

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

**USO DA CORRENTE CRÍTICA POR MEIO DA SIMULAÇÃO PARA O AUXÍLIO  
NO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE EM UMA FUNDição**

FABRÍCIO GUERMANDI DOS SANTOS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

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

**USO DA CORRENTE CRÍTICA POR MEIO DA SIMULAÇÃO PARA O AUXÍLIO NO  
PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE EM UMA FUNDição**

**Fabrício Guermandi dos Santos**

**Dissertação de mestrado apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção da Universidade  
Federal de São Carlos, como parte dos  
requisitos para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia de Produção.**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo Rogério Politano**

**SÃO CARLOS  
2013**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da  
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

S237uc

Santos, Fabrício Guermandi dos.

Uso da corrente crítica por meio da simulação para o auxílio no processo de planejamento da capacidade em uma fundição / Fabrício Guermandi dos Santos. -- São Carlos : UFSCar, 2013.

129 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2013.

1. Planejamento da produção. 2. Planejamento da capacidade. 3. Fundição. 4. Corrente crítica. 5. Simulação. I. Título.

CDD: 658.5 (20<sup>a</sup>)



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
Rod. Washington Luís, Km. 235 - CEP. 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil  
Fone/Fax: (016) 3351-8236 / 3351-8237 / 3351-8238 (ramal: 232)  
Email : ppgep@dep.ufscar.br

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno(a): Fabricio Guermandi dos Santos

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DEFENDIDA E APROVADA EM 11/03/2013 PELA  
COMISSÃO JULGADORA:

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Paulo R. P." or "Paulo R. Politano".

Prof. Dr. Paulo Rogério Politano  
Orientador(a) DC/PPGEP/UFSCar

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Sílvio R. I. Pires".

Prof. Dr. Sílvio Roberto Ignácio Pires  
PPGA/UNIMEP

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Néocles Alves Pereira".

Prof. Dr. Néocles Alves Pereira  
PPGEP/UFSCar

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Mário Otávio Batalha".

Prof. Dr. Mário Otávio Batalha  
Coordenador do PPGEP

## DEDICATÓRIA

*A Ana Carolina Baradel que suportou todo o  
processo com compreensão e carinho.  
Todo seu apoio foi fundamental.*

## AGRADECIMENTOS

*A Deus por me dar forças para concluir mais uma etapa.  
Ao professor Politano pela paciência e orientação.  
A todos meus amigos e familiares que me ajudaram  
na conclusão deste trabalho.*

*"A verdadeira dificuldade não está em aceitar ideias novas, mas em escapar das ideias antigas."*  
John Maynard Keynes

*"Insanidade é continuar fazendo sempre a mesma coisa e esperar resultados diferentes."*  
Albert Einstein

## RESUMO

É de conhecimento que o ambiente produtivo está em constante mudança, com novas tecnologias, sistemas e teorias surgindo a cada dia, proporcionando novas maneiras para gerenciar a produção e atender a um mercado concorrido e com demandas inconstantes. Nesse contexto, o planejamento da capacidade tem papel fundamental para uma empresa, gerenciando os recursos de maneira estruturada com informações precisas e garantindo o atendimento às necessidades do mercado, em termos de prazos de entrega, custo e qualidade.

O Método da Corrente Crítica se mostra como uma alternativa para modificar a maneira de gerenciar os recursos fabris, priorizando o que é realmente importante e evitando-se o desperdício de tempo, e consequentemente de recursos financeiros. Logo, o objetivo deste trabalho foi elaborar um modelo de simulação de eventos discretos para avaliar e comparar a utilização dos princípios da corrente crítica, frente ao método tradicional de planejamento da capacidade utilizado em uma fundição de grande porte. Para esta avaliação foram utilizados indicadores de desempenho como atendimento aos prazos, trabalho em processo, *lead time* médio, etc., onde estes, após serem comparados, mostraram que o método proposto pode trazer bons resultados ao ambiente estudado.

**Palavras-chaves:** Planejamento da capacidade, Fundição, Corrente crítica, Simulação.

## ABSTRACT

It is already known that the productive environment is in constant changing, with new technologies, new systems and theories coming up every day, providing other forms to manage production to comply with inconstant demands and a competitive market. In this context, the capacity planning has an important role for a company, managing resources in a structured way with accurate information, ensuring that market requirements will be fulfilled in terms of delivery, cost and quality.

The Critical Chain Method is shown as an alternative to change the way that manufacturing resources has been managed, prioritizing what is really important, avoiding waste of time and financial resources. Therefore, the objective of this work was to elaborate a model of discrete-event simulation to evaluate and compare the use of the principles of critical chain, against the traditional capacity planning method used in a foundry. For this assessment were used performance indicators as accomplishment deadlines, work in process, average lead time, etc., where these after being compared, have shown the proposed method could provide positive results to the environment studied.

**Keywords:** Capacity Planning, Foundry, Critical chain, Simulation.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA .....</b>	<b>III</b>
<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>XII</b>
<b>1      INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1    CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.1.1    Características Gerais de uma Fundição .....	2
1.2    OBJETIVO PRINCIPAL DO TRABALHO.....	3
1.3    IMPORTÂNCIA DO TRABALHO.....	4
1.4    PROBLEMA DE PESQUISA.....	5
1.5    MÉTODO DE PESQUISA .....	6
1.5.1    Concepções Metodológicas .....	6
1.5.2    Abordagem da Pesquisa .....	8
1.5.3    Métodos de Procedimento para Pesquisa .....	9
1.6    ESTRUTURA DO TRABALHO .....	11
<b>2      PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
2.1    CLASSIFICAÇÕES DO SISTEMA DE PRODUÇÃO.....	12
2.2    MODELOS DE PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO (PCP) ..	22
2.2.1    Planejamento Agregado da Produção.....	26
<b>3      PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE.....</b>	<b>32</b>
3.1    PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE: CONCEITOS E ESTRUTURA NO PCP .....	32
3.2    TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE .....	35
3.3    GERENCIAMENTO DA CAPACIDADE .....	38
<b>4      CORRENTE CRÍTICA .....</b>	<b>45</b>
4.1    OPT E TEORIA DAS RESTRIÇÕES .....	45
4.2    COORDENAÇÃO DE PROJETOS UTILIZANDO O PERT/CPM .....	55
4.3    A CORRENTE CRÍTICA: FUNDAMENTOS E PROCEDIMENTO .....	59
4.4    PULMÕES: AS PROTEÇÕES PARA A CORRENTE CRÍTICA.....	66
4.5    MÚLTIPLOS PROJETOS NA CORRENTE CRÍTICA .....	70
<b>5      SIMULAÇÃO .....</b>	<b>75</b>

5.1	LINGUAGENS DE SIMULAÇÃO .....	77
5.2	PRINCIPAIS ETAPAS DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO .....	78
<b>6</b>	<b>PROPOSTA DO USO DA CORRENTE CRÍTICA POR MEIO DA SIMULAÇÃO PARA O AUXÍLIO NO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE .....</b>	<b>82</b>
6.1	CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE PRODUÇÃO DA FUNDIÇÃO .....	82
6.2	ETAPAS DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO .....	85
6.3	PLANEJAMENTO ATUAL DA CAPACIDADE NA FUNDIÇÃO ESTUDADA .....	90
6.4	CORRENTE CRÍTICA COMO FERRAMENTA DE APOIO A ELABORAÇÃO DO PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE .....	95
6.5	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS .....	97
6.5.1	Simulação do Estado Atual .....	98
6.5.2	Cenário Utilizando a Corrente Crítica .....	107
6.5.3	Cenário Utilizando a Corrente Crítica - Tempos de Processo Reduzidos .....	113
6.5.4	Comparação dos Resultados dos Três Cenários .....	114
6.5.5	Análise da Capacidade com os Resultados Gerados .....	119
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>123</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>125</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Principais processos de uma fundição. Fonte: Landmann (2005).....	2
Figura 1.2 – Áreas de conhecimento envolvidas. Fonte: Elaboração própria. ....	5
Figura 2.1 – Tipos de instalação e <i>Layout</i> utilizados para diferentes níveis de quantidade de produção e variedade de produto. Fonte: Groover (2001). .....	14
Figura 2.2 – Tipologia de operações. Fonte: Slack (2002).....	15
Figura 2.3 – Estratégias de atendimento a demanda e as formas de interação com os clientes. Fonte: Adaptado de Pires (2004).....	20
Figura 2.4 - Visão geral das atividades do PCP. Fonte: Tubino (2006).....	24
Figura 2.5 – Conceito de hierarquia de decisões de planejamento. Fonte: Corrêa <i>et al.</i> (2009) .....	24
Figura 2.6 - O equilíbrio entre planejamento e controle de produção ao longo do tempo. Fonte: Slack <i>et al.</i> (2002, p. 316). .....	25
Figura 2.7 – Políticas opostas de produção. Fonte: Corrêa <i>et al.</i> (2009, p. 191).....	29
Figura 3.1 – O planejamento da capacidade no sistema de PCP. Fonte: Adaptado de Vollmann <i>et al.</i> (2006) .....	34
Figura 3.2 - Planejamento deve considerar a capacidade efetivamente disponível para o trabalho Fonte: Corrêa <i>et al.</i> (2009). .....	41
Figura 4.1 - Lotes de transferência e lotes de processamento. Fonte: Corrêa <i>et al.</i> (2009) 49	
Figura 4.2 – Metodologia Tambor-Pulmão-Corda. Fonte: Adaptado de Goldratt(1994) ...	54
Figura 4.3 – Diagrama de redes com os tempos de Início mais cedo (ES), Término mais cedo (EF), Início mais tarde (LS) e Término mais tarde (LF). Fonte: Adaptado de Mcclain (1985, p57). .....	57
Figura 4.4 – Diferenças entre Caminho Crítico e Corrente Crítica. Fonte: Adaptado de Steyn (2000) .....	60
Figura 4.5 - Comparaçao entre PERT/CPM e Corrente Crítica. Fonte: Rand (2000).....	61
Figura 4.6 – Atraso causado pelo mecanismo Multitarefa. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004) .....	63
Figura 4.7 – Criação da rede com base nos tempos médios. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004) .....	64
Figura 4.8 – Aplicando o primeiro passo do método da corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004) .....	65
Figura 4.9 – Eliminação das restrições de recursos e identificação da corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004).....	65
Figura 4.10 – Inserção dos pulmões de proteção na corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004) .....	65
Figura 4.11 – Gráfico de controle dos Pulmões. Fonte: Campanini(2008).....	69
Figura 4.12 – Exemplo de multiprojetos. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004)..	72
Figura 4.13 – Programação do recurso gargalo. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004) .....	72

Figura 4.14 –Pulmões de capacidade. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004).....	73
Figura 4.15 –Projetos sequenciados pelo Pulmão de capacidade. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004) .....	73
Figura 5.1 – Etapas do processo de Simulação. Fonte: Freitas (2001).....	79
Figura 6.1 - Fluxograma processo de fundição. Fonte: Elaboração própria, baseado nas etapas fabris da fundição objeto de estudo .....	83
Figura 6.2 – Esquema do <i>Layout</i> da fundição estudada mostrando as divisões de células. Fonte: Elaboração própria .....	84
Figura 6.3 - Fluxograma processo de fundição detalhado. Fonte: Elaboração própria, baseado nas etapas fabris da fundição objeto de estudo .....	86
Figura 6.4 – Fluxograma do processo para elaboração da carga fabril (plano de capacidade). Fonte: Elaboração própria .....	91
Figura 6.5 – Plano de Capacidade da fundição estudada.Fonte: Elaboração própria.....	93
Figura 6.6 – Fluxograma da Proposta do processo para elaboração do plano da capacidade. Fonte: Elaboração própria .....	96
Figura 6.7 – Fundição modelada no software Simio. Fonte: Elaboração própria .....	99
Figura 6.8 – Calendário de trabalho da fundição exibindo feriados e dias de folga. Fonte: Elaboração própria.....	100
Figura 6.9 – Rede de atividades da peça Mesa móvel utilizando os <i>lead times</i> calculados no modelo do estado atual. Fonte: Elaboração própria. ....	104
Figura 6.10 – Fluxograma processo de fundição com as alterações para aplicar o método da corrente crítica. Fonte: Elaboração própria .....	108
Figura 6.11 – Rede de atividade dos modelos tradicional e corrente crítica para a peça Pá Francis. Fonte: Elaboração própria.....	109
Figura 6.12 – Rede de atividades para a peça Pá Francis apresentando o Pulmão de Projeto. Fonte: Elaboração própria .....	110
Figura 6.13 – Gráfico de pulmão de tempo . Fonte: Leach <i>apud</i> Campanini (2008).....	110
Figura 6.14 – Consumo do pulmão de projeto para a peça SuporteCaminhão_id:511. Fonte: Elaboração própria.....	111
Figura 6.15 – Relação peças expedidas e peças demandadas. Fonte: Elaboração própria.115	
Figura 6.16 – WIP médio considerando os cenários simulados. Fonte: Elaboração própria. ....	116
Figura 6.17 – Comparação da utilização média dos Centros de Trabalho. Fonte: Elaboração própria.....	120
Figura 6.18 – Comparação da utilização média das caixas de moldação. Fonte: Elaboração própria.....	121
Figura 6.19 – Comparação da utilização média dos Modelos para moldação. Fonte: Elaboração própria.....	122

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da estratégia MTS e MTO. Fonte: Pires (2004, p.43).....	19
Tabela 2.2 – Sistema de Classificação Multidimensional. Fonte: MacCarthy e Fernandes (2000, p.486) .....	20
Tabela 6.1 – Relação peso e <i>Lead time</i> por tipo de peça na fundição estudada. Fonte: Elaboração própria.....	84
Tabela 6.2 – Família de produtos identificando o Mix e os ferramentais. Fonte: Elaboração própria.....	101
Tabela 6.3 – Roteiro de Fabricação das 24 famílias. Fonte: Elaboração própria. ....	103
Tabela 6.4 – Comparação dos resultados simulados com os dados históricos. Fonte: Elaboração própria.....	104
Tabela 6.5 – Exemplo de peças com a redução do lead time e definição do pulmão de projeto. Fonte: Elaboração própria. ....	109
Tabela 6.6 – Peças expedidas no prazo e Atraso médio de fornecimento. Fonte: Elaboração própria.....	116
Tabela 6.7 – WIP para todas as famílias de peças. Fonte: Elaboração própria. ....	117
Tabela 6.8 – Avaliação do Lead time médio e peças expedidas para os cenários simulados. Fonte: Elaboração própria. ....	118
Tabela 6.9 – Avaliação horas extras utilizadas. Fonte: Elaboração própria. ....	119
Tabela 6.10 – Avaliação do tempo médio na fila do Tratamento Térmico. Fonte: Elaboração própria.....	120

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

Considerando os dados mais recentes, o Brasil encontra-se em posição de destaque no setor de base, sendo o 7º maior produtor mundial de fundidos metálicos, com 3,4% de participação no mercado (ABIFA, 2012). Comparando-se o Brasil com os maiores produtores de fundidos, como China, EUA e Rússia, o país tem registrado números importantes. Contudo, entre os indicadores analisados está o índice de produtividade, medido em homens-hora por tonelada de peças por ano (hh/t/ano), em que o país ocupa posição desfavorável frente aos maiores produtores, 40hh/t/ano contra 12hh/t/ano (MME, 2007).

O país conta com aproximadamente 1.400 empresas no setor, sendo que, em torno de 90%, de acordo com o site da ABIFA, são de pequeno e médio porte. São consideradas fundições de pequeno e médio porte aquelas que possuem até 250 funcionários e faturamento anual de até R\$ 20 milhões (FERNANDES E LEITE, 2002). Dessa forma, os 10% restantes são fundições de grande porte, ou seja, que possuem mais de 250 funcionários e com um faturamento anual maior que R\$ 20 milhões.

A fundição utilizada como base para esse estudo é considerada de grande porte e está entre as maiores da América Latina em termos de produção de peças grandes fundidas de aço (até 35 toneladas), com um faturamento anual acima de R\$150 milhões. Essa fundição gera em torno de 600 empregos diretos e milhares indiretos (na cadeia de suprimentos, atingindo fornecedores de serviços e insumos), fabricando uma enorme diversidade de peças que atende a diversos segmentos de mercado<sup>1</sup>.

O que por um lado pode representar uma grande participação na economia, por outro lado a diversidade de produtos, característica dos bens sob encomenda, e de produção do tipo *job-shop*<sup>2</sup> dificulta o processo de planejamento e controle da produção, e no caso específico, o planejamento da capacidade. Os autores Freeland (1984), Fernandes e Godinho Filho (2010) citam que o planejamento da capacidade nem sempre é tratado da maneira ideal, sendo que, os gerentes de produção acabam focando em pedidos de curto prazo, pois são

---

<sup>1</sup> Segmento de mercado: área de atuação em vendas da empresa

<sup>2</sup> *Job Shop*: sistema de produção onde o conjunto de tarefas requeridas para fabricar cada peça (roteiro de fabricação) apresenta diferenças quanto à ordem (sequência) nas máquinas. Neste sistema existem equipamentos diversos realizando uma grande variedade de operações e sua produção usualmente é customizada.

conhecidos e com pouca margem de erro e fazem uso de aproximações quantitativas, as quais não representam a situação real de trabalho.

Neste sentido, buscou-se explorar a revisão bibliográfica de técnicas e sistemas tradicionais que lidam com o planejamento da capacidade e também apresentar o uso da corrente crítica como alternativa para o problema.

### 1.1.1 Características Gerais de uma Fundição

A indústria de fundição é um segmento da economia que se caracteriza pela produção de bens intermediários, fornecendo em sua maioria peças fundidas para diversos outros ramos industriais. A produção de fundidos atende segmentos de mercado como o automobilístico, de construção ferroviária e naval, siderurgia, mineração, fabricação de cimento, extração/ refino de petróleo e ainda açúcar e etanol.

O processo de produção da fundição, em sua essência, consiste na fusão de ferro, aço ou ligas de metais não-ferrosos como cobre, zinco, alumínio e magnésio, visando obter as propriedades que se deseja atribuir ao produto acabado. Na forma líquida, os metais e suas ligas são vazados no interior de moldes com formatos que reproduzem o objeto pretendido. Os moldes são confeccionados com areias especiais aglomeradas com resinas próprias para esse fim. As peças obtidas, geralmente, necessitam de tratamento térmico, usinagem, etc. Essas operações estão demonstradas na Figura 1.1.

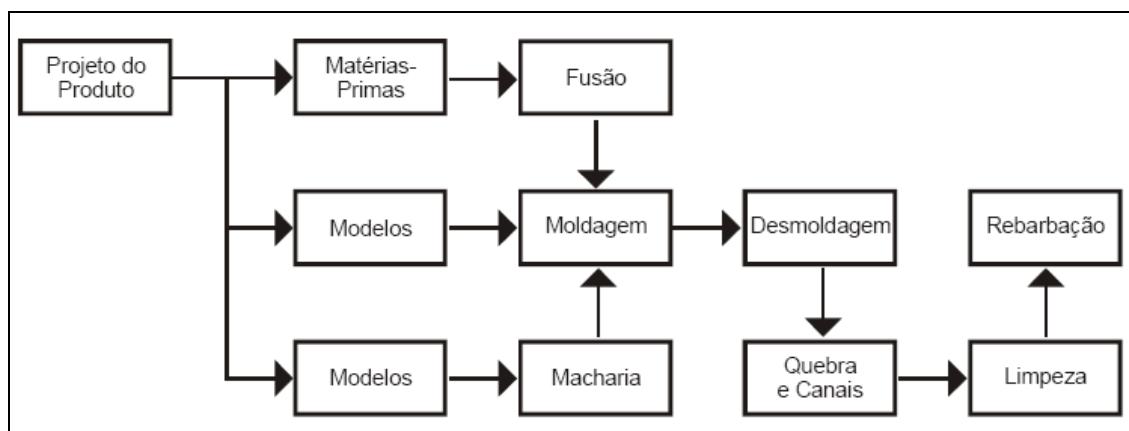


Figura 1.1 – Principais processos de uma fundição. Fonte: Landmann (2005).

Em sua tese, Landmann (2005) aponta alguns aspectos específicos dos processos de fundição, que os diferenciam de processos de outras indústrias:

- os materiais que são fundidos e vazados (despejados) num molde não são requisitados para uma ordem específica e, portanto, a ordem de compra não pode ser atribuída a um determinado cliente;
- quando um molde é vazado, a mão-de-obra e os encargos para a fusão, vazamento e desmoldagem, igualmente não podem ser atribuídos a uma ordem específica;
- o rendimento metalúrgico é fator determinante para a determinação da demanda de metal líquido, além de ser um elemento fundamental para o cálculo de custo;
- os tempos de resfriamento devem ser considerados no *lead-time* de produção;
- se houver tratamento térmico presente, podem ser requeridos procedimentos específicos para cálculo da carga-máquina e do custo, quando diferentes ordens são processadas simultaneamente.

As fundições podem ser classificadas de duas formas: fundições de mercado e fundições cativas. São consideradas fundições de mercado aquelas que se dedicam a vendas para terceiros, e nas fundições cativas a produção se destina basicamente para consumo próprio, trabalham para estoque e têm rotinas de programação diferenciadas (LANDMAN, 2005).

A fundição estudada é considerada de mercado e cativa, por atender a ambas as classificações expostas acima. Os detalhes de sua produção são descritos com maiores detalhes no capítulo 6.

## **1.2 Objetivo Principal do Trabalho**

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar a aplicação do método da corrente crítica em uma fundição de grande porte por meio da simulação. Com os resultados da simulação será possível avaliar os benefícios do uso da corrente crítica neste ambiente, e consequentemente na precisão dos dados de entrada para o planejamento da capacidade.

Neste trabalho busca-se a melhoria de uma prioridade competitiva definida por Pires (1995), sendo ela o desempenho na entrega<sup>3</sup>, que se refere à confiança do cliente em relação ao prazo acordado e é fundamental para o desempenho das atividades de planejamento e controle da produção.

A hipótese é que com o uso de um método alternativo, como a corrente crítica, os índices de desempenho da fundição como pontualidade de entrega, utilização dos recursos, redução de trabalho em processo, dentre outros, possam ser melhorados.

### **1.3 Importância do Trabalho**

Na literatura nacional pesquisada foi possível observar que existem muitos estudos na área de fundidos de pequeno porte, que adotam a produção repetitiva. Além disso, dentre os tipos de fundição vistos grande parte é do tipo cativa. No entanto, esse trabalho abordará uma fundição de grande porte com produção sob encomenda, sendo cativa e de mercado.

Logo, é importante caracterizar esse sistema de produção - de uma fundição de grande porte - e a maneira como o planejamento da capacidade é realizado, tomando como base os estudos mais conhecidos na área de Engenharia de Produção, contribuindo assim para a literatura acadêmica.

Com o intuito de aprimorar a forma como é desenvolvido o planejamento da capacidade no ambiente desta fundição, será apresentada uma alternativa para o uso da corrente crítica, utilizando a simulação. A corrente crítica foi escolhida para embasar o trabalho devido aos seus métodos de controle e foco em recursos críticos, garantindo que a gestão da capacidade seja feita de maneira mais eficaz. Dessa forma, cria uma oportunidade para aplicação real, após o estudo via simulação. O uso da simulação torna-se importante para proporcionar a análise das alternativas e testar a hipótese do trabalho.

---

<sup>3</sup> Pires (1995) descreve mais três prioridades, Custo, Qualidade e Flexibilidade. Custo é a habilidade de oferecer baixos preços, sendo baseada principalmente nos conceitos de economia de escala, curva de experiência e produtividade. Qualidade garante a durabilidade, a conformidade com o projeto, a confiança de que o produto funcione bem, entre outros; Flexibilidade: habilidade de responder de forma efetiva às mudanças no mix , no volume de produção, e a situações repentinas e inesperadas, tendo como característica a mão-de-obra multifuncional.

Para isso, é necessário apresentar as áreas de conhecimento que serão norteadoras para a proposta dessa dissertação. Na Figura 1.2 identificam-se quatro áreas distintas, sendo elas: planejamento da capacidade, corrente crítica, simulação e fundição sob encomenda, as quais serão definidas e aprofundadas na revisão bibliográfica.

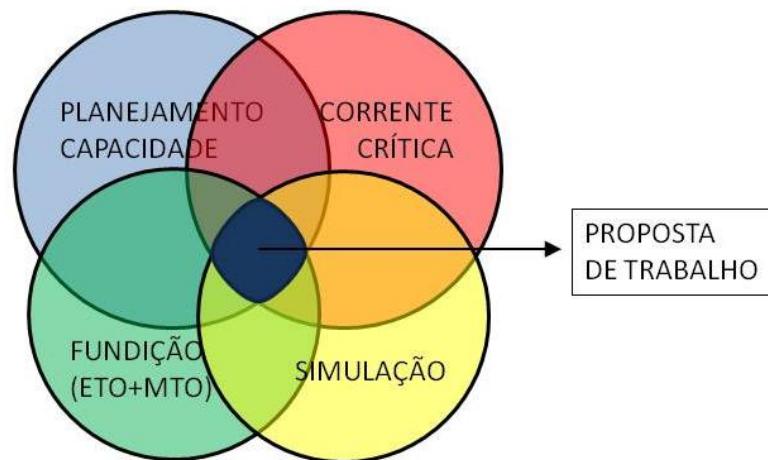


Figura 1.2 – Áreas de conhecimento envolvidas. Fonte: Elaboração própria.

#### 1.4 Problema de Pesquisa

Atualmente, na fundição objeto deste estudo, o planejamento da capacidade é feito mensalmente por meio de planilhas eletrônicas contando com dados históricos, previsões de demanda advindas da área de Marketing e Vendas aliado ao conhecimento do gerente de produção.

O gerente recebe informações de horas orçadas, matéria prima estimada e ferramental necessário da área de orçamentos e as horas dos pedidos já vendidos (pedidos em carteira<sup>4</sup>) distribuídas ao longo dos meses, da área de Planejamento e Controle da Produção (PCP). Neste sentido, o gerente de produção tem a responsabilidade de filtrar e conciliar todas as informações recebidas das áreas de vendas, orçamentos e produção, de forma a reproduzi-

---

<sup>4</sup> Segundo Ritzman (2004), pedidos em carteira é o acúmulo de pedidos dos clientes, prometidos para uma data no futuro. Este tipo de pedido ocorre geralmente em empresas que trabalham sob encomenda. Estes tipos de pedidos reduzem o nível de incerteza das necessidades de produção.

las no plano de produção anual, resultando em planilhas que contém dados relacionados à carga fabril<sup>5</sup>.

A decisão gerencial originada da análise das planilhas deveria garantir que a avaliação de novas vendas, bem como, as alterações de prioridades fossem feitas de maneira precisa e coerente com o atual cenário fabril. Todavia, isto não ocorre de maneira efetiva, gerando atrasos de entrega e perda de clientes, contratações/ demissões desnecessárias, horas extras excessivas, entre outros, ocasionando altos custos que comprometem a competitividade da empresa. Logo, a análise eficaz do planejamento da capacidade fabril constitui o problema de pesquisa o qual será trabalhado através de um modelo de simulação utilizando a abordagem da corrente crítica.

## **1.5    Método de Pesquisa**

Segundo Demo (2000) a metodologia científica não pode apenas discutir conhecimento, precisa saber fazê-lo. Desta forma, pode ser definida como um conjunto de abordagens, técnicas e processos para formular e resolver problemas de aquisição do conhecimento, de uma maneira sistemática. Para isso faz-se uso de métodos como uma forma de avaliar alternativas para a ação científica.

### **1.5.1    Concepções Metodológicas**

Para Chalmers (1995) e Martins (2010) existem quatro tipos de métodos científicos: indutivo, dedutivo, falsificacionismo (hipotético-dedutivo) e programa de pesquisa de Lakatos.

---

<sup>5</sup> A carga fabril é um gráfico que relaciona, em termos de horas de fábrica, a carteira de pedidos firmes, a capacidade produtiva atual e a capacidade produtiva projetada no futuro em função das novas vendas. Estas horas são agrupadas por segmentos de venda como açúcar e etanol, equipamentos pesados, equipamento de geração de energia, etc. A carteira de pedidos firmes, em conjunto com a previsão de novas vendas é relacionada com a capacidade atual e futura. A capacidade atual é a disponibilidade de horas-homens, horas-máquinas e a eficiência dos mesmos, sendo esta medida mensalmente através do cálculo da Eficiência.

Eficiência = (horas orçadas)÷(horas realizadas). RITZMAN (2004)

No Indutivismo, almeja-se a busca pelo conhecimento do todo, buscando em observações exaustivas a derivação de teorias para através disso “deduzir” explicações e previsões. Esta é a concepção tradicional, onde muitas leis e teorias foram criadas, e tem como ponto forte, e também como alvo de muitas críticas, o tamanho das amostras e sua variedade.

No Falsificacionismo, é possível com apenas uma afirmação singular disponível, ou como definido: um teste crucial, refutar a teoria. Com isso, toma-se o conhecimento como caráter provisório e dinâmico, onde qualquer falha implica na proposição de uma nova teoria mais explicativa. Sendo assim, o intuito é propor teorias que resistam à refutação e permaneçam irrefutáveis, até que um teste crucial possa provar o contrário.

A concepção metodológica criada por Thomas Kuhn são os Paradigmas de Pesquisa. Este busca formular e resolver problemas usando uma mesma teoria, mais especificamente métodos e instrumentos consagrados, estabelecendo desta forma um paradigma. As atividades são direcionadas para reforçar a teoria e não para refutar, garantindo que os Paradigmas de Pesquisa não percam a credibilidade facilmente. Este processo permanece até que uma crise ocorra, gerando um ciclo de aperfeiçoamento e progresso dentro da comunidade científica.

De acordo com Lakatos, o falsificacionismo e o indutivismo não eram suficientes para tratar a complexidade das teorias, sendo correto tratá-las como estruturas complexas que formam programas de pesquisa. Lakatos garantiu que, se a pesquisa científica fosse estruturada a partir de programas de pesquisa, seria fornecida a orientação necessária para a pesquisa futura, composta por um núcleo irredutível (heurística negativa) protegido de falsificação por hipóteses, com suposições básicas ao programa. Esta proteção é feita através de um cinturão protetor de hipóteses auxiliares. Existe também a heurística positiva, orientando as modificações que ocorrem no cinturão protetor. O desenvolvimento do programa se dá com adição e articulação de hipóteses, onde a falsificação só será importante quando o núcleo irredutível e o cinturão protetor estiverem bem definidos. Assim, a coerência estabelecida inicialmente não se perde, preservando o núcleo irredutível (MARTINS, 2010).

Pode-se dizer que, dentro destes conceitos, o objetivo deste trabalho não é criar um novo paradigma, nem questionar os já existentes. A idéia é utilizar as bases já bem estruturadas da teoria e levantar hipóteses que possam vir a suplementar os conceitos já criados na comunidade científica, de forma a expandir o cinturão protetor e dar abertura para que novas pesquisas do mesmo âmbito venham a ser realizadas. Com isso identifica-se,

coerentemente, que no ambiente estudado a concepção metodológica deve ser baseada nos Programas de Pesquisa de Lakatos, onde após a aplicação do modelo proposto haverá a possibilidade de se incluir a hipótese no cinturão protetor.

### **1.5.2 Abordagem da Pesquisa**

Uma pesquisa científica pode ser classificada de três maneiras quanto à abordagem: quantitativa, qualitativa ou ainda uma combinação de ambas.

