema fosse o mais realista possível. Esta etapa será descrita na sequência deste capítulo bem como as equações adicionais desenvolvidas a fim de alcançar um resultado mais real possível.

A **quarta fase** do desenvolvimento do trabalho envolveu a parte de programação em *softwares* que realizam, primeiramente, uma interface com o usuário, possibilitando que o programador interaja com o *software*, inserindo diferentes valores de demanda que serão encaminhadas a um *solver* matemático⁵ que executará a busca pela melhor solução através da resolução das equações

⁵ *Solver* matemático é o *software* que resolve o problema de programação matemática. Neste trabalho, utilizou-se o *software* GAMS para representar e gerar o modelo matemático do problema e usou-se o *software* CPLEX como *solver*.

lineares. Posteriormente, a solução encontrada é novamente direcionada ao software de interface com o usuário com os resultados obtidos.

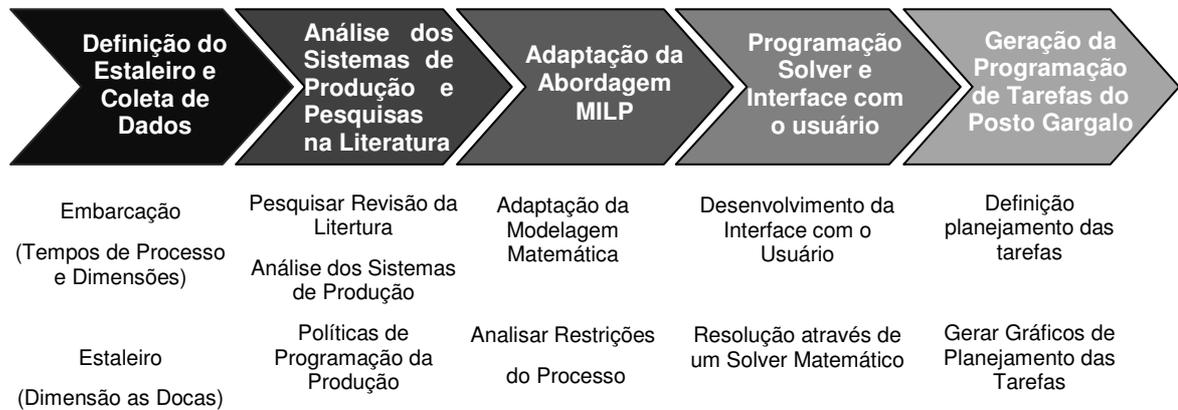


Figura 4.1 - Metodologia de desenvolvimento do trabalho.

Encontrada a melhor solução para o problema proposto, a última etapa consiste em identificar a solução e inserí-la em uma forma gráfica capaz de auxiliar o programador (ou usuário) na execução do seu trabalho, facilitando a identificação de possíveis problemas que possam surgir nas etapas de execução da fabricação de peças em fibra de vidro minimizando assim perdas pela execução de um planejamento mal executado.

4.1 REPRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Através da programação linear inteira mista (PLIM) baseada na abordagem de Guéret *et al.* (2000), apresentada na seção 2.10.1, buscou-se identificar os aspectos mais relevantes e desenvolver uma formulação do problema que promova uma eficiente utilização dos postos de trabalho, melhorando o aproveitamento dos mesmos, a fim de aumentar a produtividade do estaleiro em questão.

Como citado por Pinto *et al.* (2007), a programação da produção de um estaleiro pode ser análoga ao aplicado no setor metal-mecânico. Pinto *et al.* (2007) utilizaram uma abordagem PERT/CPM, usando o *software* MS-Project, para simular a programação da produção em seu estudo de caso.

Nesta dissertação será apresentada uma abordagem de Programação Linear Inteira Mista (PLIM) para resolver o estudo de caso proposto. A abordagem proposta

se baseou na decomposição do problema em duas etapas:

- Na primeira etapa é realizada a separação da demanda em “campanhas”, onde cada campanha corresponde à execução das tarefas de um agrupamento de peças de um ou mais modelo de embarcação, onde uma solução ótima da programação da produção pode ser obtida. Cada campanha é similar ao conceito de “filme da produção” adotado pela empresa francesa Renault na produção de veículos automotivos. Paralelamente ao uso de campanhas, observou-se que um dos recursos (posto de trabalho de laminação de peças maiores) da empresa constitui-se no gargalo de produção da empresa. Após a realização de testes, descritos no capítulo 5, observou-se que a solução da primeira etapa pode ser centrada na minimização ou eliminação de ociosidade do posto de trabalho que é o “gargalo da produção”. O modelo matemático proposto nesta etapa é uma adaptação do modelo para programação da produção em um sistema *flowshop* apresentado por Guéret *et al.* (2000);

Na segunda etapa, dada a demanda total, calcula-se quantas vezes cada campanha será produzida.

O detalhamento e as equações destinadas a cada etapa pode ser observado na figura 4.2 a seguir.

1° Etapa	Agrupamento de Tarefas	Minimização ou eliminação de ociosidade do posto de trabalho que é o “gargalo da produção”.	Equações: 2.1,2.3,2.4,2.6 e 4.1 a 4.16.
2° Etapa	Agrupamento de Campanhas de Modelos	Determinação da quantidade de campanhas a serem produzidas.	Equações: e 4.17 a 4.23.

Figura 4.2 – Detalhamento das etapas e suas equações de processamento.

4.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA PROPOSTA PARA A PRIMEIRA ETAPA

Nesta seção apresenta-se a primeira etapa da abordagem proposta nesta dissertação. Do modelo matemático original apresentado em Guéret *et al.* (2000) serão utilizadas nesta dissertação as expressões 2.1, 2.3, 2.4 e 2.6, que serão rerepresentadas junto ao modelo matemático proposto. Também serão apresentadas as novas expressões propostas nesta dissertação que correspondem a alterações das equações apresentadas por Guéret *et al.* (2000) ou a expressões matemáticas

originais, atendendo e/ou explorando às especificidades do problema no estaleiro estudado. Por exemplo, neste capítulo serão apresentadas as restrições impostas pelas limitações dos recursos e da disponibilidade dos moldes na fabricação das peças.

Essa abordagem, se convenientemente adaptada a outros casos existentes, poderá ser adequada na resolução de vários problemas da indústria náutica e naval. Antes de apresentar as equações usadas, são apresentados, respectivamente nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, índices, variáveis e parâmetros utilizados nas expressões matemáticas.

Tabela 4.1 – Índices adotados nas expressões matemáticas.

p	Identifica uma peça. Seu valor máximo é NP ;
m	Identifica uma máquina ou posto de trabalho. Seu valor máximo é NM ;
k	Identifica uma posição na sequência de produção. Seu valor máximo é NK ;
g	Identifica um produto, que é composto por um conjunto de peças $CJ(g)$. Seu valor máximo é NP ;
l	Identifica uma unidade produzida, já que várias peças poderão ter várias unidades produzidas. Seu valor máximo é a demanda do produto, $dem(g)$.

Tabela 4.2 – Variáveis adotadas nas expressões matemáticas.

$dur(m,k)$	Tempo de processamento na máquina m da peça que ocupa a posição k ;
$empty(m,k)$	Ociosidade na máquina m após o processamento da peça na posição k ;
$endpro(g,l)$	Instante final do processamento da última tarefa de uma das peças associadas à unidade l do produto g ;
$endord(k)$	Instante de fim do processamento da última tarefa da peça na posição k ;
$lote(g,l,p,k)$	Variável binária que terá valor 1 se a peça p que ocupa a posição k (na sequência de produção das peças) for associada à unidade l do produto g . Caso contrário, o valor será zero;
$rank(p,k)$	Variável binária que terá valor 1 se a peça p ocupa a posição k na sequência de produção das peças. Caso contrário, o valor será zero;
$start(m,k)$	Instante de início do processamento na máquina m da peça alocada na posição k da sequência de produção;
$stpro(g,l)$	Instante inicial do processamento da primeira tarefa de uma das peças associadas à unidade l do produto g ;
$stord(k)$	Instante de início do processamento da primeira tarefa da peça na posição k ;
$wait(p,k)$	Tempo que a peça p fica “esperando” para ser processada na máquina seguinte $(m+1)$ após ser encerrada a tarefa na máquina m .

4.2.1 Função Objetivo

Ao contrário do modelo apresentado por Guéret *et al.* (2000), a função objetivo adotada, apresentada na expressão 3.1, é do tipo multi-objetivo, apresentando vários objetivos que foram ponderados entre si. No capítulo 5, serão apresentadas várias simulações alterando-se a função objetivo. Como todos os objetivos analisados são multiplicados por um fator de ponderação, qualquer um destes objetivos pode ser “eliminado” ao associar ao seu fator de ponderação o valor zero. Os critérios apresentados na função objetivo são, pela ordem de importância:

- Minimizar a ociosidade do posto de trabalho gargalo da produção (de peças em fibra de vidro). No capítulo 6 analisa-se este objetivo, já que, após vários testes, observou-se que há um “gargalo de produção” no sistema de produção de peças em fibra de vidro. Este gargalo de produção corresponde justamente a um dos equipamentos de laminação de fibra de vidro;
- Minimizar o *lead time* do conjunto de peças em fibra de vidro que compõem um modelo de barco;
- Minimizar o *lead time* de cada peça em fibra de vidro produzida;
- Minimizar o tempo total de execução de todas as peças.

Tabela 4.3 – Parâmetros adotados nas expressões matemáticas.

$cura(p)$	Representa o tempo total necessário à conclusão da peça p após ela passar pelo recurso gargalo;
$dem(p)$	Demanda associada à peça p ;
$dempro(g)$	Demanda associada ao produto g ;
$folga$	Intervalo de tempo de segurança entre o fim do processo de laminação (operação de desmoldagem) de uma peça e o início do processamento (preparação do molde) de outra peça que compartilha o mesmo molde. Este intervalo de tempo leva em consideração o tempo de transporte da peça e do molde aos seus respectivos posto de trabalho subseqüentes;
$ltmax$	Valor máximo imposto aos <i>lead times</i> dos produtos;
$molde(p)$	Identifica o conjunto das peças que compartilham o molde (para a produção de peças de fibra de vidro) com a peça p ;
$pro(g)$	Conjunto das peças associadas ao produto g ;
$TP(m,p)$	Tempo de processamento da peça p na máquina m ;
$tr(m,p)$	Tempo de transferência da peça p da máquina m para a máquina seguinte;
α	Peso associado na função objetivo à existência de ociosidade na máquina gargalo;
β	Peso associado na função objetivo ao <i>lead time</i> para a produção de um

χ	produto; Peso associado na função objetivo ao <i>lead time</i> para a produção de uma peça;
δ	Peso associado na função objetivo ao tempo total necessário para a produção de todas as peças de todos os produtos planejados.

A função objetivo busca minimizar o tempo de início da primeira peça na sequencia no último posto de trabalho, somado ao tempo de ociosidade do posto $empty(j,k)$. Nesta adaptação, coloca-se um peso para a minimização do tempo de inicio e um peso maior para a ociosidade, determinando assim uma importância maior aos possíveis trechos de ociosidade do posto de trabalho gargalo dentro do processo.

$$\begin{aligned}
 (\min) \text{ obj} = & \alpha * \sum_k empty(m_{g \text{ arg alo}}, k) + \\
 & \beta * \sum_g \sum_{l \leq dem(g)} (fim_lote(g,l) - ini_lote(g,l)) + \\
 & \chi * \sum_k (fim_ord(k) - ini_ord(k)) + \\
 & \delta * fim_ord(NT)
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

4.2.2 Restrições de Sequenciamento

Um aspecto fundamental desta formulação é a associação da produção de cada peça a uma posição na sequência de produção, realizada pela variável $rank(p,k)$. Entre as restrições associadas ao sequenciamento, na equação 2.1, já explicada no capítulo 2, cada posição k na sequência de produção deve ser ocupada por apenas uma tarefa (GUÉRET *et al.*, 2000). Substituindo a equação 2.2, que só é válida quando a demanda das peças é unitária, foi proposta a equação 4.2. Como há uma demanda $Dem(p)$ associada a cada peça p , a equação 4.2 impõe que o número de posições ocupadas pela peça p será igual à $dem(p)$.

$$\sum_p rank(p,k) = 1 \quad \forall k \tag{2.1}$$

$$\sum_k rank(p,k) = dem(p) \quad \forall p \tag{4.2}$$

Dado que o conjunto CP identifica as peças associadas a alguma relação de precedência, onde $p \in CP$ indica que a peça p necessariamente precede alguma outra peça com a qual há uma relação de precedência. Na expressão 4.3, a soma das alocações da peça p , até a posição k , será maior ou igual à soma das alocações de todas as peças p_1 que consomem a peça p , até a posição k , o que é identificado pela relação de precedência $p_1 \in prec(p)$. A expressão 4.3 funciona como um controle da produção e do consumo das peças, impondo que a quantidade de peças p produzidas até qualquer posição k deve ser maior ou igual à quantidade de peças p_1 (que consomem p , ou seja, onde $p_1 \in prec(p)$). A expressão 4.4 complementa a expressão 4.3 ao forçar que a diferença entre a produção de peças p e seu consumo, por peças $p_1 \in prec(p)$, nunca deve exceder a uma peça. Esta expressão atende aos princípios da manufatura enxuta, que propõe a limitação no estoque de peças. No caso do estaleiro, este é um requisito desejável já que as peças náuticas, devido às suas dimensões, “consumem” o espaço disponível, que é limitado.

$$\sum_{k_1 < k} rank(p, k_1) \geq \sum_{p_1 \in prec(p)} \sum_{k_1 \leq k} rank(p_1, k_1) \quad \forall k > 1, p \in CP \quad (4.3)$$

$$\sum_{k_1 < k} rank(p, k_1) \leq 1 + \sum_{p_1 \in prec(p)} \sum_{k_1 \leq k} rank(p_1, k_1) \quad \forall k > 1, p \in CP \quad (4.4)$$

A expressão 4.5 tem a função de impedir que duas peças iguais p ou que compartilham o mesmo molde ($p_1 \in molde(p)$) sejam alocados a uma “distância” inferior a três posições uma peça da outra.

$$\sum_{k_1 \geq k \dots k_1 \leq k+3} \left(rank(p, k_1) + \sum_{p_1 \in molde(p)} rank(p_1, k_1) \right) \leq 1 \quad \forall p, k \leq NK - 3 \quad (4.5)$$

4.2.3 Restrições de Temporização das Peças

Nas restrições associadas à temporização das peças, a formulação proposta utiliza as equações 2.3, 2.4 e 2.6, propostas por Guéret *et al.* (2000). A explicação

destas restrições se encontra na seção 2.10.1. A expressão 4.6, proposta neste trabalho de mestrado, impõe que a ociosidade na máquina m após processar a peça alocada na posição k deverá ser maior ou igual ao tempo de transferência da peça p alocada na nesta posição (k). Ou seja, dependendo do tamanho da peça produzida, haverá um tempo de transferência, $tr(m,p)$, associado ao deslocamento desta peça para o posto de trabalho seguinte, o que imporá uma ociosidade mínima após processar uma peça p na máquina m . Neste trabalho, a equação 2.5 foi substituída pela inequação 4.7, que impõe que o início do processamento da peça p na máquina “ $m+1$ ” será maior ou igual ao início do processamento desta mesma peça na máquina anterior (m) mais o seu tempo de processamento na máquina m acrescido ao tempo de transferência desta peça da máquina m para a máquina $m+1$.

$$dur(m, k) = \sum_p TP(m, p) * rank(p, k) \quad \forall m, k \quad (2.3)$$

$$empty(m, k) + wait(m, k + 1) + dur(m, k + 1) = wait(m, k) + empty(m + 1, k) + dur(m + 1, k) \\ \forall m = 1, \dots, NM - 1; k = 1, \dots, NT - 1 \quad (2.4)$$

$$start(m, k + 1) = start(m, k) + dur(m, k) + empty(m, k) \quad \forall m; k = 1, \dots, NT - 1 \quad (2.6)$$

$$empty(m, k) \geq \sum_p tr(m, p) * rank(p, k) \quad \forall m, k \quad (4.6)$$

$$start(m + 1, k) \geq start(m, k) + dur(m, k) + \sum_p tr(m, p) * rank(p, k) \quad \forall m < NM; k \quad (4.7)$$

Uma nova variável, $stord(k)$, em relação ao modelo de Guéret *et al.* (2000), foi proposta para registrar o início do processamento na primeira máquina (ou seja, $m = 1$) da peça alocada na posição k . O valor desta variável é definido pela expressão 4.8. O sinal de menor ou igual foi adotado, no lugar da igualdade, porque isso facilita a solução do problema (Guéret *et al.*, 2000).

$$stord(k) \leq start(1, k) \quad \forall k \quad (4.8)$$

Outra variável proposta nesta abordagem é $endord(k)$, que representa o instante de fim do processamento da última tarefa da peça na posição k . Na expressão 4.9, o valor de $endord(k)$ deve ser maior ou igual ao fim do processamento no recurso gargalo ($start("gargalo", k) + dur("gargalo", k)$) somado ao parâmetro $cura(p)$, que representa o tempo total necessário à conclusão da peça p após ela passar pelo recurso gargalo. Neste caso, $cura(p)$ representa a soma dos tempos de transferência entre os postos de trabalho e dos tempos de processamento após a peça passar pelo recurso gargalo, adicionado ao tempo de desmoldagem da peça.

$$endord(k) \geq start("gargalo", k) + dur("gargalo", k) + \sum_p cura(p) * rank(p, k) \quad \forall k \quad (4.9)$$

A expressão 4.10 aproveita-se das expressões 4.8 e 4.9 para restringir a sobreposição no processamento de duas peças que compartilham o mesmo molde, ou que são idênticas. Considere duas peças p e p_1 , onde p_1 pertence ao conjunto das peças que compartilha o molde com a peça p ($p_1 \in molde(p)$); e que p e p_1 são alocadas, respectivamente, nas posições k e k_1 (onde $k_1 > k$ e k não é a última posição NK) da sequência de produção. Neste caso, as variáveis binárias $rank(p, k)$ e $rank(p_1, k_1)$ serão ambas iguais a 1, tornando "nulo" o lado direito da expressão 4.9, que se transformará em: $stord(k_1) - endord(k) - folga \geq 0$. Isso indicará que o início da primeira tarefa da peça (p_1) que ocupa a posição k_1 deverá ser maior que o fim do processamento da última tarefa (que é a desmoldagem) da peça (p) que ocupa a posição k somado ao parâmetro $folga$, que corresponde a um tempo de segurança suficiente para que a peça p seja movida para o seu próximo posto de trabalho e que o molde retorne ao posto de trabalho inicial. Nesta formulação, $folga$ foi definida como um parâmetro constante, mas que poderia ser dependente da peça p processada.