O foco da pesquisa qualitativa incide sobre os processos do objeto de estudo, onde são utilizadas técnicas para transcrever e traduzir o entendimento das variáveis. Esta abordagem é apropriada para a geração de teoria quando os estudos são mais exploratórios. Sua ênfase é voltada principalmente na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado, visando entender o ambiente em que ele está inserido do mesmo modo como analisa suas ideias e opiniões (BRYMAN, 1989; MARTINS, 2010).

Em contra partida, de acordo com Martins (2010), a abordagem quantitativa tem como objetivo tratar as estruturas e elementos do objeto de estudo. Para isso, preocupa-se em mensurar variáveis e defini-las antes da observação ou experimentação de forma a operacionalizar o processo de realização da pesquisa. Bem como, garantir que tudo que venha a ser apresentado seja feito por meio do relacionamento de causa e efeito entre as variáveis dependentes (efeito) e as variáveis independentes (causa). Especificamente tratando da pesquisa abordada, têm-se como variáveis dependentes: custo, estoque em processo, faturamento, entre outras; e como variáveis independentes: número de funcionários, quantidade de máquinas, tamanho da fábrica, entre outras. No caso específico do método de pesquisa de modelagem e simulação, utilizado para conduzir a abordagem quantitativa, o pesquisador manipula as variáveis e os seus níveis, através da abstração da realidade.

Uma das indicações do uso da abordagem quantitativa é quando ocorre o emprego de linguagem matemática, com fórmulas e símbolos para representar a pesquisa de maneira objetiva e rigorosa. Outro fator comum a esta abordagem é a generalização, que possibilita a extração para outras pesquisas, fazendo uso de comparações de vários modelos testados (uso do indutivismo) ou através de uma ocorrência singular que assegure que o modelo valha para outras situações (uso do falsificacionismo). Nesta abordagem de

pesquisa as fases iniciais são as mais demoradas, pois ocorre o delineamento da pesquisa. Na fase final da pesquisa, trata-se da análise estatística que é relativamente mais fácil.

Como haverá o uso de ferramentas de simulação buscando resultados mais objetivos ao problema de pesquisa, contrapondo o uso de entrevistas ou questionários que resultam em dados mais subjetivos, a proposta dessa dissertação é fazer uso da pesquisa quantitativa.

Os métodos mais comuns utilizados para guiar a pesquisa qualitativa são a pesquisa-ação e o estudo de caso. Já na pesquisa quantitativa, os métodos mais apropriados são o *survey*, o experimento, o quase-experimento e a modelagem/ simulação, que serão vistos a seguir, bem como, os métodos mais apropriados para a pesquisa qualitativa, citados anteriormente.

### **1.5.3 Métodos de Procedimento para Pesquisa**

Serão apresentados nessa etapa, os principais métodos de procedimento de pesquisa: *Survey* (ou pesquisa de avaliação); Estudo de Caso; Pesquisa-Ação; e Modelagem/ Simulação.

Em uma pesquisa do tipo *Survey* é necessário que o pesquisador trabalhe com amostras significativas e conta com um forte apelo estatístico, de modo a analisar todos os dados coletados. Uma característica do *Survey* é que não manipula os níveis das variáveis de pesquisa. Este método deve ser bem planejado com questionário e/ou entrevistas bem estruturadas (métodos de coleta de dados mais utilizados em pesquisas de avaliação), contando com boa qualidade na redação das perguntas e garantindo que a interpretação não gere dúvidas aos respondentes. Este planejamento inicial permite que o retorno da pesquisa seja satisfatório (HO, 2010).

Segundo Miguel (2010), no Estudo de Caso existe um caráter empírico, onde o contexto aplica-se na vida real, possibilitando um alto nível de entendimento sobre o fenômeno, permitindo a geração de teoria. Este método é indicado quando se quer explorar novas áreas de pesquisa, quando há necessidade de construção de teoria e também quando se quer testar uma teoria ou deseja-se refiná-la. Os instrumentos de coleta de dados mais utilizados são: entrevistas estruturadas, interações com respondentes, observações e protocolos de pesquisa.

Outro método qualitativo que trabalha de forma empírica é a Pesquisa-Ação. Esse método visa solucionar um problema através do apoio dos indivíduos participantes da situação-problema e também com o auxílio dos pesquisadores, de maneira cooperativa ou participativa. Geralmente é realizada em uma empresa ou instituição, podendo ser usada para relatar o desdobramento de ações em dado grupo, melhorar o trabalho em alguns aspectos do sistema ou para entender o impacto de determinadas mudanças. Tem como objetivo, contribuir para a solução do problema (objetivo técnico) bem como incrementar conhecimento específico à comunidade científica (objetivo científico). Além de soluções ao problema evidenciado, busca-se o aprendizado relacionado a esta prática, contribuindo para a teoria (COUGHLAN e COUGHLAN, 2002).

Já o método de pesquisa quantitativo de Modelagem e de Simulação, segundo Morabito e Pureza (2010), busca abstrair a realidade por meio de um modelo elaborado pela aplicação de técnicas analíticas de matemática e de simulação. Estes modelos são construídos para se compreender o ambiente estudado, identificar problemas, além de colaborar na tomada de decisões (apoando e sistematizando). Neste método, é imprescindível que o modelo seja detalhado suficiente para representar o sistema real, mas ao mesmo tempo é fundamental que seja simples suficiente para o tratamento analítico. É indicada para projetar, planejar e operar sistemas de maneira eficiente, considerando as restrições relacionadas ao sistema. Uma desvantagem deste método é que não avalia o fator humano no processo operacional.

A simulação pode ser física ou matemática, sendo que esta última pode ser realizada de duas formas: analítica ou numérica (determinística ou estocástica). No método de simulação determinístico é necessário fixar os valores dos parâmetros, já o método estocástico conta com algum tipo de função de distribuição como entrada para as variáveis.

Logo, tendo em vista o exposto acima, o método de pesquisa escolhido para este trabalho foi baseado em Modelagem e Simulação, mais especificamente o método numérico estocástico, pelo fato de que as entradas das peças no modelo simulado ocorrerem de maneira aleatória. As características do problema de planejamento da capacidade permitem que um modelo objetivo seja trabalhado e as técnicas de simulação podem prover ferramentas de análise para comparar as técnicas tradicionais, com as técnicas propostas a serem aplicadas, no caso específico a corrente crítica. Como a definição do método sugere, busca-se abstrair um modelo que se adapte aos objetivos de pesquisa, utilizando para este fim, situações idealizadas que foram encontradas na literatura.

## 1.6 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho é constituída por 7 capítulos. A introdução, a contextualização do problema de pesquisa, a importância do trabalho e o método de pesquisa abordado são apresentados no **capítulo 1**, bem como as características do objeto de estudo.

Em seguida, no **capítulo 2**, é apresentada a revisão bibliográfica relacionada ao Planejamento e Controle da Produção e Sistemas de Produção. No **capítulo 3** o planejamento da capacidade é abordado, admitindo sua ligação direta ao planejamento da produção, considerando a hierarquia das decisões ao longo dos horizontes de tempo, bem como apresentando algumas técnicas usadas tipicamente no planejamento da capacidade.

No **capítulo 4**, é realizada a revisão bibliográfica da corrente crítica, abordando o OPT, a Teoria das restrições, além de informações relacionadas à coordenação de projetos com PERT/CPM (*Program Evaluation and Review Technique / Critical Path Method*) para dar base ao método da corrente crítica. Os conceitos de Simulação são focados no **capítulo 5**, onde se apresentam as principais etapas para elaboração de um modelo de simulação.

O **capítulo 6** destina-se a apresentar a contribuição deste trabalho, onde será descrito o estado atual do objeto de estudo no tocante ao planejamento da capacidade e as etapas do processo de produção deste ambiente, sendo estas informações utilizadas como dados de entrada para o modelo simulado. Ainda neste capítulo, é apresentada a aplicação da Corrente Crítica na fundição como ferramenta de apoio a decisão gerencial. Finaliza-se este tópico com as etapas da simulação e os resultados obtidos para os cenários simulados.

Todas as conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros são descritas no **capítulo 7**.

## 2 PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

Sabendo-se que toda operação produtiva necessita de planos e controles, bem como, classificações para se compreender o meio em que está inserido, este capítulo contextualizará a base para os temas seguintes, onde as classificações dos sistemas de produção serão apresentadas, citando as visões de diferentes autores. Os conceitos de planejamento e controle da produção serão aprofundados, principalmente tomando como linha de raciocínio os horizontes de tempo. Esta linha também será adotada para o capítulo subsequente de planejamento da capacidade.

### 2.1 Classificações do Sistema de Produção

Segundo Sipper e Bulfin (2007) um sistema de produção é definido como algo no qual é dada entrada e após transformações obtém-se algo novo com valor agregado. Os sistemas de produção são divididos em duas partes: manufatura (tangíveis) e serviços (intangíveis).

Para MacCarthy e Fernandes (2000), um sistema de produção pode ser definido como um conjunto de elementos inter-relacionados que projetam uma forma de geração de produtos acabados com valor comercial excedendo o custo de geração.

Complementando a visão dada acima, Groover (2001) cita que um sistema de produção trata-se de um conjunto de pessoas, equipamentos e técnicas para alcançar os objetivos da manufatura e divide o mesmo em dois grupos:

1. Instalações dos sistemas de produção: é constituído pela fábrica, pelos equipamentos e a maneira como estes estão dispostos;
2. Sistemas de Suporte a Manufatura: são os procedimentos usados pela empresa para se gerenciar a produção.

A partir da definição de sistemas da produção, o próximo passo é classificá-los. Alguns autores compartilham idéias semelhantes com relação à necessidade em se classificar um sistema produtivo, mas MacCarthy e Fernandes (2000) vão além, dizendo que a classificação é a base do conhecimento científico, citando ainda que atualmente não há uma classificação apropriada dos sistemas de produção reais e que as classificações existentes

tendem a ter pouco valor para a análise complexa dos sistemas de produção reais. Para resolver este problema, os autores propõem uma classificação para melhor entender os sistemas de produção que é a classificação multidimensional.

Groover (2001) e Slack (2002) tem opiniões idênticas acerca do cerne da classificação de um sistema de produção. Ambos utilizam a relação de **variedade** de produtos *versus volume* de produção.

Groover (2001) divide a **variedade** de produtos da seguinte maneira:

- variedade grande: produtos diferem substancialmente em seus formatos, tamanho ou processo;
- variedade leve: quando existe pouca diferença entre essas características para os produtos.

Ainda de acordo com este autor, pode-se dividir o **volume** de produção em baixa produção, média produção e alta produção:

- baixa produção: caracteriza-se pelas fábricas do tipo *Job-shop*, onde existem equipamentos diversos realizando uma grande variedade de operações e sua produção é extremamente customizada. É projetado para ter o máximo de flexibilidade para poder lidar com a diversidade de produtos e o tipo de *Layout* é de posição fixa ou de processo.
- média produção: pode ser de dois tipos: bateladas e manufatura celular. A produção é em bateladas quando a variedade de produtos é grande e onde os pedidos costumam ser repetidos. Tem como grande desvantagem o tempo perdido em *setup* de máquinas e tem como arranjo dentro da fábrica o *Layout* de processo. Quando não há tanta variedade, aborda-se o uso da manufatura celular que consiste na fabricação de produtos que podem utilizar o mesmo equipamento sem grande perda de tempo em *setup*. Esse *Layout* é chamado de *Layout* celular.
- alta produção: caracterizada pela produção em massa, onde os produtos não possuem grande variedade e trabalham em altos níveis de produção. É diferenciada por dois tipos: a) produção em quantidade, que fabrica simples partes e trabalha com máquinas padrão, tendo como *Layout* típico o *Layout* de processo; b) produção em linha, onde a estação de trabalho é disposta em sequência para que todas as peças movam-se ao longo da linha para completar o produto e tem com objetivo a maximização da eficiência, utilizando o *Layout* de

produto. Podem-se summarizar os tipos de produção e *Layouts* conforme Figura 2.1, que mostra a relação existente entre a variedade dos produtos e o volume produzido.

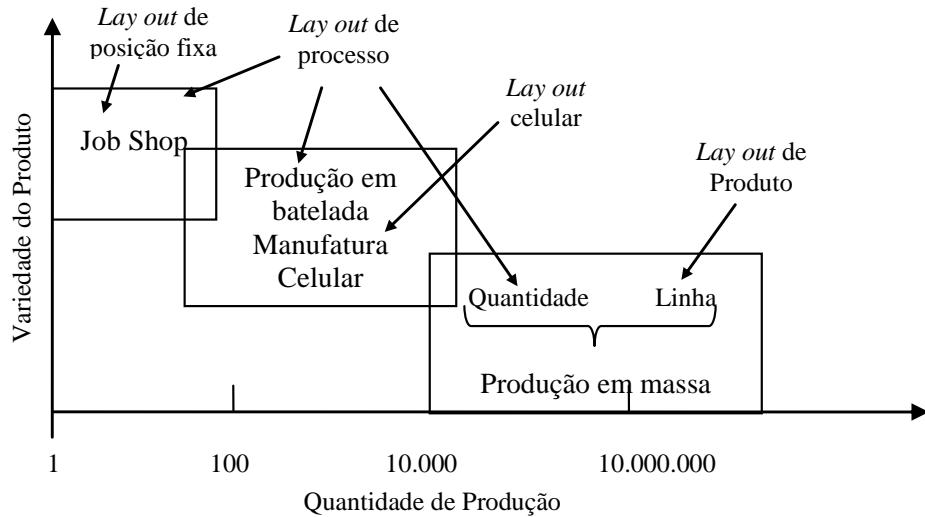


Figura 2.1 – Tipos de instalação e *Layout* utilizados para diferentes níveis de produção e variedade de produto. Fonte: Groover (2001).

Para Slack (2002), embora as operações de transformação sejam semelhantes entre si na forma de transformar os recursos de entrada em produto de saída, estas apresentam quatro diferenças em aspectos importantes, que são: volume dos produtos, variedade dos produtos, variação da demanda e o nível de visibilidade.

Segundo Slack (2002), na dimensão volume, o que se considera é o grau de repetição das tarefas sendo seguido pelo nível de especialização, com funcionários desempenhando atividades cada vez mais padronizadas no sentido em que se aumenta o volume. Considerando a dimensão variedade, pode-se constatar a relação direta com a flexibilidade, variando de produtos padrões a customizados. Já a dimensão variação aborda a capacidade que um sistema produtivo tem em poder mudar a sua capacidade de acordo com a necessidade da demanda. Na dimensão visibilidade é refletido o grau de exposição da operação ao cliente. A Figura 2.2 ilustra as implicações do posicionamento (posição “baixa” e posição “alta”) das dimensões apresentadas por Slack.

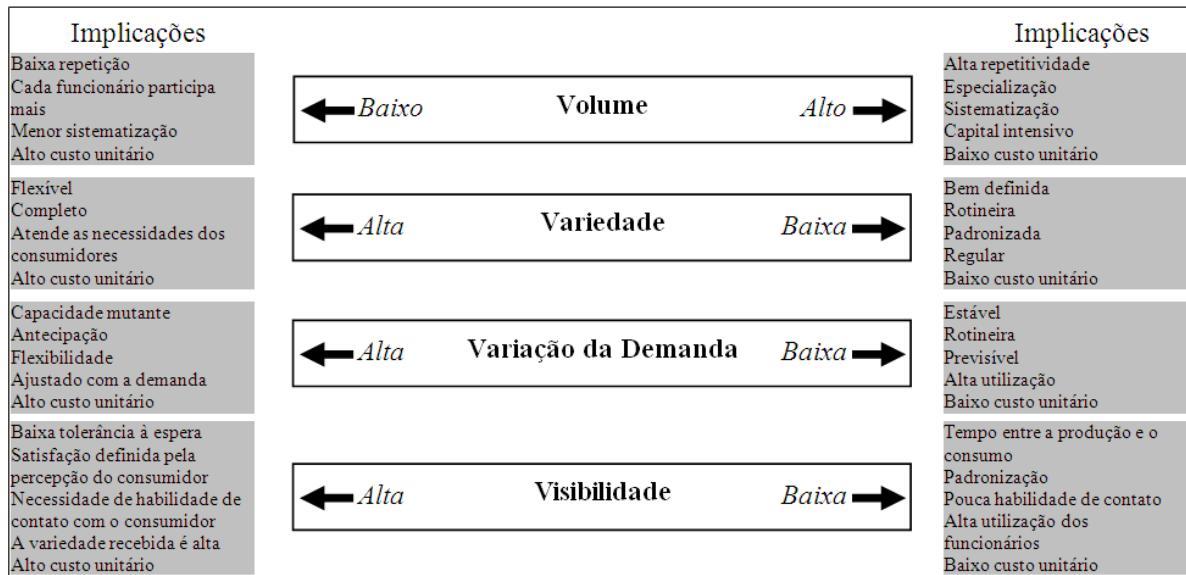


Figura 2.2 – Tipologia de operações. Fonte: Slack (2002).

Ainda considerando as dimensões de volume e variedade, Slack (2002) garante que esta relação determina a abordagem geral para gerenciar processos, e segundo ele, pode-se diferenciar em cinco tipos (em ordem de volume crescente e variedade decrescente):

- Processos de projeto: lidam com produtos muito customizados, período de tempo para fabricação do produto ligeiramente longa. Exemplos: construção de navios, fabricação de turbo geradores, montagem e fabricação de pontes rolantes.
- Processos de *jobbing*: semelhante aos processos de projetos, no entanto os produtos compartilham os recursos de operação com diversos outros produtos. Exemplos: ferramentarias especializadas, gráficas, fábrica de móveis, etc.
- Processos em lotes: parece-se com o processo de *jobbing*, no entanto com menor grau de variedade, onde cada vez em que é produzido um produto, produz-se mais de um produto semelhante. Exemplos: indústria de embalagens e alimentícias.
- Processos de produção em massa: caracteriza-se pelo nível de repetitividade e volume de peças alto. Exemplos: as fábricas de automóveis, aparelhos de TV, etc.
- Processos contínuos: volume intenso, e variedade mínima, com períodos muito longos de produção e muitas vezes ininterrupto. Exemplos: refinarias de petróleo, instalações de eletricidade, etc.

Para cada tipo de processo citado acima, Slack (2002) e Nahmias (2001) propõem tipos básicos de arranjo físico (*Layout*), possibilitando mais detalhes para a classificação do sistema de produção:

- Arranjo físico posicional ou de posição fixa: os recursos se movem ao longo do produto, caracterizado pelos processos de projeto. Normalmente os produtos são grandes demais para serem movidos;
- Arranjo físico por processo: a decisão do arranjo limita-se às necessidades e conveniência dos recursos de transformação. São efetivos para grandes variações do *mix* de produtos, reduzem o tempo ocioso de máquinas, etc. Este arranjo é caracterizado pelos processos de *jobbing*;
- Arranjo físico celular: neste arranjo físico os recursos transformados entram na operação de fabricação já previamente selecionados, movimentam-se até uma parte específica da operação (célula) onde todos os recursos necessários para processamento estão disponíveis. A produção em lotes utiliza este tipo arranjo;
- Arranjo físico por produto: a localização de todos os recursos de transformação atende de maneira conveniente o produto que está sendo transformado, e têm as sequências de atividades de acordo como os processos foram arranjados fisicamente. Processos contínuos e produção em massa utilizam-se deste arranjo.

Segundo Slack, existe a possibilidade em se utilizar mais de um tipo de arranjo físico dentro do mesmo sistema produtivo.

Complementando as informações acerca da classificação do sistema de produção, alguns autores como Slack (2002) e Groover (2001) abordam o nível de automação da empresa.

Slack (2002) considera novamente a relação variedade e volume para distinguir os diversos tipos de automação, com máquinas de controle numérico isoladas em um extremo (baixo volume e alta variedade), sistemas flexíveis de manufatura (médio volume e média variedade) e sistemas dedicados (baixa variedade e alto volume).

Para Groover (2001) a automação de sistemas de produção ocorre fisicamente no produto, como na montagem, no processo de fabricação ou na movimentação do material. São indicados para reduzir a participação humana no processo manual, seja pela dificuldade em se operar ou mesmo para aumentar a eficiência do processo. As características principais são o alto investimento inicial, altas taxas de produção, etc. Pode ser classificada em três tipos básicos:

1. Automação fixa: a sequência de operações é fixada pela configuração do equipamento. Tem como característica as produções em alta escala;
2. Automação programável: os equipamentos da produção são projetados com a capacidade de se mudar as sequências de operação. Utilizada em sistemas de produção de médio e baixo volume;
3. Automação flexível: é uma extensão da automação programável e é capaz de produzir uma grande variedade de itens sem a perda para trocas de um tipo de peça para a próxima. A diferença entre as partes trabalhadas é mínima, o que possibilita o uso desta automação.

Outra abordagem para classificação do sistema de produção esta relacionada à resposta a demanda de acordo com os tempos de resposta e as formas de interação com o cliente. Slack (2002), Marçola (2000), Pires (1995) e Pires (2004) apresentam as seguintes estratégias para atendimento a demanda:

- a) *Make-to-Stock (MTS)*: Produção para estoque. Os produtos são padronizados e a interação com o cliente é rara. Vantagem: rapidez na entrega. Desvantagem: custo de estoque. Ciclos de vida longos e previsíveis. O problema de planejamento foca na reposição do estoque, determinando o tamanho do lote e a data de início de fabricação. Produz-se antes do pedido, logo o *lead time* será de entrega;
- b) *Assembly-to-order (ATO)*: Montagem sob encomenda. Os subconjuntos, componentes e matéria-prima são manufaturados, armazenados e são montados de acordo com a ordem do cliente. A interação com o cliente é limitada, com entregas de curto a médio prazo. Desenvolvida como técnica para simplificar projetos e obter economia de escala em pesquisa e desenvolvimento, produção, além de reduzir os estoques de segurança. O tempo de resposta é relacionado apenas ao tempo de montagem das peças (previamente produzidas segundo a estratégia *make-to-stock*) e tempo de entrega. Possui variações como Construção sob encomenda (*Buid-to-order*) e Configuração sob encomenda (*Configure-to-order*);
- c) *Make-to-order (MTO)*: Produção sob encomenda. Projeto básico desenvolvido a partir dos primeiros contatos com o cliente, mas a produção só é iniciada com o recebimento formal do pedido. A interação com cliente é grande, com o produto sujeito a alterações mesmo durante a fabricação. O tempo de entrega é de médio a longo prazo. A demanda é incerta e nenhum produto acabado é estocado. O planejamento da produção deve determinar os tamanhos dos lotes, o setup e a sequência de produção para atender as entregas. *Lead time* e preço são definidos de acordo com a prioridade e necessidade do cliente, sendo

avaliados na concorrência o que melhor atender a estes quesitos. A ordem dos principais processos de negócios nesse sistema produtivo costuma ser prever demanda dos componentes para estoque, em seguida vender para depois planejar a produção final, realizar a produção final e entregar os produtos.;

d) *Engineering-to-order (ETO)*: Engenharia sob encomenda. Esta estratégia relaciona-se ao nível mais customizado de produção, onde o produto só será entregue ao cliente quando todo o projeto, toda a compra de materiais, e toda fabricação e montagem estiverem concluídos. É uma extensão do MTO, com o projeto do produto feito quase totalmente baseado nas especificações do cliente e só é realizado quando ocorrer a venda. Altamente customizados onde o nível de interação com o cliente é intenso. Caracterizada por *Lead times* longos e incertos. Como a engenharia do produto consome muito tempo, devido as incertezas e mudanças ao longo do projeto, considerando que o cliente deverá aprová-lo, este tipo de estratégia está sujeita a grandes atrasos quando não for bem gerenciada.

Para Pires (2004), a estratégia ATO é considerada um meio termo entre as estratégias MTS e MTO, buscando adequar os pontos positivos e reduzir os pontos negativos de cada uma destas estratégias. Além disso, admite que a estratégia ETO seja uma extensão do sistema MTO, com a etapa de projeto do produto também sendo feita sob encomenda, ou seja, baseada nas especificações do cliente. Abaixo na Tabela 2.1 podem ser notadas as principais vantagens dos dois extremos, MTS e MTO:

<b>Forma</b>	<b>Perspectiva</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>MTS</b>	<b>Produtor</b>	Maior potencial para padronizar e racionalizar os programas de produção e os processos produtivos no geral. Maior potencial de redução de custos e de ciclos produtivos.	Incerteza da demanda, especialmente em termos de mix e volume. Custo dos estoques de matéria-prima e de produtos acabados. Custo do capital de giro.
	<b>Cliente</b>	Pronta Entrega Preço geralmente menor Produto padronizado (standard)	Necessidade de se adequar ao produto padronizado.
<b>MTO</b>	<b>Produtor</b>	Certeza na demanda (produzindo sob pedidos). Maior racionalização do capital de giro via pagamentos antecipados do produto.	Dificuldade para padronizar e racionalizar os programas e a produção no geral. Maior custo dos estoques em processo de produção. Dificuldade na redução de custos e de ciclos produtivos.
	<b>Cliente</b>	Produto feito de forma customizada (personalizada).	Longos tempos de espera Preços geralmente maiores

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens da estratégia MTS e MTO. Fonte: Pires (2004, p.43)

Geralmente nos ambientes do tipo ETO, há uma fase de engenharia simplificada onde é feito o orçamento para o cliente, a fase de engenharia detalhada onde se gera a estrutura do produto e roteiros de fabricação, a fase de planejamento de compras e produção e a fabricação, havendo um grande grau de superposição entre tarefas. As quatro estratégias comentadas podem ser verificadas na Figura 2.3:

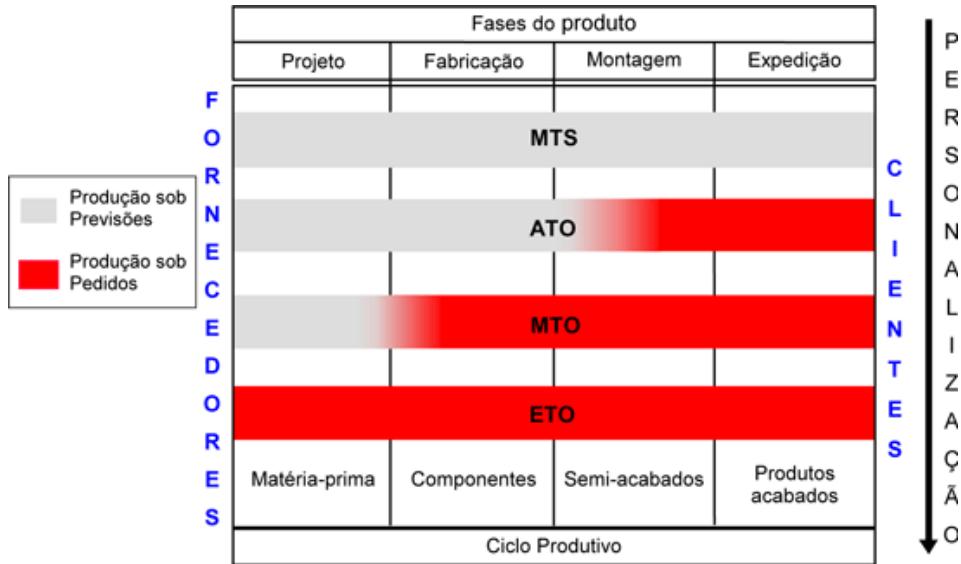


Figura 2.3 – Estratégias de atendimento a demanda e as formas de interação com os clientes. Fonte: Adaptado de Pires (2004)

As quatro estratégias básicas de atendimento a demanda definem ou direcionam grande parte das atividades que compõem o processo de Planejamento da Produção.

Um conceito bastante sofisticado acerca da classificação de sistemas de produção é a abordagem de MacCarthy e Fernandes (2000) onde estabelecem uma classificação do sistema de produção no nível multidimensional, sendo oito dimensões conforme mostra Tabela 2.2.

Grupos Principais	Dimensões	Variáveis
Caracterização Geral	a) Tamanho do Negócio	
	b) Tempo de Resposta	
	c) Nível de Repetitividade	
	d) Nível de Automação	
Caracterização do Produto	e) Descrição do Produto	Estrutura do Produto
		Nível de Customização
		Número de Produtos
Caracterização do Processo	f) Descrição do Processamento	Tipos de <i>Buffer</i>
		Tipos de <i>Layout</i>
		Tipo de Fluxo
Caracterização da Montagem	g) Tipos de Montagem	
	h) Tipos de Organização do Trabalho	

Tabela 2.2 – Sistema de Classificação Multidimensional. Fonte: MacCarthy e Fernandes (2000, p.486)

Segundo os autores, esta visão proporciona um melhor entendimento para estudos de caso, e também indica o problema da complexidade dos sistemas de produção. Além disso, após o estudo envolvido para classificar os sistemas de produção, MacCarthy e Fernandes propõem possibilidades de escolha e projeto de sistemas de planejamento e controle da produção, seguindo basicamente o nível de repetitividade dos sistemas de produção.

Para MacCarthy e Fernandes (2000), esta classificação não busca ser incontestável, e comentam que na prática toda classificação é um *trade-off*<sup>6</sup> entre o nível de detalhes necessários para ser útil e o nível de agregação desejável para que ocorra a prática.

Além das classificações apresentadas, Burbidge (1990) classifica os sistemas de produção em quatro tipos básicos, de acordo com a variedade de materiais que entram (matérias-primas, componentes, etc.) e da maneira como saem os produtos:

Processo: converte uma pequena quantidade de materiais numa pequena quantidade de produtos, geralmente utilizando poucos processos em um sequência comum;

Implosivo: o que transforma uma pequena quantidade de materiais em um grande número de produtos diferentes;

Quadrado: o que transforma um grande número de materiais em um grande número de produtos e;

Explosivo: transforma um grande número de materiais em um pequeno número de produtos.

A fundição estudada possui as características de produção de *job-shop*, com alta variedade de produtos adotando o *layout* de processo, sendo um sistema do tipo Implosivo. Este ambiente adota as estratégias de atendimento a demanda MTO e ETO, com alto nível de customização na fabricação. Estas informações serão vistas com maiores detalhes no capítulo 6 desta dissertação.

---

<sup>6</sup> *Trade-off* : é uma expressão que define uma situação em que há conflito de escolha, também chamada de relação de “perde-e-ganha”. Isso implica que uma decisão seja feita com completa compreensão tanto do lado bom, quanto do lado ruim de uma escolha em particular.

## 2.2 Modelos de Planejamento e Controle da Produção (PCP)

Segundo Slack (2002), o planejamento e controle da produção visa gerenciar as atividades da operação produtiva satisfazendo de maneira contínua a necessidade dos consumidores. Cita também que o planejamento e controle da produção trata-se de uma conciliação entre suprimento e demanda.

Para Corrêa *et al.* (2009), planejar é entender a situação presente em conjunto com a visão do futuro para poder influenciar as decisões tomadas no presente alcançando as metas no futuro.