Note que, caso as peças alocadas nas posições k e k_1 não sejam, respectivamente, as peças p e p_1 , então a constante M , que representa um número muito grande (que pode tender a infinito), será multiplicado por -1 ou -2, anulando o caráter restritivo desta expressão. Por fim, observe que a expressão 4.5

complementa a expressão 4.10. De fato, a expressão 4.5 é redundante e poderia ser eliminada do modelo matemático, mas ela tem o efeito de restringir o espaço de busca.

$$\begin{aligned} \text{stord}(k_1) - \text{endord}(k) - \text{folga} \geq \\ M^* (\text{rank}(p, k) + \text{rank}(p_1, k_1) - 2) \quad \forall p, p_1 \in \text{molde}(p), k < NK, k_1 > k \end{aligned} \quad (4.10)$$

4.2.4 Restrições de Temporização dos Produtos

Na seção anterior, foi mostrado o processo de temporização da peças, enquanto nesta seção são mostrados os mesmos processos, mas para os produtos. As equações desta seção foram inseridas no modelo matemático proposto porque um dos objetivos do problema (vide equação 4.1) é minimizar os *lead times* dos produtos. Ou seja, como há várias peças associadas a um produto (ou lancha), deseja-se minimizar o intervalo de tempo necessário à produção de todas as peças deste produto. Para isso, identifica-se o tempo inicial, $\text{stpro}(g, l)$, e o final de processamento, $\text{endpro}(g, l)$, entre todas as peças associadas à unidade (ou lote unitário) l de um produto g .

Para definir os valores de $\text{stpro}(g, l)$ e $\text{endpro}(g, l)$ será necessário associar cada peça p produzida a um produto g . Isso será feito pela variável binária $\text{lote}(g, l, p, k)$, que terá valor 1 se a peça p que ocupa a posição k (na sequência de produção das peças) for associada à unidade l do produto g . Caso contrário, o valor será zero. A expressão 4.11 realiza a associação de uma única variável binária $\text{lote}(g, l, p, k)$ a toda variável binária $\text{rank}(p, k)$. Nesta expressão, o número de unidades l do produto g que são produzidas é limitado pela demanda do produto, $\text{dempro}(g)$, já que cada produto consome uma unidade de cada peça associada a ele. A expressão 4.11 só será escrita se a peça p estiver associada ao produto g ($p \in \text{pro}(g)$).

A expressão 4.12 complementa a expressão 4.11. Dado um produto g , a expressão 4.12 restringe que qualquer peça p (onde $p \in \text{pro}(g)$) alocada na posição k só possa ser associada a uma única unidade deste produto. Ou seja, uma unidade l do produto g só pode ser associada a uma única posição k onde a peça p foi alocada.

$$\sum_{l \leq dempro(g)} lote(g, l, p, k) = rank(p, k) \quad \forall g, p \in pro(g), k \quad (4.11)$$

$$\sum_k lote(g, l, p, k) < 1 \quad \forall g, p \in pro(g), l \leq dempro(g) \quad (4.12)$$

Ao definir as peças associadas a uma unidade l de um produto g , através da variável binária $lote(g, l, p, k)$, pode-se definir os instantes de início e de fim do processamento deste produto através das variáveis $stpro(g, l)$ e $endpro(g, l)$, respectivamente. A expressão 4.13 define que o instante de início do processamento da unidade l do produto g (onde $l \leq dempro(g)$), $stpro(g, l)$, será sempre menor ou igual ao início do processamento da peça alocada na posição k , $stord(k)$, desde que esta peça tenha sido associada a este produto, ou seja, se a variável $lote(g, l, p, k)$ é igual a um. Caso contrário, se a variável $lote(g, l, p, k)$ for nula, a variável $stpro(g, l)$ será menor que $stord(k)$ mais um número muito grande M , que necessariamente é maior que o horizonte de tempo necessário à produção de todas as peças a serem produzidas, o que será uma redundância.

$$stpro(g, l) \leq stord(k) + M * (1 - lote(g, l, p, k)) \quad \forall g, l \leq dempro(g), p \in pro(g), k \quad (4.13)$$

A expressão 4.14 segue a mesma lógica da expressão 4.13, sendo usada para definir o instante de fim do processamento da unidade l do produto g , $stpro(g, l)$. Neste caso, $endpro(g, l)$ será sempre maior ou igual ao fim do processamento da peça alocada na posição k , $endord(k)$, desde que esta peça tenha sido associada a este produto, ou seja, se a variável $lote(g, l, p, k)$ é igual a um. Caso a variável $lote(g, l, p, k)$ seja nula, o lado direito da expressão 4.14 será negativo, tornando a expressão matemática redundante, já que a variável $endpro(g, l)$ terá sempre valor positivo.

$$endpro(g, l) \geq endord(k) - M * (1 - lote(g, l, p, k)) \quad \forall g, l \leq dempro(g), p \in pro(g), k \quad (4.14)$$

4.2.4 Restrições de Temporização dos Produtos

Nesta seção são apresentadas restrições que também foram testadas ou que foram ocasionalmente usadas para impor um ordenamento entre os produtos. Neste sentido, a expressão 4.15 foi testada e os resultados do seu uso são apresentados no capítulo 5. Esta expressão impõe um limite máximo para os *lead times* dos produtos, onde *ltmax* expressa este limite máximo.

A expressão 4.16 impõe, indiretamente, um ordenamento entre os produtos da “campanha”. Como parte dos testes, verificou-se qual seria o impacto desta restrição que impõe que o fim do processamento da unidade l_1 do produto g_1 , $endpro(g_1, l_1)$, será menor que instante de fim de processamento da unidade l_2 do produto g_2 , $endpro(g_2, l_2)$. O uso destas equações será explorado no capítulo 5.

$$endpro(g, l) - stpro(g, l) \leq lt\ max \quad \forall g, l \leq dempro(g) \quad (4.15)$$

$$endpro(g_1, l_1) \leq endpro(g_2, l_2) \quad (4.16)$$

4.3 ABORDAGEM PROPOSTA PARA A SEGUNDA ETAPA

Apresentada a primeira etapa, nesta seção apresenta-se a segunda etapa da abordagem proposta. Devido às características do estudo de caso, onde apenas três produtos serão considerados, cada campanha terá no máximo três unidades produzidas, podendo ser, por exemplo, duas unidades de um produto “A”, uma unidade de um produto “B” e nenhuma unidade do produto “C”; ou poderá ser uma unidade de cada produto. Assim, na primeira etapa realizou-se a otimização da programação da produção das várias campanhas de acordo com as possíveis combinações entre os modelos de embarcações (produtos). A tabela 4.4 a seguir apresenta todas as possíveis campanhas geradas a partir dos três diferentes produtos fabricados pelo estaleiro e que serão identificados como: Q268, Q290 e QZ21.

Tabela 4.4 – Possíveis campanhas a serem geradas.

Campanha	Produtos		
	Q268	Q290	QZ21
1	1	1	1
2	1	1	0
3	2	1	0
4	1	2	0
5	0	1	1
6	0	2	1
7	0	1	2
8	1	0	1
9	2	0	1
10	1	0	2

Após a simulação da produção para as dez campanhas propostas na tabela 4.4, que constituirá na primeira etapa da abordagem proposta, será aplicada a segunda etapa da abordagem. A segunda etapa é constituída de duas ações:

- i) Definição de quais campanhas serão produzidas e quantas vezes elas serão repetidas a fim de atender a demanda dos produtos;
- ii) A primeira etapa é focada na eliminação das ociosidades no recurso ou posto de trabalho que é o “gargalo da produção”, tendo como objetivos secundários a minimização dos *lead times* dos produtos e peças, nesta ordem de prioridade. Assim, na segunda etapa, após a definição das campanhas que serão produzidas para atender a demanda dos produtos e em que ordem elas serão produzidas, realiza-se um pós-processamento que consiste na revisão da temporização de todas as tarefas, exceto aquelas do recurso gargalo. Este pós-processamento visa eliminar possíveis sobreposições de tarefas em algum posto de trabalho.

No estudo de caso haverá apenas a consideração das demandas dos produtos. Assim, a formulação para o ordenamento dos pedidos será dada a seguir. A função objetivo é apresentada na expressão 4.17 que indica quantas unidades de cada produto serão produzidas no total, que deverá ser igual à demanda.

$$(\min) \text{obj} = \sum_g \text{producao}(g) \quad (4.17)$$

Para solucionar este passo, definiu-se uma variável binária $rank_{cp}(c,k)$ que terá valor um (1) quando a campanha c ocupar a posição k na sequência de produção das campanhas. Caso contrário, a variável binária terá valor nulo. A equação 4.18 indica que apenas uma campanha pode ocupar uma posição na sequência de produção. Observe que, eventualmente, haverá posições k que não serão ocupadas por alguma campanha. Isso ocorrerá porque não se sabe *a priori* quantas campanhas devem ser produzidas para atender a demanda dos produtos, visto que as campanhas não produzem necessariamente o mesmo número de produtos. Assim, a expressão 4.19 complementa a expressão anterior, impondo que só pode haver uma campanha alocada na posição $k+1$ se houver uma campanha alocada na posição k , já que o somatório em cada uma das posições será menor ou igual a um graças à expressão 4.18.

$$\sum_c rank_{cp}(c,k) \leq 1 \quad \forall k \quad (4.18)$$

$$\sum_c rank_{cp}(c,k) \geq \sum_c rank_{cp}(c,k+1) \quad \forall c, k \quad (4.19)$$

A produção de dois produtos iguais em sequência resultará em ociosidade no recurso gargalo, o que não será permitido. Assim, como cada campanha (definida na primeira etapa) tem uma sequência de produção conhecida e sem ociosidade, é preciso garantir que a junção entre duas campanhas não resultará em ociosidade, caso o último produto produzido na campanha na posição k seja o mesmo produto na primeira posição da campanha na posição $k+1$. Isto é garantido pela expressão 4.20, que é gerada para toda campanha e todas as posições da sequência, exceto a última posição. Nesta expressão, o conjunto $Seq(c)$ identifica todas as campanhas que gerarão ociosidade caso sejam produzidas logo após a campanha c . A expressão 4.20 define que se uma campanha c for alocada na posição k , então qualquer campanha c_1 , onde $c_1 \in Seq(c)$, não poderá ser alocada na posição $k+1$; e vice versa.

$$\text{rankcp}(c,k) + \sum_{c_1 \in \text{Seq}(c)} \text{rankcp}(c_1, k+1) \leq 1 \quad \forall c, k \leq NK-1 \quad (4.20)$$

A expressão 4.21 calcula a variável $\text{producao}(g)$, que corresponde à quantidade produzida do produto g . O parâmetro $\text{prd}(c,g)$ identifica quantas unidades do produto g serão produzidas para cada campanha c . O somatório $\sum_k \text{rankcp}(c,k)$ identifica quantas unidades de cada campanha serão produzidas, que multiplicado por $\text{prd}(c,g)$ identifica quantas unidades do produto g serão produzidas no total. A expressão 4.22 impõe que a quantidade total produzida do produto g , $\text{producao}(g)$, deverá satisfazer a demanda deste produto, $\text{dempro}(g)$.

$$\sum_c \text{prd}(c,g) * \sum_k \text{rankcp}(c,k) = \text{producao}(g) \quad \forall g \quad (4.21)$$

$$\text{producao}(g) \geq \text{dempro}(g) \quad \forall g \quad (4.22)$$

4.3.1 Pós-Processamento da Temporização das Tarefas

Após realizar o procedimento descrito na seção anterior, faltará apenas realizar o pós-processamento da temporização das tarefas. Trata-se apenas de um procedimento de segurança para garantir que não haverá sobreposição de tarefas quando as campanhas são alocadas em sequência. Como o ordenamento de todas as peças dentro de uma campanha é conhecido, após o ordenamento das campanhas (como indicado na seção anterior), então pode-se afirmar que o ordenamento de todas as peças (considerando-se todas as campanhas) será conhecido. Logo, bastará aplicar novamente as expressões apresentadas na seção 4.2.3, onde foram propostas restrições de temporização de peças. A função objetivo deste modelo, expressão 4.23, será a minimização do somatório dos *lead times* das peças.

$$(\min) \text{obj} = \sum_k (\text{endord}(k) - \text{stord}(k)) \quad (4.23)$$

O capítulo 4 descreve a decomposição do problema de programação linear inteira para gerar formulações que permitam considerar apenas o que está implícito em todas as variáveis necessárias a resolução deste estudo de caso.

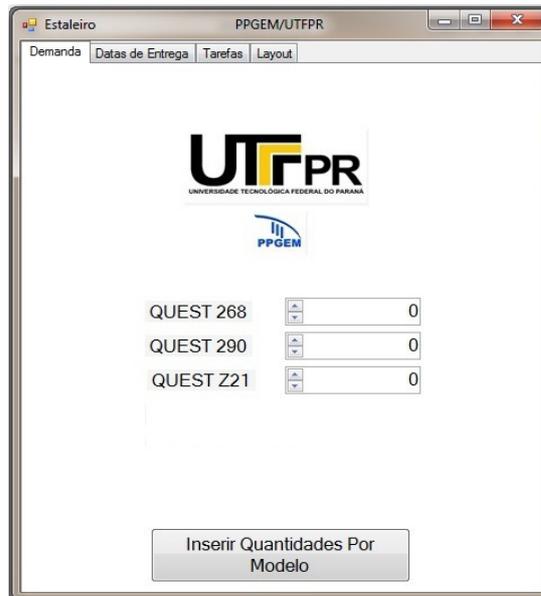
A programação linear inteira é um modelo muito abrangente e embora, existam técnicas gerais que lidem com essa estrutura, muito trabalho tem sido desenvolvido no intuito de obter-se algoritmos especiais para resolver subclasses particulares desse modelo.

De um modo geral, estas classes possuem um número exponencial de desigualdades, o que não quer dizer que sua utilização seja proibitiva. Neste contexto utilizando “planos de corte” as desigualdades são incluídas na formulação do programa linear na medida em que se tornam necessárias (violadas). Através da separação, um problema onde, dado uma solução de um programa linear que contém apenas parte das desigualdades, determina-se se existe alguma desigualdade da classe que está violada. O método prossegue após a inclusão desta desigualdade no programa linear corrente.

Deste modo, a pesquisa na resolução de problemas combinatórios concentra-se na busca por formulações que forneçam as melhores estimativas possíveis.

4.4 INTERFACE COM O USUÁRIO

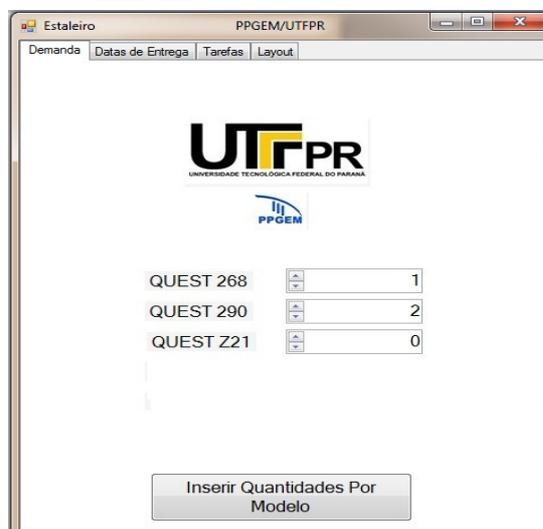
Nesta seção, será apresentada a interface desenvolvida para realizar a interação do aplicativo com o usuário. A programação desenvolvida utiliza o *software Visual Basic Express Studio* (2008), onde o usuário insere a quantidade de embarcações a serem produzidas de cada modelo. Essa interface, indicada na figura 4.2, foi usada tanto na formação das campanhas como, posteriormente, para definir as demandas totais dos produtos. Na verdade, são interfaces similares.



Modelo	Quantidade
QUEST 268	0
QUEST 290	0
QUEST Z21	0

Figura 4.3 - Representação da Interface com o Usuário do Aplicativo de Programação da Produção.
Fonte: Autoria Própria

Esta interface permite que o usuário insira diferentes tipos de quantidades para os modelos de embarcações, como indicado na figura 4.3. Desta forma, o resultado para cada uma delas, gera um resultado diferente.



Modelo	Quantidade
QUEST 268	1
QUEST 290	2
QUEST Z21	0

Figura 4.4 – Exemplo de entrada de dados da demanda dos produtos na Interface com o Usuário.

Após o usuário realizar a entrada das demandas por modelo desejada para uma determinada campanha de produção, o *software Visual Basic Express Studio* (2008) cria um arquivo “.txt”, utilizado por um editor de texto, que será utilizado como dados de entrada ao solver matemático para realizar as equações e determinar qual

a melhor sequência de execução das tarefas. O solver também criará um arquivo “.txt”, com os resultados das equações.

De volta ao *software Visual Basic Express Studio* (2008), o mesmo possui um botão para realizar a leitura deste arquivo .txt criado pelo solver, e assim, torna-se possível que este software seja capaz de exibir os resultados graficamente. Os gráficos para cada uma das campanhas simuladas nesta dissertação podem ser observados no Capítulo 5.

5 RESULTADOS

Conforme explicitado nos capítulos anteriores, para a análise da programação da produção da fabricação das peças em fibra de vidro de um estaleiro náutico, leva-se em conta os postos de produção responsáveis pela confecção dos blocos da embarcação, e especialmente, o posto de trabalho gargalo (J4). Desta forma, é necessário expor os resultados de forma gráfica, para facilitar o entendimento da ferramenta proposta. Para mostrar os resultados é utilizada uma interface em *Visual Basic Express Studio* (2008) gerando um gráfico de Gantt.

Para analisar os resultados da eficiência da ferramenta, torna-se necessário entender que em um sistema intermitente, a variação do *mix* de produção depende muito da sazonalidade, e das especificidades que o cliente deseja em relação aos produtos. Assim, de forma a minimizar a complexidade do problema abordado, foram determinadas possíveis combinações do *mix* de embarcações produzidas por este fabricante.

Conforme descrito anteriormente, serão tratados nesta abordagem inicial, somente três modelos, compondo o *mix* de embarcações. Assim, são combinados os três modelos {Q268, Q290 e QZ21} a serem fabricados, gerando diferentes campanhas a partir da variação da quantidade produzida de cada um dos produtos.

Todas as formulações matemáticas foram implantadas em um *solver* matemático (GAMS/CPLEX), sendo simuladas diferentes campanhas, a partir de combinações de demandas de produção dos modelos de barco. Para cada campanha, foi possível identificar a melhor sequência de execução das tarefas de fabricação das peças em fibra de vidro.

5.1 O USO DE CAMPANHAS: PRIMEIRA ETAPA DO SISTEMA PROPOSTO

Para justificar o uso de campanhas, iniciamos a apresentação dos resultados simulando apenas a produção de uma única unidade para um modelo do *mix* de produção. Isso foi feito inserindo, na interface apresentada nas figuras 4.2 e 4.3, a demanda de “1” para fabricação isolada de cada modelo de embarcação Q268, Q290 e QZ21. Inicialmente, serão apresentadas e analisadas as figuras 5.1, 5.2 e 5.3, correspondentes à produção unitária de cada um dos três produtos. Na

sequência, serão apresentadas tabelas com os resultados numéricos associados às três soluções. O propósito da simulação de campanhas “unitárias” é o de evidenciar que ao produzir apenas as peças de um produto por vez, como apresentado nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, são geradas ociosidades no posto J4.

A figura 5.1 apresenta a solução ótima quando se considera apenas a produção de uma unidade da embarcação Q268. Nesta figura observa-se que apenas os postos de trabalho J1 (preparação do molde), J2 (pintura do molde) e J4 (máquina de aplicação e laminação em fibra de vidro) apresentam tarefas alocadas. Isso foi feito para realçar que o posto de trabalho J4 possui maior carregamento, sendo o gargalo da produção do processo de confecção de peças em fibra de vidro. Assim, qualquer ociosidade no posto J4 é indesejável. Em função disso, o modelo matemático para a primeira etapa, proposto na seção 4.2, envolve apenas os postos J1, J2 e J4. No posto J6 ocorre a cura da peça, ou seja, a peça de fibra de vidro necessita de algumas horas para endurecer. Por isso, o posto J6 não consome recurso material ou humano, podendo haver mais de uma peça neste posto ao mesmo tempo. O último posto na fabricação de peças de fibra de vidro é o J7, onde as peças são desmoldadas. Os postos J3 e J5 não serão considerados neste estudo, pois correspondem também a postos onde ocorre a laminação de peças e as peças de fibra de vidro passam apenas por um dos postos (J3, J4 e J5). Assim, como o posto J4 é o gargalo da produção, a programação da produção das peças processadas nos postos J3 ou J5 ficam como trabalhos futuros a serem executados posteriormente.

Ao longo deste capítulo será usada a função objetivo, apresentada na equação 4.1. Ela trata quatro objetivos específicos, que são ponderados, respectivamente, pelos parâmetros α , β , χ e δ que foram definidos em função da importância de cada um dos critérios. Por ora, os parâmetros α , β , χ e δ aplicados na função objetivo são apresentados na tabela 5.1, que foram aplicados a todos os cenários (ou campanhas) apresentados nesta seção.

Tabela 5.1 – Pesos estimados associados aos critérios da função objetivo.

Objetivo específico (minimizar)	Parâmetro	Valor na eq. 4.1
Ociosidade no posto J4	α	100000
Soma dos <i>lead times</i> dos produtos	β	300
Soma dos <i>lead times</i> das peças	χ	10
Tempo total de produção	δ	1

Ao analisar a solução para a fabricação de uma embarcação do modelo Q268, observa-se na figura 5.1 que o primeiro item a ser produzido é a peça p01, seguida da peça p21 e depois da peça p3, que não necessita passar pelo posto de trabalho J2 (Pintura). As peças p01 e p21 correspondem à laminação da primeira camada de fibra de vidro sobre o molde. Após a cura, no posto J6, o molde retorna ao processo de laminação, para acrescentar mais uma camada de fibra de vidro e resina. Nessa segunda etapa de laminação, as peças p01 e p21 são renomeadas para p02 e p22, respectivamente, como se fossem novos itens, sendo a quarta e quinta peças da sequência de produção. A separação de peças com dupla camada de laminação em dois itens distintos é uma conveniência para que o problema possa ser tratado como um *flowshop*, onde na segunda parte ou item o tempo de processamento nos postos J1 e J2 serão nulos.

A tabela 5.2 complementa a figura 5.1 por apresentar, para cada posto, o instante de início da tarefa (identificada na seção 4.2 como $start(m,k)$), a ociosidade no processador após a realização da respectiva tarefa (identificada na seção 4.2 como $empty(m,k)$) e o tempo de espera entre o fim de uma tarefa e o início da tarefa seguinte, no próximo posto (identificada na seção 4.2 como $wait(m,k)$).

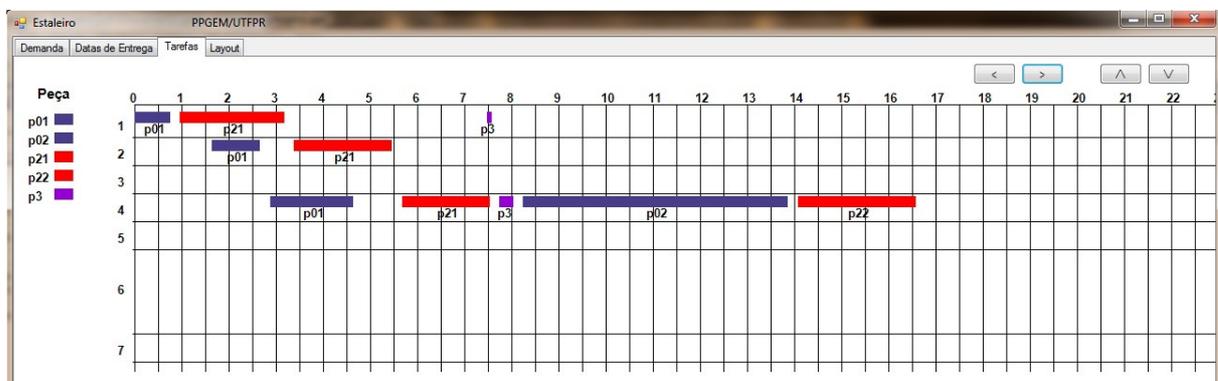


Figura 5.1 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q268.

Baseado em experiência adquirida *in loco* convencionou-se neste trabalho que o tempo de transporte da peça/molde ao posto seguinte sempre será de 0,2 horas (ou 12 minutos), por representar um tempo aproximado em todas as trocas de ferramentas e transferência das peças entre postos. Talvez aqui seja onde pode-se apresentar um dos maiores ganhos, em se comparado à situação real, já que esta operação, para algumas peças, envolve uma quantidade considerável de trabalhadores (de 3 a 6 pessoas) na execução desta operação. Além do fato de que

os trabalhadores que operam as máquinas são os mesmos que transportam as peças entre os postos. Esta restrição pode ser mais desenvolvida em estudos futuros, ou até mesmo melhorada aplicando-se ferramentas da manufatura enxuta.

Inclusive, devido à transferência das peças entre postos, haverá um tempo de espera entre a conclusão de uma tarefa de uma peça num posto e o início do processamento desta peça no posto seguinte. Também se observa na figura 5.1 e na tabela 5.2 que sempre há uma ociosidade entre a execução de duas tarefas, devido ao tempo de transporte do molde/peça até o posto de trabalho seguinte. Porém, foi observada a presença de uma ociosidade significativa após a conclusão da laminação da primeira peça no posto J4. Após a peça P01, ocorreu uma ociosidade de 1,04 horas, como mostra a tabela 5.2 (em amarelo). O desejável (em verde nesta tabela) seria uma ociosidade de apenas 0,2 horas no posto J4.

Tabela 5.2 – Tempos de início, ociosidades e esperas associadas às peças do modelo Q268.

Peça	Posto de trabalho	Início da tarefa $start(m,k)$	Ociosidade $empty(m,k)$	Espera $wait(m,k)$
P01	J1	0	0.200	0.880
	J2	1.650	0.710	0.200
	J4	2.880	1.040	
P21	J1	0.970	4.290	0.200
	J2	3.390	2.260	0.200
	J4	5.690	0.200	
P3	J1	7.480	0.700	0.200
	J2			
	J4	7.750	0.200	
P02	J1			
	J2			
	J4	8.250	0.200	
P22	J1			
	J2			
	J4	14.080		

A seguir, pode-se visualizar a solução ótima para a produção de uma unidade da embarcação dos modelos Q290 e QZ21, apresentada nas figuras 5.2 e 5.3, respectivamente. Ao analisar as soluções para a fabricação de uma embarcação dos modelos Q290 e QZ21, respectivamente, nota-se que as soluções obtidas são equivalentes à do modelo Q268, variando apenas o tempo de execução de algumas tarefas devido ao tamanho do molde das peças.

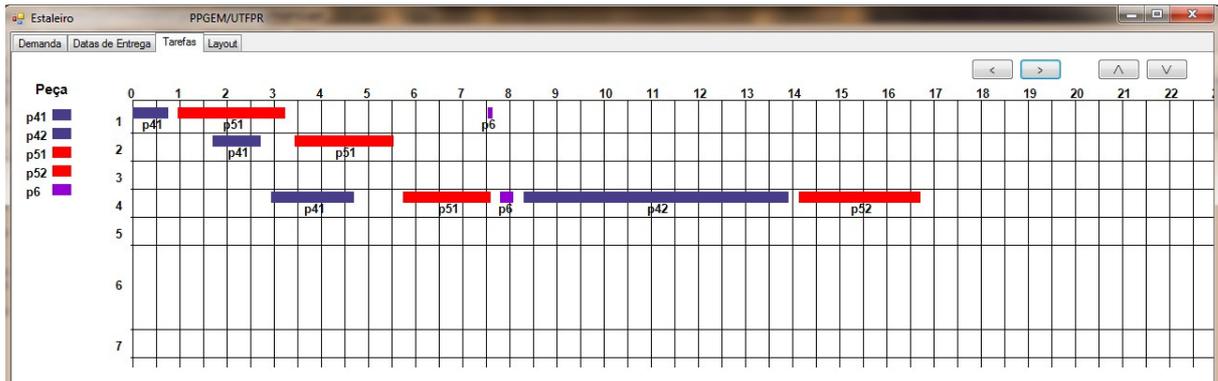


Figura 5.2 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q290.

As tabelas 5.3 e a 5.4 apresentam as mesmas informações das figuras 5.2 e 5.3, respectivamente com outros modelos. As tabelas apresentam os instantes de início de processamento das peças, bem como, as ociosidades e esperas que ocorrerão após o processamento das tarefas (peças) dentro dos postos de trabalho pertencente às oficinas.

Assim como no modelo Q268, as soluções dos modelos Q290 e QZ21 também apresentam ociosidades excessivas (em amarelo nas tabelas) no posto J4, já que o ideal seria uma ociosidade de apenas 0,2 horas, tempo este estimado e referente ao transporte de moldes/peças entre um posto de trabalho e outro, que está destacado de verde quando ocorreu.

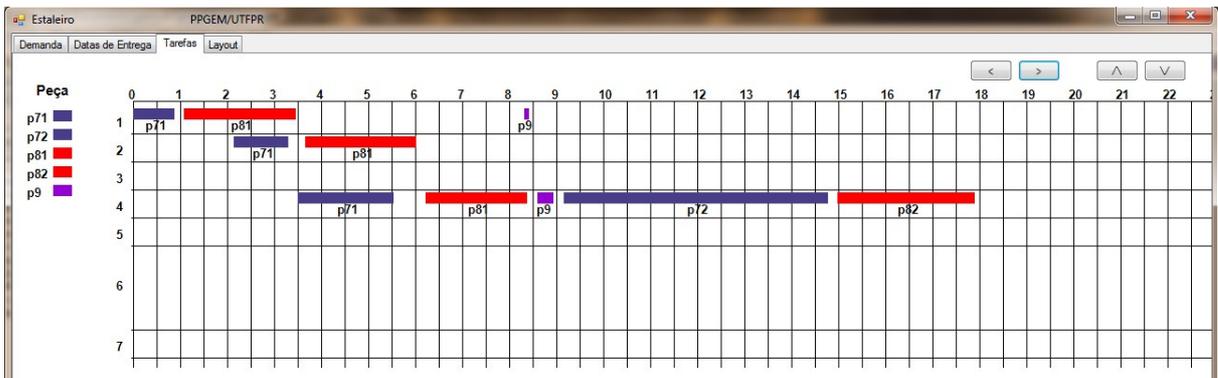


Figura 5.3 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação QZ21.

A tabela 5.5 apresenta um resumo da solução obtida pelo uso do *solver* GAMS/CPLEX. Esta tabela apresenta na terceira linha os valores obtidos para a função objetivo em cada um dos três casos, onde o principal “peso” para os valores obtidos foi a ociosidade. O *solver* informou para os três casos que a solução ótima foi encontrada. Na quarta linha observa-se que os tempos decorridos (tempos de CPU) para se chegar à solução ótima foram sempre inferiores a 1 segundo,

considerando-se que o computador usado foi um DELL INSPIRON® com processador Intel Core 2 Duo, 2.10 GHz, 3 GB de memória RAM e sistema operacional Windows Vista. Vale aqui ressaltar que houve apenas a preocupação de verificar se os tempos de CPU foram aceitáveis, já que o sistema operacional Windows Vista interfere no tempo de resolução do modelo, tendo-se obtido diferentes tempos para a solução do mesmo modelo. Como o modelo matemático proposto, na seção 4.2, é de Programação Linear Inteira Mista, esta tabela apresenta, na quinta linha, o número de iterações realizadas para cada um dos três modelos. Por fim, os três modelos apresentaram o mesmo número de equações e de variáveis simples (contínuas) e binárias geradas.

Tabela 5.3 – Tempos de início, ociosidades e esperas associadas às peças do modelo Q290.

Peça	Posto de trabalho	Início da tarefa $Start(m,k)$	Ociosidade $empty(m,k)$	Espera $wait(m,k)$
P41	J1	0	0.200	0.940
	J2	1.710	0.710	0.200
	J4	2.940	1.040	
P51	J1	0.970	4.290	0.200
	J2	3.450	2.260	0.200
	J4	5.750	0.200	
P6	J1	7.540	0.700	0.200
	J2			
	J4	7.810	0.200	
P42	J1			
	J2			
	J4	8.310	0.200	
P52	J1			
	J2			
	J4	14.140		

Tabela 5.4 – Tempos de início, ociosidades e esperas associadas às peças do modelo QZ21.

Peça	Posto de trabalho	Início da tarefa $Start(m,k)$	Ociosidade $empty(m,k)$	Espera $wait(m,k)$
P71	J1	0	0.200	1.260
	J2	2.140	0.350	0.200
	J4	3.510	0.670	
P81	J1	1.080	4.870	0.200
	J2	3.660	2.570	0.200
	J4	6.230	0.200	
P9	J1	8.330	0.760	0.200
	J2			
	J4	8.600	0.200	
P72	J1			
	J2			
	J4	9.160	0.200	
P82	J1			
	J2			
	J4	14.990		

Tabela 5.5 – Resultados do processamento de um produto no *solver* GAMS/CPLEX.

Resultados gerados	Produto considerado		
	Q268	Q290	QZ21
Função objetivo	166397.92	166414.36	129554.14
Tempo de CPU (s)	0.436	0.355	0.812
Nº de iterações	186	183	156
Equações geradas	363		
Variáveis simples	145		
Variáveis discretas	50		

Como dito anteriormente, todas as peças apresentadas, que compõem as partes principais, casco e convés, devem passar pelo posto de trabalho J6 (Processo de Cura da Resina), após a laminação no posto J4. Além disso, as peças P3, P02 e P22 passarão também pelo posto J7, para então serem extraídas do molde. Assim, as figuras 5.4, 5.5 e 5.6 repetem as informações apresentadas nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente, mas também apresentam as alocações das tarefas nos postos J6 e J7. No posto J6, nas três figuras, observa-se que o processo de cura é iniciado imediatamente após a execução das tarefas no posto J4. Além disso, há a possibilidade de haver vários processos de cura ocorrendo simultaneamente, sem que haja consumo de recursos. Por fim, as tarefas no posto J7 foram alocadas logo após a conclusão da tarefa no posto J6 e de seu transporte, havendo apenas um teste contra sobreposição de tarefas de desmoldagem. Caso ocorra a sobreposição, o início da desmoldagem das peças será deslocado para frente até que a sobreposição seja eliminada e que seja considerado o tempo de transporte.

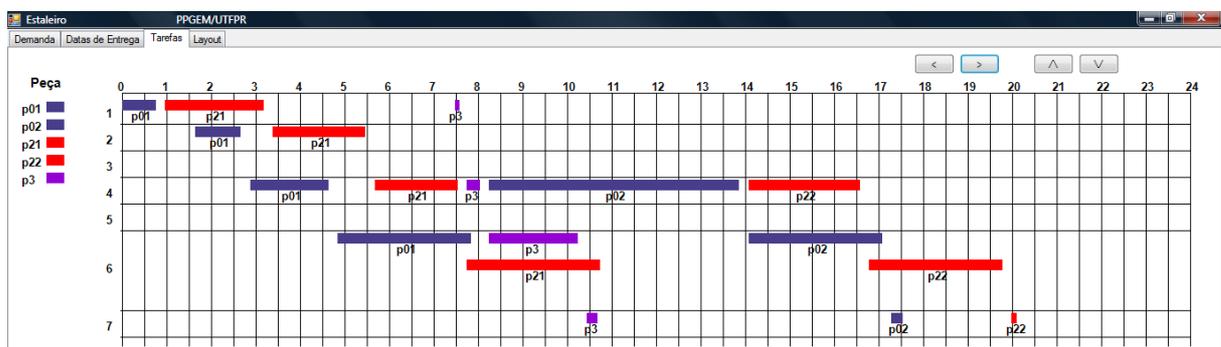


Figura 5.4 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q268.