As principais decisões tomadas pelo PCP são: o que, quanto, quando e como produzir e comprar. Abaixo, seguem algumas das atividades gerenciais essenciais que são suportadas pelo PCP:

1. Planejar as necessidades de capacidade futura, de forma a atender ao mercado;
2. Planejar a aquisição de compra de materiais, nos momentos e quantidades corretas;
3. Planejar os níveis apropriados de estoque;
4. Programar as atividades de produção, possibilitando que o trabalho seja realizado nas tarefas prioritárias, evitando desperdício;
5. Conhecer a situação corrente da fábrica em termos de pessoas, recursos, etc., para comunicar-se corretamente com fornecedores e clientes;
6. Reagir eficazmente às mudanças inesperadas;
7. Prometer prazos com precisão e garantir o cumprimento dos mesmos;
8. Prover informações a outras funções, contribuindo para sua integração.

Planejar a produção conduz a um processo de desagregação ao longo dos horizontes de tempo, começando de maneira abrangente no longo prazo, passando a um nível mais tático no médio prazo e chegando ao nível de programação da produção, sendo este considerado de curto prazo (CORRÊA *et al.*, 2009).

De acordo com Corrêa, o horizonte de planejamento indica o tamanho do tempo futuro sobre o qual se tenha interesse em desenvolver uma visão. Cada etapa do planejamento e controle da produção ocorre de acordo com o horizonte trabalhado: longo,

médio e curto prazo, distinguindo-se entre si pelo nível de agregação das informações, e a antecedência das decisões e ações a serem tomadas.

Tomando como referência o horizonte de planejamento, Tubino (2006) define planejamento de longo, médio e curto prazo.

No **planejamento de longo prazo** as atividades são relacionadas ao **Planejamento Estratégico** da produção, onde é feito o **Plano de Produção** que estabelece informações mais agregadas relacionada aos produtos, buscando atender as necessidades dos clientes e satisfazer os critérios estratégicos da produção. Este plano apresentará as previsões de novas vendas e as necessidades de recursos. Neste nível de planejamento há pouco detalhe de informações e os produtos são reunidos em famílias.

No **médio prazo**, Tubino (2006) apresenta o **planejamento-mestre da produção (PMP)**, mostrando um plano mais detalhado do que o feito no Plano de Produção. Para isso utiliza a carteira de produtos finais e a previsão de demanda de médio prazo. Nesta fase do planejamento, serão identificados os gargalos da produção que possam inviabilizar o plano no curto prazo. Para Sipper e Bulfin (1997), o planejamento executado no médio prazo também é chamado de **Planejamento Tático**.

No **curto prazo**, ocorre a **programação da produção**, na qual são realizados os controles de estoque e são feitas as perguntas do tipo quando/quanto produzir e comprar. Nesta fase emitem-se ordens de compra para itens comprados e ordens de fabricação para os produtos que serão fabricados internamente. Se as fases anteriores de planejamento (longo e médio prazo) tiverem sido eficazes, a programação da produção não terá problemas para atender a demanda. Sipper e Bulfin (1997) definem a programação da produção como sendo o **Planejamento Operacional**.

De acordo com Tubino (2006) o PCP é afetado diretamente pela classificação dos sistemas produtivos. No caso dos sistemas padronizados, o PCP produz baseado na previsão de demanda e equilibra esta com os estoques disponíveis, proporcionando um controle da produção mais simples. Já tomando como base os sistemas de produção que trabalham sob encomenda, o PCP espera a manifestação do cliente para poder então agir, e qualquer alteração na demanda implicará no replanejamento dos recursos produtivos.

Segue, resumidamente, as principais funções do PCP e sua relação com outros departamentos, conforme Figura 2.4:

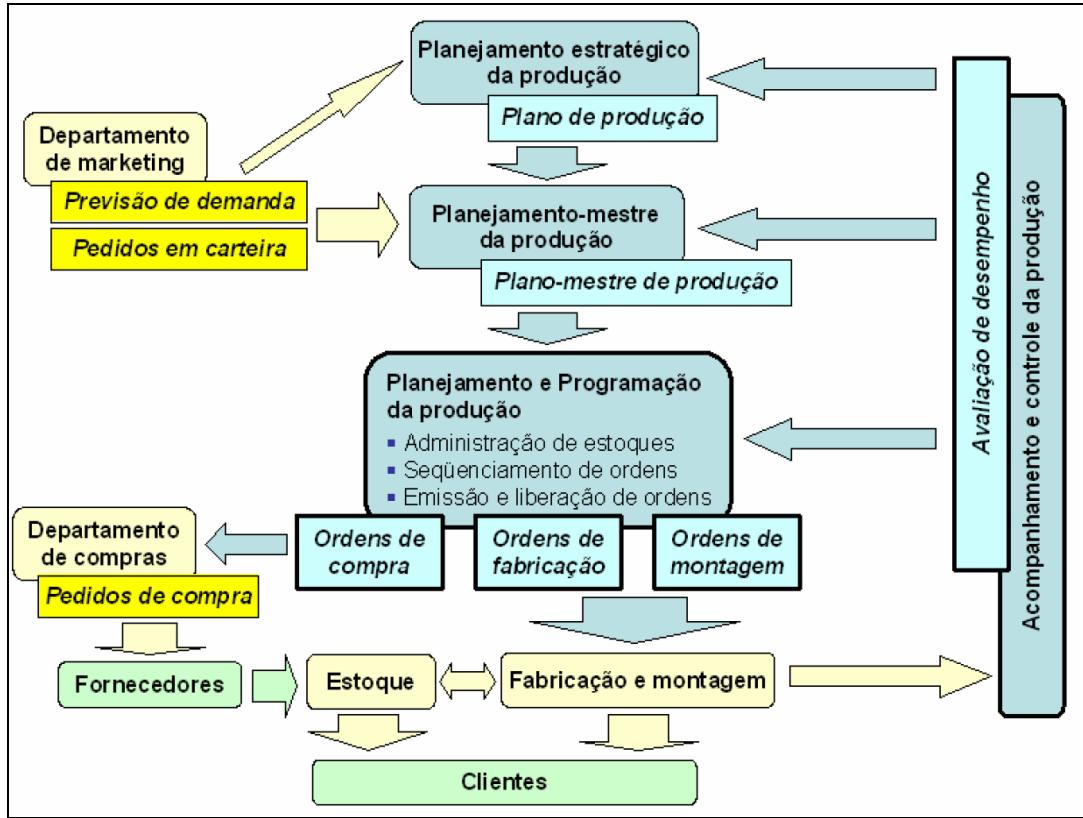


Figura 2.4 - Visão geral das atividades do PCP. Fonte: Tubino (2006)

Segundo Corrêa *et al.* (2009), os erros de previsão crescem quanto mais longo for o horizonte de planejamento, e decisões que requerem maior volume de recursos devem ser tomadas com maior antecedência. As decisões de prazo mais longo limitam as decisões de prazo mais curto, e estão sujeitas a incertezas e consequentemente a um maior custo relacionado aos erros.

Para ilustrar esta situação, a Figura 2.5 mostra as hierarquias de planejamento relacionadas aos níveis de agregação.

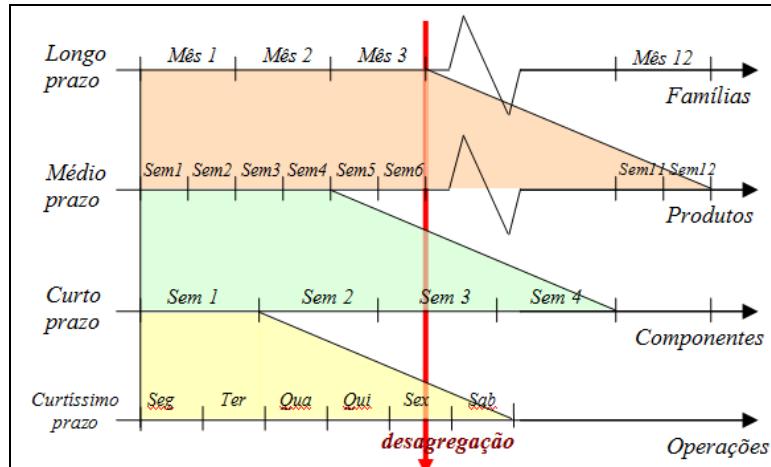


Figura 2.5 – Conceito de hierarquia de decisões de planejamento. Fonte: Corrêa *et al.* (2009)

Semelhantemente, Slack (2002) mostra na Figura 2.6 que os aspectos de planejamento e controle variam em termos de importância conforme um determinado evento se aproxima, ou seja, evidencia as principais diferenças de acordo com o horizonte planejado.

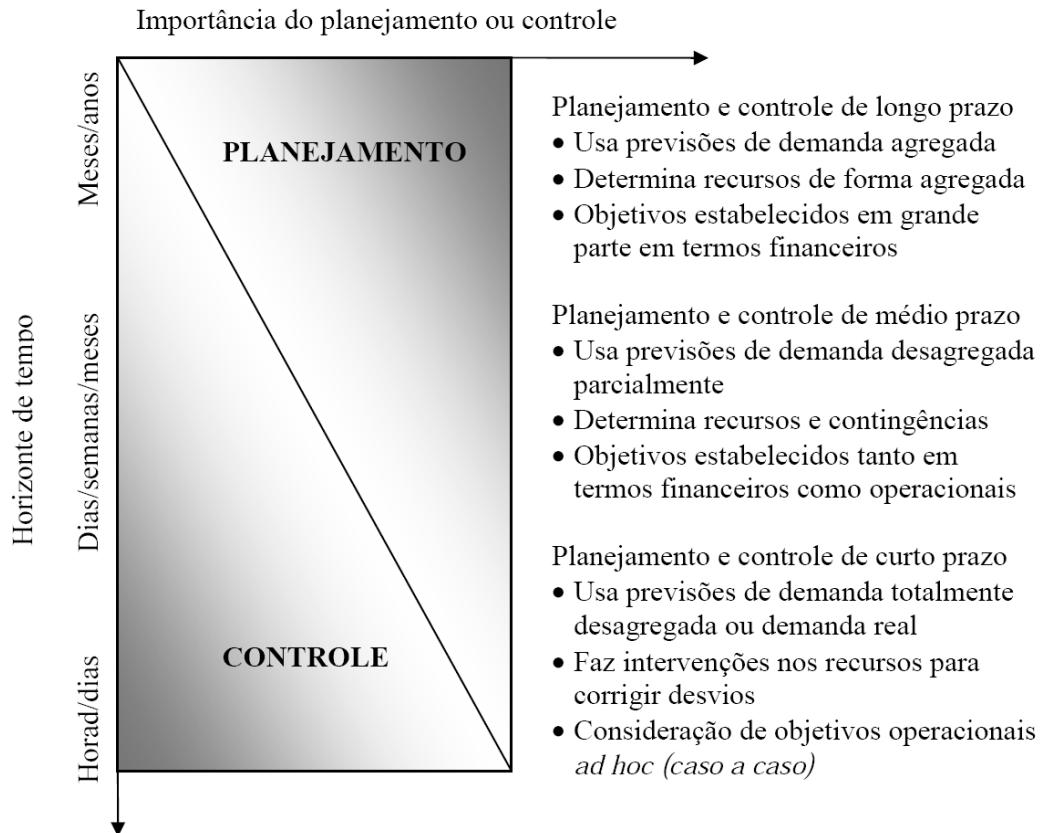


Figura 2.6 - O equilíbrio entre planejamento e controle de produção ao longo do tempo. Fonte: Slack *et al.* (2002, p. 316).

Conforme pode ser visto, no planejamento e controle de longo prazo a importância do **planejamento** é maior e é medida em meses ou até mesmo anos. No outro extremo, o planejamento e controle de curto prazo foca no **controle** da produção e utiliza como medida horas e dias e toma ações quanto aos desvios apresentados na previsão da demanda ou na elaboração dos planos de produção.

Segundo Marçola (2000), considerando os três níveis de planejamento, existe bastante confusão entre as atividades e os nomes destes níveis de decisão. Mesmo assim, os objetivos e ferramentas utilizadas em cada horizonte são diferentes entre si. Deste modo propõe as seguintes nomenclaturas para cada nível:

- Administração estratégica: responsável pela estratégia corporativa e de negócios, foca o longo prazo;

- Planejamento da produção: cuida do planejamento agregado de capacidade e de produção, além de ser responsável pelo Planejamento Mestre da Produção, lidando com informações mais desagregadas. Neste nível, foca o médio prazo;

- Controle da produção: responsável pelo planejamento das necessidades de materiais e de capacidade, que se concentra no curto prazo.

Na seção seguinte é abordado com maior nível de detalhes o planejamento e controle da produção no longo/ médio prazo, delimitando o horizonte estudado e proporcionando coesão com o tema do trabalho. Para isso, será adotada a nomenclatura utilizada por diversos autores como Fernandes e Godinho Filho (2010), Chase (2006), e Marçola (2000), que utilizam o termo planejamento agregado da produção para definir este processo.

### **2.2.1 Planejamento Agregado da Produção**

Segundo Chase (2006), o planejamento agregado se refere ao processo que permite manter a oferta e a procura equilibradas, e tem como objetivo *minimizar* o custo dos recursos necessários para cumprir a demanda em determinado período. Neste processo o Marketing desenvolve o plano de vendas e a Produção desenvolve o plano da produção como resultado do processo.

O principal propósito do planejamento agregado é especificar a melhor combinação da taxa de produção (número de unidades completadas por unidade de tempo), do nível de mão-de-obra (número de operários necessários para a produção) e do estoque disponível (estoque não usado que foi transferido do período anterior).

No planejamento agregado, os itens individuais são agregados em famílias, pois a alta direção não vê praticidade em analisar produto por produto e sim de maneira mais agregada neste horizonte de planejamento. Quanto menor o número de famílias melhor, pois facilita o planejamento e a previsão de demanda é mais precisa. No entanto, é importante garantir o nível de significância destas famílias, evitando-se agregá-las demais a ponto de se perder informações importantes para a decisão (CORRÊA *et al.*, 2009; FERNANDES E GODINHO FILHO, 2010).

Autores como Vollmann *et al.* (2006) e Corrêa *et al.* (2009) substituem o termo planejamento agregado pelo Planejamento de Vendas e Operações (*Sales and operations planning - S&OP*). O S&OP lida com o processo de planejamento e controle da produção realizado de forma estruturada para atender aos requisitos de integração de diversas áreas funcionais nos horizontes de longo e médio prazo. Nas palavras de Corrêa “ele é o elemento que faz a ligação entre a manufatura e alta administração” (2009, p.168), bem como faz ligação entre a manufatura e as demais funções da empresa. Pode ser considerado como um “tradutor” da estratégia organizacional para a estratégia operacional, de mais fácil compreensão para os níveis de decisão mais baixos.

Resumidamente, o processo S&OP é realizado todos os meses, onde as equipes envolvidas trabalham para preparar todos os dados de produção, estoques, vendas e carteira de pedidos para uma reunião executiva. Uma equipe inicia as atualizações das previsões de demanda, agrupando dados das famílias de produtos, identificam dificuldades relacionadas a capacidades e a aquisição de matéria-prima e elaboram sugestões de solução. Identificam também alternativas para os problemas existentes que serão apresentados na reunião executiva. As reuniões devem ser curtas e objetivas, pois há a premissa de que o trabalho foi realizado com antecedência. Após a aprovação dos executivos, o plano é divulgado para toda empresa de forma que o processo ocorra conforme estipulado no plano de ação. (WALLACE, 2008).

Como o foco deste trabalho está voltado principalmente ao planejamento da capacidade, os detalhes referentes às fases do processo, políticas, integração de decisões e pré-requisitos do S&OP não serão detalhados, atendo-se neste capítulo aos métodos e estratégias para obtenção do plano de produção agregado.

Segundo Chase (2006), o planejamento agregado varia de empresa para empresa, podendo ser mais formal com objetivos e premissas, bem como, pode ser feito através de cálculos simples, refletindo a estratégia geral do pessoal. Pode ser derivado do plano corporativo anual, que especifica quantas unidades de cada linha de produto (família) será fabricada para atender a previsão das vendas.

O ponto chave é descobrir quais produtos a demanda é relativamente previsível e quais são relativamente imprevisíveis. Com este intuito, Chase (2006) emprega estratégias de planejamento da produção para controlar os fatores internos de forma a atender a demanda:

- **Estratégia de acompanhamento da demanda:** contrata e dispensa funcionários de acordo com a taxa de pedidos, produzindo exatamente à quantidade demandada. Vantagem: evitam-se problemas de sobrecapacidade se as previsões forem otimistas e evita-se a formação de estoques de produtos finais. Desvantagens: custos de ociosidade ou baixa utilização da capacidade e o impacto motivacional. Segundo Ritzman (2004), há ainda o risco de perder mão de obra qualificada, bem como há a necessidade de treinamento de funcionários novos e atender às limitações impostas pelo sindicato.

- **Estratégia de Mão-de-obra estável e horas de trabalho variáveis:** através de horários de trabalho flexíveis, deslocando funcionários para trabalhos de manutenção, treinamento durante os períodos de demanda baixa, e no caso da demanda aumentar, fazer uso de horas extras.

- **Estratégia de capacidade constante:** as faltas e excesso são absorvidos pelos níveis de estoque flutuantes, por pedidos em atraso e vendas perdidas. Vantagem: satisfação dos clientes tendo seus pedidos entregues no prazo e boa utilização da capacidade. Desvantagens: os produtos estocados podem se tornar obsoletos ou deteriorarem e altos níveis de estoque em períodos de demanda baixa.

A **terceirização** pode ser considerada uma quarta estratégia. É similar ao acompanhamento da demanda. O relacionamento com o fornecedor dos serviços deve ser forte de forma a manter a qualidade e o controle sobre a programação. A terceirização quando ocorre de maneira demasiada é considerada uma estratégia de alto risco, pois permite ao fornecedor do serviço/ produto aprimorar-se e transformar-se em concorrente. Neste caso, é importante se atentar a decisão de “o que” será terceirizado.

*Corrêa et al.* (2009) enfatiza que as decisões de como estabelecer os planos de produção são determinadas pela maneira que a demanda será atendida, utilizando da melhor maneira a capacidade e garantindo estoque baixo. Devido à variação constante da demanda, é preciso optar entre as duas políticas extremas: **acompanhar a demanda** ou **nivelar a produção** ao longo do horizonte de planejamento, conforme Figura 2.7. Na prática, a melhor opção está situada entre estas duas extremidades.

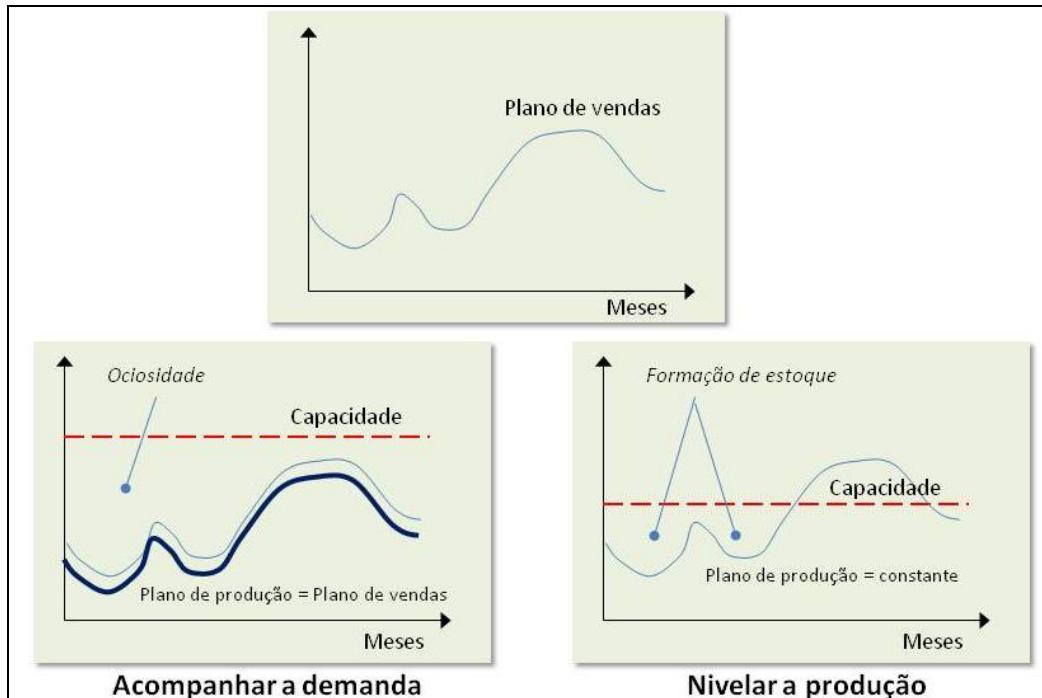


Figura 2.7 – Políticas opostas de produção. Fonte: Corrêa *et al.* (2009, p. 191).

O autor Ritzman (2004) indica o uso da estratégia de acompanhamento da demanda para atender as variações sazonais através do acúmulo de estoques. Pode também optar neste caso por uma estratégia de utilização da força de trabalho, onde é feito o uso de horas extras em caso de picos de demanda, e horas ociosas quando a capacidade excede a demanda. Neste sentido, sugere ainda a programação de férias como alternativa no caso de diminuição das vendas, colocando os funcionários em férias. No caso oposto, quando há aumento da demanda, os funcionários podem ser desencorajados a tirar férias.

Fernandes e Godinho Filho (2010) classificam as estratégias expostas acima como **métodos de planilha**, sendo consideradas mais simples e baseadas em tentativa e erro. Como apresentado por Corrêa *et al.* (2009), na prática os gerentes utilizam o que Fernandes e Godinho Filho (2010) chamam de **estratégias mistas**, que fazem uso dos pontos fortes de cada uma das estratégias vistas acima.

Estas soluções não são necessariamente ótimas, não buscando o melhor resultado, mas são rápidas e colaboram na tomada de decisão. Ao final do capítulo são citados alguns métodos avançados, que fazem uso de pesquisa operacional e buscam uma solução ótima.

Segundo os autores Chase (2006), Fernandes e Godinho Filho (2010) é necessário também analisar os custos produtivos para uma análise mais profunda do plano agregado da produção. Para estes autores, os custos mais relevantes são:

- Custos básicos de produção: envolvem custos fixos e variáveis, custos diretos e indiretos e também o custo de horas extras;
- Custos associados com mudanças na taxa de produção: envolve admissão, treinamento, exames médicos, demissão de pessoal e toda burocracia envolvida. No âmbito da demissão, há ainda perdas de produtividade e queda da moral dos funcionários;
- Custos de manutenção do estoque: custo do capital empenhado no estoque (armazenagem, seguro, impostos, etc.);
- Custo de subcontratação;
- Custos por atraso de pedidos: envolvem basicamente multas e o descontentamento do cliente, que pode levar a perda de pedidos futuros.

Fernandes e Godinho Filho (2010) citam alguns métodos para o planejamento agregado que geram soluções ótimas, mas são mais complexos do que o método de planilha citado anteriormente. O objetivo é apenas citar para conhecimento, não sendo o foco deste trabalho o detalhe destes métodos:

- Programação linear;
- Programação inteira mista;
- Regra de decisão linear;
- Abordagem dos coeficientes gerenciais.

O uso de programação linear depende da postura da gerência, que determina o quanto rigoroso será o uso dos modelos, utilizando métodos mais sofisticados ou mesmo planos alternativos de tentativa e erro. Segundo Chase (2006), espera-se que muitas empresas venham a utilizar de métodos de otimização como prática comum.

No entanto, de acordo com Landmann (2005), as soluções que fazem uso de otimização, apesar de serem viáveis na teoria, na realidade são de difícil aplicação nos ambientes produtivos como a fundição, devido às variações no *mix* de produtos e uma política de mercado instável, que gera grandes alterações na carga dos recursos. A partir destas premissas, o autor indica o uso de técnicas de otimização muito complexas e que não serão abordadas neste trabalho.

Logo abaixo será apresentado de forma sucinta um método ótimo para gerar planos agregados, chamado de método de transportes. O intuito é exemplificar a metodologia básica de Pesquisa Operacional para a solução de problemas de planejamento agregado.

De acordo com Ritzman (2004), este método é baseado na premissa de que a previsão da demanda é disponível para cada período, bem como, exista um plano do nível de força de trabalho para as horas normais. Também se deve estabelecer um limite para as horas extras e subcontratação. Chase (2006) chama o método de transportes de matriz de transportes, onde a demanda da produção é relacionada com a capacidade de produção por períodos. Nesta matriz indicam-se os meios pelos quais a produção é disponibilizada (horas normais, horas extras e estoque inicial). Um “X” na matriz indica o período em que a produção não pode atrasar. Os custos em cada célula são acrescidos do custo de manutenção por período.

O procedimento é iniciado com uma tabela, chamada de *tableau* mostrando os níveis de força de trabalho, o limite de capacidade, a previsão da demanda, o nível de estoque inicial e os custos para cada período do horizonte de planejamento. Cada linha do *tableau* representa uma alternativa: trabalhar em horas normais, trabalhar em horas extras ou subcontratar. As colunas mostram os períodos que o plano deve cobrir, bem como, apresentam a capacidade não utilizada e a capacidade disponível total.

A precisão deste método só é garantida através da informação correta de todos os parâmetros. O autor também lembra que trata-se de uma ferramenta de apoio a decisão gerencial. Quem decide as ações a serem tomadas é o gerente de produção.

É conveniente situar que a fundação objeto de estudo deste trabalho, faz uso das estratégias mistas de planejamento da produção, buscando atender a demanda e ao mesmo tempo nivelando a produção.

O presente capítulo serve de base para o capítulo seguinte sobre Planejamento da Capacidade, abordando a maneira hierárquica para tomada de decisões ao longo dos horizontes de tempo.

### **3 PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE**

Como foi relatado no capítulo anterior, o planejamento e controle da produção é realizado de maneira hierárquica, desagregando as informações do horizonte de longo prazo em direção ao horizonte de curto prazo.

Nesta etapa do trabalho, adota-se a mesma premissa para definir o planejamento da capacidade, considerando suas ligações com o planejamento da produção ao longo dos horizontes de planejamento.

A seguir são apresentados os conceitos de planejamento da capacidade, sua relação com o planejamento da produção e as áreas que recebem seu suporte. Também são consideradas as técnicas específicas para cada nível de planejamento e a maneira como os planos de capacidade são calculados. No final do capítulo serão apresentadas as decisões gerenciais mais utilizadas para administrar efetivamente a capacidade.

#### **3.1 Planejamento da Capacidade: Conceitos e Estrutura no PCP**

Pode-se definir a capacidade como sendo o número máximo de unidades/ horas de trabalho que uma instalação fabril pode produzir/ oferecer em um determinado período. Esta é uma das atividades mais importantes realizadas pelo PCP, pois interage com as decisões do planejamento agregado (FERNANDES E GODINHO FILHO, 2010).

De acordo com estes autores, o planejamento da capacidade visa mudar substancialmente a capacidade através de ações mais estruturadas e a análise da capacidade limita-se a calcular a carga de trabalho e comparar com a capacidade disponível fazendo incrementos ou diminuições de capacidade relativamente pequenos.

De acordo com Marçola (2000), o planejamento da capacidade lida com problemas de médio e longo prazo baseado nas expectativas da demanda, desenvolve e implementa estratégias para atender a demanda, gerenciando os recursos fabris e determinando a capacidade exigida pelo sistema. O autor ainda diferencia o controle da capacidade como sendo um problema de curto prazo, onde é implementado o plano de capacidade e os ajustes são realizados. No controle da capacidade são desenvolvidos recursos

para atender as variações da demanda no curto prazo e as entradas e saídas são monitoradas para garantir que os planos de produção sejam realizados.

Na concepção de Ritzman (2004), o planejamento da capacidade é necessário, dentre outras características, para dar suporte a diversas áreas como:

- Contabilidade: custos necessários para atender as decisões de ampliação da capacidade;
- Finanças: faz análise financeira dos investimentos para ampliação da capacidade;
- Recursos humanos: contrata e treina funcionários;
- Marketing: fornece as previsões de demanda para a verificação das faltas de capacidade;
- Operações: seleciona as estratégias de capacidade que atenderão a demanda;
- Compras: obtém capacidade subcontratada.

Conforme aborda Vollmann *et al.* (2006), o plano de capacidade deve ser desenvolvido simultaneamente com os planos de materiais. Segundo o autor, este procedimento hierárquico garante que o plano possível no longo prazo implique em um plano factível no curto prazo. É importante salientar que a decisão de alterar o plano de capacidade para atender o plano de materiais deve ser gerencial. O gerente deve decidir se atenderá o plano de capacidade e fará alterações no plano de materiais, ou vice-versa.

Na Figura 3.1 abaixo são relacionadas às decisões de planejamento da capacidade com os demais módulos de PCP, variando de maneira hierárquica: os planos com informações mais agregadas em períodos longos e chegando a informações mais detalhadas para uma máquina específica em períodos de curto alcance.

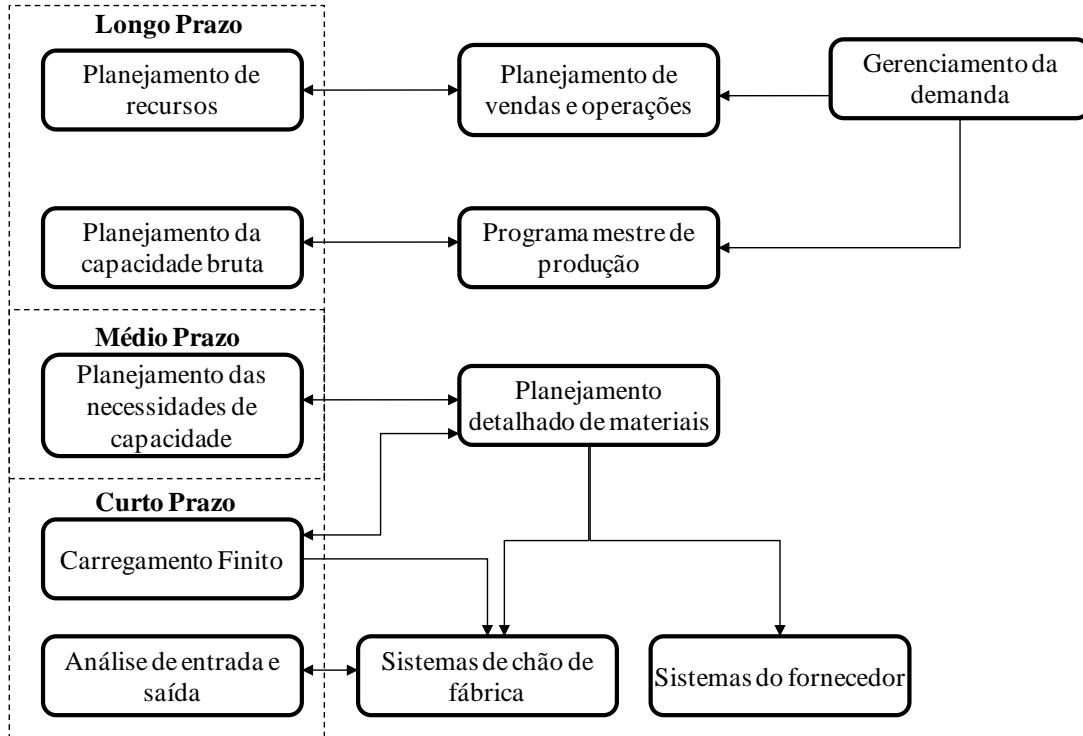


Figura 3.1 – O planejamento da capacidade no sistema de PCP. Fonte: Adaptado de Vollmann *et al.* (2006)

Como pode ser visto, em algumas ligações da Figura 3.1 há setas de duas pontas que representam a correspondência entre a capacidade requerida para executar um plano específico e a capacidade disponibilizada para executar o plano.