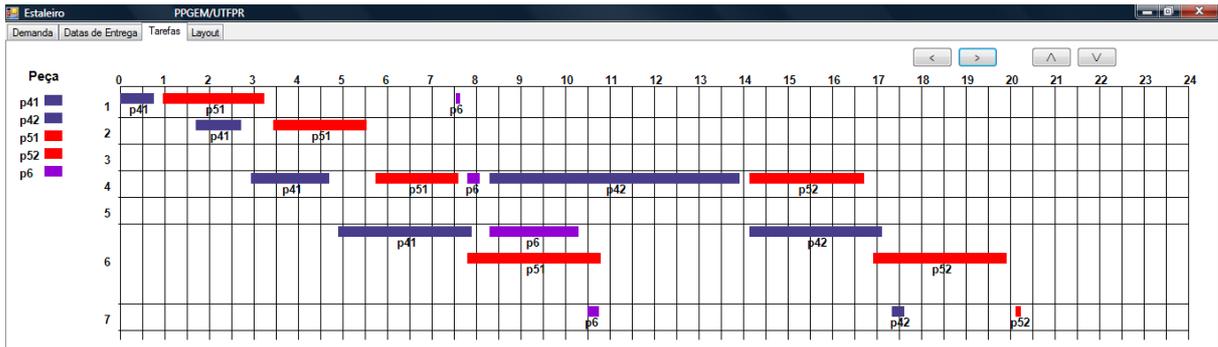


Figura 5.5 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação Q290.

A análise da produção apenas de peças de um modelo por vez, nesta seção, indica que haverá ociosidade acima do desejável se isso for implementado na prática. Assim, o passo seguinte nos testes realizados foi analisar a produção de campanhas com dois ou três produtos distintos. Aliás, a idéia da efetivação das campanhas surgiu da observação de que, em todos os casos de campanhas com dois ou três produtos distintos, como será observado nas seções seguintes, sempre se obteve uma solução onde a ociosidade no posto J4 foi reduzida ao menor valor possível, quando ela é igual ao tempo de transporte (de 0,2 horas).

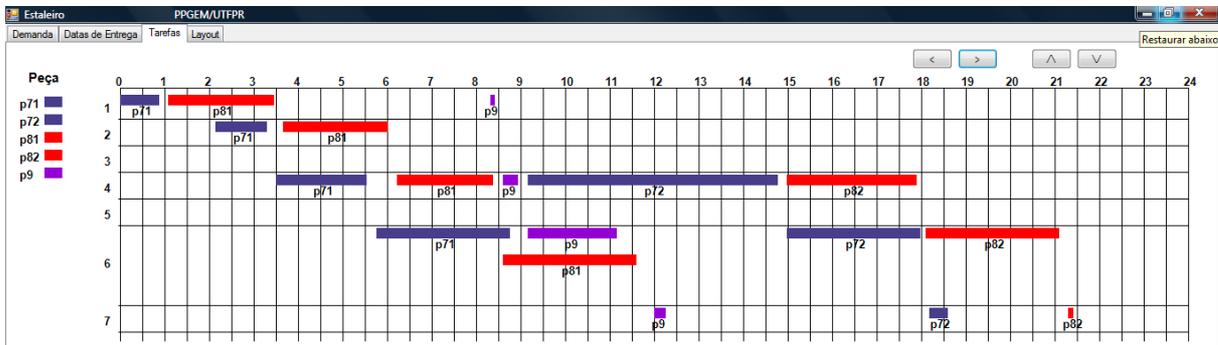


Figura 5.6 - Alocação das tarefas de produção das peças do modelo de embarcação QZ21.

• **Interface com o usuário**

Finaliza-se esta subseção indicando que as figuras 5.1 a 5.6, bem como as demais que serão apresentadas neste capítulo, complementam a seção 4.4, onde se apresentou a interface de entrada da demanda. Após inserir as demandas, a interface gera um arquivo de entrada de dados para o *solver* GAMS/CPLEX, apresentado na figura 5.7. Assim, basta clicar na execução do *solver* que, após executar a busca pela solução ótima, o *solver* gera um arquivo texto (.txt). Ao clicar

em “Datas de Entrega”, disponibiliza-se a leitura dos resultados do *solver*, que são expressos graficamente conforme indicado, por exemplo, na figura 5.6.

```

gamside: C:\Documents and Settings\Luiz Carlos\Meus documentos\gamsdir\projdir\gm
File Edit Search Windows Utilities Model Libraries Help
p02.4
Sched_Flowshop_Estaleiro_v16_nov_10.gms Sched_Flowshop_Estaleiro_v16_nov_10.lst Sched_Flowshop_prob.lst

$title Minimizacao do tempo de producao num FLOWSHOP

$include dados_gams_estaleiro.inc

Sets  ordem K          / pos1*pos5 /

      molde_fim(p,pp) /

      p01.p02
      p21.p22
      p3. p3
  
```

Figura 5.7 – Detalhe do *software* GAMS.

5.1.1 Campanhas com Duas Unidades De Produtos

Em função dos resultados iniciais obtidos para produção de uma unidade de cada produto (Q268, Q290 e QZ21), apresentados no início deste capítulo, alterou-se a quantidade da demanda de embarcações a serem produzidas, buscando propiciar a geração de diversos cenários para melhor executar a fabricação das embarcações dentro do fluxo de produção intermitente. Assim, apresenta-se na sequência o estudo da combinação de dois produtos, formando uma campanha. Na seção 5.1.2 são apresentadas campanhas com três unidades de produtos. Na seção 5.2 será mostrado que a combinação de campanhas de duas e três unidades permite a geração de soluções ótimas, do ponto de vista da ociosidade do posto J4, possibilitando o atendimento de quaisquer demandas de produtos.

Inicialmente, identificou-se a solução ótima para a produção em sequência de duas unidades do modelo Q268, que é apresentada na figura 5.8 e na tabela 5.6. A tabela 5.6 apresenta os instantes de início das tarefas (nos postos J1, J2 e J4) também apresentados na figura 5.8.

A tabela 5.6 também apresenta, para o posto J4, os valores da ociosidade encontrados na solução ótima deste problema, sendo que ociosidades aceitáveis

(iguais a 0,2 horas) são realçadas na cor verde; enquanto as ociosidades excessivas (acima de 0,2 horas) são realçadas na cor amarela. Resultados similares foram obtidos para os modelos Q290 e QZ21. Adicionalmente, a tabela 5.7 apresenta informações complementares do problema relacionadas à solução pelo *solver* GAMS/CPLEX.

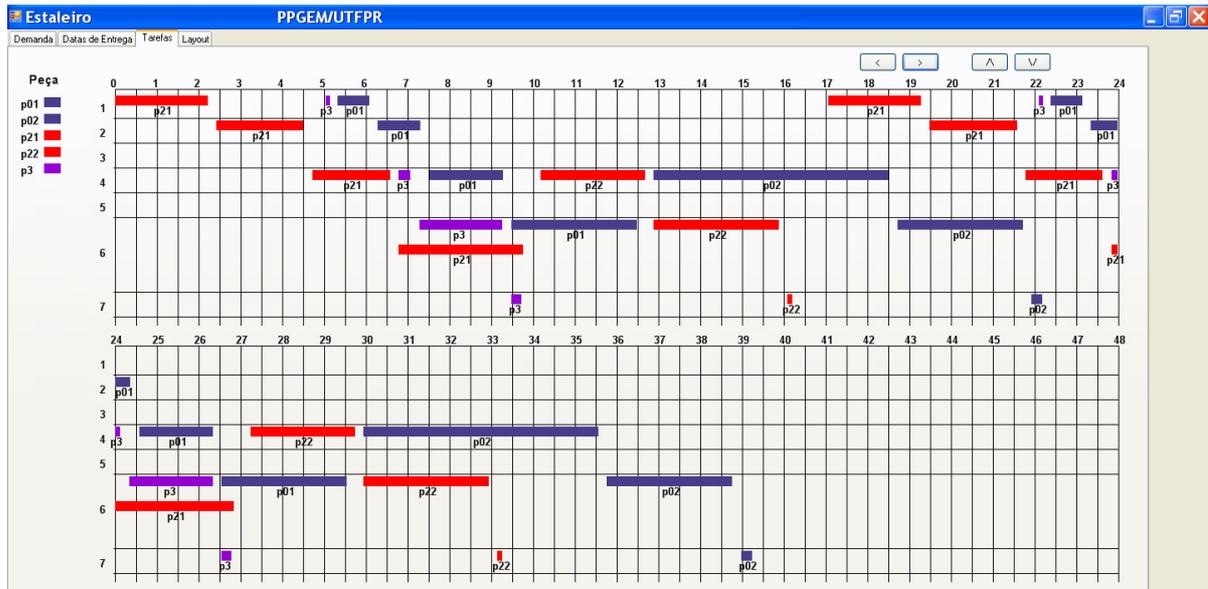


Figura 5.8 - Produção de peças de duas unidades do modelo de embarcação Q268.

Tabela 5.6 – Tempos de início, ociosidades e esperas associadas às peças do modelo Q268.

Peça	Início da tarefa <i>Start(m,k)</i>			Ociosidade <i>empty(m,k)</i>
	Posto J1	Posto J2	Posto J4	Posto J4
P21	0	2,420	4,720	0,200
P3	5,050	-	6,780	0,440
P01	5,320	6,290	7,520	0,890
P22	-	-	10,180	0,200
P02	-	-	12,890	3,260
P21	17,060	19,480	21,780	0,200
P3	22,110	-	23,350	0,440
P01	22,380	23,350	24,580	0,890
P22	-	-	27,240	0,200
P02	-	-	29,950	

Tabela 5.7 – Resultados do processamento de duas unidades de Q268 no *solver* GAMS/CPLEX.

	Produto Q268
Função objetivo	677.222,44
Tempo de CPU (s)	5,203
Nº de iterações	33404
Equações geradas	1057
Variáveis simples	342
Variáveis discretas	150

Em função da ociosidade gerada no posto J4, que comprometeria a produtividade do estaleiro, a produção em sequência de duas unidades dos produtos Q268, Q290 e QZ21 não serão consideradas na composição da solução final para atender as demandas. Na fabricação de duas unidades, sendo uma para cada modelo de embarcação, realizaram-se inúmeras simulações/estudos visando identificar a qualidade das soluções, que são expostas logo a seguir. As combinações de duas unidades estudadas foram:

- 1) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e Q290, priorizando a conclusão do modelo Q268 antes de Q290;
- 2) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e Q290, priorizando a conclusão do modelo Q290 antes de Q268;
- 3) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e QZ21, priorizando a conclusão do modelo Q268 antes de QZ21;
- 4) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e QZ21, priorizando a conclusão do modelo QZ21 antes de Q268;
- 5) Produção de uma unidade dos modelos Q290 e QZ21, priorizando a conclusão do modelo Q290 antes de QZ21;
- 6) Produção de uma unidade dos modelos Q290 e QZ21, priorizando a conclusão do modelo QZ21 antes de Q290.

i) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e Q290

Os estudos da produção de duas ou mais unidades de diferentes produtos resultaram na adoção do jargão “campanha” para se referir a cada um destes lotes de produtos. Ao estudar uma campanha de uma unidade dos produtos Q268 e Q290, verificou-se se a imposição de uma prioridade na conclusão de um dos dois produtos poderia gerar algum prejuízo à solução do problema. A imposição de uma prioridade na conclusão de um dos dois produtos foi obtida pela inclusão da expressão 4.16 no modelo matemático.

A tabela 5.8 apresenta um resumo dos resultados da programação da produção de uma unidade dos modelos Q268 e Q290, usando o *solver* GAMS/CPLEX. Ao buscar a solução ótima, observou-se que a imposição de que um dos produtos deve ser concluído antes do outro não afetou significativamente os

valores da função objetivo, do tempo de CPU e do número de iterações executadas. De fato, considerou-se adequado que o tempo de CPU esteja próximo a 8 segundos. Os dois valores da função objetivo são próximos a 185.900. As figuras 5.9 e 5.10 representam as soluções ótimas para as duas campanhas indicadas.

Tabela 5.8 – Resultados da produção de uma unidade de Q268 e de Q290 no *solver* GAMS/CPLEX.

	Prioridade para a conclusão de Q268	Prioridade para a conclusão de Q290
Função objetivo	185921,84	185936,83
Tempo de CPU (s)	8,185	7,978
Nº de iterações	43197	40191
Equações geradas	1.684	
Variáveis simples	392	
Variáveis discretas	200	

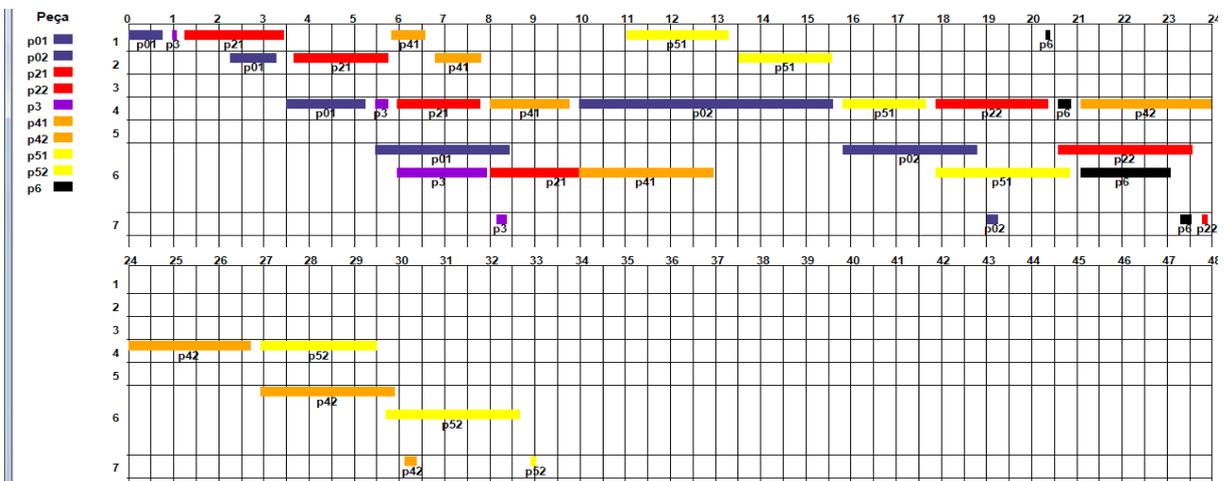


Figura 5.9 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q268 e Q290, com prioridade para a conclusão do produto Q268.

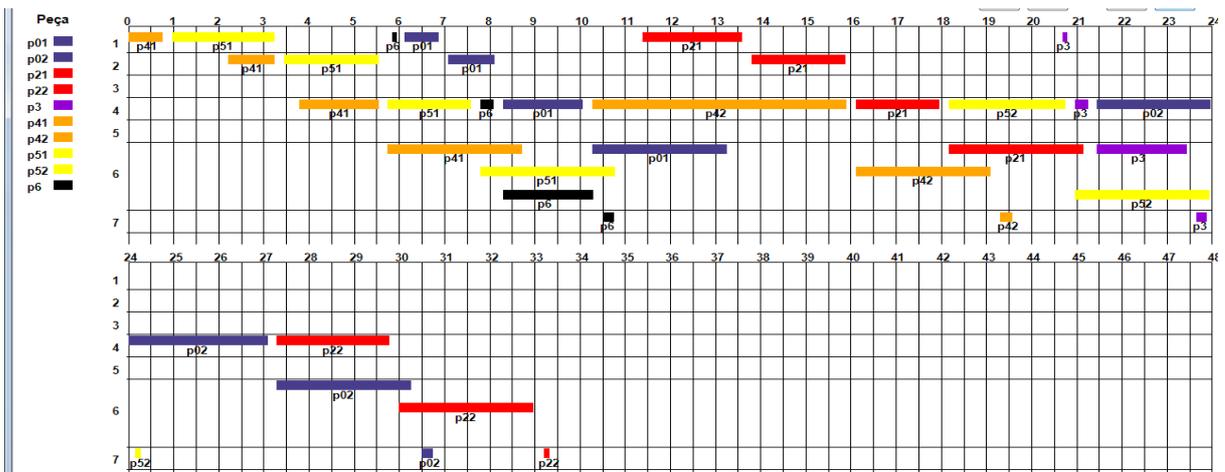


Figura 5.10 - Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q268 e Q290, com prioridade para a conclusão do produto Q290.

A fim de avaliar a adequação da equação 4.1 e dos valores atribuídos aos parâmetros α , β , χ e δ , é oportuno lembrar que se atribuiu a α o valor 100.000. Ou seja, como haverá uma ociosidade mínima de 0,2 horas após cada tarefa no posto J4, devido ao transporte do molde/peça, cada operação de transporte implicará um custo de 20.000. Como 20 peças serão processadas no posto J4, serão contabilizadas 19 operações de transporte, já que a ociosidade é medida pelo tempo despendido entre o fim de uma tarefa e o início da tarefa seguinte no mesmo processador. Assim, nas duas funções objetivo, apenas a ociosidade implicou um “custo” de 180.000 e o restante do custo na função objetivo (de pouco mais de 5.900) foi causado pelos outros três critérios (β , χ e δ). Esse fato permite compreender porque o valor de α foi definido tão alto, comparado aos demais fatores. Como o posto de trabalho J4 é o gargalo da produção, se houver uma ociosidade adicional (aos tempos de transporte) de 0,2 horas, isso aumentará o valor da função objetivo em 20.000, que é muito mais que o peso de todos os critérios somados; isto forçará a ociosidade em J4 ao seu valor mínimo, tal como desejado. A definição dos valores de β , χ e δ também seguiu a mesma lógica de α .

ii) Produção de uma unidade dos modelos Q268 e QZ21

Para evitar a repetição de comentários feitos anteriormente, neste item e nos seguintes, houve a preocupação de apenas apresentar os resultados para campanhas diferentes. A seguir, na tabela 5.9 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas uma unidade dos produtos Q268 e QZ21. Neste caso, foram testadas duas situações distintas: *i*) quando o produto Q268 deve ser concluído antes de QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.11; e *ii*) quando o produto QZ21 deve ser concluído antes de Q268, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.12.

Tabela 5.9 – Resultados da produção de uma unidade de Q268 e de QZ21 no *solver* GAMS/CPLEX.

	Prioridade para a conclusão antes de Q268	Prioridade para a conclusão antes de QZ21
Função objetivo	186.122,22	186.102,62
Tempo de CPU (s)	9,242	7,398
Nº de iterações	51.070	35.587
Equações geradas	1.684	
Variáveis simples	392	
Variáveis discretas	200	

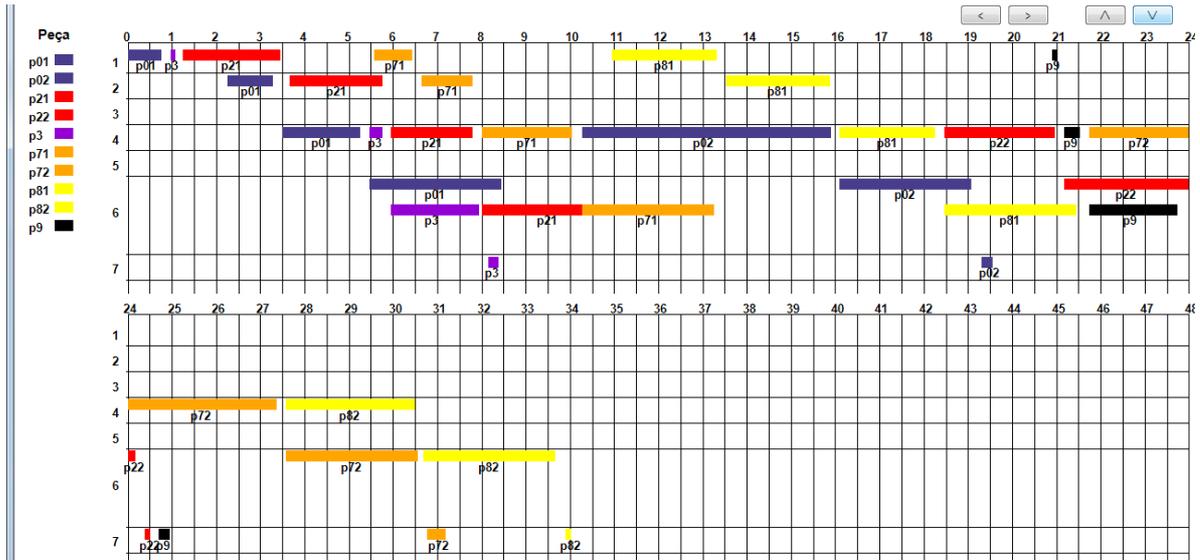


Figura 5.11 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q268 e QZ21, com prioridade para a conclusão primeiro do produto Q268.

iii) Produção de uma unidade dos modelos Q290 e QZ21

A seguir, na tabela 5.10, são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas uma unidade dos produtos Q290 e QZ21. Os números de equações e de variáveis simples e binárias são similares ao apresentado na tabela 5.8. Neste caso, foram testadas duas situações distintas: *i)* quando o produto Q290 deve ser concluído antes de QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.13; e *ii)* quando o produto QZ21 deve ser concluído antes de Q290, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.14.

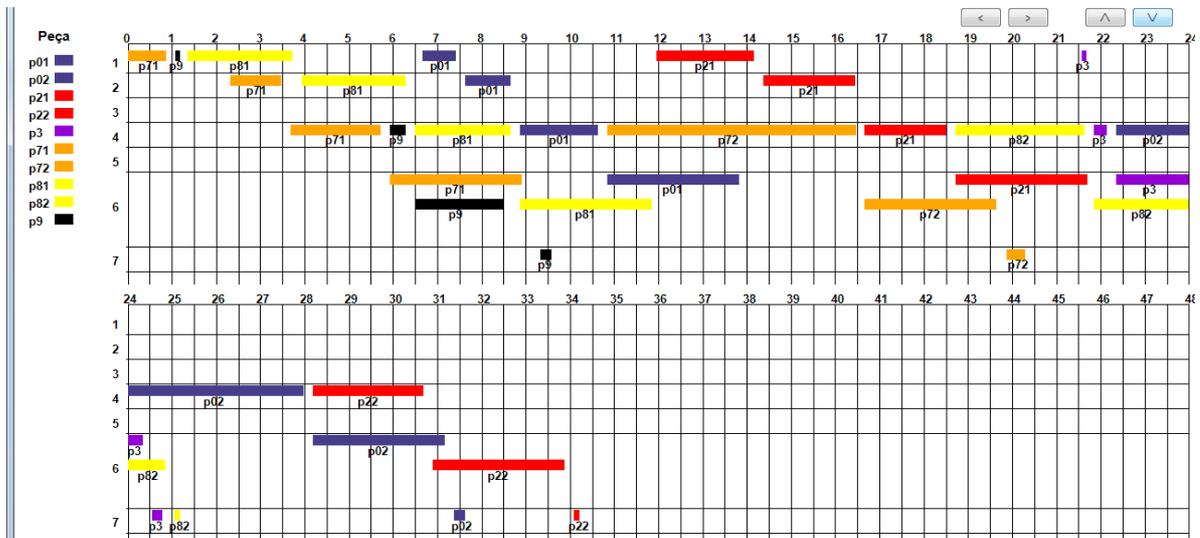


Figura 5.12 - Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q268 e QZ21, com prioridade para a conclusão primeiro do produto QZ21.

Tabela 5.10 – Resultados da produção de uma unidade de Q290 e de QZ21 no solver GAMS/CPLEX.

	Prioridade para a conclusão antes de Q290	Prioridade para a conclusão antes de QZ21
Função objetivo	186.147,26	186.112,40
Tempo de CPU (s)	5,524	6,904
Nº de iterações	21.697	28.832

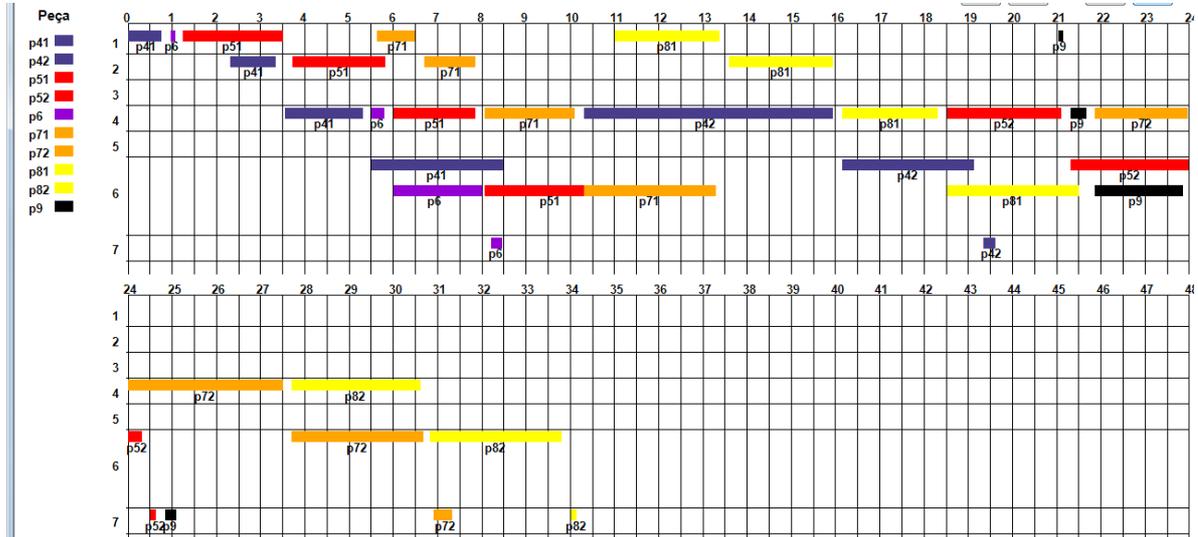


Figura 5.13 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q290 e QZ21, com prioridade para a conclusão primeiro do produto Q290.

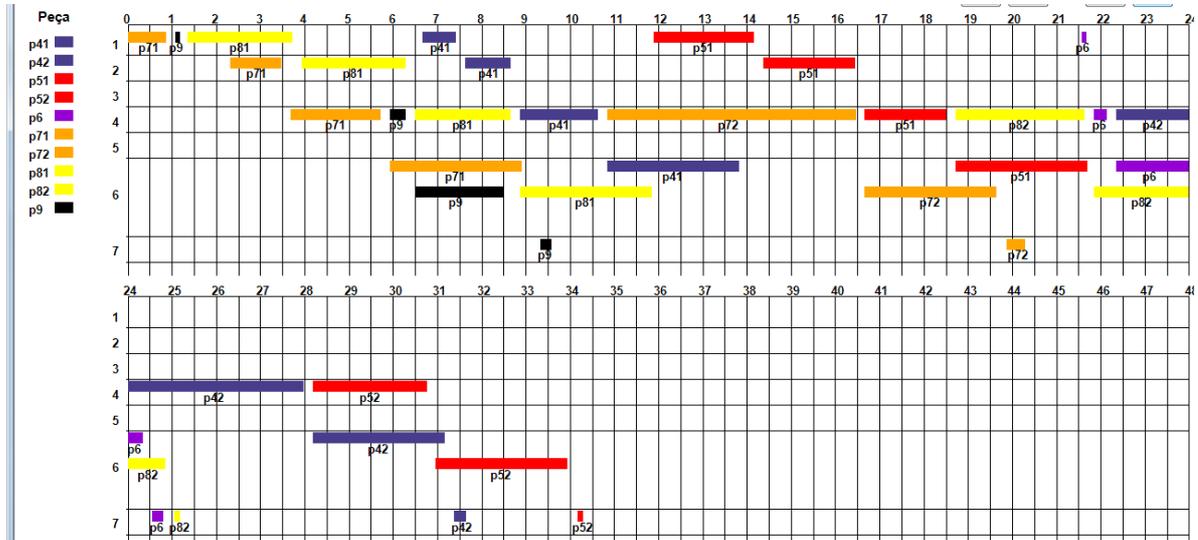


Figura 5.14 - Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos Q290e QZ21, com prioridade para a conclusão primeiro do produto QZ21.

5.1.2 Campanhas com Três Unidades De Produtos

Nesta subsecção são apresentadas todas as campanhas que envolvem a produção de três unidades de produtos, podendo ser produzidos uma unidade de

cada um dos três produtos ou uma unidade de um produto e duas unidades de um segundo produto (e nenhuma unidade do terceiro produto).

i) Produção de uma unidade dos modelos Q268, Q290 e QZ21

A seguir, nas tabelas 5.11a e 5.11b, são apresentados os seis resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX, quando são produzidas uma unidade dos produtos Q268, Q290 e QZ21, testando-se todos os ordenamentos possíveis entre estes três produtos. Uma observação para este caso é que se estabeleceu um limite de tempo de CPU de 3600 segundos ou 1 hora, para viabilizar que a solução ótima fosse encontrada. Contudo, houve casos em que o uso do tempo de CPU excedeu 3600 s.

Como os números de equações e de variáveis simples e binárias serão similares para todos os casos de campanhas com três unidades de produtos produzidas estes valores não serão apresentados nas próximas tabelas desta subseção. Neste primeiro caso, com produção de uma unidade de cada um dos três produtos, foram testadas seis situações distintas: *i)* quando são produzidos pela ordem os produtos Q268, Q290 e QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.15; *ii)* quando são produzidos pela ordem os produtos Q268, QZ21 e Q290, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.16; *iii)* quando são produzidos pela ordem os produtos Q290, Q268 e QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.17; *iv)* quando são produzidos pela ordem os produtos Q290, QZ21 e Q268, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.18; *v)* quando são produzidos pela ordem os produtos QZ21, Q268 e Q290, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.19; *vi)* quando são produzidos pela ordem os produtos QZ21, Q290 e Q268, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.20.

Tabela 5.11a – Produção de uma unidade de Q268, Q290 e de QZ21 no *solver* GAMS/CPLEX.

	Conclusão pela ordem: Q268, Q290 e QZ21	Conclusão pela ordem: Q268, QZ21 e Q290	Conclusão pela ordem: Q290, Q268 e QZ21
Função objetivo	289.106,40	289.068,70	289.071,212
Tempo de CPU (s)	3.600,193	1.745,84	3.600,328
Nº de iterações	7.984.207	4.182.933	8.166.939
Equações geradas		4.034	
Variáveis simples		739	
Variáveis discretas		450	

Tabela 5.11b – Produção de uma unidade de Q268, Q290 e de QZ21 no *solver* GAMS/CPLEX.

	Prioridade na conclusão: Q290, QZ21 e Q268	Prioridade na conclusão: QZ21, Q268 e Q290	Prioridade na conclusão: QZ21, Q290 e Q268
Função objetivo	289.080,86	289.004,96	289.191,89
Tempo de CPU (s)	3.216,625	3.600,174	3.600,368
Nº de iterações	7.672.172	8.040.353	8.392.348

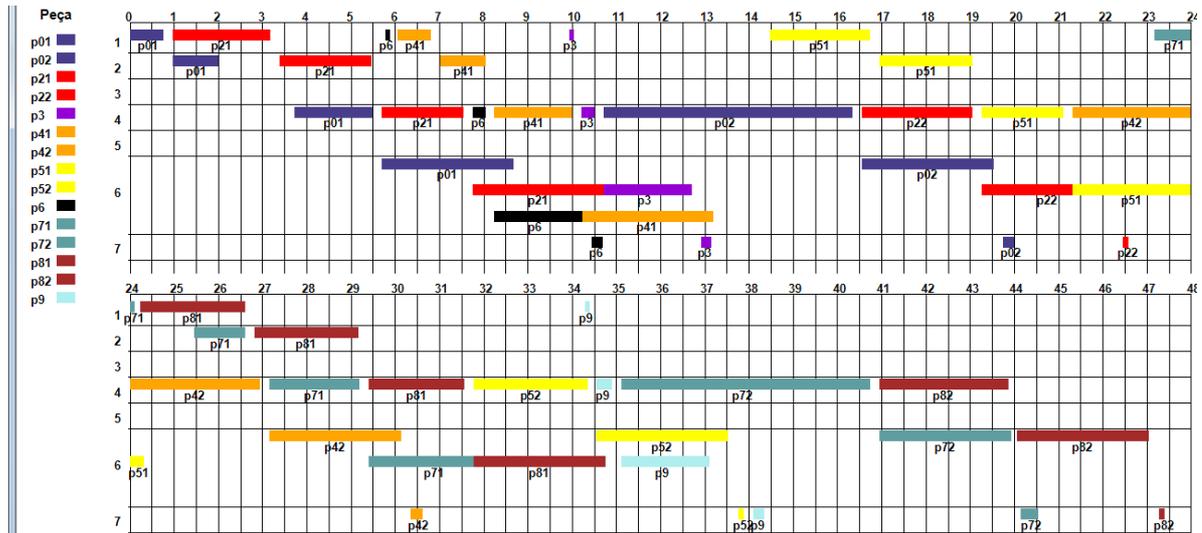


Figura 5.15 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto Q268, depois Q290 e, por fim, QZ21.

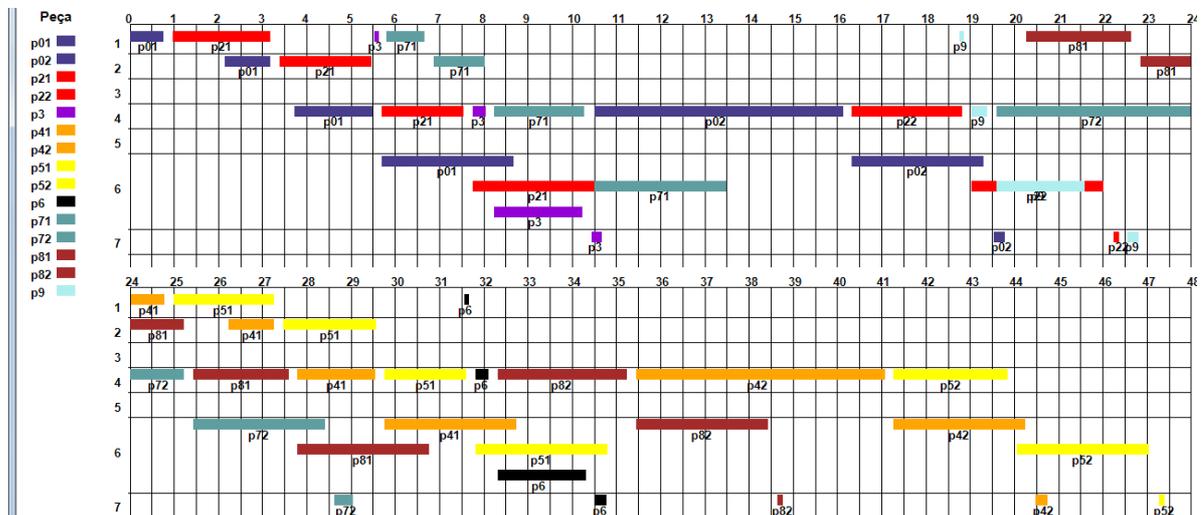


Figura 5.16 - Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto Q268, depois QZ21 e, por fim, Q290.