Os cinco níveis de planejamento da capacidade são descritos abaixo de acordo com Vollmann:

#### **Planejamento de Recursos:** ligado ao planejamento de vendas e operações.

Neste nível são tomadas decisões de longo prazo voltadas aos recursos agregados como horas-homem brutas, espaço e horas máquina. Neste nível, o plano de capacidade visa antecipar necessidades de recursos que levem muito tempo para obtenção e colabora para a tomada de decisões de quanto produzir de determinada família de produtos. Deve ser rápido e simples, tendo como horizonte de planejamento uma variação de meses a anos.

#### **Planejamento da Capacidade Bruta:** ligado diretamente ao PMP. Neste nível

de planejamento da capacidade, busca-se antecipar as necessidades de recursos que demandam poucos meses para sua utilização, gerar um plano de produtos acabados mais desagregado e subsidiar as decisões de quanto produzir de cada produto em situações de capacidade limitada. Pode ser estimado através de várias técnicas como o CPOF (*Capacity planning using overall planning factors*), as listas de capacidade e os perfis de recursos. Estas

técnicas garantem a execução do PMP e variam em exatidão, nível de agregação e facilidade de preparação.

**Planejamento das Necessidades de Capacidade (CRP – Capacity requirements planning):** é o planejamento de capacidade de médio alcance no nível do MRP, sendo bem mais detalhado do que os anteriores. Fornece informações para determinar as necessidades de capacidade para centros de trabalho e máquinas. Aplica-se a empresas que fazem uso de sistemas de programação baseada em ordens de produção.

**Carregamento Finito:** é utilizado no curto prazo. Difere das demais abordagens de Planejamento e Controle da Capacidade, pois as primeiras não consideram ajustes nos planos motivados pela utilização da capacidade planejada. O carregamento finito começa com uma capacidade específica e programa o trabalho somente na capacidade disponível do recurso. Programando apenas dentro das restrições de capacidade o trabalho flui rapidamente e as tarefas são programadas no momento exato.

**Análise de Entrada/Saída:** monitora o consumo real de capacidade durante a execução do planejamento detalhado de materiais. Indica atualizar os planos de acordo com o desempenho real da fábrica.

Na seção 3.2 é abordado com maiores detalhes cada uma das técnicas de planejamento da capacidade expostas acima.

### 3.2 Técnicas de Planejamento da Capacidade

De acordo com Vollmann *et al.* (2006), as técnicas de Planejamento da Capacidade para converter um plano de materiais em necessidades de capacidade também são hierárquicas: as restrições do planejamento de longo prazo colocam restrições nos planejamentos de médio e curto prazo. A seguir seguem diversas técnicas para efetuar o planejamento da capacidade, com diferenças principais relacionadas à quantidade de dados necessária para efetuarem os cálculos e o nível de agregação destas informações.

**CPOF:** planejamento da capacidade utilizando fatores globais. Faz parte do planejamento da capacidade bruta e é a técnica mais simples entre todas, sendo baseada em dados de contabilidade e feita manualmente. As entradas são os dados do PMP. O primeiro passo é calcular as necessidades de capacidade do programa para toda a planta. Em seguida,

utilizar as porcentagens históricas do total de horas de mão-de-obra para alocar a capacidade total requerida em cada período para os centros de trabalho individuais. As vantagens desta técnica são a facilidade do cálculo e a utilização de poucos dados. São válidas somente quando o *mix* de produtos ou as divisões históricas de trabalho entre os centros de trabalho continuem constantes. São revisados à medida que a empresa altera o PMP.

**Listas de Capacidade:** é mais uma técnica de planejamento da capacidade bruta onde é realizada uma ligação mais estreita entre os produtos individuais do PMP e a capacidade requerida para centros de trabalho individuais. Diferente do CPOF, esta técnica leva em conta as mudanças no *mix*. No entanto, necessita de dados de roteiro e horas de mão-de-obra direta ou dados de horas-máquina. Também pode ser construída a partir dos dados de engenharia. Para estimar as necessidades de capacidade nos centros de trabalho individuais é necessária a lista de capacidade de cada produto acabado com o PMP.

**Perfis de Recursos:** difere dos demais procedimentos de planejamento da capacidade bruta, pois considera o *lead time* das peças. Uma desvantagem é que em períodos muito longos, alguns dados são perdidos na agregação dos dados. Para aplicar o procedimento, deve-se adicionar o *lead time*, as listas de materiais, os roteiros e as informações de tempo padrão. Em todos os planos de capacidade a carga de trabalho total permanece igual, porém as mudanças ocorrem nas necessidades período a período.

**CRP** ou Planejamento das Necessidades de Capacidade: Esta técnica é de médio alcance e bastante precisa, calculando somente a capacidade necessária para completar o PMP. Difere dos Perfis de Recursos, pois utiliza os dados provenientes do MRP que considera a situação dos estoques e das ordens de fabricação em aberto e, devido aos detalhes dos dados, estabelece as quantidades e os momentos exatos dos pedidos para calcular a capacidade necessária. No entanto, os benefícios só ocorrem com uma base de dados mais abrangente, levando a um esforço computacional bem maior.

Vollmann *et al.* (2006) foca as técnicas de planejamento da capacidade bruta além dos demais horizontes de médio e curto prazo, não abordando com maiores detalhes a técnica para planejamento de recursos, ou **RP** como aborda Corrêa *et al.* (2009). Na verdade Corrêa utiliza o CPOF como sendo uma técnica do Planejamento de Recursos, diferentemente de Vollmann que aborda esta técnica como o Planejamento da capacidade bruta. Independente das duas versões, ambos descrevem esta técnica como sendo apropriada para o Planejamento da capacidade de longo prazo.

As quatro técnicas expostas acima se tratam da visão tradicional de PCP, que visa planejar primeiro os materiais e depois verificar o que isso implicará na capacidade destes planos. Vollmann *et al.* (2006) sugere outra técnica, apresentada abaixo, visando a programação de ambos simultaneamente, considerando as condições reais de capacidade:

**Programação finita da capacidade:** Planejamento de curto prazo, sendo menos válidas no longo prazo. Difere do CRP que só calcula as necessidades de capacidade não aplicando ajustes para a inexequibilidade, ou seja, a capacidade excedente ou faltante não é considerada no CRP. A programação finita determina quais tarefas serão completadas considerando sua capacidade limitada. Carrega todas as tarefas em todos os centros de trabalho ao longo do horizonte de planejamento e segue as abordagens de carregamento vertical e horizontal, bem como a programação para frente e para trás.

No carregamento vertical, planeja e utiliza a capacidade de um centro de trabalho considerando as prioridades dos trabalhos, verifica as tarefas que estão chegando ao centro de trabalho e quando serão completadas nos centros anteriores. A partir disso, opta em deixar o centro de trabalho ocioso para dar lugar a uma tarefa em particular no momento exato.

Para o carregamento horizontal a orientação foca nas ordens de trabalho inteiras, sendo que as tarefas de maior prioridade são programadas em todos os centros de trabalho. Geralmente entra em conflito com a utilização dos centros de trabalho (haverá mais espaços vazios na programação do que no carregamento vertical). No entanto, no carregamento horizontal, as ordens serão completadas antes do que no vertical. Vollmann *et al.* (2006, p.331) enfatiza ainda que “é muito melhor 50% de trabalhos completados do que 90% incompletos”.

Por se tratar de um modelo simulado, a programação finita pode gerar erros à medida que os dados são simulados no futuro, pois dependem dos resultados reais ocorridos no dia anterior. Uma solução para melhorar a programação finita é reprogramar com maior frequência.

Os principais fatores para o uso atual da programação finita, segundo Corrêa *et al.* (2009) devem-se as limitações dos sistemas MRP em gerir o chão de fábrica, a busca por competitividade por parte das empresas, ao recente desenvolvimento em técnicas de simulação que usam inteligência artificial e ao crescente desenvolvimento dos equipamentos, possibilitando tempos mais viáveis de resolução dos problemas.

Corrêa *et al.* (2009) aponta ainda que os sistemas de programação da produção com capacidade finita remetem a necessidade da empresa de gerenciar sua capacidade de forma detalhada

Para a fundição estudada, os cálculos para efetuar o planejamento da capacidade são semelhantes ao cálculo envolvido na técnica CRP e serão apresentados no capítulo 6.

A Corrente Crítica e Teoria das restrições, por serem tópicos fundamentais neste trabalho, serão abordados com mais detalhes no Capítulo 4.

### **3.3 Gerenciamento da Capacidade**

Para gerenciar a capacidade e sua utilização, muitos autores sugerem alternativas aplicadas em cada horizonte de planejamento. Segundo Vollmann *et al.* (2006), a questão chave é unir o planejamento com a execução, monitorando periodicamente e verificando se alguma ação corretiva é necessária. Para isso é fundamental definir claramente as medidas de capacidade.

Para Vollmann *et al.* (2006), o objetivo das medidas de capacidade é fornecer capacidade para atingir os planos de produção, sendo adequada aos recursos cruciais limitados. Deve ser possível converter os produtos em medidas de capacidades e os resultados devem ser entendidos e monitorados pelos responsáveis. As alternativas possíveis variam de horas-máquina ou horas-homem a unidades físicas ou monetárias. Ressaltando, que a definição das medidas depende das necessidades dos recursos restritivos e das decisões tomadas pela empresa.

De acordo com Ritzman (2004) a capacidade pode ser expressa de duas maneiras:

- Medidas de produção, sendo mais bem utilizadas quando a empresa fornece um número pequeno de produtos e serviços padronizados; (toneladas expedidas, carros vendidos, etc.);

- Medidas de insumo, mais usuais para processo flexíveis e de volume reduzido (horas/máquina; horas/homem; etc.).

Um problema relatado por Ritzman (2004) se deve a necessidade de conversão das medidas transmitidas pelo Marketing para a Manufatura, que invariavelmente são fornecidas como medidas de produção. O gerente de produção só conseguirá avaliar a capacidade de sua fábrica em uma base de dados equivalente.

Para planejar a capacidade, Ritzman (2004) lembra-se da necessidade em se conhecer a capacidade atual de um processo e sua utilização, esta última é expressa da seguinte forma:

$$\text{Utilização} = \frac{\text{índice de produção média}}{\text{capacidade máxima}} \times 100\%$$

O nível de utilização indica a necessidade de agregar capacidade extra ou eliminar capacidade ociosa. Ritzman apresenta ainda duas definições de capacidade máxima:

- Pico de capacidade: é a produção máxima que determinado processo ou instalação é capaz de atingir em condições ideais (horas extras, subcontratação, turnos extras, etc.). Estes extremos não devem ser mantidos durante muito tempo, por exemplo, no caso do uso de horas extras excessivas. Nestes casos os funcionários acabam não sendo tão produtivos, devido ao cansaço desta rotina desgastante.

- Capacidade efetiva: é a produção máxima que o processo ou instalação pode manter de maneira econômica sob condições normais.

Para escolher a medida de capacidade, deve-se identificar os recursos fundamentais, definir a unidade de medida que atenda uma variedade mais ampla de recursos e serviços e por último, deve-se estimar a capacidade disponível.

No gerenciamento da capacidade, Vollmann *et al.* (2006) faz o uso da abordagem de **controle de entrada/saída**, onde as entradas e saídas planejadas são comparadas com as entradas e saídas reais de trabalho, todos expressos em horas.

A **saída planejada** remete aos níveis de equipe, horas de trabalho, etc. Em centros de trabalho com restrição de capacidade, a saída planejada é estabelecida pela gerência através de taxas de capacidade. Não havendo restrição, a saída é exatamente igual à entrada.

Para levantar os dados da **entrada planejada** a situação de todas as ordens em aberto é examinada, estimando quanto tempo seria necessário para terminar seu trabalho em

centros de trabalho e descobrindo o momento em que chegariam ao centro de trabalho seguinte.

Para determinar as **entradas e saídas reais** deve-se fazer o usos dos dados do sistema de controle do chão de fábrica.

A análise de entrada e saída monitora as ordens em atraso. Uma alternativa para lidar com estas ordens é aumentar a capacidade de produção, reconhecendo que os fluxos devem ser controlados para mudá-las. Também indica que há pouco propósito em se liberar ordens a um centro de trabalho que já tenha trabalho em excesso, a menos que a ordem liberada tenha prioridade mais alta do que as ordens em atraso. A ideia é não liberar trabalho que não possa ser feito, liberar apenas o que é realmente necessário.

Segundo Marçola (2000), quando há um desencontro entre a capacidade requerida e a capacidade disponível, os planos de produção ou de capacidade devem ser alterados para satisfazer a demanda:

**Mudanças no plano de produção:** comprar ou fabricar, aumentar/diminuir o tamanho do inventário, reprogramar datas de entrega dos pedidos, alterar tamanho do lote em processo.

**Alterações na capacidade:** requer técnicas de ajuste da capacidade. Definir período inicial e final que serão ativadas, calcular a somatória de capacidade acrescentada/removida.

Abaixo, algumas técnicas sugeridas por Marçola (2000) para modificar o nível de capacidade:

- Compra de máquinas/equipamentos e instalações: decisões de longo prazo. Esta decisão em conjunto com a contratação de mão-de-obra é preferida pela gerência devido à facilidade na adoção e por ser definitiva. Mas a alta direção reluta em aceitar, pois contraria a ideia de utilizar a capacidade produtiva total para alcançar eficiência máxima.

- Operar mais turnos: busca a otimização do ciclo-homem, apresenta custos adicionais como restaurante, manutenção, ferramentaria, ambulatório.

- Contratar/demitir funcionários, lembrando que novos funcionários são suscetíveis a acidentes, a não conformidades, menor produtividade devido à curva de aprendizado. As demissões constantes baixam a moral e a produtividade, bem como aumentam as inseguranças dos funcionários.

- Horas extras são mais utilizadas por serem mais fáceis de aplicar. No entanto deve se verificar que o uso de horas extras cria um aumento nos custos da hora e diminuição da produtividade quando a hora extra é excessiva.

- Subcontratação: melhora a eficiência organizacional e a flexibilidade, reduz custos, melhora o serviço ao cliente e o foco no negócio principal da empresa. A subcontratação pode ser útil para fabricar produtos, subcontratando o excesso de capacidade. Pode ser uma alternativa quando há excesso de capacidade, buscando serviços para completar a carga interna nos departamentos ociosos.

- Diminuir horas improdutivas: para reduzir as horas improdutivas é necessária uma gestão extremamente eficiente. Muitas vezes o custo desta prática é irrisório comparado com os benefícios de aumento na capacidade produtiva.

Complementando a abordagem sobre horas improdutivas, Corrêa *et al.* (2009) lembra que a taxa de eficiência deve cobrir aspectos como quebra de máquina, falta de energia, ausência de funcionários, movimentação de materiais, atraso de fornecedores, etc.; ou seja, deve considerar valores de improdutividade, muitos deles inevitáveis e outros que podem ser evitados através de uma boa gestão. Logo, a taxa de eficiência deve apresentar a disponibilidade real e isso deve ocorrer em todos os níveis de planejamento da capacidade.

Estas afirmações podem ser observadas na Figura 3.2 abaixo:

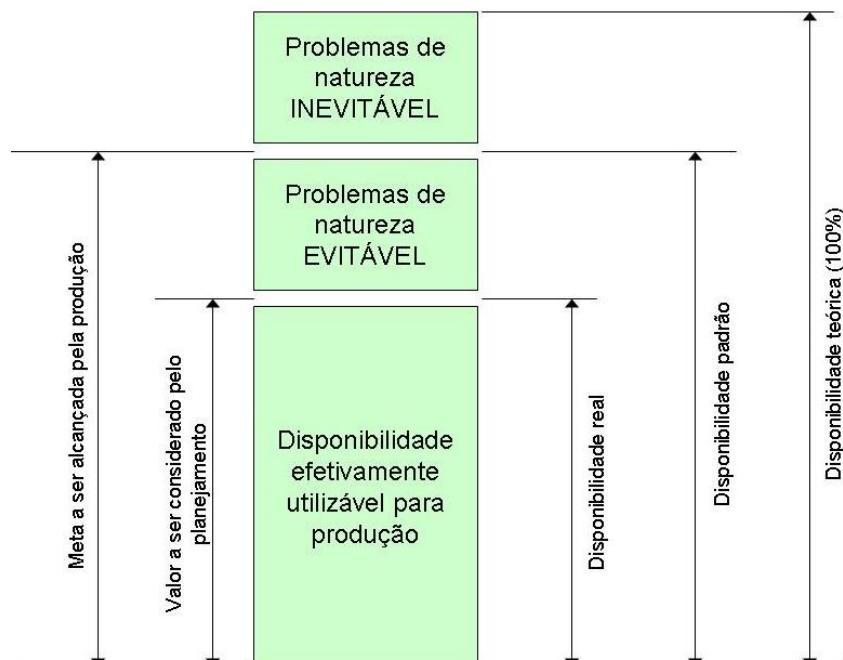


Figura 3.2 - Planejamento deve considerar a capacidade efetivamente disponível para o trabalho Fonte: Corrêa *et al.* (2009).

Em casos em que a necessidade é menor que a capacidade, Slack (2002) diz que o tempo ocioso dos funcionários pode ser utilizado para realizar outras atividades como limpeza e manutenção, remanejando-os para áreas onde a demanda seja grande (para isso é necessário um alto nível de flexibilidade dos funcionários). Existe a possibilidade de demitir mão de obra em excesso, lembrando que existem custos relacionados a esta prática. Também é possível utilizar a estratégia de contratação de funcionários por tempo parcial.

De acordo com a abordagem de Ritzman (2004), o gerente deve levar em conta algumas decisões estratégicas com relação à capacidade:

- 1) Dimensionar reservas de capacidade: garantir um montante de capacidade extra para suportar aumentos da demanda inesperados ou perdas de produção por quebra de máquina, falta de funcionário, etc. Quanto menor as reservas, menor o custo do capital investido, e maiores são as chances de verificar ineficiências no processo, que são ocultadas pelo excesso de capacidade;
- 2) Determinar a oportunidade e o tamanho da expansão: envolve quando deverá ocorrer a expansão da capacidade e qual o tamanho desta expansão;
- 3) Vincular a capacidade a outras decisões: envolve a participação de outras áreas dentro da organização, para que as decisões de capacidade sejam tomadas baseadas no todo.

Sobre o item “Dimensionar reservas de capacidade”, Vollmann *et al.* (2006) apresenta um exemplo em que a capacidade da empresa é considerada como uma torta: há fatias de negócios recorrentes, para produção de peças de reposição, fatias para as paradas e manutenção e uma fatia para oportunidade de negócio. O gerente desta empresa não acrescenta aquela oportunidade de negócios a um plano de capacidade completamente comprometido com outros aspectos de seu negócio. No entanto esta decisão deve ser discutida, comparando-se os custos de oportunidade *versus* os custos de excesso de capacidade.

Marçola (2000), em sua tese trata de uma opção para gerenciar o planejamento da capacidade através dos conceitos de **horas anualizadas**.

O sistema de horas anualizadas é baseado no tempo de trabalho rateado ao longo do ano, provendo aos trabalhadores um número de horas a serem trabalhadas em doze meses ao invés de focar no número de horas trabalhadas na semana. Desta forma, os empregados trabalham mais nos períodos de pico e menos nos períodos de baixa demanda. No

Brasil é comumente chamada de banco de horas, com a diferença na forma de controle, que é determinada pelo controle do saldo credor ou devedor das horas. Abaixo são identificadas as vantagens e desvantagens desse sistema:

- Vantagens: proporciona flexibilidade na gestão dos recursos, minimiza as horas extras, a ociosidade e o inventário. Além disso, a moral dos funcionários é elevada, devido principalmente à estabilidade do trabalho.

- Desvantagens: válido para pequenos incrementos de capacidade, aumento dos custos administrativos inerentes ao acréscimo de controle, risco de não compensação das horas aumentando a ociosidade e risco de pagamento de horas extras no caso da demanda menor não se concretizar.

Vollmann *et al.* (2006) indica uma maneira de administrar a capacidade através do **gerenciamento de gargalos de capacidade** baseada na Teoria das Restrições (TOC), onde as capacidades dos centros de trabalho gargalo devem ser gerenciadas com muito mais cuidado do que os centros não-gargalo. Enfatiza que o trabalho adicional feito em um centro de trabalho subutilizado não tem nenhum custo. No entanto, se os centros de trabalho gargalo deixam de trabalhar devido à falta de trabalho fornecida pelo centro não-gargalo, é imprescindível que o trabalho extra seja realizado.

Planejar a capacidade com a TOC implica determinar os centros gargalo, por exemplo, através do planejamento da capacidade bruta. Em seguida, deve-se procurar soluções rápidas para eliminar os gargalos e gerenciar sua capacidade, sendo que as tarefas que passam nos recursos gargalo são programadas finitamente, ou seja, considerando o limite do recurso, utilizando para isso o carregamento horizontal e a programação para trás no caso das tarefas mais críticas.

Segundo Vollmann *et al.* (2006), para centros de trabalho não-gargalo, buscar um aumento de sua utilização é mais do que irrelevante – é fundamentalmente errado, pois resulta em mais trabalho na fábrica do que necessário, gerando estoques excessivos e confusão.

Como pode ser observado, existem diversas técnicas e métodos para lidar com o planejamento da capacidade, sendo algumas mais elaboradas do que outras, porém todas tem o mesmo intuito que é adaptar a capacidade fabril de maneira efetiva para atender à demanda. De forma resumida:

- Os planos de capacidade devem ser desenvolvidos simultaneamente com os planos de materiais;
- As técnicas de planejamento da capacidade devem combinar o nível de detalhe e circunstâncias reais da empresa implicando em decisões gerenciais eficazes. Além disso, as técnicas podem ser aplicadas somente aos recursos-chave facilitando a gestão (TOC);
- Maior nível detalhes dos planos de capacidade implicará em mais dados de manutenção da base de dados;
- A capacidade planejada deve ser monitorada constantemente.

## 4 CORRENTE CRÍTICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos inerentes à técnica da Corrente Crítica, suas principais particularidades, como o cálculo dos pulmões e o monitoramento destes como forma de controle. Além disso, serão mostradas suas principais diferenças quando comparada com o caminho crítico e detalhes de sua aplicação em ambientes de múltiplos projetos, como é o caso da fundição estudada. Com este fim, estão incluídas no início deste capítulo as definições relacionadas ao OPT e a Teoria das restrições, que servem de base para o raciocínio envolvido na Corrente Crítica.

Apesar do tópico relacionado ao PERT/CPM se ater à área de conhecimento de Gerenciamento de Projetos, ele será abordado neste capítulo por ser fundamental para explicar o método da Corrente crítica.

### 4.1 OPT e Teoria das Restrições

O OPT é a sigla para *Optimized Production Technology*, ou Tecnologia de Produção Otimizada. É baseado na pesquisa de israelenses, entre eles o físico Eliyahu Goldratt, autor do livro “A Meta” (CORRÊA *et al.*, 2009).

Conforme Chase (2006), Goldratt e seus sócios da empresa *Creative Output* desenvolveram o software de Tecnologia de Produção Otimizada, que levava em consideração as limitações das instalações fabris. Os programas de produção eram resolvidos de forma precisa e bem mais rápidos do que o sistema MRP, pois separava as operações gargalo das operações não-gargalo.

O OPT não é uma técnica otimizante, apesar de seu nome, ela é baseada em procedimentos heurísticos. Além disso, não é uma técnica que seja de domínio público, sendo o “*The Goal System*” um dos sistemas que utilizam esta lógica.

Para ilustrar os conceitos do OPT e da Teoria das Restrições, o livro “A Meta”, que foi escrito por Goldratt em 1994, apresenta a situação em que pai e filho, junto a seus colegas escoteiros, estão em uma trilha. Eles percebem a existência de uma grande distância entre o primeiro escoteiro na fila e o último, atrasando deste modo o grupo todo. Para resolver este problema, decide inverter a ordem da fila, de modo que o mais lento ficasse na frente.

Mesmo assim, a fila demorava muito pra andar, pois o garoto que conduzia a fila estava sobrecarregado com sua mochila. Soluciona este problema reduzindo a carga da mochila do rapaz mais lento, entre os demais da fila. A fila começa a andar mais rápida e junta.

O primeiro pensamento relacionado a esta história é que o grupo é **uma equipe**, com os objetivos iguais entre si: chegarem juntos ao destino. O segundo pensamento atribuído ao ocorrido foi que se deve **focar na restrição do problema**, neste caso o garoto lento com sobrecarga na mochila.

Do ponto de vista de Chase (2006), a manufatura sincronizada, que é onde o OPT se enquadra, é um processo de produção feito de maneira coordenada, trabalhando-se para atingir a meta de lucro da empresa, sendo que a ênfase é dada no desempenho do sistema, não nas medidas locais. O foco deve ser dado na sincronização do fluxo.

Segundo Goldratt (1994), a meta da empresa é fazer dinheiro. Os outros propósitos tradicionais não garantem a sobrevivência da empresa a longo prazo. A filosofia é ganhar dinheiro e para isso é necessário:

- **Aumentar o fluxo**, que é a taxa em que o sistema gera dinheiro;
- **Diminuir o estoque**, que é o dinheiro empregado pela empresa em bens a serem vendidos;
- **Diminuir as despesas operacionais**, que trata-se do dinheiro gasto para que o sistema transforme estoque em fluxo.

No OPT, sempre há um recurso que restringe o sistema, seja ele relacionado ao mercado, aos fornecimentos, às políticas da empresa ou mesmo relacionado à capacidade do processo produtivo. Estes recursos são chamados por Corrêa *et al.* (2009) de recursos restritivos críticos (RRC). Ambos os termos, RRC e gargalo são usados indistintamente pelo autor.

De acordo com Chase (2006), o **gargalo** é um recurso cuja capacidade é menor do que a demanda, sendo uma restrição que limita o ganho. Pode ser uma máquina, mão de obra escassa ou uma ferramenta especializada. Além disso, existem poucas operações gargalo numa indústria e quando não há gargalo, então há excesso de capacidade e o sistema deveria mudar para criar um gargalo.

Um recurso **não-gargalo** é aquele cuja capacidade é maior que a demanda. Este recurso não deveria trabalhar constantemente, pois já produz mais que o necessário.

Além destas duas definições, o autor Corrêa *et al.* (2009) define os Recursos com Capacidade restritiva (CCR), que são recursos que possuem capacidade superior a demandada, porém podem tornar-se gargalos quando mal gerenciados. Os CCR's surgem principalmente devido a variações da demanda, a problemas no sequenciamento das ordens, a tempos de preparação maiores do que o programado, manutenção, etc.

Os conceitos de gargalo e restrição transmitem a mesma idéia de limitação, no entanto, é possível afirmar que a diferença entre ambos está na área de aplicação de cada um. O gargalo é um termo mais adequado para ser aplicado em produção. Situação diferente acontece com o termo restrição, que é utilizado com um sentido mais amplo representando tudo o que limita o sistema, tornando-o mais lento ou impedindo-o de seguir em direção ao seu objetivo (CHASE, 2006).

O autor Ritzman (2004) informa que o gargalo pode ser encontrado através do cálculo da utilização média de cada operação, e lembra que a alta variabilidade de carga de trabalho pode criar gargalos variáveis. Cita ainda que, uma forma para **administrar a capacidade** é monitorar cuidadosamente a produção no curto prazo, garantindo que os **gargalos** fiquem sempre em operação quando for possível.

No trabalho de Antunes Júnior (1998), é enfatizado que o gargalo deveria ser fixo, facilitando a gestão dos projetos no dia-a-dia da fábrica, garantindo que o foco da gerência não mude constantemente.

Para implantar satisfatoriamente um sistema como o OPT, Corrêa *et al.* (2009) indica três fatores indispensáveis:

1. Adequação atual e futura deste sistema ao ambiente da empresa que envolve: a necessidade da empresa em gerenciar sua capacidade de forma detalhada, ou seja, em níveis mais desagregados, o alinhamento à política de produção da empresa, mais precisamente às empresas que produzem sob encomenda, e onde a demanda é pouco previsível. Envolve também apoiar o plano-mestre da produção e a complexidade das decisões no âmbito da programação da produção;
2. Escolha de um sistema que atenda às necessidades e particularidades da empresa, que compreende: a) definição conceitual do sistema, considerando a adequação à empresa e determinando quais as decisões que serão apoiadas pelo sistema e; b) a escolha entre os diversos sistemas disponíveis no mercado;

3. Metodologia de implantação: envolvimento de RH e alta administração, treinamento e gestão do projeto.

A decisão de implantar este sistema envolve a análise dos níveis de investimento e esforços organizacionais além da análise dos sistemas comerciais de OPT disponíveis que por apresentarem diferenças sensíveis na concepção e no escopo, merecem avaliação criteriosa relacionada às necessidades atuais e futuras da empresa.

Abaixo são apresentadas quatro situações onde deve-se controlar o **fluxo** nos CCR's (evitando-se que estes tornem-se gargalos) e nos gargalos:

1. Gargalo sem tempo de *setup*: apenas a sequência é importante;
2. Gargalo com tempo de *setup*: as tarefas serão feitas antecipadamente, trabalhar com lotes maiores economizando *setup*. Lotes pequenos de transferência para tentar encurtar o *lead time*;
3. CCR sem tempo de *setup* e;
4. CCR com tempo de *setup*. Ambos (3. e 4.) têm certo tempo ocioso. O ideal é cortar o tamanho de alguns lotes de processo garantindo mudanças mais frequentes no produto e diminuindo o *lead time*.

Corrêa *et al.* (2009) lembra também que quanto menos estoque estiver em processo significa impacto menor relacionado a mudanças de projeto de engenharia. Goldratt trata o inventário como sendo um empréstimo. Para medir quanto tempo ele é mantido, utiliza a medida *dollars days*: multiplicando o valor total do estoque pelo número de dias que o inventário fica no departamento. É possível instituir técnicas para reduzir o número de *dollars days*, cuidando para que esta medida não passe a ser um objetivo local, prejudicando os objetivos globais.

Conforme Corrêa *et al.* (2009), para implantar o OPT deve haver um grande comprometimento da empresa, começando pela alta direção, necessitando que seja dado treinamento para vários funcionários. Como o OPT questiona e nega alguns pressupostos da administração da produção tradicional, Corrêa considera que existem quatro áreas que deveriam ser repensadas:

1. Tipos de recurso: gargalos e não-gargalos, onde os gargalos ficam ocupados durante todo o tempo de sua disponibilidade

2. Preparação de máquina: faz parte da disponibilidade de um recurso gargalo e deve ser minimizada, pois uma hora economizada no tempo de preparação significa uma hora ganha no tempo de processamento;
3. Tamanho de lotes: tão grande possível nos recursos gargalos, minimizando o tempo de preparação, aumentando a capacidade de fluxo. Diferenciam-se aqui lotes de processamento e lotes de transferência (Figura 4.1):
  - 3.1 Lotes de Transferência: uma fração do lote de processamento. É o tamanho de lote que será transferido para as próximas operações
  - 3.2 Lotes de Processamento: é o tamanho de lote que vai ser processado antes que seja preparado novamente para o processamento de outro item. Segundo o princípio do OPT, o lote de processamento é variável.
4. Efeitos das incertezas: o tempo de execução varia de acordo com uma distribuição estatística, sendo que é praticamente impossível eliminar os fatores aleatórios destes tempos. Devido às incertezas, deve-se permitir o estoque antes da máquina gargalo.