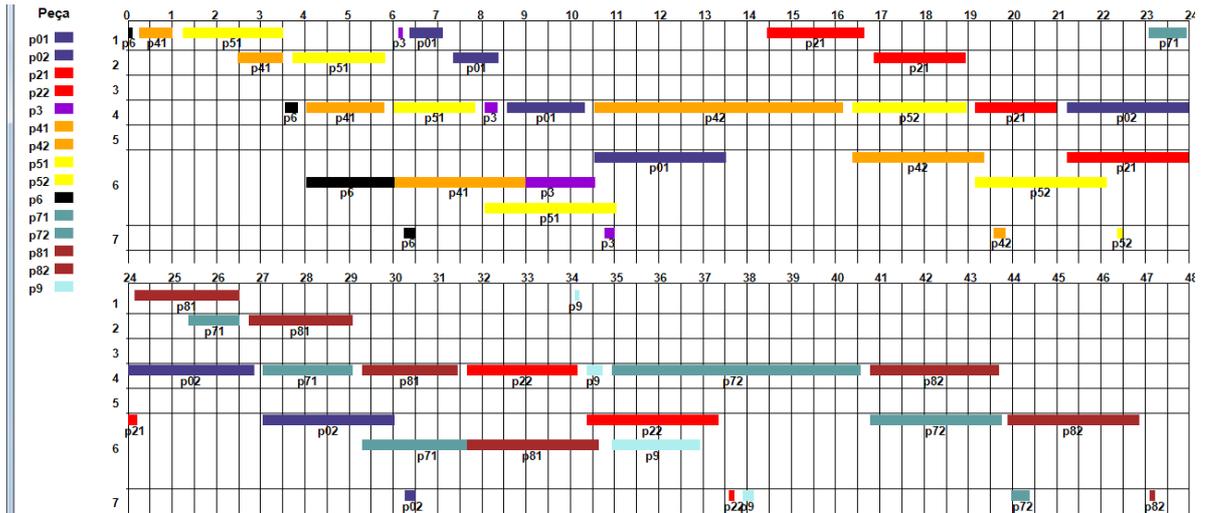


Figura 5.17 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto Q290, depois Q268 e, por fim, QZ21.

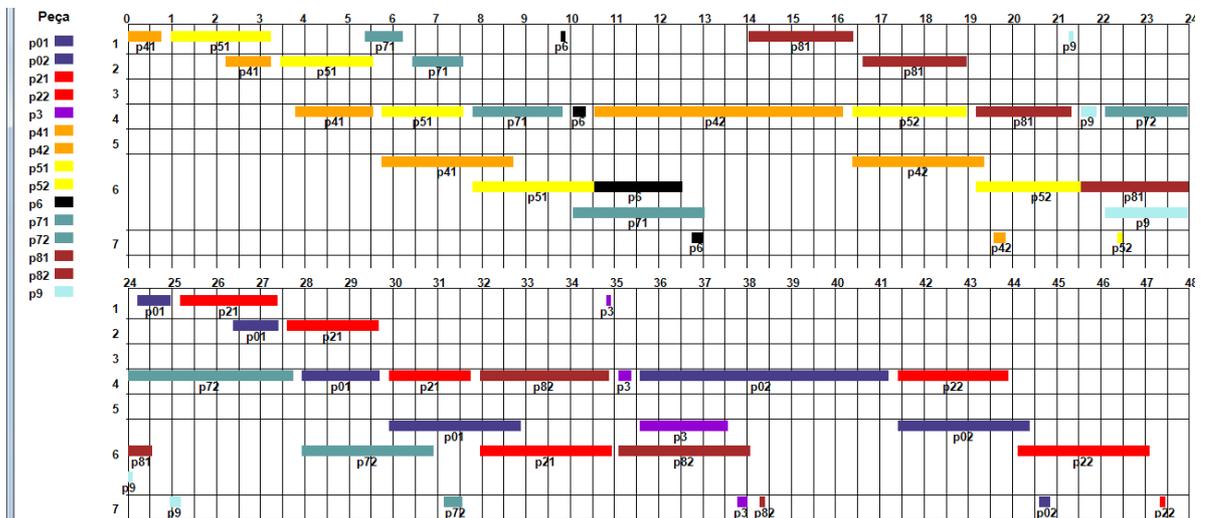


Figura 5.18 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto Q290, depois QZ21 e, por fim, Q268.

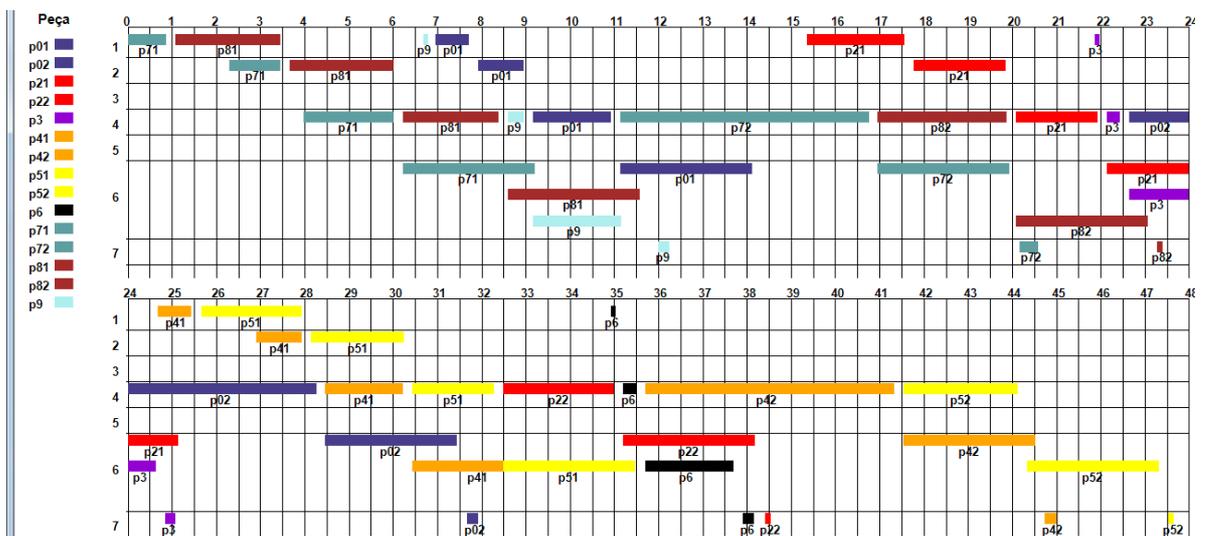


Figura 5.19 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto QZ21, depois Q268 e, por fim, Q290.

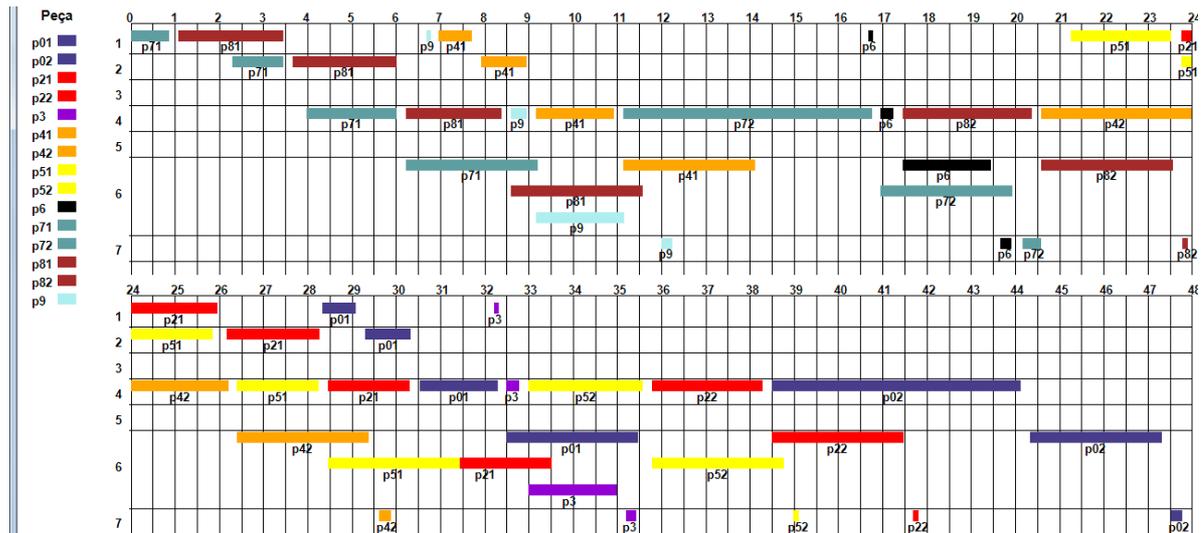


Figura 5.20 – Solução ótima para a produção de uma unidade dos produtos com prioridade para a conclusão do produto QZ21, depois Q290 e, por fim, Q268.

Para estudos futuros, talvez algumas restrições (cortes) devem ser necessários para propiciar a redução da carga computacional. Isto deve ser levado em consideração após avaliar os tempos de simulação deste modelo.

ii) Produção de uma unidade do modelo Q268 e duas unidades de Q290

A seguir, na tabela 5.12 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: uma unidade do produto Q268 e duas unidades do produto Q290. Ao contrário do item *i*, desta subseção, o tempo de CPU voltou a ser baixo (106s.). Neste caso, necessariamente, a ordem de conclusão dos produtos será uma unidade do produto Q290, depois uma unidade do produto Q268 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto Q290, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.21. Observe que, se esta sequência não for seguida, então se recairá no caso apresentado no início da seção 5.1.1, quando a produção de duas unidades seguidas do produto Q268 resultou em uma ociosidade excessiva, maior que o tempo de transporte entre duas tarefas, fato que não é aceitável.

Tabela 5.12 – Resultados da produção de uma unidade de Q268 e duas unidades de Q290 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	288.839,78
Tempo de CPU (s)	106,317
Nº de iterações	302.613

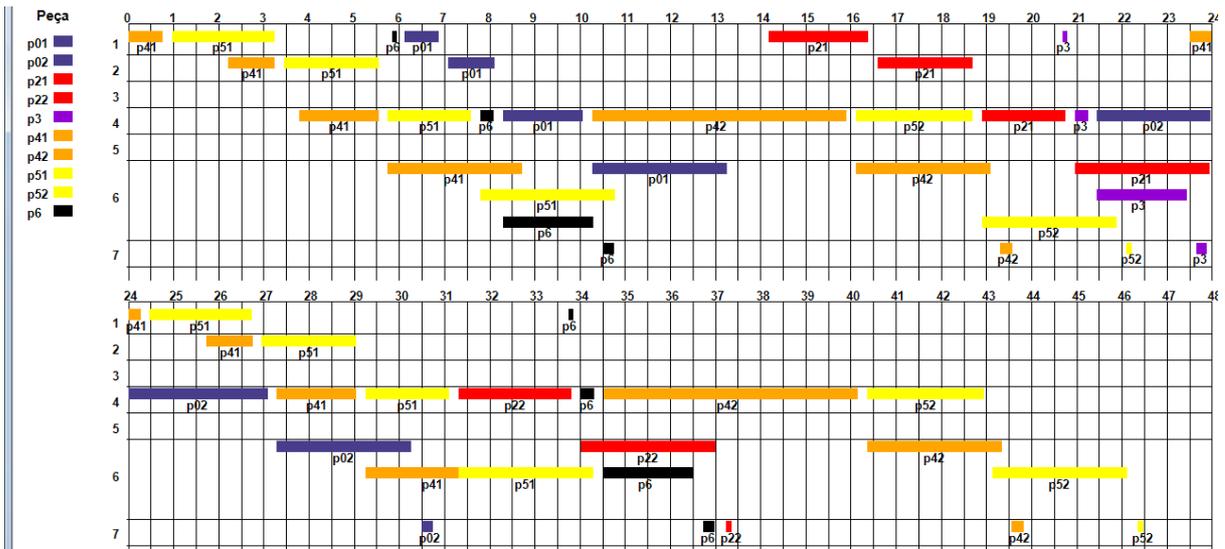


Figura 5.21 – Solução ótima para a produção de uma unidade de Q268 e duas unidades de Q290.

iii) Produção de duas unidades do modelo Q268 e uma unidade de Q290

A seguir, na tabela 5.13 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: duas unidades do produto Q268 e uma unidade do produto Q290. Neste caso, a ordem de conclusão dos produtos será uma unidade do produto Q268, depois uma unidade do produto Q290 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto Q268, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.22.

Tabela 5.13 – Resultados da produção de uma unidade de Q290 e duas unidades de Q268 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	288.818,14
Tempo de CPU (s)	100,326
Nº de iterações	276.336

iv) Produção de uma unidade do modelo Q268 e duas unidades de QZ21

A seguir, na tabela 5.14 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: duas unidades do produto QZ21 e uma unidade do produto Q268. Neste caso, a ordem de conclusão dos produtos será uma unidade do produto QZ21, depois uma unidade do produto Q268 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.23.

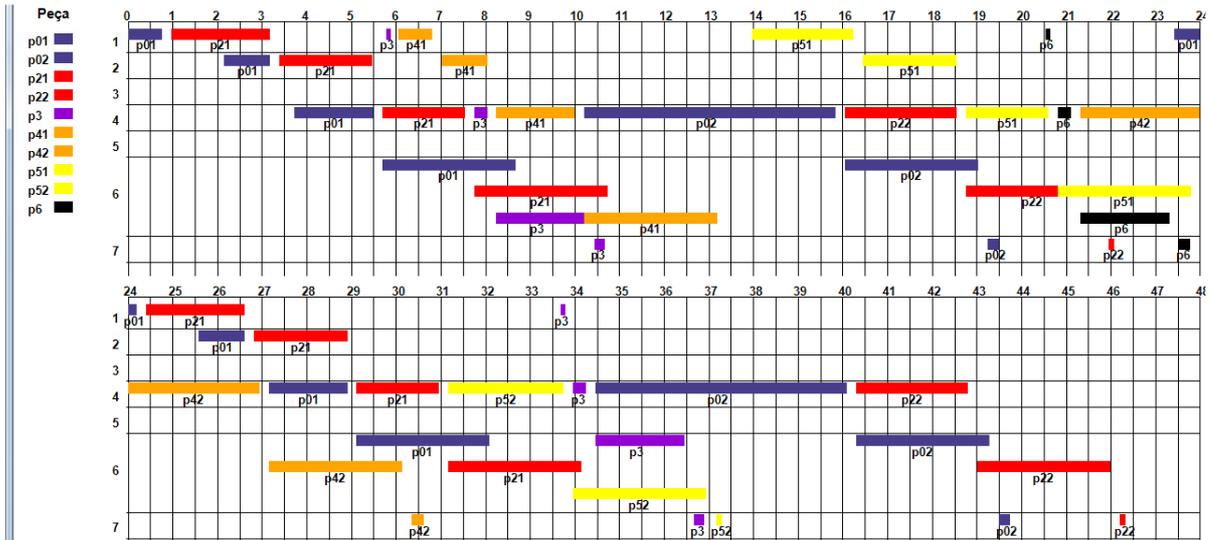


Figura 5.22 – Solução ótima para a produção de uma unidade de Q290 e duas unidades de Q268.

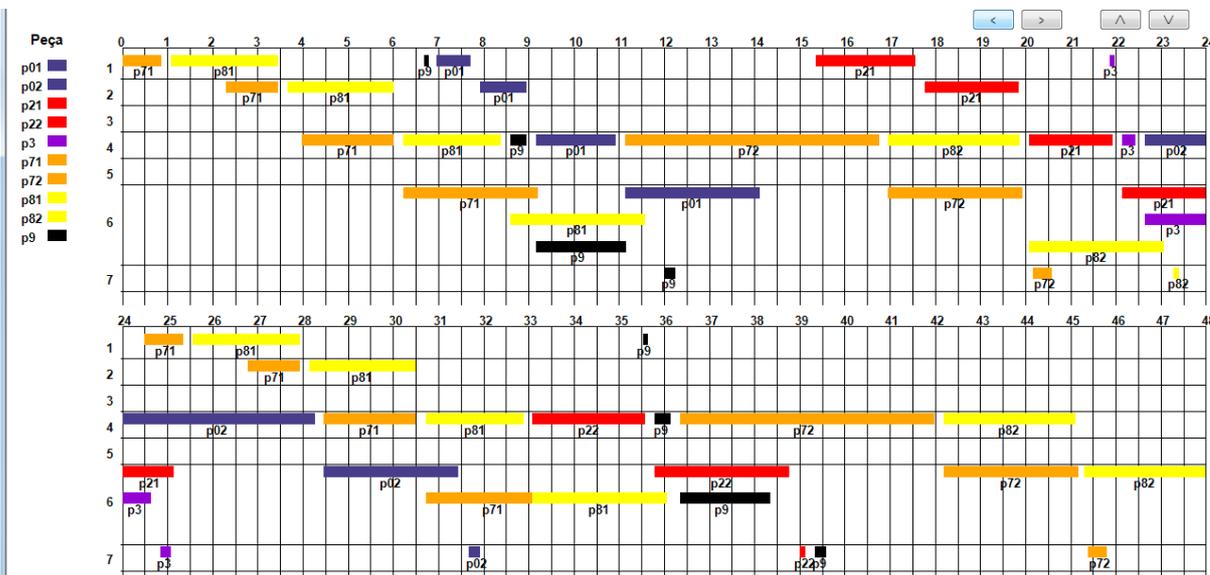


Figura 5.23 – Solução ótima para a produção de uma unidade de Q268 e duas unidades de QZ21.

Tabela 5.14 – Resultados da produção de uma unidade de Q268 e duas unidades de QZ21 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	289.199,84
Tempo de CPU (s)	96,348
Nº de iterações	266.997

v) Produção de duas unidades do modelo Q268 e uma unidade de QZ21

A seguir, na tabela 5.15 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: duas unidades do produto Q268 e uma unidade do produto QZ21. Neste caso, a ordem de conclusão dos produtos será

uma unidade do produto Q268, depois uma unidade do produto QZ21 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto Q268, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.24.