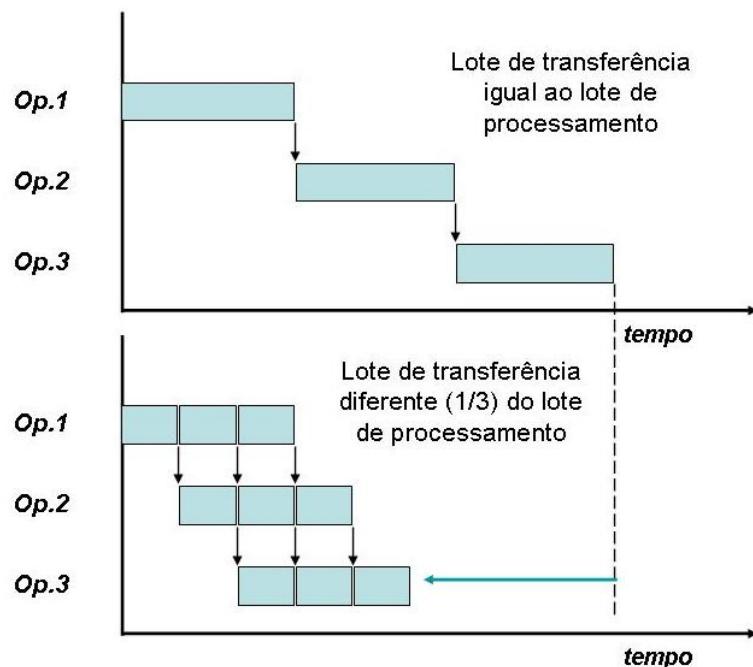


Figura 4.1 - Lotes de transferência e lotes de processamento. Fonte: Corrêa *et al.* (2009)

Exemplificando o extremo que é a linha de produção, o **Lote de Processo** é infinito e o **Lote de Transferência** é unitário, significando que o **Lote de Processo** deve ser grande ou pequeno suficiente para ser processado com uma duração específica. Nos recursos gargalos deve haver lotes maiores de processo. Por outro lado, nos recursos não-gargalos haverá lotes menores de processo.

O Lote de transferência refere-se à movimentação das peças do lote de processo. Não se deve esperar que o lote todo seja terminado, movendo parte para a próxima estação de trabalho a jusante. Os lotes de transferência menores implicam em estoque mais baixo, fluxo mais rápido, *lead times* mais curtos, mais manuseio de materiais, ou seja, é determinado pelo *trade off* entre os *lead times* de produção, os benefícios de redução de inventário e os custos de movimentação. Estes tamanhos são determinados após se comparar os desempenhos anteriores para cumprir as datas de entrega.

No OPT, a programação deve começar no recurso gargalo, pois este ditará o ritmo de todo o sistema produtivo. Este recurso deve ser totalmente carregado para atingir máximo fluxo. Em paralelo, deve programar a melhor sequência para os trabalhos, priorizando-os de acordo com as datas de entrega. Logo em seguida, o recurso gargalo deve ser protegido contra possíveis incertezas através de um estoque por tempo de segurança (*time-buffer*) que garanta que o RRC não fique ocioso.

A próxima etapa é programar os recursos não-gargalos utilizando o RRC, lembrando que estes devem ter capacidade produtiva maior do que é demandado, não sendo um problema processar o material proveniente do gargalo. Além disso, os RRC controlam os estoques ao longo do processo produtivo através da “corda”, que liga o estoque criado pelo *time-buffer* à operação inicial do processo. Este processo garante a sincronia do sistema, com quantidades precisas e no momento ideal.

Além do *time-buffer* que protege o gargalo, é necessário um estoque secundário protegendo a montagem final/ expedição, evitando que as partes processadas pelo RRC tenham que esperar para serem montadas/ expedidas. O tamanho destes *time-buffers* deve ser definido pela natureza e pela probabilidade de eventos incertos afetarem os ramos dos recursos não-gargalos.

O algoritmo utilizado pelo OPT conta com dois tipos de programação:

- Finita para frente: programa os recursos RRC
- Infinita para trás: programa recursos não-gargalo

Basicamente, as operações que antecedem os *time-buffers* são programadas para trás de acordo com a lógica do MRP. As operações seguintes ao recurso gargalo são programadas para frente. É imprescindível que haja coerência no momento da definição dos recursos gargalos, caso contrário a programação se baseará em premissas falsas que comprometerão a funcionalidade do OPT.

Para a aplicação da ferramenta OPT, Goldratt desenvolveu as nove regras de programação da produção, também conhecida como **as nove regras do OPT**, conforme abaixo:

1. Balancear o fluxo e não a capacidade;
2. O nível de utilização de um recurso não-gargalo é determinado por outra restrição do sistema;
3. Utilização e ativação de um recurso não são sinônimos;
4. Hora perdida no gargalo implica em hora perdida no sistema todo;
5. Hora salva no não-gargalo é apenas uma miragem;
6. Os gargalos controlam o ganho e o inventário;
7. Lote de transferência pode não ser e muitas vezes, não deveria ser, igual ao lote de processamento;
8. Lote de processo deve ser variável ao longo do roteiro e ao longo do tempo;
9. Prioridades são fixadas através da avaliação das restrições do sistema. Os *Lead times* são resultados da programação e não podem ser assumidos a priori.

Corrêa *et al.* (2009) cita um importante ponto relacionado ao OPT que é a rapidez para implantação do sistema. Essa rapidez se justifica, pois este sistema foca em poucos pontos críticos, enfatizando que os dados que realmente necessitam de precisão são apenas relacionados aos recursos gargalos. Em contrapartida, revela algumas limitações deste sistema:

- A centralização na tomada de decisões;
- Os softwares para uso do sistema são patenteados, sendo necessário adquirir uma licença;
- A identificação de gargalos pode estar mascarada por lotes excessivos, por práticas tradicionais de produção, etc.;
- Pode haver um gargalo que varia constantemente de recurso comprometendo os resultados do sistema;
- O OPT demanda habilidade analítica do programador e;
- As mudanças culturais intrínsecas às novas medidas de desempenho.

O desenvolvimento do OPT incentivou o surgimento da Teoria das Restrições (TOC – *Theory of Constraints*) que é uma metodologia para planejamento e controle da

produção através do conceito de Tambor-Pulmão-Corda. A aplicação do sistema OPT tornou-se para muitos o sinônimo de Teoria das Restrições. No entanto, apenas o uso do software não garante na prática de uma empresa um processo de melhoria continua que se auto-sustenta (SOUZA, 2005).

Para isso é fundamental compreender que a Teoria das Restrições trata-se da filosofia que muda a forma de agir e de pensar das pessoas.

A TOC possui indicadores de desempenho diferenciados que são fundamentados do ponto de vista financeiro e do ponto de vista da produção:

**Financeiros:** 1) Lucro líquido; 2) Retorno sobre o investimento; 3) Fluxo de caixa (indicador de sobrevivência da empresa). Todos precisam ser utilizados em conjunto, e segundo o autor, a Empresa pode falir se não puder lidar com estes indicadores desta maneira.

**Operacionais:** 1) Ganho: produtos vendidos; 2) Inventário: produtos acabados ou estoque em processo. O que tem valor neste caso é apenas o custo dos materiais que ele contém, evitando o problema em determinar quais custos são diretos e quais são indiretos; 3) Despesas operacionais: custos de produção e custos administrativos.

Logo, baseado nos conceitos da TOC, o objetivo principal da empresa é aumentar o ganho e ao mesmo tempo reduzir inventário e despesas operacionais. Para Goldratt (1994), dentre os dois indicadores Inventário e Despesas operacionais, o primeiro é mais importante devido a vários impactos decorrentes de sua redução, como: melhoria na qualidade dos produtos, redução de *lead time*, e também na redução da própria despesa operacional.

Segundo Corrêa *et al.* (2009), utilizando estas novas medidas de desempenho haverá simultaneamente uma melhoria nas medidas de desempenho tradicionais. E ainda, garante que as novas medidas são mais ligadas às decisões tomadas pelas pessoas envolvidas com o setor produtivo, favorecendo a execução dos objetivos do OPT.

Neste sentido, Goldratt criou os Cinco Passos de Focalização da Teoria das Restrições:

1. **Identificar** a restrição do sistema, que é elo mais fraco da corrente. Logo a capacidade da fábrica é igual a capacidade do gargalo, e quando a demanda é menor do que a capacidade fabril, o gargalo passa a ser o mercado externo;

2. **Explorar** estas restrições, tornando-as mais eficazes, afinal, o ganho da empresa está limitado à restrição. Uma melhoria resultará em obter o máximo de sua capacidade maximizando o ganho.
3. **Subordinar** tudo à decisão tomada acima, mesmo que esta decisão reduza a eficiência dos recursos não-gargalos, produzindo apenas o que o gargalo conseguir assimilar;
4. **Elevar** as restrições do sistema, melhorando e extraíndo o máximo do recurso, até que este não seja mais uma restrição. Quando a restrição é interna, deve-se melhorar o processamento do gargalo, aumentando sua capacidade através da compra de novo maquinário, redução de tempo de preparação, etc. Por outro lado, quando a restrição é externa, deve-se tomar ações para aumentar a demanda, via redução de preços, propagandas, criação de novos produtos, etc. Cabe enfatizar que quando se quebra uma restrição, inevitavelmente surge um novo elo mais fraco, conforme pode ser visto no passo 5;
5. Se as restrições forem quebradas, **Retornar** ao passo 1. Não deixar a inércia tornar-se a restrição do sistema. Após a capacidade do gargalo ter sido aumentada, surgirão novos gargalos, e o processo terá que ser reiniciado demonstrando a característica de melhoria continua do procedimento da TOC.

De acordo com Corrêa *et al.* (2009), existem duas maneiras de se **identificar o gargalo**. A primeira indica conduzir um perfil de carga do recurso, sendo que os dados devem ser precisos. A segunda maneira indica utilizar o conhecimento dos especialistas da fábrica, examinando o sistema e conversando com supervisores e trabalhadores. Cita algumas alternativas para se economizar tempo com o gargalo como o uso de ferramentas melhores, contratação de mão de obra melhor capacitada, tamanhos maiores de lotes e redução de tempo de *setup*.

Ressaltando, que o controle do fluxo do produto deve ser feito no gargalo, certificando-se que as operações a montante não produzam além do necessário, acumulando estoque em processo que o gargalo não consiga absorver. É imprescindível que o gargalo sempre tenha trabalho, neste sentido, torna-se necessário apresentar os conceitos de Tambor-Pulmão-Corda conforme Figura 4.2 abaixo:

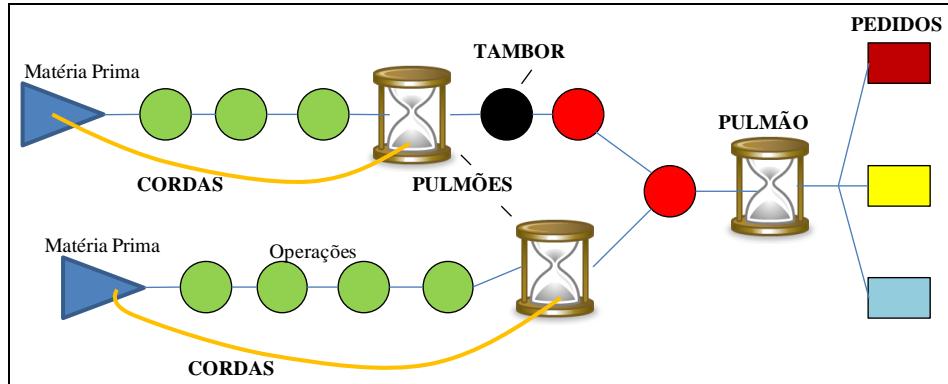


Figura 4.2 – Metodologia Tambor-Pulmão-Corda. Fonte: Adaptado de Goldratt(1994)

**Tambor** – é o ponto de controle do gargalo e dita o ritmo do restante do sistema. Determina quando o material deve estar chegando e quando o material deve ser entregue.

**Pulmão** – é uma forma de garantir que um recurso gargalo sempre tenha trabalho para fazer. O pulmão é tão grande quanto for preciso para garantir que o gargalo continue a funcionar. O pulmão estabelece quanto tempo antes do programado pelo Tambor deve-se liberar o material para atender a uma determinada ordem de fabricação.

**Corda** – é a comunicação a montante do que o gargalo está produzindo para que os recursos produzam somente o que é necessário. Sua função é sincronizar os recursos não restritivos em função das necessidades dos pulmões.

É possível criar dois pulmões, um em frente ao gargalo ou ao CCR e o outro no final como produtos acabados no momento da expedição. Um protege o mercado, garantindo que os produtos cheguem à expedição com certa antecedência e o outro protege os ganhos. Neste caso, são necessárias duas cordas, uma comunicando o inventário de produtos acabados de volta para o tambor e uma corda do tambor de volta para o ponto de liberação de materiais.

No quesito qualidade, se uma peça ruim for produzida à montante do gargalo significa apenas perda de material, devido ao excesso de capacidade em todo o sistema, menos no gargalo. Logo, o controle de qualidade deve agir pouco antes do gargalo, garantindo que este processe apenas peças boas. Também deve haver um controle a jusante para garantir que o trabalho feito pelo gargalo não seja refugado.

Muitos problemas podem ser solucionados aplicando-se a lógica da Teoria das Restrições. Um dos problemas é a cultura relacionada à Lógica da contabilidade que busca satisfazer os indicadores de eficiência e utilização. Esta lógica induz supervisores a utilizar os

funcionários o tempo todo, gerando inventários excessivos. Quando há tempo ocioso, faz uso deste tempo para aumentar a utilização, o que pode gerar um gargalo.

Um ponto importante citado pelo autor é que o marketing e a produção deveriam conduzir suas atividades em harmonia e se comunicar constantemente. Ambos devem buscar linhas fortes de comunicação contribuindo para alcançar as metas da empresa.

Os indicadores de uma empresa deveriam incentivar o aumento dos lucros líquidos, do retorno sobre o investimento e do fluxo de caixa. No nível de produção deve-se focar na quantidade de ganho, inventário e despesa operacional criada. Deve-se analisar e encontrar os recursos gargalos e com restrição de capacidade, para que sejam priorizados. Resumindo o livro “A Meta” de Goldratt (1994): a chave para a vantagem competitiva através da produção é garantir que esta opere como sistema sincronizado, onde todas as peças funcionam como em um concerto. Isto sendo feito de forma eficaz é o caminho para alcançar a meta – lucratividade.

Um tópico sucinto é apresentado abaixo sobre coordenação de projetos utilizando o caminho crítico. Neste sentido, não é objetivo desta dissertação um aprofundamento acerca deste tema, apenas se faz necessária sua apresentação para dar base aos conceitos da corrente crítica, que é vista com maiores detalhes no tópico subsequente.

#### **4.2 Coordenação de Projetos utilizando o PERT/CPM**

É importante apresentar nesse ponto do trabalho as informações acerca da coordenação de projetos para embasar o método da corrente crítica, que será discriminado posteriormente. Para um gerente, é essencial trabalhar com métodos efetivos, podendo antecipar dificuldades em projetos, planejando desta forma contingências para evitar surpresas.

Conforme foi apresentado anteriormente, no sistema de produção voltado para projetos os produtos são muito customizados e o tempo para fabricação dos produtos é longo. Outro sistema que compartilha destas definições são os sistemas de produção do tipo *Job-shop*, no entanto os produtos compartilham os recursos de operação com diversos outros produtos (SLACK, 2002).

Por terem características semelhantes, ambos os sistemas de produção podem fazer uso do método que será descrito a seguir: PERT/CPM.

O PERT/CPM é utilizado para planejamento e controle de projetos. O PERT (Técnica de Avaliação e Revisão do Programa) foi criado pela marinha dos EUA para avaliar mudanças na programação e prevenir atrasos, utilizando para isso o cálculo a partir da média ponderada de três durações possíveis de uma atividade, sendo as durações otimistas, as durações mais prováveis e as durações pessimistas. Já o CPM (Método do Caminho Crítico) foi criado na mesma época pela DuPont, sendo que este avalia quais atividades de uma sequência não podem sofrer alteração de duração sem que isso reflita na duração total de um projeto. O PERT/CPM é uma ferramenta de fácil compreensão e uso, principalmente as versões computadorizadas para análise de projetos de grande escala (MCCLAIN, 1985).

Segundo o Mcclain (1985), três fases do planejamento do projeto devem ser apresentadas: Análise, Programação e Controle.

**1<sup>a</sup> Fase: Análise do Projeto** - o projeto é dividido em atividades, onde se identifica a estimativa da duração de cada uma delas. Em seguida aprimora-se a definição de cada atividade consultando-se a pessoa responsável que possa detalhar o tempo estimado devido a experiências anteriores. São considerados os “piores casos”, os “melhores casos” antes de se encontrar a duração “mais provável”. Também são definidas todas as relações de precedência

Outros detalhes são gravados, como o número de pessoas, equipamentos e materiais necessários. É conveniente definir códigos para cada atividade, baseado em letras e/ou números.

O planejamento do PERT/CPM é baseado em um **diagrama de redes** que usa flechas para mostrar relações de precedência entre atividades, e mostra possíveis dificuldades na programação gerando melhorias na coordenação do projeto. No diagrama de rede, cada atividade é um nó, representado por um círculo, e as setas são usadas para indicar o fluxo de precedência das atividades.

Outro método utilizado é o diagrama de atividades nas setas, onde estas tem a tarefa de representar a atividade e a precedência

Segue abaixo alguns cálculos utilizando para o diagrama de redes:

Data de início e término mais cedo: As atividades iniciam o mais cedo possível (ES), dadas suas relações de precedência, e terminam mais cedo de acordo com seu ES mais seu tempo de atividade (AT)

$$EF_i = ES_i + AT_i \quad \text{para cada atividade } i.$$

$ES_i = \max \{EF \text{ dos predecessores de cada atividade } i\}$ , onde “máx” representa o último tempo para se completar a tarefa.

Data de início e término mais tarde: Estes cálculos são projetados para encontrar o quanto tarde cada atividade pode começar sem atrasar a finalização do projeto e são calculados de trás para frente:

$$LF_i = \min \{LS \text{ do sucessor da atividade } i\}$$

$$LS_i = LF_i - AT_i$$

Abaixo é exemplificado um diagrama de redes com sua relação de precedência (ver Figura 4.3), tempos de atividade (A, 5 → Atividade “A”“A”, tempo de atividade igual a 5 unidades) e datas de inicio e término (mais cedo ou mais tarde).

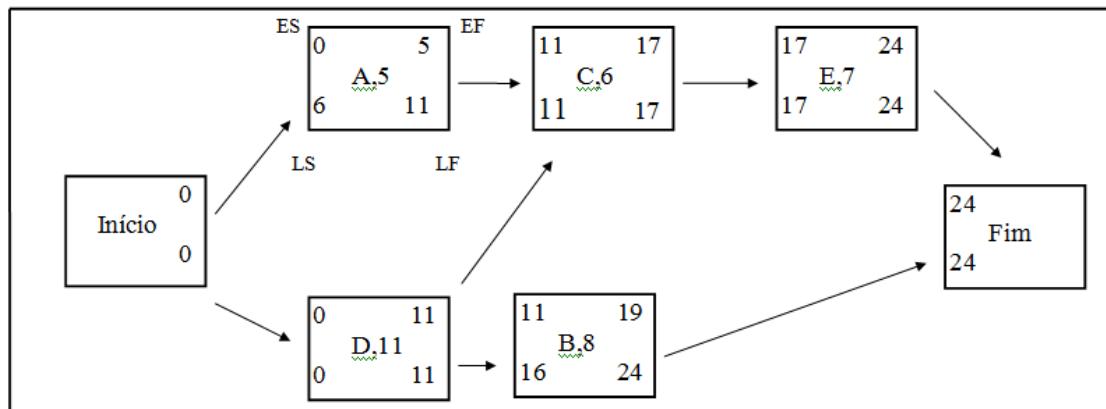


Figura 4.3 – Diagrama de redes com os tempos de Início mais cedo (ES), Término mais cedo (EF), Início mais tarde (LS) e Término mais tarde (LF). Fonte: Adaptado de McClain (1985, p57).

Folga: A folga total (TS) é dada pela fórmula abaixo:

$$TS_i = LS_i - ES_i$$

Portanto, o caminho crítico pode ser definido como a maior sequência de atividades da rede e é aquele que determina a data de término do projeto. Não há folgas para as atividades neste caminho, logo  $TS=0$ .

Segundo Steyn (2000), de acordo com o conceito de caminho crítico, os recursos só serão levados em conta após a definição do caminho crítico. No decorrer do

projeto, caso as tarefas não críticas atrasem além da folga que possuem, o caminho crítico será modificado.

**2<sup>a</sup> Fase - Programação com PERT/CPM** - É utilizada uma escala de tempo associada ao diagrama de redes. Neste diagrama é possível visualizar as folgas e o caminho crítico. Também foi facilitada a coordenação de recursos onde a programação pode ser melhorada movendo algumas atividades ao longo de suas folgas, aproveitando ainda mais os recursos por meio de nivelamento.

Uma característica comum no uso do PERT/CPM é o *trade-off* entre tempo e custo. Algumas atividades devem ser aceleradas ao mesmo tempo em que outras atividades a velocidade é reduzida ou mesmo são gastos recursos para que isto ocorra. De qualquer forma, muitas vezes isto se faz necessário devido ao fator crítico de atividades que impactam na performance do projeto como um todo.

Mcclain (1985) relembra que os tempos considerados na fase de análise não podem sempre ser de confiança, principalmente devido a eventos incertos que possam ocorrer durante o projeto, como o clima. Os métodos probabilísticos associados ao PERT/CPM não são comuns, mesmo assim, existem dois caminhos alternativos que são usados: gráfico de escala de tempo e técnicas de suporte computadorizadas.

Para prever o tempo da atividade utiliza-se de uma aproximação em que é considerado o tempo mais otimista para se executar uma atividade(a), em seguida o tempo mais pessimista(b) e então o tempo mais provável (m). Desta forma o tempo esperado (ET) pode ser dado pela formula:

$$ET = \frac{a + 4m + b}{6}$$

E como indicador de precisão temos o desvio padrão para cada atividade:

$$\sigma = \frac{b-a}{6};$$

E o desvio padrão do caminho, dado pela fórmula:

$$\sigma^2(\text{caminho}) = \sum_i \sigma_i^2 \text{ com a soma de } i = \text{todas atividades ao longo do caminho.}$$

**3<sup>a</sup> Fase: Controle do Projeto** - um eficiente controle do projeto precisa de respostas rápidas e confiáveis relacionadas ao progresso em relação ao prazo. Os relatórios simples são mais utilizados, pois são ágeis e não são complexos.

Revisões semanais são utilizadas de forma a verificar o andamento e antecipar “gargalos” (ocorre quando se tem uma atividade sucessora e a atividade anterior atrasa e desta forma atrasando o programa). Outra consideração a ser feita com relação aos gargalos é que devem ser feitos programas de contingência para aliviá-los.

Outra ferramenta de controle muito útil é o diagrama de redes em conjunto a escala de tempo. A representação visual é mais rápida e possibilita uma visão geral do projeto, focando nos pontos cruciais.

O autor Mcclain (1985) ressalta que trabalhar com o caminho não crítico, começando o mais tarde possível pode implicar em um controle do projeto mais rígido, pois as folgas seriam consumidas logo no início, e ao invés de um caminho crítico seriam possíveis vários caminhos críticos. Logo, a atenção do gerente deverá se dividir em vários processos em paralelo, e perderá o foco no verdadeiro caminho crítico. No entanto, começar mais cedo as atividades críticas caracteriza perda de dinheiro, investimento adiantado, trabalho em processo desnecessário, e utilização da mão de obra que poderia trabalhar em processos críticos. No método do Caminho crítico, utilizando as medidas de desempenho usuais, o gerente fica sem foco do que deve ser trabalhado, voltando suas atenções em grande parte aos clientes mais importantes ou mais complexos. Aqueles que “cobram mais” acabam tendo maiores benefícios.

Uma alternativa que será apresentada nos tópicos a seguir é a corrente crítica, derivada dos conceitos de Produção com Capacidade Finita, Teoria das Restrições e gerenciamento de projetos.

#### **4.3 A Corrente Crítica: Fundamentos e Procedimento.**

Baseado nos conceitos apresentados anteriormente torna-se possível definir a corrente crítica. Conforme Herroelen (2001), a corrente crítica é o conjunto de tarefas que determina a duração do projeto, considerando as limitações de recursos e a relação de precedência entre as tarefas. É uma técnica que aborda aspectos do comportamento humano que podem contribuir para o andamento do projeto e tem como alicerce a Teoria das

Restrições. Segundo Goldratt (1998), a corrente crítica visa reduzir a duração do projeto e simplificar a sua forma de controle.

Para evitar qualquer falta de clareza, será importante situar os conceitos de corrente crítica frente aos conceitos de caminho crítico, abordados no tópico anterior sobre coordenação de projetos. A Figura 4.4 abaixo exemplifica a principal diferença entre corrente crítica e caminho crítico:

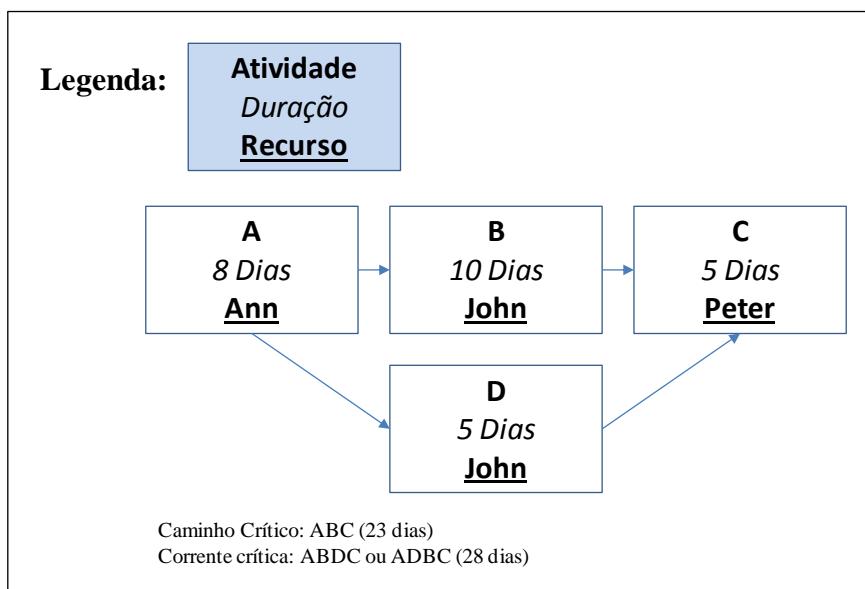


Figura 4.4 – Diferenças entre Caminho Crítico e Corrente Crítica. Fonte: Adaptado de Steyn (2000)

Como pode ser verificado, o recurso “John” deve desempenhar as atividades B e D em paralelo, logo com os conceitos do caminho crítico a rede de atividade terminaria em 23 dias, já nos princípios da corrente crítica a mesma rede de atividades levaria 28 dias para ser finalizada, considerando a restrição do recurso e podendo seguir a ordem de atividades ABDC ou ADBC.

Segundo Herroelen (2001) o método do caminho crítico não considera a capacidade dos recursos, ou seja, trabalha com capacidade infinita. Além disso, na corrente crítica todos os caminhos não críticos do projeto são iniciados o mais tarde possível, com pulmões na ligação destes caminhos com o caminho crítico, reduzindo os impactos de mudanças em trabalhos que já tenham sido realizados e o gasto em investimento antes do momento necessário. Com isso, evita-se que muitas atividades sejam iniciadas em paralelo.

Outra diferença fundamental entre os dois métodos reside no conceito de pulmões de tempo, que não devem ser confundidos com as folgas abordadas na teoria do caminho crítico e serão apresentados ao longo do capítulo.

A corrente crítica parte deste pressuposto, trabalhando mais especificamente na área de gerenciamento de projetos, podendo ser chamada de CCPM (*Critical Chain Project Management*). Goldratt (1998) define a corrente crítica como uma abordagem voltada para o gerenciamento de prazos com foco no recurso gargalo. Para controlar a rede de atividades, prioriza-se a atenção nos pulmões de tempo colocados em pontos estratégicos nesta rede.

No método da corrente crítica é possível compreender que o tempo de segurança considerado nas estimativas das atividades influencia na data de conclusão dos projetos. Como a incerteza é um fato que ocorrerá em qualquer projeto, a ideia central é saber como administrar esta incerteza. Toda a segurança envolvida nestas tarefas é remediada através da adoção de pulmões de tempo colocados no final do projeto, protegendo a data de conclusão e não mais as tarefas individualmente. Abaixo, na Figura 4.5 pode ser verificada mais uma comparação entre a abordagem PERT/CPM e a abordagem da Corrente Crítica:

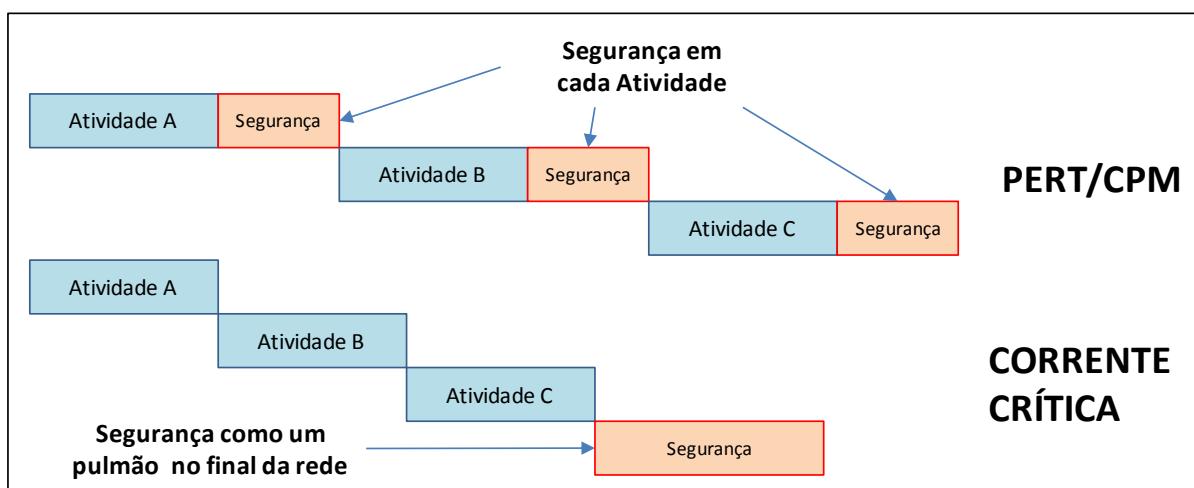


Figura 4.5 - Comparação entre PERT/CPM e Corrente Crítica. Fonte: Rand (2000)

Goldratt (1998) evidencia a filosofia da corrente crítica através de uma ficção, vivenciada em um curso de MBA onde o professor do curso ministra suas aulas por meio de trabalhos requeridos aos alunos, no qual são identificados certos problemas em seus projetos particulares.

Neste livro, Goldratt define projeto como sendo um conjunto de atividades que tem como fim atingir um objetivo específico, e possui como características principais a grande probabilidade de ultrapassar o orçamento previsto, atrasar a entrega e ter seu conteúdo comprometido.