Tabela 5.15 – Resultados da produção de uma unidade de QZ21 e duas unidades de Q268 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	289.057,22
Tempo de CPU (s)	109,233
Nº de iterações	298.751

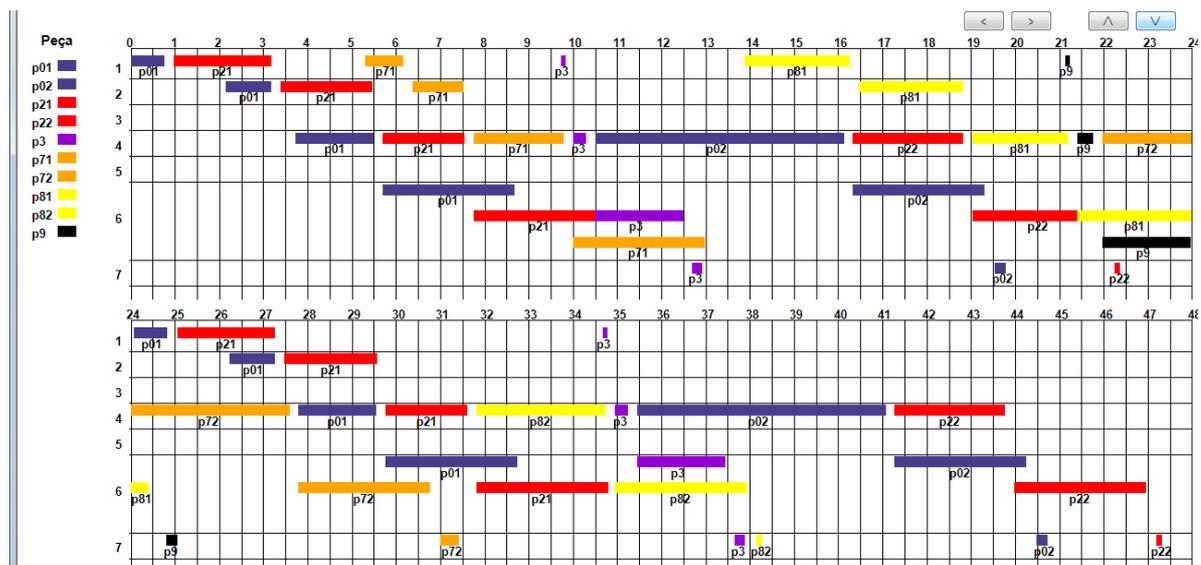


Figura 5.24 – Solução ótima para a produção de uma unidade de QZ21 e duas unidades de Q268.

vi) Produção de uma unidade do modelo Q290 e duas unidades de QZ21

A seguir, na tabela 5.16 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: duas unidades do produto Q290 e uma unidade do produto Q290. Neste caso, a ordem de conclusão dos produtos será uma unidade do produto QZ21, depois uma unidade do produto Q290 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto QZ21, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.25.

Tabela 5.16 – Resultados da produção de uma unidade de Q290 e duas unidades de QZ21 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	289.218,22
Tempo de CPU (s)	110,018
Nº de iterações	307.564

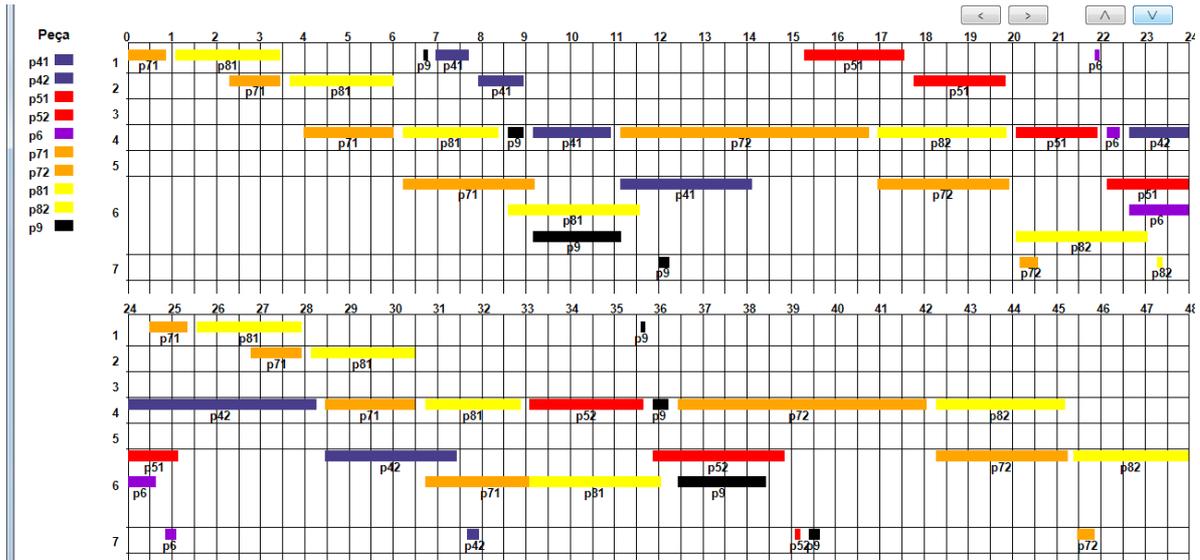


Figura 5.25 – Solução ótima para a produção de uma unidade de Q290 e duas unidades de QZ21.

vii) Produção de duas unidades do modelo Q290 e uma unidade de QZ21

A seguir, na tabela 5.17 são apresentados os resultados da execução do *solver* GAMS/CPLEX quando são produzidas: duas unidades do produto Q290 e uma unidade do produto QZ21. Neste caso, a ordem de conclusão dos produtos será uma unidade do produto Q290, depois uma unidade do produto QZ21 e, por fim, será concluída a segunda unidade do produto Q290, cuja solução ótima é apresentada na figura 5.26.

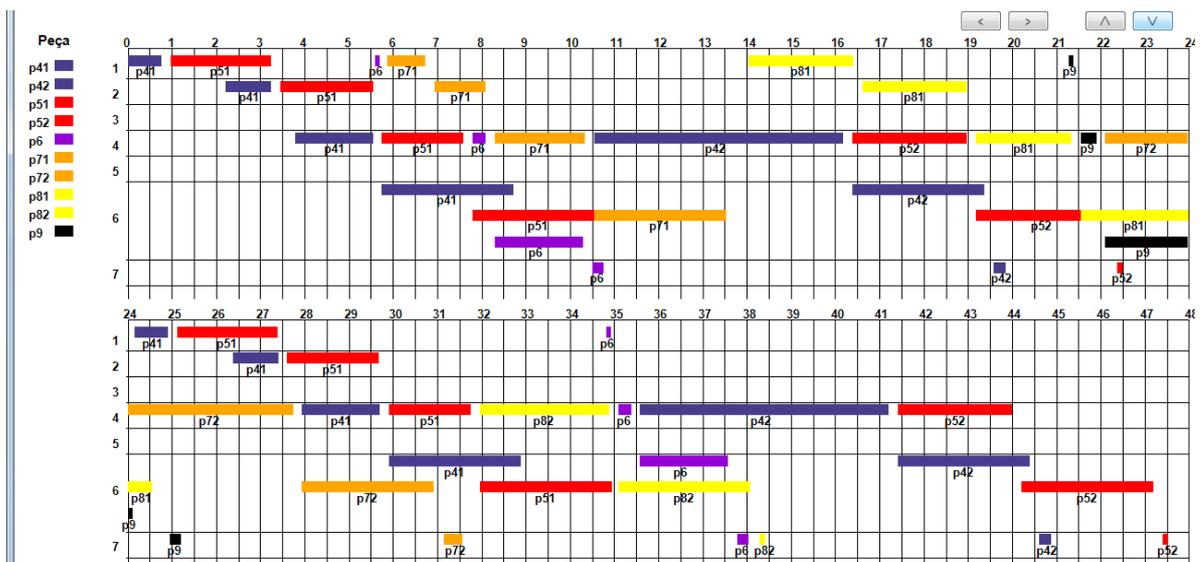


Figura 5.26 – Solução ótima para a produção de uma unidade de QZ21 e duas unidades de Q290.

Tabela 5.17 – Resultados da produção de uma unidade de QZ21 e duas unidades de Q290 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	289.066,74
Tempo de CPU (s)	109,188
Nº de iterações	299.798

5.2 SEGUNDA ETAPA DO SISTEMA PROPOSTO

Na primeira etapa, mostrada na seção 5.1, foram apresentadas todas as campanhas aceitáveis (com duas ou três unidades produzidas), onde a única ociosidade encontrada no posto J4 foi a decorrente do transporte de moldes/peças. Ou seja, todas as campanhas apresentadas nas seções 5.1.1 e 5.1.2 garantem a máxima produtividade possível. Estas campanhas são relacionadas na tabela 5.18.

Nesta seção são apresentados e discutidos resultados para a segunda etapa da abordagem proposta, onde são utilizadas as campanhas das seções 5.1.1 e 5.1.2 para atender a quaisquer possíveis demandas. Para exemplificar isso, serão apresentados dois estudos de caso (cenários de produção). Após a simulação da produção para as dezoito campanhas propostas na tabela 5.18, que constituirá na primeira etapa da abordagem proposta, será aplicada a segunda etapa da abordagem que é constituída de duas ações:

- i) Definição de quais campanhas serão produzidas e quantas vezes elas serão repetidas a fim de atender a demanda dos produtos;
- ii) Após a definição das campanhas que serão produzidas para atender a demanda dos produtos e em que ordem elas serão produzidas, realiza-se um pós-processamento que consiste na revisão da temporização de todas as tarefas, exceto aquelas do recurso gargalo.

5.2.1 Cenário 1: Demanda de 7 Unidades

Neste primeiro cenário foi definida, aleatoriamente, a demanda de 7 unidades (3 unidades de Q268; 1 unidade de Q290; 3 unidades de QZ21). Trata-se de um cenário de curto prazo para o estaleiro, mas que já representa aproximadamente 95 horas de produção no posto J4.

Tabela 5.18 – Possíveis campanhas a serem geradas, apresentadas pela ordem de conclusão.

Campanha	Ordem de conclusão dos produtos			Figura associada
	1°	2°	3°	
1	Q268	Q290	-	5.9
2	Q290	Q268	-	5.10
3	Q268	QZ21	-	5.11
4	QZ21	Q268	-	5.12
5	Q290	QZ21	-	5.13
6	QZ21	Q290	-	5.14
7	Q268	Q290	QZ21	5.15
8	Q268	QZ21	Q290	5.16
9	Q290	Q268	QZ21	5.17
10	Q290	QZ21	Q268	5.18
11	QZ21	Q268	Q290	5.19
12	QZ21	Q290	Q268	5.20
13	Q290	Q268	Q290	5.21
14	Q268	Q290	Q268	5.22
15	QZ21	Q268	QZ21	5.23
16	Q268	QZ21	Q268	5.24
17	QZ21	Q290	QZ21	5.25
18	Q290	QZ21	Q290	5.26

Como apresentado na seção 4.3, o primeiro passo é definir quais campanhas serão produzidas. Para isso, aplicou-se o mesmo modelo matemático apresentado na seção 4.3.1, que consiste num Problema de Programação Linear Inteira Mista, solucionado através do *solver* GAMS/CPLEX. A tabela 5.19 apresenta o resumo da solução gerada pelo GAMS/CPLEX.

Um aspecto interessante desta abordagem é que o tempo de CPU do modelo proposto na seção 4.3.1 foi baixo (0,418 s.), enquanto, na seção 5.1.2, houve algumas campanhas cujo tempo de CPU alcançou 3600 s. (1 hora). Porém, é importante lembrar que uma vez obtidas as soluções para as campanhas, apresentadas nas seções 5.1.1 e 5.1.2, elas só serão novamente resolvidas caso haja alguma alteração nos tempo de processamento das tarefas ou de transporte dos moldes/peças. Assim, o único procedimento que será realizado com frequência será a segunda etapa da abordagem proposta, cujos resultados são apresentados nesta seção. A sequência de campanhas (onde cada campanha é identificada pela sequência de produção das peças), obtida na solução do problema é apresentada na tabela 5.20. A partir da sequência das campanhas, aplicou-se o procedimento de temporização, explicado na seção 4.3.1, que é um procedimento de Programação

Linear. A figura 5.27 apresenta o resultado desta temporização que foi executada em 1,244 s. (2339 iterações).

Tabela 5.19 – Resultados da seleção das campanhas no cenário 1 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	7
Tempo de CPU (s)	0,398
Nº de iterações	68
Equações geradas	188
Variáveis simples	184
Variáveis discretas	180

Tabela 5.20 – Resultados da seleção das campanhas no cenário 1 no *solver* GAMS/CPLEX.

1º	2º	3º
QZ21	Q268	Q268
Q290	QZ21	QZ21
		Q268

5.2.2 Cenário 2: Demanda de 14 Unidades

Neste segundo cenário foi definida aleatoriamente a demanda de 14 unidades (3 unidades de Q260; 4 unidade de Q290; 7 unidades de QZ21). Trata-se de um cenário de médio prazo para o estaleiro, mas que já representa aproximadamente 191 horas de produção no posto J4. A tabela 5.22 apresenta o resumo da solução gerada pelo GAMS/CPLEX, onde o tempo de CPU foi de 0,418 s. A sequência de campanhas (onde cada campanha é identificada pela sequência de produção das peças), obtida na solução do problema é apresentada na tabela 5.23. A figura 5.28 apresenta o resultado desta temporização que foi executada em 4,639 s. (5752 iterações).

Tabela 5.22 – Resultados da seleção das campanhas no cenário 1 no *solver* GAMS/CPLEX.

Função objetivo	14
Tempo de CPU (s)	0,418
Nº de iterações	61
Equações geradas	188
Variáveis simples	184
Variáveis discretas	180

Tabela 5.23 – Resultados da seleção das campanhas no cenário 2 no *solver* GAMS/CPLEX.

1º	2º	3º	4º	5º	6º
QZ21	QZ21	QZ21	Q268	Q290	QZ21
Q268	Q268	Q290	QZ21	QZ21	Q290
		QZ21		Q290	

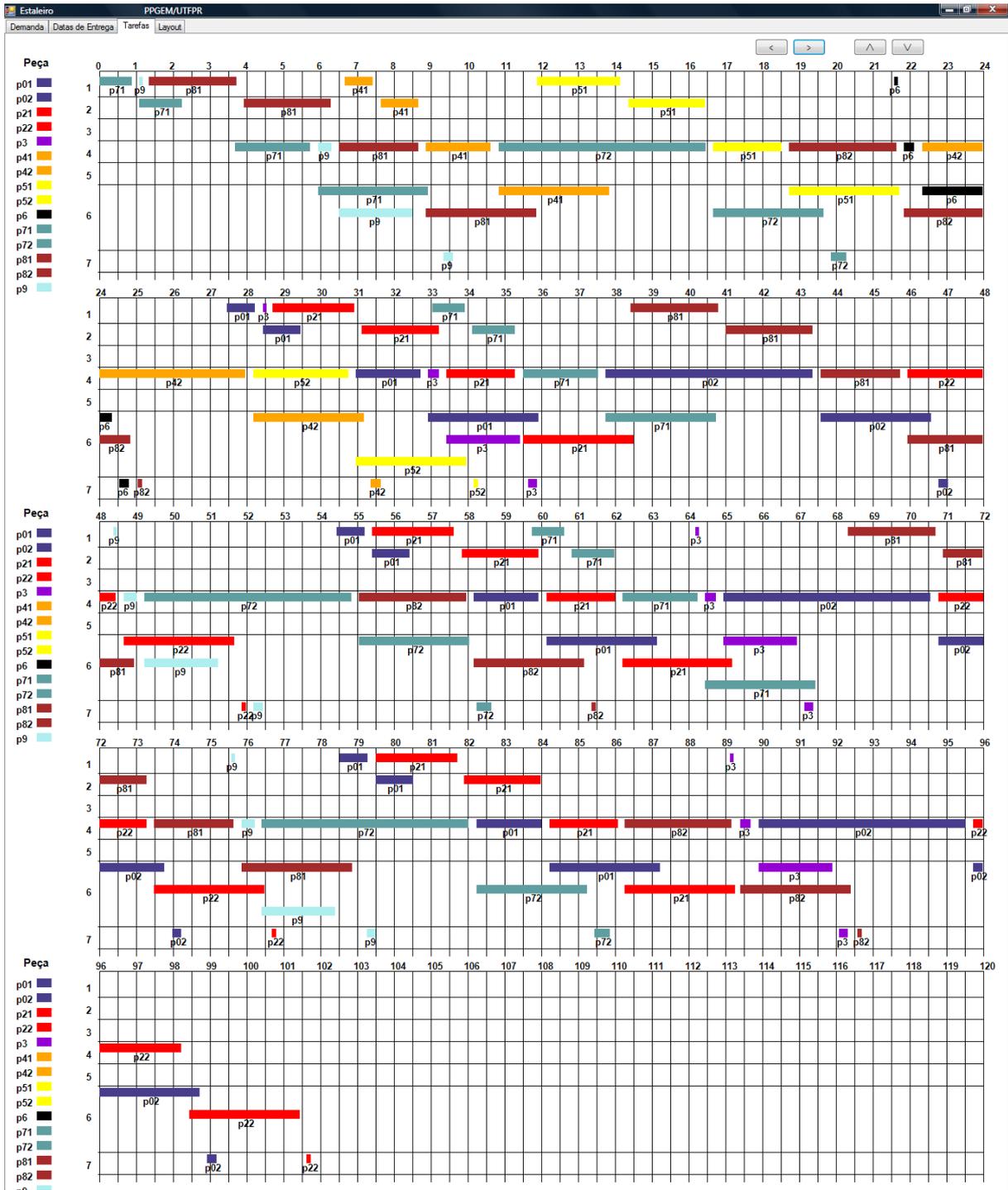


Figura 5.27 – Solução ótima da temporização do cenário 1.