Steyn (2000) apresenta alguns problemas inerentes a determinação dos prazos, onde cada parte envolvida aumenta sua segurança, ocasionando datas de entrega tardias:

1. Alta gerência: em 50% dos casos reduz em torno de 20% o *lead time* do projeto todo. Devido a este problema o responsável pela elaboração do cronograma inflaciona em 25% a estimativa final;
2. Tempo baseado em experiências pessimistas: no momento da elaboração do cronograma, tomam-se, como padrão, as piores entregas já realizadas para se determinar os prazos;
3. Conforme se aumenta os níveis gerenciais, maior é o tempo embutido: cada nível gerencial acrescenta tempo ao nível abaixo, aumentando ainda mais a estimativa de entrega; Uma solução apresentada por Steyn (2002) indica que o único responsável por agregar tempos de contingência deveria ser o gerente de projeto, evitando-se o “efeito bola de neve”.
4. Quem define os tempos, protege suas estimativas.

No entanto, um ponto levantado por Steyn (2000) mostra que o grande problema não esteja nas estimativas de tempo e suas grandes contingências, mas sim onde estas contingências estão sendo alocadas. Discute que em alguns casos a estimativa de tempo pode seguir um caminho totalmente diferente, citando como exemplo o caso de um profissional que está orgulhoso de seu trabalho e de suas capacidades sendo muito otimista, acaba subestimando o tempo necessário para terminar determinada atividade.

Goldratt (1998) define alguns mecanismos utilizados instintivamente e que são inseridos para aumentar os desperdícios de tempo nos projetos:

**Lei de Parkinson:** não há estímulo para terminar antecipado, pois os subordinados tem receio de ter que reduzir ainda mais os futuros tempos estimados. O departamento que executará a próxima tarefa também ficará insatisfeito, pois terá que reprogramar todas as atividades baseadas na programação feita no departamento anterior. Uma atividade tende a preencher todo o tempo estimado disponível e a dependência entre atividades causa acúmulo de atrasos. Um fato pode ser observado em operações que ocorrem em paralelo e a operação seguinte depende do término das anteriores: se uma das etapas atrasar e todas as outras anteciparem seu trabalho, o que determinará o início da etapa seguinte é a atividade que consumiu mais tempo.

**Síndrome do Estudante:** como os empregados sabem que existe segurança no tempo estimado, eles acreditam que não é preciso se preocupar em iniciar no prazo. Logo, acabam querendo mais tempo para realizar determinada tarefa, mas realizam-na no último minuto, é o atraso garantido. Além disso, problemas que possam surgir durante o processo só

serão descobertos quando não houver mais tempo para solucioná-los sem comprometer o projeto.

**Multitarefa:** recebe pressão de outros departamentos para concluir várias atividades de vários projetos nos prazos acordados. Todas as atividades são iniciadas, mas nenhuma é concluída, satisfazendo apenas os clientes internos. O tempo de segurança é consumido quando múltiplas tarefas são programadas para serem executadas em um mesmo período e com recursos limitados, sem orientação das prioridades, admite-se que todas as tarefas tenham a mesma prioridade. Muitas vezes as tarefas mais simples são realizadas antes das tarefas que deveriam realmente ser focadas. Conforme mostra a Figura 4.6 abaixo, se houvesse uma prioridade estipulada para cada tarefa o correto seria iniciar a tarefa A, finalizá-la para em seguida trabalhar a tarefa B e depois a tarefa C. No entanto, o que acontece na prática é que várias tarefas são iniciadas antes de finalizar uma delas por completo. No exemplo, as tarefas levaram o dobro do tempo para serem finalizadas, isso considerando que não exista nenhum tempo de preparação entre elas, o que acarretaria maior duração.

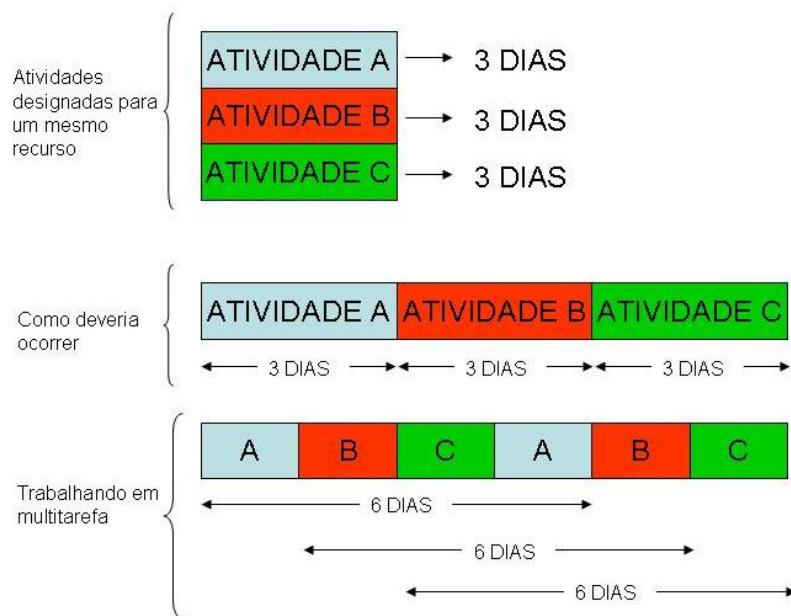


Figura 4.6 – Atraso causado pelo mecanismo Multitarefa. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004)

O fenômeno da Lei de Parkinson é uma das razões da metodologia da Corrente Crítica eliminar os marcos de entrega. O que realmente importa na corrente crítica é a data final do projeto (BARCAUI E QUELHAS, 2004). Todos devem reconhecer de que o que deve ser seguido é a data de entrega do projeto, e as programações indicam as durações estimadas, ao invés de compromissos, pois se acharem que serão culpados por atrasos nas tarefas individuais, serão estimulados a aumentar a contingencia nas mesmas (STEYN, 2000).

O procedimento apresentado no trabalho de Barcaui e Quelhas (2004) para aplicar a corrente crítica segue o roteiro abaixo:

1. Identificar o gargalo e criar a rede, reduzindo o tempo estimado para as atividades em 50% e posicioná-las para sua data mais tarde de início, considerando as dependências da rede. Normalmente este resultado mostra uma estimativa baseada na média da duração de uma tarefa ao invés de uma estimativa com grandes margens de segurança.
2. Eliminar a contenção de recursos, modificando a sequência das tarefas
3. Definir o tamanho da corda: como regra prática, o autor define reduzir o lead time total  
*lead time* atual total pela metade, logo:  $\frac{2}{2}$  ;
4. Amarrar a corda no gargalo e no processo mais rápido do sistema, resolvendo desta forma o dilema de começar mais cedo ou mais tarde. Também reduz o dilema da multitarefa;
5. Proteger a corrente através do uso dos pulmões;

No exemplo abaixo (vide Figura 4.7) extraído de Barcaui e Quelhas (2004), contém o procedimento da corrente crítica e inserção de pulmões:

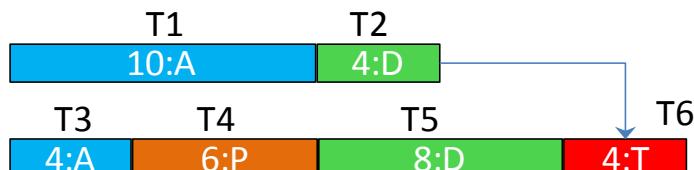


Figura 4.7 – Criação da rede com base nos tempos médios. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004)

Neste exemplo cada barra representa uma atividade, onde os números inscritos nas barras representam a duração e as letras representam os recursos. Por exemplo, a tarefa T1 possui uma duração igual a 10 dias e será processada pelo recurso A. Além disso, como pode ser visto existem duas sequências de tarefas para entrega do projeto, sendo: T1-T2-T6 e T3-T4-T5-T6 e neste caso o caminho crítico é determinado pela sequência mais longa que é T3-T4-T5-T6 com duração total igual a 22 dias. Também é possível analisar que existe uma folga de 4 dias na sequência T1-T2-T6.

Para aplicar o método da corrente crítica o primeiro passo é reduzir as tarefas em 50% do tempo e iniciá-las o mais tarde possível, conforme pode ser visto abaixo (Figura 4.8):



Figura 4.8 – Aplicando o primeiro passo do método da corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004)

É possível verificar que neste exemplo todas as tarefas tornaram-se críticas (sem nenhuma folga). No entanto, ainda existem restrições de recursos, no caso o recurso D precisa processar as tarefas T2 e T5 em paralelo. Como esta prática induz ao mecanismo da Multitarefa, cabe aplicar o próximo passo do método da corrente crítica conforme pode ser visto na Figura 4.9:

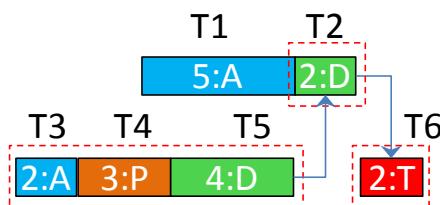


Figura 4.9 – Eliminação das restrições de recursos e identificação da corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004)

Como pode ser observado, as tarefas que utilizavam o mesmo recurso D (representadas na cor verde) não poderiam trabalhar em paralelo. Resolvendo a restrição deste recurso, colocaram-se as tarefas críticas para iniciar antes das tarefas não críticas obtendo-se a corrente crítica (tarefas tracejadas), que é o maior caminho da rede considerando as precedências e restrições de recursos.

Para finalizar, resta aplicar os conceitos vistos sobre pulmões de tempo na rede de tarefas, conforme Figura 4.10:

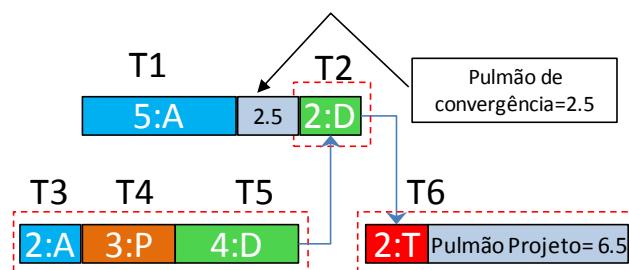


Figura 4.10 – Inserção dos pulmões de proteção na corrente crítica. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas(2004)

Como foram eliminadas as seguranças da rede inicial (ver Figura 4.7) em 50% o equivalente a **metade deste valor** será colocado ao fim do projeto, considerando o remanejamento das atividades devido ao recurso concorrente. Neste caso o tempo de segurança eliminado foi de 13 dias, portanto o pulmão de projeto será de 6,5 dias. Para o

cálculo do pulmão de convergência pode-se utilizar a mesma lógica, neste caso a segurança retirada da tarefa T1 foi de 5 dias, logo o pulmão de convergência será igual a 2,5 dias.

A seguir será apresentada a descrição de cada tipo de pulmão aplicável a corrente crítica, bem como uma breve referência a diferentes cálculos dos pulmões.

#### **4.4 Pulmões: as Proteções para a Corrente Crítica**

Conforme citado anteriormente, o gargalo é um recurso cuja capacidade não é suficiente para produzir as quantidades que o mercado demanda, impedindo a empresa de ganhar mais dinheiro e sabendo que logo após reduzir o *lead time* em 50%, os projetos ficarão bem mais vulneráveis, será necessária a utilização de pulmões para evitar as incertezas decorrentes de todos os projetos.

Para complementar as informações acerca do roteiro para aplicação da corrente crítica, Goldratt (1998) apresenta as seguintes definições de pulmão:

**Pulmão de projeto:** a segurança é colocada no final da corrente crítica para proteger a data de conclusão. Como o tempo alocado para cada atividade é reduzido em 50%, a metade da soma destes valores será colocada no pulmão de projeto.

**Pulmão de convergência:** são pulmões de tempo colocados nos pontos em que outros caminhos não críticos se juntam ao caminho crítico. Estes pulmões de tempo protegem o caminho crítico de atrasos ocorridos no caminho não-crítico e no caso de tudo correr bem, permite que a corrente crítica possa ser iniciada antes (HERROELEN, 2001). O tempo dado para os pulmões de convergência são metade do tempo estimado para as etapas não críticas.

**Pulmão de recurso:** visa assegurar que um determinado recurso estará disponível para ser utilizado no momento planejado. Geralmente não há adição de tempo, sendo utilizados como alertas prévios e posicionados entre os recursos.

**Pulmão de capacidade:** utilizado em múltiplos projetos para garantir que os recursos estratégicos estejam disponíveis. Esse pulmão tem o tamanho proporcional ao tamanho da atividade do recurso restritivo (tambor), e seu objetivo é o sequenciamento das tarefas com a devida proteção entre o fim do projeto anterior e o início do próximo.

Os métodos para cálculo do pulmão são derivados da teoria original de Goldratt, que muitos autores denominam “método cortar e colar”, no entanto este método sofre pela simplificação excessiva e deveria ser utilizado com cautela (HERROELEN, 2001).

Tukel *et al.* (2006) considera também que o método cortar e colar tem como principal vantagem a simplicidade na execução, no entanto, o autor enfatiza que o tamanho do pulmão aumenta linearmente. Como exemplo, é possível encontrar um projeto de dois anos com um pulmão de um ano, gerando uma grande quantidade de proteção, muitas vezes desnecessária.

Como o dimensionamento do pulmão reflete na duração total do projeto, podendo criar novas restrições de recursos, devendo ser maior em casos de lançamento de novos produtos e menor no caso de projetos rotineiros, onde a incerteza é menor. Abaixo, diferentes métodos de cálculo de pulmões são brevemente apresentados:

**RSEM (root-square-error-method):** o método da raiz quadrada do erro requer duas estimativas de tempo para a tarefa, uma com tempo de segurança (S) e a outra sem proteção (A). Com estes dois valores, é calculada a magnitude da variabilidade da tarefa,  $D = S - A$ . O tamanho do pulmão necessário é igual a raiz quadrada da soma dos quadrados da variabilidade D de cada atividade individual. Esta técnica é mais elaborada que o cortar e colar, no entanto, em alguns projetos mais longos o pulmão é subdimensionado. Pode ser utilizado para calcular os pulmões de convergência e de projeto.

**APD (Adaptive procedure with Density):** o procedimento adaptativo com densidade é apresentado por Tukel *et al.* (2006) e a proposta deste método indica que redes possuindo um grande número de relações de precedência tendem a ter maiores chances de atraso, portanto implicando em um pulmão maior. Tukel *et al.* (2006) apresenta este procedimento para o cálculo do pulmão de convergência.

**APRT (Adaptive procedure with resource tightness):** no procedimento adaptativo com ajuste do recurso, o tamanho dos pulmões é baseado no uso médio dos recursos pelas atividades da corrente crítica. Tukel *et al.* (2006) apresenta este procedimento para o cálculo do pulmão de convergência.

Em seu artigo, Tukel *et al.* (2006) faz uma comparação destes métodos apresentados através de simulação. Os indicadores avaliados foram: a probabilidade de atender o prazo planejado e a duração dos tempos de conclusão planejada. Os dois métodos

adaptativos apresentaram resultados semelhantes, apesar de que o APT gerou pulmões menores e obteve altas chances de exceder as datas de entrega. No método tradicional (Cortar e colar) foram verificados pulmões maiores do que nos demais métodos e tempos de conclusão planejada entre 17% e 25% maiores do que os demais, o que pode ser algo preocupante no caso de projetos com duração longa.

Geralmente, o RSEM calcula um pulmão relativamente maior para projetos com menor duração das tarefas e menor pulmão para projetos com maior duração das tarefas, quando comparado com o método cortar e colar.

Tukel *et al.* (2006) cita que o dimensionamento dos pulmões tem grande impacto na programação do projeto, podendo criar novas contenções de recursos, bem como alterar o caminho mais longo da rede. Enfatiza ainda que a determinação do pulmão em ambientes de novos produtos deve ser melhor avaliada devido ao grau de incerteza envolvido na fase de desenvolvimento.

Em geral, os pulmões são calculados com o método de cortar e colar ou com o RSEM. É utilizado o valor que produzir um pulmão mais robusto (BARCAUI E QUELHAS, 2004). Entende-se como pulmão mais robusto aquele que se adapte melhor ao ambiente estudado.

O autor Newbold (1998) *apud* Tukel *et al.* (2006) argumenta que na prática não é necessário definir o tamanho do pulmão ideal, e sim verificar se o tamanho é bom o suficiente e que pode ser ajustado de acordo com o conhecimento do risco.

Tomando como base o fato de que a proteção inserida na corrente crítica colabora para o projeto ser entregue no prazo, deve-se lembrar de que o projeto possui um *lead time* menor do que a sequência elaborada inicialmente. Para garantir que o projeto seja entregue no prazo, o controle e monitoramento dos pulmões se faz necessário.

Em sua dissertação, Campanini (2008) cita que este controle é realizado através de gráficos que refletem todo o tempo de atraso nas atividades. Estes atrasos vão consumindo um percentual do pulmão conforme a evolução do projeto. Para evitar atrasos é necessário acompanhar os pulmões periodicamente, focando o trabalho nos projetos com pulmão consumido, minimizando o risco de destinar esforços a tarefas desnecessárias ou não tão críticas. Abaixo na Figura 4.11 segue um exemplo do monitoramento através do gráfico de controle do pulmão.

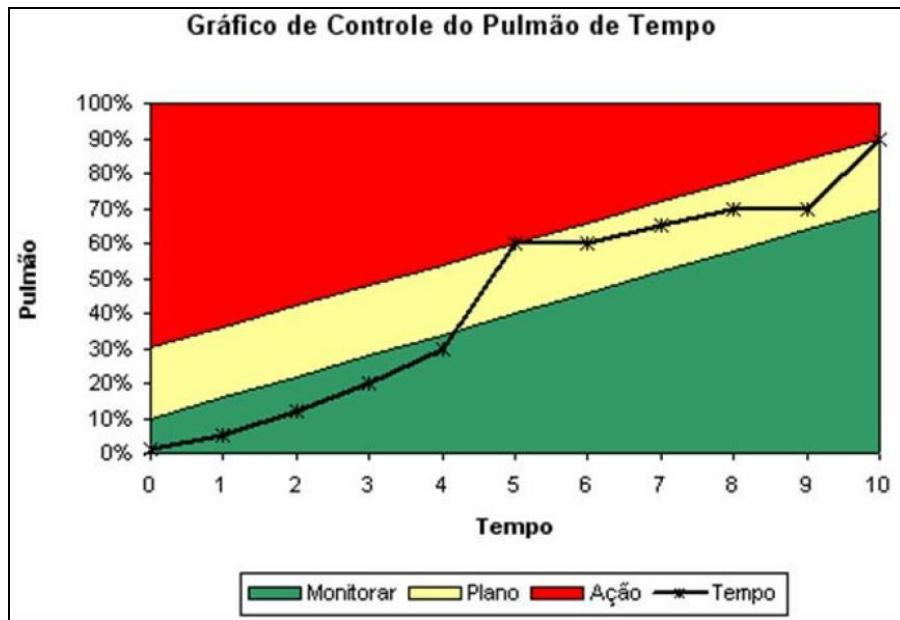


Figura 4.11 – Gráfico de controle dos Pulmões. Fonte: Campanini(2008)

Neste gráfico a abscissa representa o tempo do gráfico e a ordenada representa os percentuais consumidos da reserva de tempo do pulmão. Como cada projeto tem um *lead time* diferenciado, as marcações na abscissa devem refletir esta duração. No caso de um projeto possuir 10 meses, cada unidade da linha do tempo representará um mês.

Pode-se constatar que o gráfico é composto de três faixas que indicam diferentes procedimentos:

**Verde:** na atualização do consumo do pulmão, se a porcentagem consumida estiver nesta faixa, não deve ser feito nada, apenas continuar o monitoramento;

**Amarela:** se o consumo do pulmão estiver nessa faixa, um plano deverá ser elaborado, mas não aplicado;

**Vermelha:** se durante uma atualização o consumo do pulmão residir na faixa vermelha, o plano elaborado deverá ser colocado em prática.

No exemplo acima, considerando os períodos de tempo 1, 2, 3 e 4, pode ser verificado um atraso. Mesmo assim, o atraso ocorrido até o momento 4 não remete a nenhuma ação, apenas continuar o monitoramento. Se após a próxima atualização, o gráfico ficar localizado na linha amarela, algum plano deverá ser elaborado (no gráfico os pontos referentes a 5, 6, 7, 8 e 9), sendo que, este plano só será posto em prática se o ponto atingir a faixa vermelha do gráfico. O plano deverá ser seguido até que o consumo do pulmão saia da faixa vermelha.

Neste exemplo ocorreram atrasos nas atividades, consumindo 90% do pulmão conforme monitoramento no momento 10. No entanto, o projeto foi entregue no prazo, pois o pulmão não foi totalmente consumido.

Espera-se que o tempo dos pulmões seja consumido e também recuperado, conforme as tarefas vão terminando mais cedo ou mais tarde do que determinado. O plano de recuperação pode ser composto por horas extras, alocação adicional de recursos, modificação das prioridades, *fast-tracking*<sup>7</sup>, entre outros (BARCAUI E QUELHAS, 2004).

A seguir, será descrito com mais detalhes a maneira como a corrente crítica lida com múltiplos projetos.

#### 4.5 Múltiplos Projetos na Corrente Crítica.

Se o impacto da multitarefa em projetos únicos é importante, no caso de múltiplos projetos o impacto é desastroso (LEACH, 1999). Devido ao fato dos gerentes de projeto estabelecerem prioridades diferenciadas, muitos projetos são iniciados em paralelo causando muitos problemas na fábrica.

O objetivo paira em garantir de maneira eficiente que todos os projetos sejam entregues no prazo, evitando a ânsia de iniciar outros projetos, devido ao fato de que grande parte das organizações não reflete cuidadosamente sobre sua capacidade real (QUELHAS E BARCAUI, 2004). Neste contexto, muitos projetos acabam atrasando, ocorrem custos desnecessários em atividades apressadas que muitas vezes ficarão paradas a frente do próximo recurso devido a sua indisponibilidade.

Como mostrado anteriormente, em um único projeto a corrente crítica é determinada pelo caminho crítico, considerando as restrições de recursos. No entanto, no caso de múltiplos projetos, é necessário identificar o recurso com restrição de capacidade (tambor). Todos os recursos antes do tambor devem ter capacidade excedente para garantir que nunca falte trabalho. Os recursos que vem depois do tambor, devem ter maior capacidade para minimizar as flutuações das saídas.

---

<sup>7</sup> *Fast-tracking* significa fazer mais atividades ao mesmo tempo para finalizar uma tarefa mais rápido do que o normal. Modifica a tarefa de forma que possa ser feitas tarefas em paralelo.

Conforme Steyn (2002) o problema de múltiplos projetos em alocar recursos para projetos concorrentes é um problema já visto na literatura, semelhante ao problema de programar *Job Shops* onde múltiplos trabalhos são direcionados para uma fábrica com um número escasso de recursos. Deve haver sincronismo para que sejam tomadas decisões de maneira consciente relacionadas ao momento em que um determinado projeto deve iniciar.

Barcaui e Quelhas (2004) citam que o uso do método dos cinco passos da Teoria das Restrições pode ser aplicado nestes tipos de ambiente. Herroelen (2001) também cita os cinco passos da TOC, aplicados nos ambientes de multiprojetos:

- Todos os projetos da organização devem ser priorizados individualmente. Neste passo, ataca os problemas referentes a mecanismo da multitarefa;
- Planejar os projetos individualmente de acordo com o método da corrente crítica, acrescentando os pulmões de convergência e de projeto;
- Sequenciar as atividades de todos os projetos, considerando o recurso estratégico (gargalo) e protegendo-o com o pulmão de capacidade;
- Medir e apresentar os pulmões;
- Gerenciar o consumo dos pulmões.

A crítica de Herroelen (2001) sobre este método reside no fato de que não existe nenhuma garantia que a corrente crítica dos projetos individuais continuará a mesma, devido a dinamicidade do conjunto de projetos ocorrendo simultaneamente. O autor critica que após a mudança na sequência das atividades após a inserção do pulmão de capacidade é possível que a corrente crítica de cada projeto se altere.

Para Barcaui e Quelhas (2004) a solução do método da Corrente Crítica para o conflito de recursos é simples, e começa (assim como a maioria das soluções baseadas na TOC) com o uso do que pode ser chamado de “puro bom senso”. Ou seja, é necessário que a organização saiba priorizar sua carga de trabalho por projeto, já que o que limita a efetividade dos recursos é o planejamento descoordenado das tarefas que são mal sincronizadas e o fenômeno da multitarefa, apresentado anteriormente. Para exemplificar o procedimento da corrente crítica para múltiplos projetos, segue abaixo a Figura 4.12:

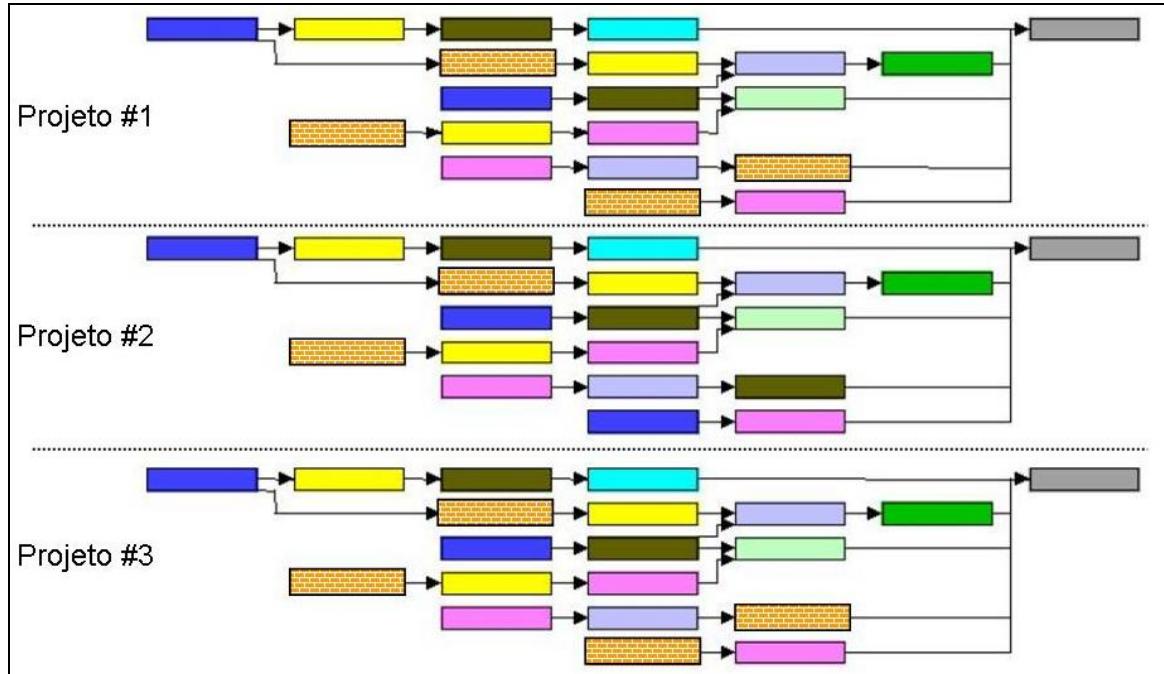


Figura 4.12 – Exemplo de multiprojetos. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004)

Neste exemplo o recurso com restrição de capacidade está destacado por tijolos nos três projetos e as demais cores representam os recursos restantes. Como foi apresentado anteriormente, uma vez reconhecido o recurso gargalo, faz-se necessário a reprogramação das tarefas baseadas na restrição do recurso. Para isso, será necessário programar o recurso gargalo em uma sequência lógica, conforme Figura 4.13 abaixo:

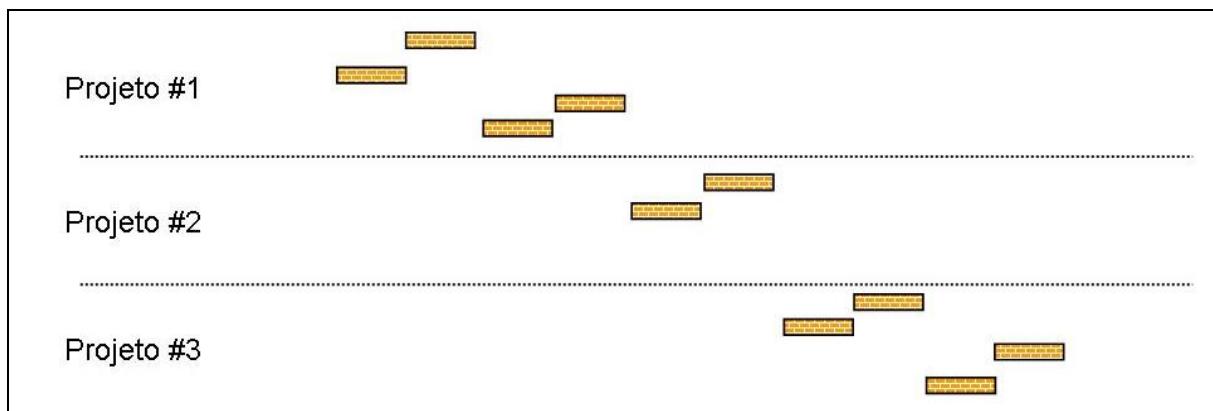


Figura 4.13 – Programação do recurso gargalo. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004)

O autor indica o uso do pulmão de capacidade conforme apresentado na Figura 4.14. Estes pulmões são utilizados para evitar possíveis atrasos entre projetos e possuem o tamanho proporcional ao tamanho da atividade do recurso restritivo. Conforme visto em Barcaui e Quelhas (2004) e Cohen *et al.* (2004) não há um método padrão para dimensionar este pulmão. No trabalho de Cohen *et al.* (2004) foi utilizado um pulmão de capacidade igual a 50% do tempo da atividade gargalo.

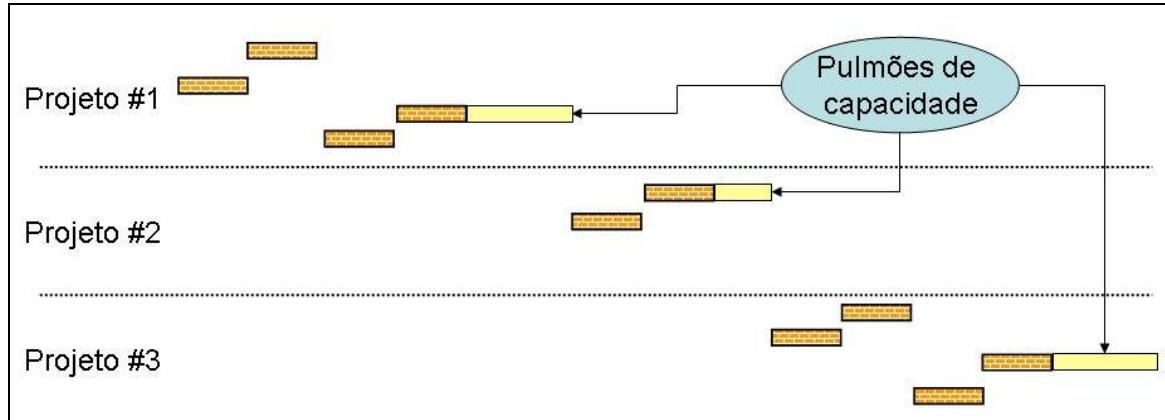


Figura 4.14 –Pulmões de capacidade. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004)

Abaixo na Figura 4.15 pode ser constatado o uso do pulmão de capacidade entre dois projetos.