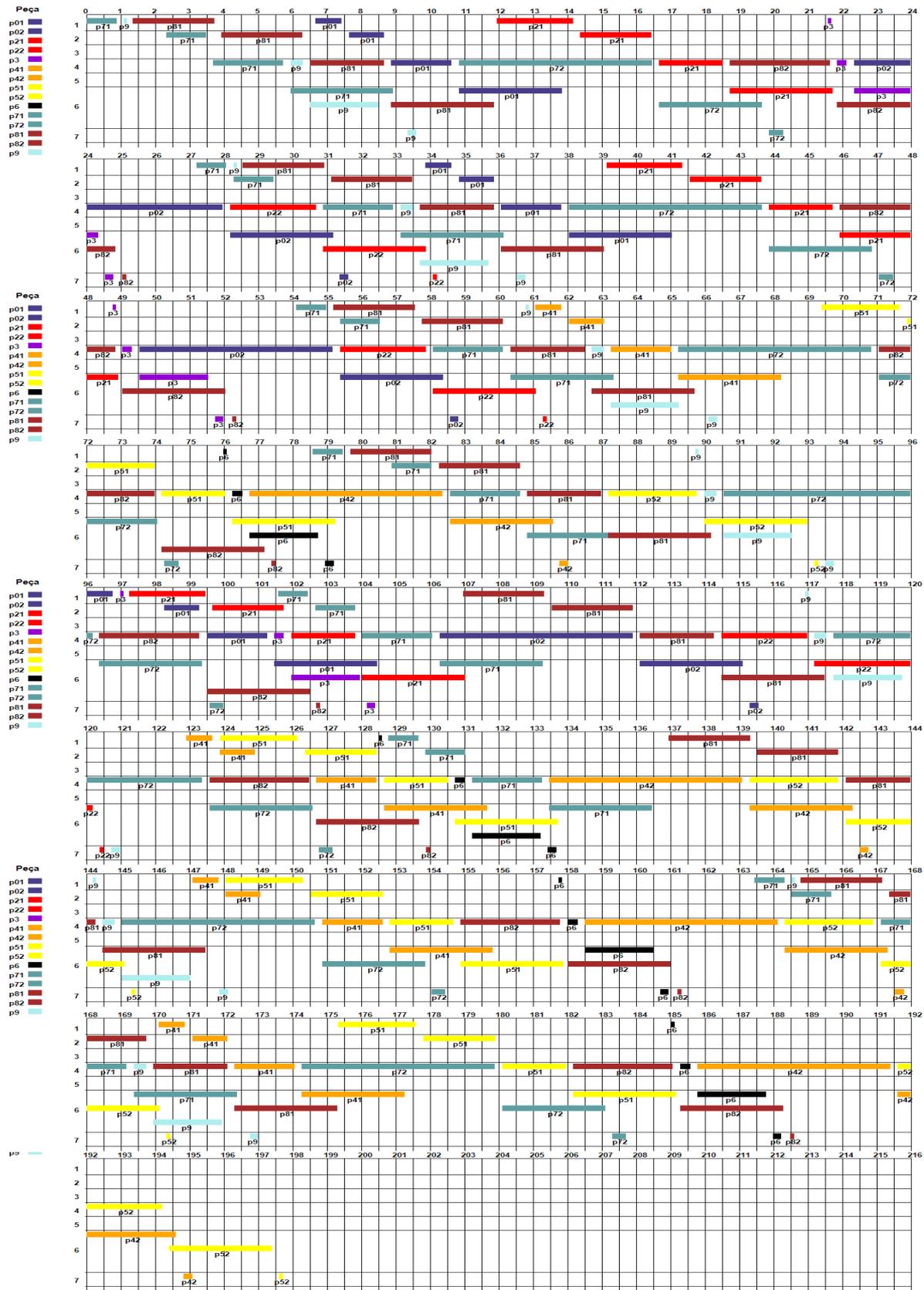


Figura 5.28 – Solução ótima da temporização do cenário 2.

6 CONCLUSÕES

O problema de programação de tarefas em ambiente *flow-shop* abordado neste trabalho é de alta complexidade, devido às técnicas utilizadas para encontrar uma solução ótima. Além disso, foi gerada uma interface gráfica para expor os resultados para o processo de manufatura de um produto desde o início ao fim, incluindo a fabricação das partes principais, até os detalhes de acabamento e opcionais (de lazer e adaptabilidade de condução de um veículo motorizado), visando atender um mercado em significativo crescimento nos últimos anos.

Este trabalho abordou a otimização do planejamento produtivo de curto-prazo de um estaleiro náutico localizado em Curitiba – PR. Desenvolveu-se uma abordagem computacional baseada em um modelo de Programação Linear Inteira Mista. Esta abordagem mostrou-se capaz de otimizar o processo de fabricação de peças em fibra de vidro do estaleiro em estudo; em especial, a ocupação de um posto de trabalho gargalo do processo.

Essa particularidade da existência de um posto gargalo no processo produtivo e a possibilidade de representar o problema como sendo um *flowshop* direcionaram à utilização de técnicas já existentes como a proposta por Guéret *et al.* (2000); porém, não é descartado o desenvolvimento futuro de novas formulações que propiciem soluções mais realistas aos resultados para o estudo de caso.

O objetivo principal foi minimizar a ociosidade dos postos de trabalho na execução da fabricação de peças em fibra de vidro entre modelos de embarcação. Após a coleta de dados para os três modelos, estabeleceram-se as possíveis campanhas com as combinações de execução de um conjunto de modelos de embarcações. Posteriormente, foram analisadas as soluções obtidas para minimização da função objetivo aplicada aos intervalos entre uma campanha e outra. Assim, minimizou-se a ocupação do posto de trabalho (J4), que regula o fornecimento das partes principais (devido ao maior tempo de fabricação) para o sistema intermitente sob encomenda, que necessita destas peças para execução da montagem de outros componentes na embarcação.

Todas as pesquisas realizadas, coleta de dados, desenvolvimento da programação e análise dos resultados contribuíram para um melhor entendimento dos setores naval e náutico, que nos últimos anos apresentam um considerável

crescimento em nosso país. Assim, o desenvolvimento de soluções, que permitam uma racional utilização dos recursos necessários à edificação de uma embarcação, torna-se relevante à obtenção de competitividade dentro do setor.

Em relação ao cenário de estudo, a sazonalidade de vendas dos diversos modelos demanda dinamismo na administração e gerência do sistema produtivo, bem como respostas rápidas às oscilações de demanda e análise da ocupação dos postos de trabalho. Assim, a aplicação de uma abordagem de otimização para o auxílio ao processo de tomadas de decisões operacionais tem se mostrado fundamental.

6.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação abordou contextos simplificados para um melhor entendimento da abordagem de solução desenvolvida. O processo de fabricação é dividido em dois sistemas de manufatura, o intermitente repetitivo e o intermitente sob encomenda. Realizar uma análise completa de todas as operações simultaneamente iria sobrecarregar o tempo computacional de obtenção das soluções. Devido a este fato, cada sistema de manufatura, deve ser analisado separadamente. A prioridade dada ao sistema intermitente repetitivo foi baseada na identificação de um posto de trabalho gargalo. Na fabricação das partes principais, este posto passa a limitar a produtividade de todo o sistema.

Uma sugestão pertinente de trabalho futuro é executar a mesma análise a partir da identificação do posto de trabalho mais sobrecarregado no sistema de manufatura intermitente sob encomenda, uma vez que os dados de todas as variáveis já foram coletados, necessitando apenas de adaptações em algumas formulações de restrições.

Conforme explicitado anteriormente, o estaleiro em estudo possui um número maior de produtos em seu *mix* de produção. A coleta dos dados para os principais modelos também foi realizada, porém o esforço para sua programação, solução e análise não foi compatível com o tempo de execução da dissertação, devido à maior preocupação em desenvolver uma formulação. Assim, sugere-se como trabalho

futuro a incorporação ao estudo dos demais modelos de embarcações produzidos pela empresa.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOBAR – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DOS CONSTRUTORES DE BARCOS E SEUS IMPLEMENTOS. **Indústria náutica brasileira: fatos e números 2005**. Relatório anual de 2005.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Construção Naval no Brasil e no Mundo**. Informe Infra Estrutura. Rio de Janeiro n°14, setembro, 1997.

COUTINHO L.G., SABBATINI R., RUAS J.A.G.. **Documento: forças atuantes na indústria**. NEIT-IE-Unicamp. PR-011 PROTAN – Programa Tecnológico da Transpetro. Centro de Estudos em Gestão Naval. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

DEPARTAMENTO INTERSINDICAL DE ESTATÍSTICA E ESTUDOS SOCIO ECONOMICOS- DIEESE. **Diagnóstico da indústria naval brasileira**. Julho, 1998. Disponível em < <http://www.dieese.org.br> > Acesso em 10 abr. 2003

GOLDBARG M.C., LUNA H.P., **Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos**. Campus, Rio de Janeiro, Brasil. 2000.

GUÉRET C., PRINS C., SEVAUX, M. **Applications of Optimization With Xpress™**. Editions Eyrolles, Paris, França. 2000.

IBM ILOG CPLEX 12.2, <http://-01.ibm.com/software/integration/optimization/cplex-optimizer/>,2011.

DANTZIG G.B., **Linear Programming and Extensions**. Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1963.

Indústria Naval do Brasil: panorama desafios e perspectivas. Revista do BNDES.

Rio de Janeiro, v.9, n.16, dez 2002.

KOH M.C., EOM, C., JANG J., CHOI Y., **An Improved Spatial Scheduling Algorithm for Block Assembly Shop in Shipbuilding Company**. Dept. os Syst. Manage. &Eng., Pukyong Nat. Univ. Pukyong, Korea. 2008.

LEE K.J., LEE J.K., CHOI S.Y., **A Spatial Scheduling System and its Application to Shipbuilding: DAS CURVE**. Korea Advanced Institute of Science and Technology, Coréia do Sul. 1997.

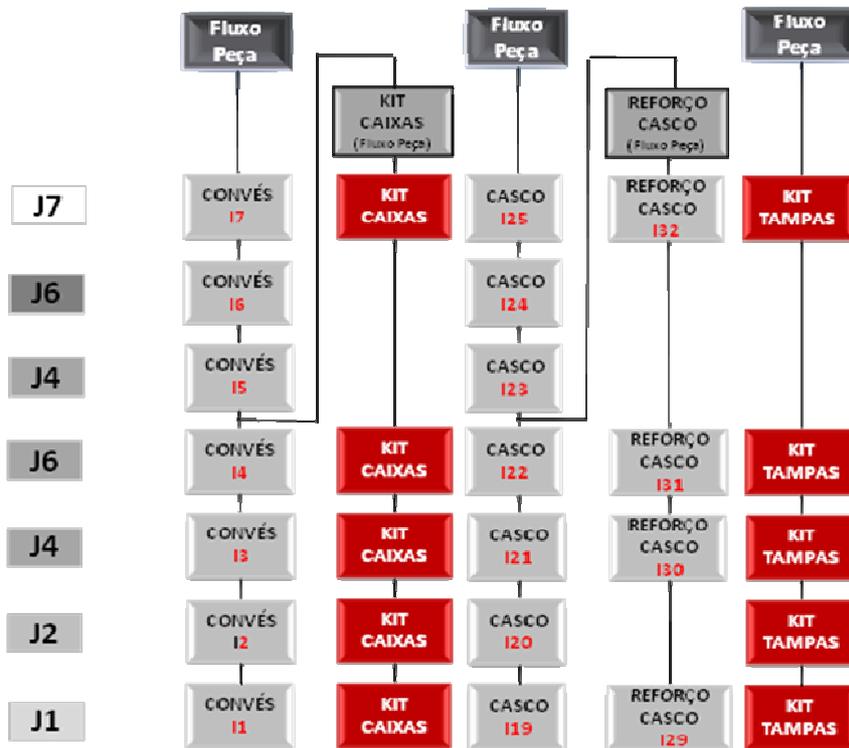
LUSTOSA L., MESQUITA M. A., QUELHAS O., OLIVEIRA R. J., **Planejamento e Controle da Produção**. Editora Campus, São Paulo. 2008

- MORO L.F.L., **Técnicas de Otimização Mista Inteira para o Planejamento e Programação da Produção em Refinarias de Petróleo**. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2000
- MOURA D.A., **Análise dos principais segmentos da Indústria Marítima Brasileira: Estudo das dimensões e dos Fatores Críticos de Sucesso Inerentes à sua Competitividade**. Tese de Doutorado, USP, São Paulo. 2008.
- NEMHAUSER G.L., WOLSEY L.A., **Integer and Combinatorial Optimization**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1998.
- PARK K., **Modeling and Solving the Spatial Block Scheduling Problem in a Shipbuilding Company**. Elsevier Science, United Kingdom. 1996.
- PINTO M. M., ANDERSON V.L., CARDOSO J.S.N., STUPELLO B., **Desenvolvimento e Aplicação de Método para Definição da Estrutura de Produto de um Navio Tanque (SUEZMAX) com Aplicação de Planejamento, Programação e Controle da Produção em um Estaleiro**. Centro de Estudos em Gestão Naval – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2007.
- PORTER M. **Competitive Strategy**. New York: Free Press, 1980.
- RODRIGUES L. C. A., MAGATÃO L. **Enhancing Supply Chain Decisions Using Constraint Programming: A Case Study**. Federal University of Technology - Paraná, UTFPR, 2007.
- RUAS J.A.G., LUGLI, V.M., ARAÚJO R. D., MELLO C.H., BOEIRA J.L.F., **Relatório de Acompanhamento Setorial – Indústria Naval – Volume IV**. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial – ABDI, Núcleo de Economia Industrial e da Tecnologia do Instituto de Economia da Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, 2009.
- RODRIGUES, Luiz C.A., **Notas de aula da disciplina de Métodos Heurísticos**, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2006.
- SLACK, N., CHAMBERS, S., HARLAND, C., HARRISON, A. e JOHNSTON, R., **Administração da Produção**. São Paulo: Ed. Atlas S.A., 1997.
- WEISS, J.M.G.. **Origens do desequilíbrio na indústria brasileira de construção naval**. Dissertação (Mestrado) – EAESP/FGV, São Paulo, 1990.
- WILLIAMS, H.P.. **Model Building in Mathematical Programming**. John Wiley, 1999.
- WOLSEY, L.A.. **Integer Programming**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1998.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO Q268

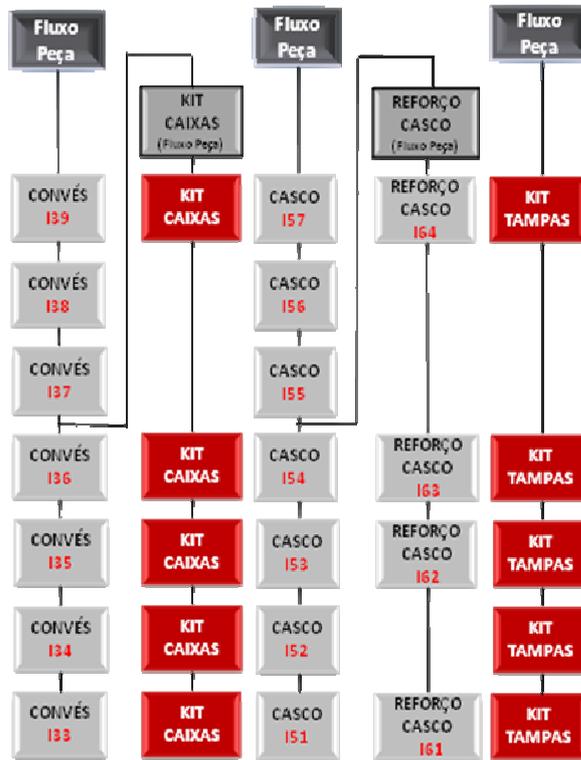
Sistema de Produção Intermitente



Sistema de Produção Intermitente Repetitivo (Q268)

APÊNDICE B – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO Q290

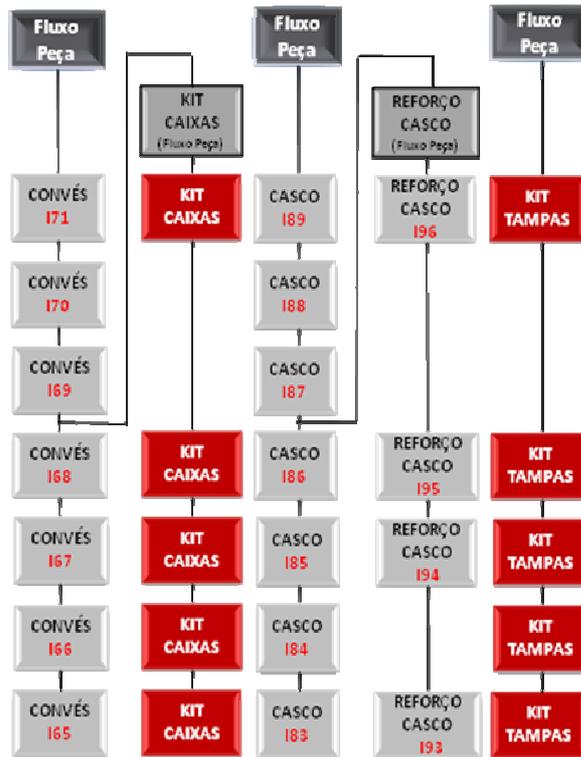
Sistema de Produção Intermitente



Sistema de Produção Intermitente Repetitivo (Q290)

APÊNDICE C – ESTRUTURA DE PRODUTO DO MODELO QZ21

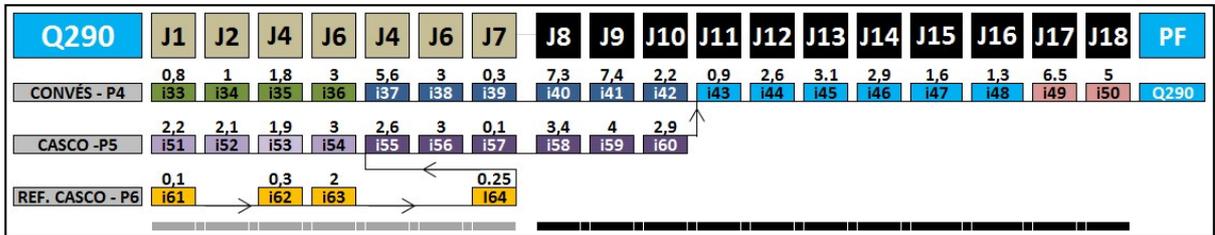
Sistema de Produção Intermitente



Sistema de Produção Intermitente Repetitivo (QZ21)

ANEXOS

ANEXO B – RELAÇÃO DE PRECEDÊNCIA DAS TAREFAS (Q290)



Relação das Tarefas de Processamento em Projetos. Fonte: Autor