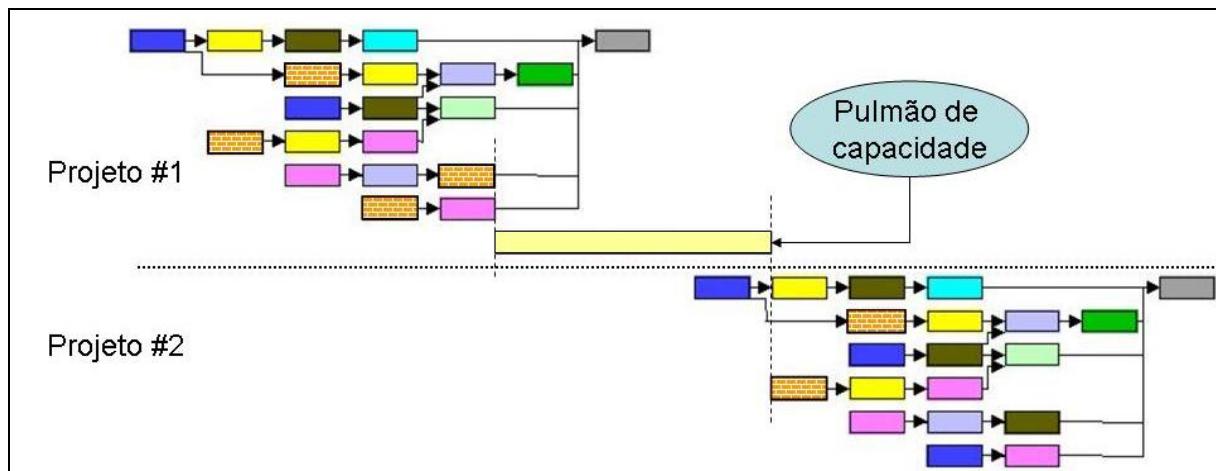


Figura 4.15 –Projetos sequenciados pelo Pulmão de capacidade. Fonte: Adaptado de Barcaui e Quelhas (2004)

Contrariamente ao apresentado acima sobre múltiplos projetos, Trietsch (2005) cita que a criação de uma tarefa como pulmão de capacidade acaba sendo supérflua, pelo fato de que este pulmão seria criado por si só através de um tempo de fila adicional. Ainda, aborda que realizar antecipadamente a programação destes recursos nem sempre é necessária.

Segundo Steyn (2002), uma das deficiências encontradas no método da corrente crítica para múltiplos projetos é que a remoção da restrição de recursos só é possível para projetos únicos. O autor faz menção ainda a grandes projetos que podem muitas vezes ser considerados como multiprojetos, pois são compostos de um número de pequenos sub-projetos que devem ser programados como correntes críticas separadas, devem dividir os recursos escassos e são executados simultaneamente.

Herroelen e Leus (2001), ao apresentar os resultados da simulação computacional aplicada em seu trabalho, identificaram a oportunidade de ganho de tempo no

projeto no caso em que o plano fosse recalculado regularmente, após o término de tarefas críticas ou quando os pulmões de convergências fossem consumidos.

Os resultados mostraram que as estimativas de término se tornaram mais precisas e o cronograma foi cumprido em menor tempo. No entanto, deve haver o bom senso no momento de reprogramar o cronograma, pois mudanças constantes alteram o foco no que é importante e pode ser desmotivador para todo o grupo de trabalho.

Trietsch (2005) também acredita que um passo adicional na teoria da corrente crítica deveria ser dado com relação à atualização do cronograma sempre que os caminhos críticos mudassem ou caso o consumo dos pulmões tiver sido muito maior ou menor do que o esperado. A partir daí, deve verificar as restrições mais amenas e avaliar se precisam ser tratadas com maior rigor.

Importante salientar que a metodologia da TOC e da Corrente Crítica provê aos gerentes uma ferramenta simples para monitorar a condição do projeto através do controle dos pulmões de tempo (COHEN *et al.* 2004). A simplicidade do método para muitos autores, entre eles Herroelen (2001), é tida como um problema, principalmente no que tange as reprogramações e a regra dos 50% para determinar o tamanho do pulmão, sendo este muitas vezes subestimado. No entanto, este método pode colaborar na iniciativa de adoção por parte das empresas que fazem uso dos métodos tradicionais de controle em seus projetos.

## 5 SIMULAÇÃO

Cada vez mais as empresas buscam por soluções que tragam respostas rápidas e precisas para atingir às suas necessidades e as do mercado. Como a competitividade tem se tornado dia-a-dia mais acirrada, torna-se importante mover-se em direção ao uso de ferramentas de tomada de decisão mais sofisticadas.

Uma ferramenta que vem sendo empregada comumente é a simulação, que pode ser utilizada para verificar questões intrínsecas aos sistemas de manuseio de material, ao planejamento de capacidade, a utilização de mão-de-obra, a investimento em novos equipamentos, etc.

Segundo Pereira (2000) a simulação visa representar um sistema real através de um modelo, utilizando o computador. Proporciona a facilidade da visualização do sistema real permitindo que mudanças sejam feitas e perguntas do tipo “o que aconteceria se” (*what-if*) sejam respondidas. A simulação, apesar de não garantir uma solução ótima, garante que o modelo projetado seja muito semelhante a realidade (BADRI, 1999)

Cabe ressaltar que a simulação não é uma teoria e sim uma metodologia para implementar e analisar um procedimento real, proposto em um computador de maneira virtual ou em protótipos (LAW E KELTON, 1991). Permite, de acordo com Pereira (2000), que sejam feitos estudos detalhados sobre a situação passada, presente e futura, sem que haja a modificação física do sistema.

Conforme Taha (2008) a simulação é o segundo melhor procedimento depois da observação de um sistema real. Trata de uma imitação computadorizada do comportamento aleatório de um sistema com a finalidade de estimar suas medidas de desempenho. A tarefa de utilizar simulação começa com o desenvolvimento da lógica do modelo computacional de um modo que permitirá coletar os dados necessários. Indica ainda a existência de várias linguagens computacionais disponíveis para facilitar os cálculos. A modelagem por simulação lida com um experimento estatístico cujo resultado deve ser interpretado por testes estatísticos adequados.

De acordo com Taha (2008) existem dois tipos distintos de modelos de simulação.

1. Modelos contínuos: tratam de sistemas cujo comportamento muda continuamente ao longo do tempo.

2. Modelos discretos: tratam primordialmente do estudo de filas de espera, com o objetivo de determinar medidas como o tempo médio de espera e o comprimento da fila. Essas medidas mudam somente quando um cliente entra ou sai do sistema. Os momentos em que mudanças acontecem ocorrem em pontos discretos do tempo (eventos de chegadas e partidas), o que dá origem ao nome simulação de eventos discretos.

O resultado da simulação é uma função de comprimento do período simulado. O período inicial produz comportamento errático e é usualmente denominado período transiente ou de aquecimento (*warm-up*) (TAHA, 2008).

Quando o resultado é estabilizado, o sistema funciona em estado de equilíbrio. No entanto, não há maneira de prever com antecedência o ponto inicial do estado de equilíbrio.

Algumas situações são indicadas para o uso da simulação, conforme cita Harrel *et al.* (2006):

- Se houver dificuldade em desenvolver um modelo matemático, ou mesmo se não houver possibilidade para isso;
- Sistemas com variáveis aleatórias;
- Quando a dinâmica do processo é complexa;
- Há necessidade de verificar o comportamento do sistema em um período específico;
- Quando a visualização do processo é importante.

Algumas vantagens do uso da simulação segundo Law e Kelton (1991):

- Melhor controle sobre condições experimentais do que no sistema real, pois várias replicações podem ser realizadas no modelo designando-se valores desejados para todos os parâmetros;
- Permite a replicação dos experimentos, garantindo o teste de diversas alternativas para o sistema;
- Pode ser aplicado a problemas mal estruturados;

- Permite simular longos períodos em um tempo reduzido;
- Testar no sistema real é mais dispendioso.

Banks(1998) apresenta algumas desvantagens:

- A construção de modelos requer treinamentos especiais devido a experiência em programação ser necessária;
- Os resultados de simulação às vezes são difíceis de interpretar, devido a origem dos dados de entrada serem aleatórias;
- Na modelagem e na fase de análise, pode haver consumo excessivo de tempo e dinheiro, onde os resultados podem ser insuficientes para a tomada de decisão;
- O uso da simulação quando uma solução analítica é passível de ser colocada em prática deve ser evitada.

Algumas entradas comuns para um modelo de simulação são as definições do produto, dados de demanda, relações entre recursos, calendários de trabalho, etc.

As saídas convencionais são: os tempos iniciais e finais para as tarefas no sistema, recursos utilizados, tamanho da fila de espera, trabalho em processo, etc.

## **5.1 Linguagens de Simulação**

O uso do computador é essencial para executar modelos de simulação. Isso se deve aos cálculos envolvidos:

- manipulações de arquivo que lidam com a armazenagem e o processamento cronológicos dos eventos do modelo;
- cálculos aritméticos e de contabilização associados à geração de amostras aleatórias e coleta das estatísticas do modelo

Segundo Taha (2008) a necessidade do desenvolvimento de linguagens computacionais específicas para simulação se deve a eficiência na execução destes cálculos, que muitas vezes são demorados e tediosos.

As linguagens de simulação discreta disponíveis são enquadradas em duas categorias amplas:

1. Programação de eventos: o papel principal da linguagem é a automação da amostragem com base nas distribuições; armazenagem e recuperação de eventos em ordem cronológica; e a coleta das estatísticas do modelo.

2. Orientadas para processo: usam blocos ou nós que podem ser ligados uns aos outros para formar uma rede que descreve os movimentos de transações ou entidades no sistema. Cada um desses blocos/nós é definido com todas as informações necessárias para ativar a simulação automaticamente. Por exemplo, uma vez especificado o intervalo de tempo entre chegadas para a fonte, uma linguagem orientada para processo ‘sabe’ automaticamente quando os eventos de chegada ocorrerão. Na realidade, cada bloco/nó do modelo tem instruções permanentes que definem como e quando as transações são movimentadas na rede de simulação.

Linguagens orientadas para processo são ativadas internamente pelas mesmas ações utilizadas em linguagens de programação de eventos. A diferença é que essas ações são automatizadas para auxiliar os usuários com os detalhes lógicos e de cálculos.

Hoje, existem vários pacotes comerciais modernos, entre os quais alguns podem ser mencionados: Arena, AweSim e GPSS/H. Esses pacotes utilizam extensivas interfaces ao usuário para simplificar o processo de criação de um modelo de simulação. Também fornecem recursos de animação que permitem a observação visual das mudanças no sistema.

Neste trabalho é utilizado o software *Simio* para elaborar um modelo de simulação de eventos discretos. Este Simulador possui a vantagem de ter a modelagem orientada a objeto além de ser preparado para trabalhar em 3D (três dimensões).

## **5.2 Principais Etapas do Processo de Simulação**

As principais etapas de um processo de simulação podem ser apresentadas conforme Figura 5.1, elaborada por Freitas (2001):

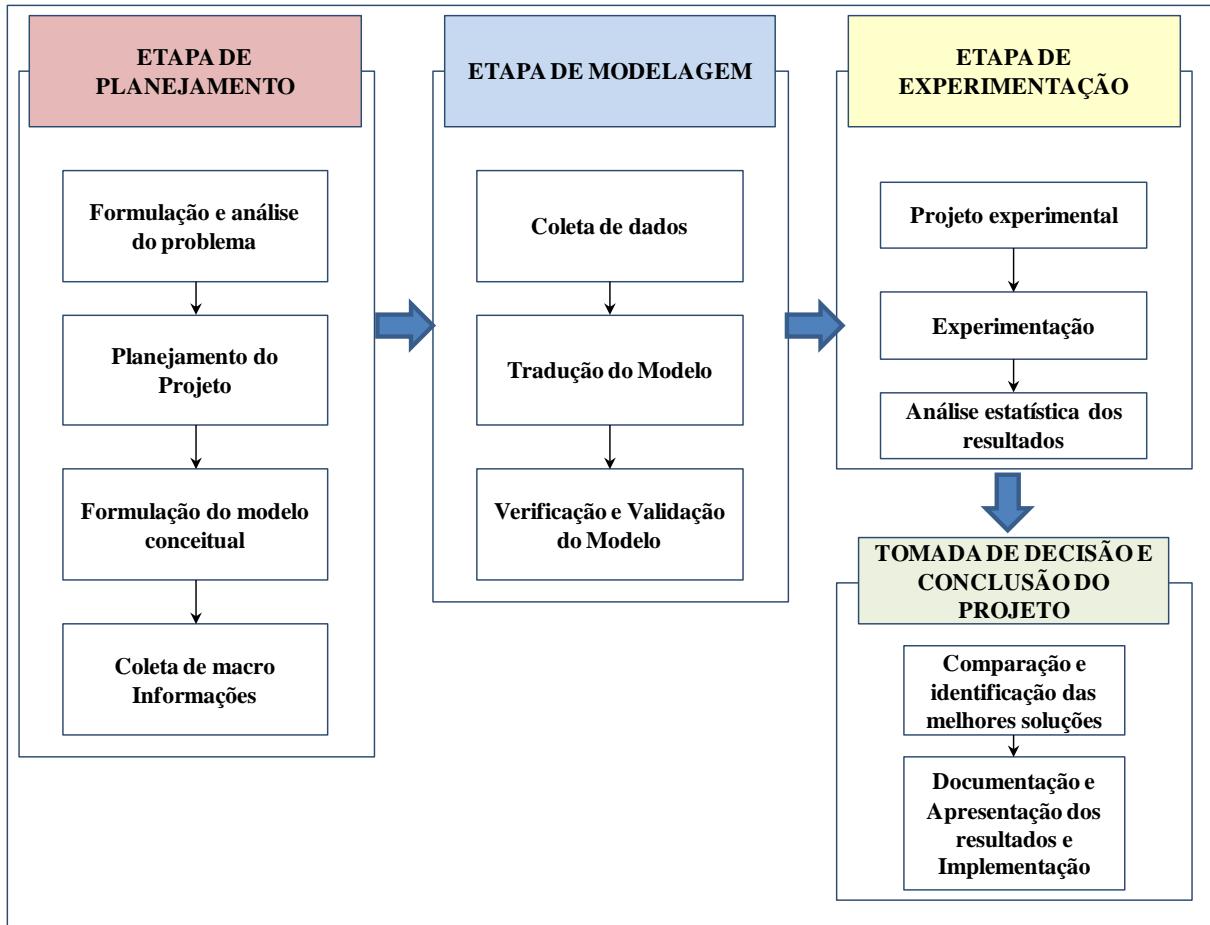


Figura 5.1 – Etapas do processo de Simulação. Fonte: Freitas (2001)

Na sequência são apresentadas com maiores detalhes estas etapas, seguindo a abordagem de Freitas (2001) e Pedgen *et al.* (1995):

### **Etapa 1:** Formulação e Análise do Problema

Primeiramente é realizada a definição do problema que será estudado, apresentando os propósitos e objetivos do estudo. Essa formulação poderá ser atualizada quando se souber mais a respeito do sistema.

Pedgen *et al.* (1995) complementa indicando que esta fase consiste na clara definição dos objetivos do estudo proposto, ou seja, por que o problema está sendo estudado e quais questões serão respondidas.

### **Etapa 2:** Planejamento do Projeto

É importante ter certeza que o método adequado para alcançar o objetivo do trabalho é a simulação. Deve-se considerar as especificação dos cenários que serão abordados, bem como as pessoas, hardware, sistemas envolvidos, custos e prazos, ou seja, todas as delimitações para a execução da simulação.

### **Etapa 3: Formulação do Modelo Conceitual**

É traçado um esboço do sistema de forma gráfica ou algorítmica, definindo componentes e descrevendo as variáveis e interações lógicas do sistema. Na maioria das vezes é executada a partir de um modelo preliminar (protótipo), que pode ser feito na forma de diagrama de blocos. Ao longo da elaboração do modelo, são acrescentados maiores detalhes até alcançar algo mais complexo que conteemple todas as suas características.

### **Etapa 4: Coleta de Macro-Informações e Dados**

Define macro-Informações como fatos, informações e estatísticas fundamentais, que surgem a partir de observações, experiências pessoais e de bancos de dados históricos. A coleta das macro-informações e dos dados é facilitada pela observação do modelo conceitual, pois com ele podem ser identificadas as entradas e saídas mais relevantes.

### **Etapa 5: Tradução do Modelo**

Nesta fase deve ser feita a codificação do modelo numa linguagem de simulação apropriada. Atualmente os esforços dessa etapa diminuíram devido aos avanços em hardwares e principalmente nos softwares de simulação. A escolha do software pode ser definida de modo que seja adequada ao propósito do modelo.

### **Etapa 6: Verificação e Validação**

Segundo Pedgen *et al.* (1995) a verificação trata-se da confirmação de que o modelo opera de acordo com o proposto e que as saídas do sistema são admissíveis e representam as saídas de um sistema real.

O processo de validação envolve verificar o comportamento do modelo quando se considera seus processos, por exemplo, envio de pedidos, produção, entregas ou qualquer outra situação específica e a situação real observada.

Dados inconsistentes ou não acurados podem levar a resultados errados que tiram à credibilidade do estudo, o que justifica a importância desta fase.

Portanto, esta etapa confirma se o modelo não tem erros de programação e lógica e se o modelo gera informações que satisfaçam aos objetivos estabelecidos no estudo.

### **Etapa 7: Projeto Experimental Final**

Um conjunto de experimentos que produza a informação desejada será projetado para determinar como cada um dos testes deverá ser realizado.

Relaciona-se à realização de um experimento que possibilita obter a informação desejada e determinar como as corridas de simulação para cada cenário serão executadas. Nesse momento não se desenvolve mais nada em relação ao modelo, sendo realizada a aplicação deste como parte integrante da análise para o suporte à decisão.

#### **Etapa 8:** Experimentação

Consiste na execução da simulação propriamente dita, gerando os dados necessários e realizando a análise de sensibilidade. São avaliadas a situação do modelo e as condições futuras do sistema. Análises do tipo *what if* são avaliadas antes que a decisão ocorra de fato e seja implementada.

#### **Etapa 9:** Interpretação e Análise Estatística dos Resultados

São feitas as inferências a partir dos dados gerados na simulação. Com base nos indicadores gerados pelo modelo, os resultados são analisados e os cenários são comparados a fim de identificar a melhor alternativa. Neste momento será avaliado o período de *warm-up*, o período simulado e o número de replicações.

#### **Etapa 10:** Comparação de Sistemas e Identificação das melhores soluções

As alternativas são comparadas entre os cenários existentes visando identificar a melhor ou a mais adequada.

#### **Etapa 11:** Documentação

Para cada cenário testado os dados devem ser organizados e documentados de maneira cuidadosa. A documentação do modelo é necessária para evitar perda de informações quando o modelo tiver que ser estudado ou modificado.

#### **Etapa 12:** Apresentação dos Resultados e Implementação

A última etapa exibe os resultados do estudo de simulação. Após a apresentação, o modelo geralmente é implementado.

## **6 PROPOSTA DO USO DA CORRENTE CRÍTICA POR MEIO DA SIMULAÇÃO PARA O AUXÍLIO NO PROCESSO DE PLANEJAMENTO DA CAPACIDADE**

Nesta parte do trabalho é descrito o processo de planejamento da capacidade, considerando as operações do chão de fábrica no estado atual, e a proposta de planejamento da capacidade, contextualizando as operações de chão de fábrica usando a corrente crítica. Em seguida, são apresentados três cenários de simulação da operação de chão de fábrica em uma fundição: um representa o estado atual, considerando as regras de operação baseadas no conhecimento dos especialistas de fundição, os outros dois cenários representam uma proposta de operação utilizando os princípios da corrente crítica e da TOC. A partir dos resultados apurados, os cenários são comparados, verificando o desempenho de cada um deles e avaliando como as decisões de alocação de capacidade podem ser tomadas através da simulação.

O software *Simio* foi utilizado para elaborar o modelo de simulação, tendo como vantagem a modelagem orientada a objeto além de ser preparado para trabalhar em três dimensões. Para todos cenários simulados, os indicadores de desempenho avaliados são a quantidade de peças expedidas, o *lead time* de cada família de peças, a quantidade de trabalho em processo (WIP), o atendimento aos prazos, percentual médio de atraso. Além destes indicadores, é feita uma análise do tempo médio de espera na fila do recurso gargalo, o uso de horas extras e a utilização de mão-de-obra em cada centro de trabalho. No caso dos cenários utilizando a corrente crítica, é avaliado também o consumo do pulmão.

Neste trabalho a corrente crítica é utilizada como ferramenta de apoio a decisão gerencial frente às restrições de capacidade, baseando-se no controle dos pulmões e no uso de horas extras como alternativa de curto prazo para implementação da capacidade. O aumento/redução da capacidade através de contratação/ demissão não foi simulado, devido às limitações do modelo, que entre outros fatores, não avalia os custos envolvidos com esta prática, o que dificulta a análise da melhor técnica, ou seja, a de menor custo. No entanto, os resultados gerados pela simulação indicam onde as ações de implementação de capacidade poderiam ser tomadas.

### **6.1 Características do Sistema de Produção da Fundição**

Neste item, são apresentadas as características do sistema de produção da fundição estudada. Estas informações derivam da observação do ambiente, em conjunto ao estudo efetuado na revisão da literatura. A caracterização do sistema torna-se necessária para compreender melhor o ambiente estudado.

O objeto de estudo em questão trata de uma fundição de grande porte, que apresenta as características de fundições cativas e de fundições de mercado, pois produz para diversos clientes e também para seu próprio consumo, atendendo as demais unidades da corporação. É considerada de grande porte devido a quantidade de funcionários (600 pessoas) e ao peso individual das peças produzidas (peças de até 35 toneladas) (FERNANDES E LEITE, 2002).

Nesta fundição, a variedade de produtos é muito grande, aproximadamente 1.200 peças diferentes expedidas em média nos anos de 2010 a 2012. O volume de peças não é tão expressivo, sendo que, foram expedidas nos mesmos anos em torno de 9.000 peças. De acordo com a classificação de Groover (2001), a fundição se caracteriza como **média produção** ou como aborda Slack (2002) **médio volume**. Para este sistema de produção, o *Layout* de processo é comum.

A automação nesta fábrica pode ser vista no manuseio de materiais, através uso de pontes rolantes, empilhadeiras e máquinas de limpeza, com a participação do ser humano para operá-las. Todas as características citadas acima são típicas dos sistemas de manufatura *Job-shop*. Além disso, conforme classificação de Burbidge (1990), o sistema produtivo da fundição possui características de um sistema implosivo, que transforma uma pequena variedade de materiais em uma grande diversidade de produtos.

Na Figura 6.1 é mostrado um fluxograma básico do processo de fundição, onde são apresentadas as operações mais representativas durante o processo fabril, e que são aplicáveis a toda a fábrica:

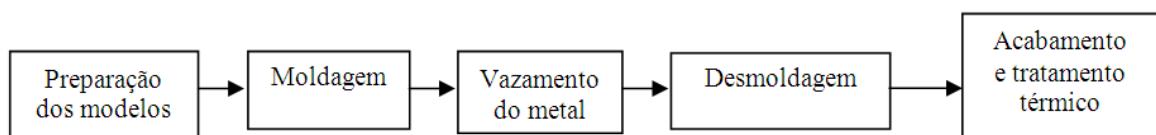


Figura 6.1 - Fluxograma processo de fundição. Fonte: Elaboração própria, baseado nas etapas fabris da fundição objeto de estudo

No processo de fundição podem ser verificadas muitas variações em relação ao *lead time*. Como pode ser verificado na Tabela 6.1, não existe relação direta entre o peso das peças e o *lead time*. Os fatores que determinam o *lead time* são os tipos de materiais, os tipos

de processo e a quantidade de operações envolvidas no processo fabril. Algumas peças passam por mais operações do que outras, como por exemplo: tratamento térmico, usinagem, pintura, entre outros.

Item	Tipo de Peça	Segmento de mercado	Lead time	Peso médio(kg)
1	Camisa de moenda	Açúcar e etanol	15 dias	14.000
2	Bagaceira	Açúcar e etanol	5 dias	800
3	Rodete de Moenda	Açúcar e etanol	40 dias	1.800
4	Pá de Rotor Kaplan	Hidrogeração	90 dias	14.000
5	Cubo de Rotor Kaplan	Hidrogeração	100 dias	28.000

Tabela 6.1 – Relação peso e *Lead time* por tipo de peça na fundição estudada. Fonte: Elaboração própria.

É visível a grande diferença de *lead times* das peças. O primeiro item considera uma peça fabricada na célula produtiva de Camisa, os itens 2 e 3 são da célula produtiva de fundidos Leves, e os itens 4 e 5 são da célula produtiva de fundidos Pesados.

Na Figura 6.2 são representadas as diversas células da fundição, entre elas a Fundição Leve, Fundição Repetitiva, Camisas de Moenda e Fundição Pesada:

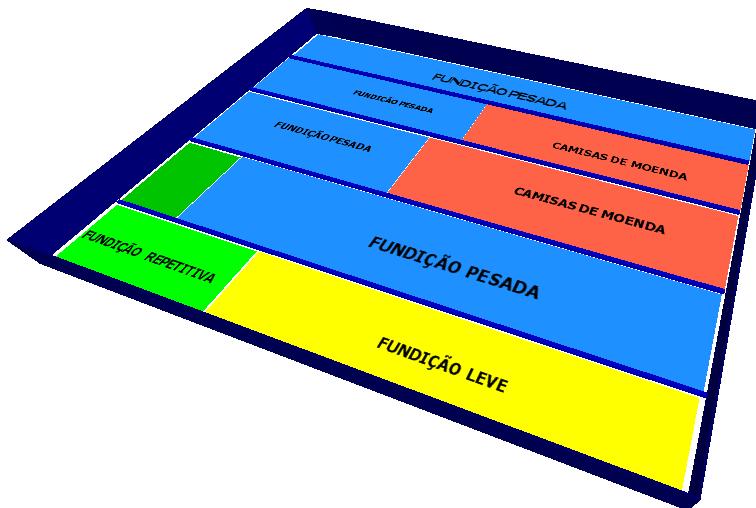


Figura 6.2 – Esquema do *Layout* da fundição estudada mostrando as divisões de células. Fonte: Elaboração própria

A maior parte das peças fabricadas na fundição estudada são tratadas como projetos, devido aos longos *lead times* e a interação constante com o cliente, que acompanha o desenvolvimento das peças desde o início da fabricação até a entrega.

Nesta fundição adotam-se as seguintes estratégias de atendimento a demanda:

– **Make-to-order (MTO):** Nesta estratégia os fundidos só serão fabricados após a venda estiver concluída. Os modelos de moldação e projetos de fundição já são existentes. Estes são casos em que as peças são fabricadas com certa freqüência. Representam em torno de 40% da produção.

– **Engineering-to-order (ETO):** Nesta estratégia o que muda é que a fundição recebe novos pedidos para só então efetuar o projeto e emitir compra do modelo. Inicialmente, são casos de peças novas, nunca antes fabricadas, mas que podem tornar-se pedidos freqüentes e entrar na categoria MTO. Representam os outros 60% da produção.

Em ambos os casos, MTO e ETO, os insumos que são comuns a todas as peças são comprados previamente, sendo estes: areia, insumos de metal, sucata, etc. O estoque destes insumos deve ser mantido em um nível mínimo para atendimento da demanda, de modo que nunca faltem.

Neste trabalho será evidenciado apenas um recorte de toda a fábrica, a célula de fundidos de grande porte, que foi escolhida por representar o maior volume de horas trabalhadas e por possuírem como característica a utilização de centros de trabalho que não concorrem com as demais células.

## 6.2 Etapas do Processo de Fundição

As etapas descritas a seguir se referem ao fluxo de operação realizada atualmente pelo chão de fábrica da fundição da célula de fundidos de grande porte. Neste setor foram selecionadas 24 famílias<sup>8</sup> de produtos baseado nos históricos de vendas dos últimos anos. Além disso, considerando as estratégias de atendimento a demanda, tomou-se como base que todos os recursos já estão à disposição, desconsiderando-se as fases de engenharia do produto e de suprimentos, mantendo assim o foco nos processos de produção.

Na Figura 6.3 é apresentado o fluxograma do processo de fundição da célula de fundidos de grande porte e em seguida a descrição de cada uma das principais atividades. Enfatiza-se que este fluxograma é utilizado para a elaboração do cenário simulado, para representar a situação atual da fabrica.

---

<sup>8</sup> Em uma mesma família existem diversos tipos de peças diferentes que possuem características semelhantes entre si. As peças foram separadas em família para facilitar o cálculo dos tempos de processo e reduzir o esforço computacional na simulação.

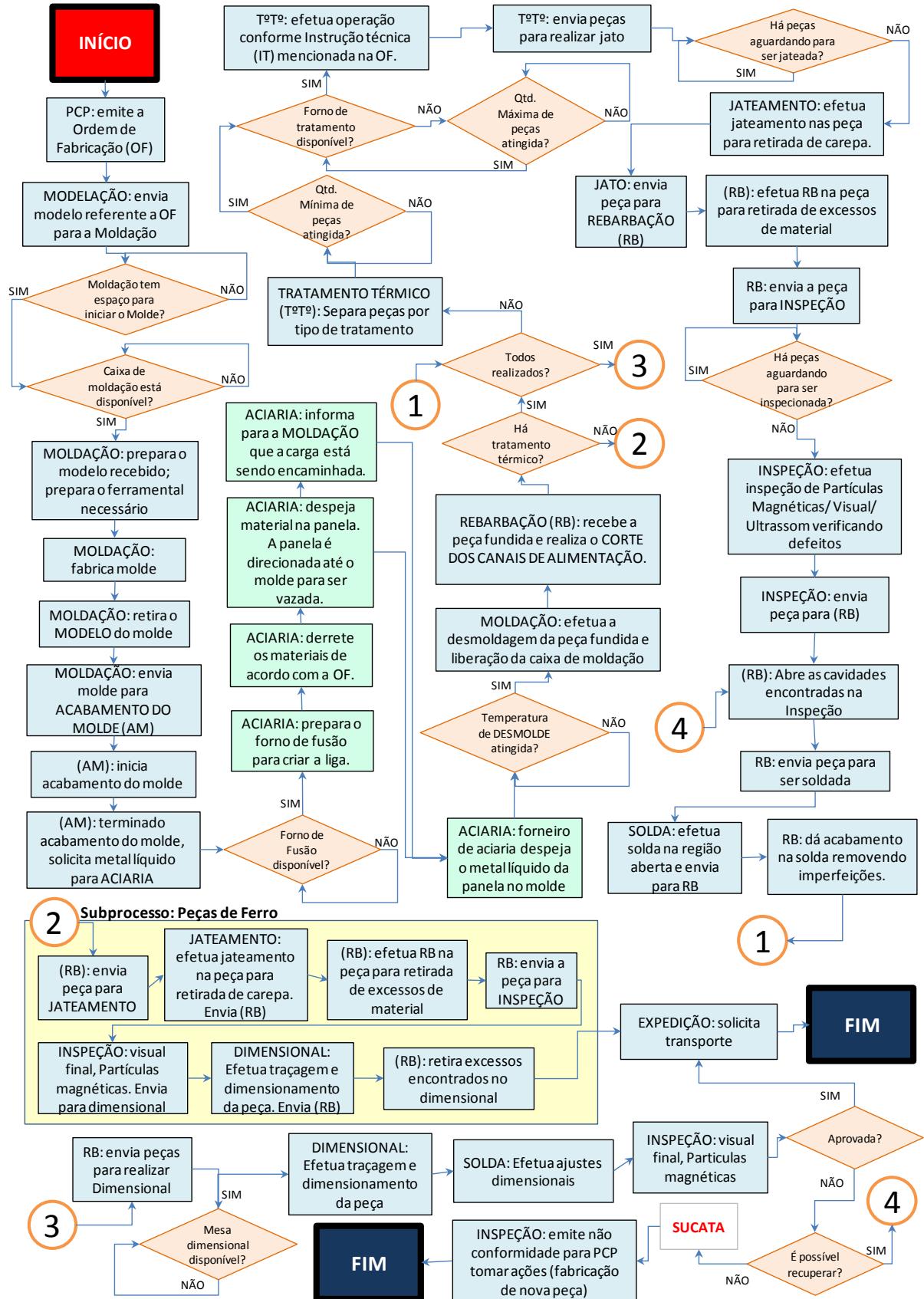


Figura 6.3 - Fluxograma processo de fundição detalhado. Fonte: Elaboração própria, baseado nas etapas fabris da fundição objeto de estudo

Abaixo, seguem as etapas e atividades desenvolvidas ao longo do processo produtivo em maiores detalhes:

**PCP:** emite a Ordem de Fabricação (OF), baseada nos requisitos apresentados pela engenharia e necessidades do cliente. Esta OF é enviada para o setor de Modelação;

**Modelação:** após recebimento da OF, a área de modelação inspeciona o modelo, baseado no projeto recebido da engenharia industrial. Liberado o modelo pelo departamento de modelação, o mesmo segue para a área de Moldação, de acordo com a data de liberação indicada pelo PCP na ordem de fabricação;

**Moldação:** onde o processo de confecção do molde será realizado de acordo com a programação elaborada pelo PCP, que fornece informações de início e fim de cada peça. O programador da Moldação avaliará se a caixa de moldação (ferramental para confecção dos moldes) está disponível e se há espaço para iniciar a moldação. Se ambas as restrições forem satisfeitas, inicia-se a fabricação do molde, caso contrário, deverá aguardar até que haja espaço fabril e caixa disponível. O moldador fará a preparação do local para receber o modelo e revestirá o modelo com o material desmoldante. Em seguida, acrescentará os acessórios de moldagem especificados, fará o enchimento com areia, realizará o socamento, que trata-se da compactação manual da areia, providenciará o registro do tempo de cura e logo após, completará o socamento da tampa. Assim que o tempo necessário decorrer, fará a retirada do modelo e disponibilizará este para a moldação de outra peça igual. Em seguida envia o molde para a área de acabamento do molde;

**Acabamento do molde:** efetuará o acabamento final do molde, montagem dos machos, que é o elemento refratário colocado no molde para definir uma cavidade ou espaço vazio no fundido final, providenciará a pintura do molde e fechamento da caixa além da colocação dos pesos para vazamento. Solicita metal líquido para a Aciaria, baseado nas instruções da OF;

**Aciaria:** terminado o molde, verifica se o Forno de fusão está disponível e caso não esteja, aguarda até a sua liberação. A aciaria providenciará o vazamento no molde baseada no projeto de fundição confeccionado pela engenharia industrial. Nesta etapa o operador de forno da aciaria prepara o forno para início de operação, efetua o carregamento do mesmo com os componentes da liga. Por exemplo, para fabricar a liga de uma Pá de Rotor de aço Inox, são necessários os seguintes materiais: 900kg de FeCrAC + 2000kg de FeCrBC + 8000kg de Sucata de Inox + 400kg de Ca Si Granulado, etc.). É realizado o controle da

temperatura do metal líquido durante o processo onde são retiradas amostras da liga bem como são acrescentados elementos. Cada liga tem um processo diferenciado até o momento do vazamento para a panela de vazamento (equipamento onde estará o metal líquido produzido no forno e que será vazado no molde previamente fabricado) retirando amostras para análises de laboratório. Os resultados do laboratório são gerados imediatamente após a amostra ser enviada para o mesmo.

**Aciaria - Vazamento:** ocorre após aprovação dos resultados do laboratório. Tendo realizado estas operações, o vazador recebe da aciaria as panelas na área de vazamento, verifica se a temperatura está de acordo com o especificado, centraliza a panela no molde, verifica as condições de segurança, destrava e abre a válvula de vazamento, fazendo o controle da mesma, evitando que a escória do metal líquido penetre no molde.

**Resfriamento:** após o vazamento deve-se aguardar o tempo mínimo previsto para o resfriamento da peça sendo em média de 10 a 15 horas por tonelada. Passado o tempo mínimo de resfriamento, a próxima etapa é o Desmolde que é de responsabilidade da área de Moldação. Nesta etapa o molde é quebrado para se retirar a peça previamente fundida e a caixa de moldação, que servirá para a moldagem de outra peça semelhante. Em seguida as peças passam pela Rebarbação para efetuar o corte dos canais de alimentação.

**Rebarbação – Corte de canais:** após o desmolde da peça fundida, será executado o corte de canais de alimentação. Depois disso, baseado nas instruções da OF, será avaliado se a peça necessita de tratamento térmico ou não. Caso necessite, será enviada para o Tratamento térmico, caso contrário, enviará a peça para o Jateamento;

**Tratamento térmico:** são realizadas as etapas de recozimento, revenimento, normalização, tempera e alívio de tensões. Nestas etapas o forneiro de tratamento térmico faz o carregamento do forno de tratamento térmico, onde as operações têm por objetivo modificar as propriedades dos aços, através do aquecimento e o resfriamento em condições controladas, cuidando do correto calçamento para evitar deformações. O operador do forno verifica a conexão dos termopares e acompanha o desenvolvimento do tratamento através de medições em tempo real. Nesta etapa, o operador do forno avalia se há disponibilidade no forno e se a quantidade mínima de peças para tratar está disponível. Caso o forno esteja ocupado, deverá aguardar até que a quantidade máxima de peças seja atingida. Se alguma destas restrições não esteja satisfeita, deverá aguardar. Terminado o tratamento térmico, a peça será enviada para o setor de Jateamento;

**Jateamento:** neste setor as peças entrarão em cabines onde são disparadas granalhas para limpeza da superfície da peça e posterior inspeção. Terminado o jateamento, as peças são encaminhadas para a Rebarbação;

**Rebarbação – retirada de excessos de materiais:** nesta fase são removidos os excessos de materiais e a superfície da peça é preparada para a Inspeção.

**Inspeção:** são realizadas inspeção de partículas magnéticas, ultrassom, dureza, Raios-X, inspeção dimensional, etc. Sendo que alguns testes só serão realizados se forem solicitados pelo cliente, conforme OF. Após os resultados, será feita a recuperação das regiões com defeitos/trincas no departamento de Rebarbação e Solda;

**Rebarbação e Solda:** recebe a peça da Inspeção e remove os defeitos através de rebarbação, esmerilhamento e posterior solda. Após a solda, normalmente é feito um novo tratamento térmico de Alívio de Tensões. Neste caso, a peça deve ser enviada novamente para o Tratamento Térmico, caso contrário a peça seguirá para o controle Dimensional;

**Dimensional:** a peça aguardará enquanto a mesa dimensional não estiver disponível. Caso esteja disponível, é feita a checagem do dimensional da peça, confrontando-se o encontrado com o desenho do cliente. Neste momento, a peça é enviada para o setor de solda e rebarbação para possíveis reparos dimensionais;

**Solda e Rebarbação:** realizados os reparos dimensionais, a peça é enviada para o setor de inspeção;

**Inspeção Final:** todas as características da peça são verificadas e os defeitos recuperados são novamente analisados. Caso a peça esteja em condições de uso, será enviada para a Expedição. Senão, a peça será encaminhada para novas correções, ou se não houver reparo, será sucata. Se a peça for sucata, o setor de Inspeção enviará um relatório de não conformidade para o setor de PCP, solicitando a fabricação de nova peça;

**Embalagem e expedição:** após todas as inspeções concluídas e aprovadas, a peça poderá ser entregue ao cliente.

As etapas apresentadas mostram o estado atual do chão de fábrica na fundição pesada e são empregadas para a simulação de todos os cenários.

A seguir, é apresentado o processo de planejamento da capacidade na fundição atual, que será utilizado como comparativo em relação ao método proposto, lançando mão da corrente crítica.

### 6.3 Planejamento Atual da Capacidade na Fundição Estudada

O planejamento da capacidade na fundição é realizado mensalmente, na primeira semana do mês, apresentando um horizonte de 12 meses. Para realizar essa atividade, o gerente de produção necessita do apoio de algumas áreas como orçamentos, planejamento da produção e marketing. Estas áreas fornecem dados de previsão de novas vendas, carteira de pedidos e capacidade atual da fábrica. A partir destes dados, o gerente de produção elabora o plano de capacidade, utilizando planilhas eletrônicas, mostrando os meses em que a fábrica estará superalocada ou subalocada. Com base neste plano, o gerente toma ações para lidar com a falta ou excesso de trabalho.

Todas as informações relacionadas à capacidade da fundição estudada são medidas em horas/homem, pois de acordo com Ritzman (2004) são medidas mais usuais para processo flexíveis e de volume reduzido.

Na Figura 6.4 pode ser visto o fluxograma para elaboração do plano de capacidade e decisões envolvidas neste processo.

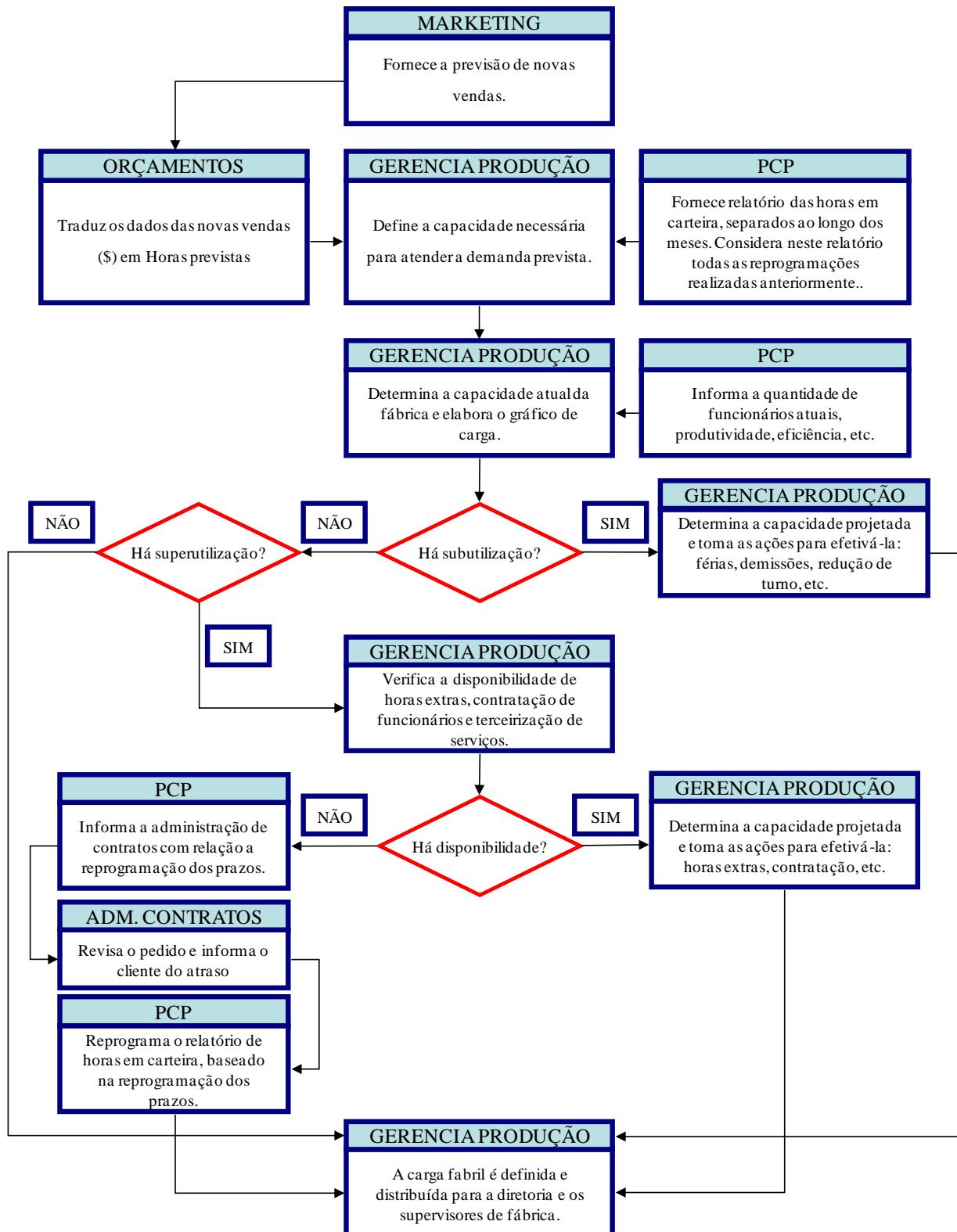


Figura 6.4 – Fluxograma do processo para elaboração da carga fabril (plano de capacidade). Fonte: Elaboração própria

Inicialmente a área de Marketing fornece as informações relacionadas a previsão de novas vendas. Estes dados são transmitidos em termos monetários e divididos por segmento de mercados (equipamentos de siderurgia, mineração, hidrogeração, etc.).

Em paralelo, a área de planejamento (PCP) fornece um relatório de horas em carteira, distribuídas ao longo dos meses e detalhadas, considerando os segmentos de mercado e as células produtivas da empresa. Estas horas são provenientes do registro feito diariamente no chão de fábrica. O PCP também informa as reprogramações realizadas no mês corrente devido a atrasos, reprogramação de entregas pelos clientes, antecipações, etc. Além disso, envia para o gerente informações com os dados de fábrica, sendo: quantidade de funcionários, horas improdutivas (atrasos de funcionários, afastamento médico, falta de serviço, falta de material, quebra de máquina, etc.), eficiência, quantidade de máquinas, horas extras realizadas e férias realizadas. Todos estes dados são agrupados e definem a capacidade atual da fábrica.

A área de orçamentos quantifica os dados das novas vendas, fornecido em termos monetários pela área do Marketing, em horas previstas, pois todos os dados do plano de capacidade devem ser apresentados em horas. Para quantificar os dados de novas vendas em termos de horas, a área de orçamentos conta com a base de dados de peças similares, já fornecidas no passado.

O plano de capacidade confeccionado pelo gerente de produção é baseado nas horas previstas informadas pela área de orçamento e pelos dados fabris fornecidos pelo PCP. No plano de capacidade é exibida a defasagem de horas de **toda a fábrica**, mês a mês, sem descrever quais são as células específicas que estão superutilizadas ou subutilizadas. Como exemplo, pode ser visto na Figura 6.5 o plano de capacidade de toda a fundição atualizado no mês de junho de 2011. Este plano agrupa todas as células indiscriminadamente, dificultando a identificação do gargalo, e, consequentemente a tomada de decisão de maneira eficaz.

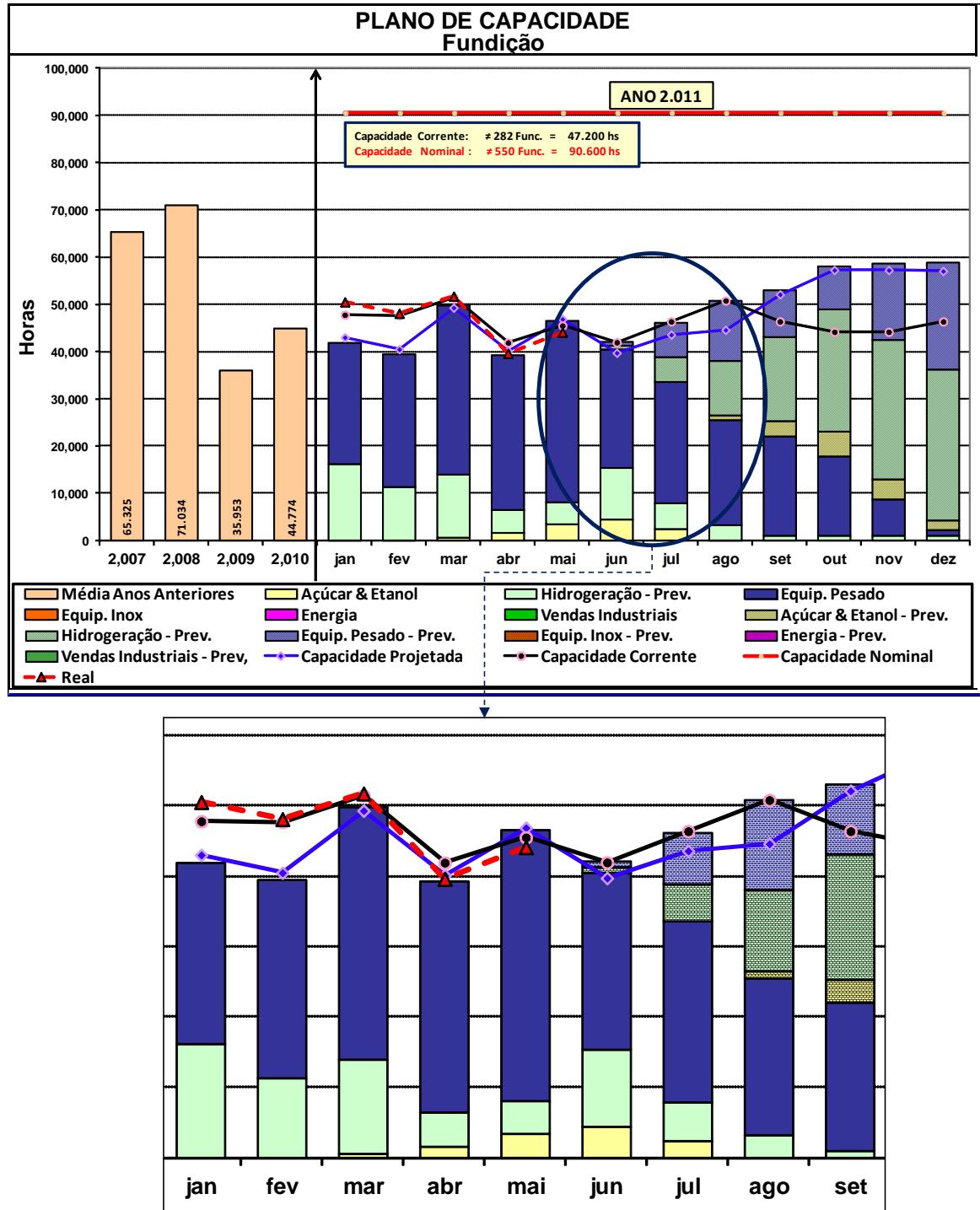


Figura 6.5 – Plano de Capacidade da fundição estudada. Fonte: Elaboração própria.

Neste plano são identificadas as colunas coloridas que representam a quantidade de horas em carteira por segmento de mercado (azul – equipamentos pesados, verde – hidrogeração, amarelo – açúcar e etanol) e as colunas “tijolos” representam as horas previstas de novas vendas.

A linha vermelha constante (identificada na parte superior da Figura 6.5 no valor de 90.600 horas) representa a **capacidade nominal** que reflete a quantidade de horas máximas disponíveis em termos de espaço, ou seja, qualquer necessidade acima deste valor implicará em aumentos significativos de investimento em capacidade (construção de novo barracão, compra de novas máquinas, etc.). Estas decisões devem ser tomadas sabendo que os resultados só ocorrerão a longo prazo e deverão ser avaliadas pela alta administração da empresa, que irá estudar esta ampliação.

A **capacidade real** é representada por uma linha tracejada vermelha e reflete as horas realizadas nos períodos anteriores. Esta informação pode ser vista no detalhe do mês de maio, anterior a atualização do plano, onde a capacidade realizada foi em torno de 45.000 horas. Analisando a figura, nota-se que a capacidade real foi insuficiente para atender a demanda, portanto, ocorreram atrasos que serão transferidos para os meses seguintes.

A **capacidade corrente**, visualizada pela linha preta, é definida pela quantidade de funcionários, eficiência, horas improdutivas e quantidade de dias úteis no mês. No mês de julho, a capacidade corrente é de 46.381 horas, sendo que neste mês há 21 dias úteis, 8.8 horas por funcionário, 282 funcionários e os dados de eficiência e horas improdutivas são retirados a uma taxa média de 11% do total. Em agosto a capacidade corrente é de 50.798 horas, onde a diferença entre estes dois meses deve-se apenas a quantidade de dias úteis no mês de agosto ser maior do que no mês de julho (21 dias em julho e 23 dias em agosto).

A partir da elaboração deste gráfico, o gerente tomará as decisões relacionadas a **capacidade projetada** ao longo dos meses, que pode ser visualizada através da linha azul. Estas decisões envolvem demissão/ contratação de funcionário, terceirização, férias, redução/aumento de turnos, etc. Por exemplo, no mês de julho e agosto de 2011 a decisão indicada para a projeção de capacidade foi reduzir a quantidade de horas disponíveis em 2.700 horas em julho e 6.200 horas em agosto, devido a ausência de alguns funcionários programados previamente para entrar em férias. Se a previsão de julho e agosto se concretizar em vendas, o gerente precisará tomar ações de curto prazo, como por exemplo: horas extras, reprogramação das férias ou até mesmo atrasar entregas de algumas peças. Já no mês de setembro, devido a previsão de novas vendas, o gerente indica um aumento da capacidade em 11.000 horas, através da contratação de 60 funcionários.

Com as informações do plano de capacidade referente às horas disponíveis (capacidade corrente) *versus* as horas necessárias (pedidos em carteira e previsão), torna-se

possível determinar se as entregas serão antecipadas/ atrasadas, através de negociações com cliente e diretoria da fundição.

Tendo apresentado a situação do planejamento da capacidade na fundição estudada, a próxima etapa é apresentar a proposta de planejamento utilizando o método da corrente crítica aplicado à célula de fundidos de grande porte.

#### **6.4 Corrente Crítica como Ferramenta de Apoio a Elaboração do Planejamento da Capacidade**

A partir das etapas apresentadas anteriormente neste capítulo, foram alteradas algumas dessas, as quais são significantes nas etapas de PCP, especificamente as etapas destacadas em vermelho no fluxograma da Figura 6.6. Nessas etapas será realizado o controle dos pulmões de cada projeto. Esse controle da capacidade no horizonte de curto prazo dará suporte para o planejamento da capacidade no médio e longo prazo.

O monitoramento dos pulmões, assim como, os controles mais apurados e a remoção da segurança envolvida na estimativa de tempos das tarefas fazem parte da técnica da corrente crítica. Essa técnica aliada ao planejamento da capacidade atual pode gerar melhores resultados, caso as medidas de desempenho avaliadas mostrem-se superiores quando comparadas ao cenário atual.

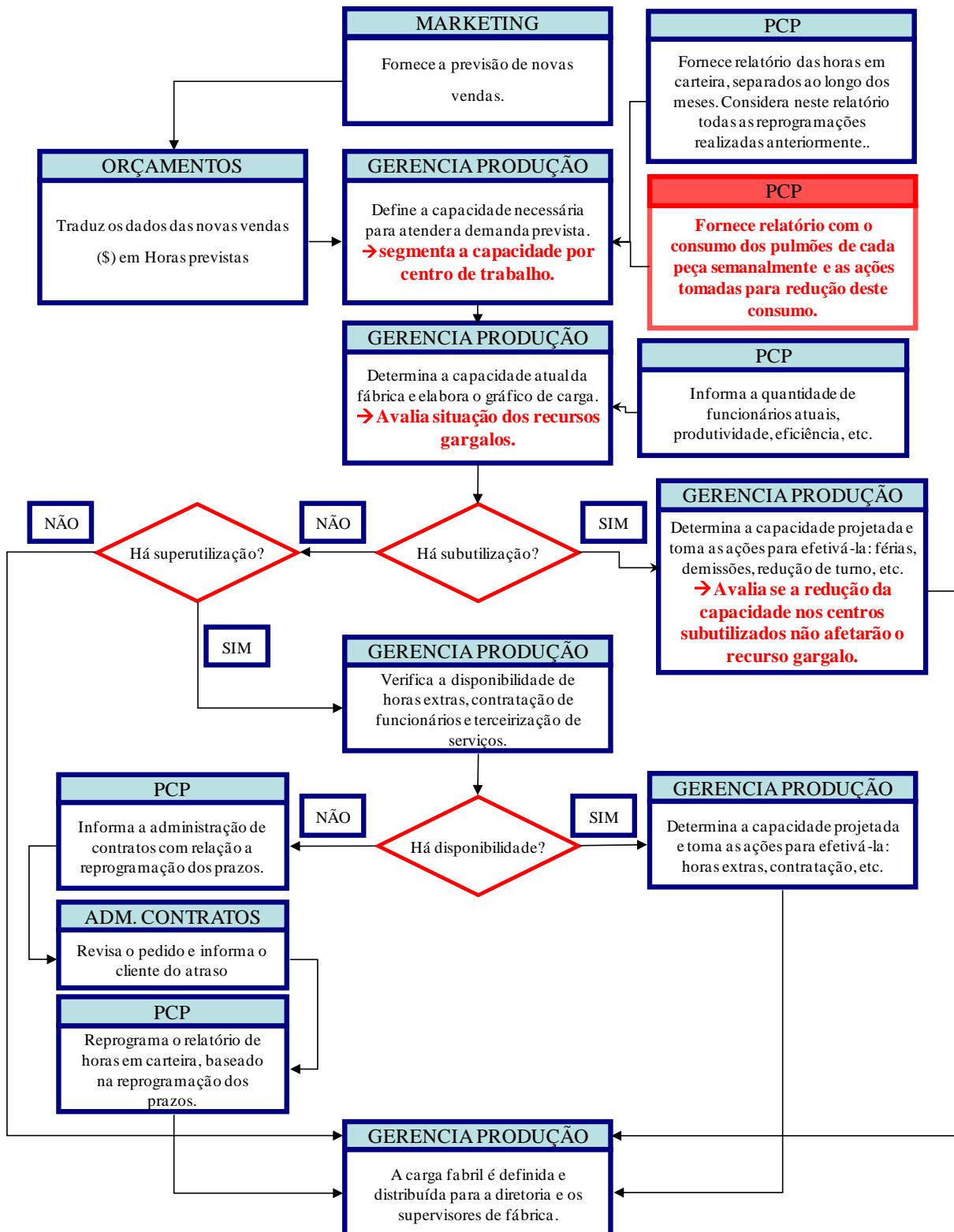


Figura 6.6 – Fluxograma da Proposta do processo para elaboração do plano da capacidade. Fonte: Elaboração própria

A seguir segue a proposta de alterações nas atividades de PCP:

1. Cada peça será acompanhada através dos controles de pulmões, que serão atualizados periodicamente, baseada na simulação do cenário;

2. A partir da simulação do cenário e identificado as etapas que podem ter sua utilização/ tempo melhorado, o gerente decidirá como será a utilização do recurso humano através de contratação/ demissão, horas extras, etc., sendo basicamente:
  - 2.1 Contratação de funcionários para os departamentos não-gargalos, para que não prejudiquem o andamento da produção e não deixem o gargalo ocioso;
  - 2.2 Horas extras para situações que interfiram no recurso gargalo, como quebra de máquinas a montante do recurso gargalo, falta de funcionários, atrasos. Neste trabalho, as horas extras serão utilizadas quando o pulmão de projeto estiver na área vermelha do gráfico de monitoramento.
  - 2.3 As férias deverão ser analisadas de acordo com o mesmo objetivo: administrar a utilização do recurso gargalo.
3. Administrar a utilização do recurso gargalo, esse caso, os fornos de tratamento térmico, pois limitam a produção e são os únicos recursos que não podem ser terceirizados devido aos preços serem extremamente altos e o tempo para o transporte das peças e para a contratação do serviço não ser viável financeiramente. Além disso, sua capacidade só pode ser ampliada através de investimentos de grande porte e de longo prazo, como a construção de novo forno ou ampliação dos existentes. Os demais recursos que restringem a capacidade podem ter sua disponibilidade aumentada através da contratação de funcionários, aumento de turnos, etc.

A partir da definição da proposta acima, serão apresentados nos próximos itens os cenários simulados e verificar os resultados apresentados.

## **6.5 Simulação dos Cenários**

Todos os cenários simulados, contam com a mesma base de dados: formato da fabrica, localização dos centros de trabalho, taxa de entrada de peças, disponibilidade de ferramental, turnos de trabalho e sequência de operações, sendo todas estas informações baseadas no histórico de dados do ambiente fabril e a opinião de especialistas de cada área da fundição.

Nos cenários simulados, utilizando a corrente crítica, serão reduzidos os tempos de segurança, focando assim, o controle dos pulmões para atender aos prazos estabelecidos. Além disso, as tomadas de decisão serão modificadas no momento da entrada de cada peça nos centros de trabalho.

O modelo elaborado nesta dissertação representa a operação do chão de fábrica de uma fundição de grande porte para cenários distintos: um representa a prática atual de operação e o outro irá aplicar a corrente crítica. O modelo de simulação permite, por meio de medidas de desempenho, a análise do cenário atual e dos cenários da corrente crítica, possibilitando a comparação entre ambos.

A escolha da simulação ocorreu, pois se mostrou como uma ótima ferramenta para analisar a escolha de um cenário proposto, podendo avaliar o seu comportamento antes de colocá-lo em prática. E ainda, essa ferramenta é capaz de lidar com um grande número de variáveis, característica inerente aos ambientes do tipo *job-shop*.

Conforme apresentado anteriormente, esse modelo foi delimitado a estudar os fundidos de grande porte, mais especificadamente a produção ocorrida em uma célula: fundidos pesados. As peças que passam por estes centros de trabalho só concorrem pelos mesmos recursos, o que permitiu realizar esse recorte sem perda de sentido - o recorte representa uma minifábrica.

### **6.5.1 Simulação do Estado Atual**

Para a simulação do estado atual, a lógica de operação segue o fluxograma apresentado anteriormente na Figura 6.3. Os dados coletados que são usados nas variáveis de entradas no modelo de simulação referem-se aos dados históricos coletados nos últimos três anos e a simulação irá considerar a operação para um período de 12 meses.

Os tempos médios de processo foram obtidos pelo conhecimento de especialistas de cada área da fundição. Toda informação foi aplicada ao modelo em cada etapa do processo, considerando os valores médios, os otimistas e os tempos pessimistas. Os tempos otimistas representam situações em que as ordens de fabricação são priorizadas pelo gerente de produção. Já no caso dos tempos pessimistas, estes agregam todos os tempos de

improdutividade, falta de funcionários, retrabalho, etc. O cálculo para determinar os tempos otimistas e pessimistas será apresentado em seguida.

O período de inicialização (*warm-up*) foi determinado como sendo de 800 horas. Esse valor foi escolhido, pois quando a simulação é iniciada, o modelo apresenta-se como se estivesse iniciando a linha de produção naquele momento, o que não retrata a realidade. No modelo estudado, foi verificado o momento em que todos os centros de trabalho já estivessem ocupados, para que, desta maneira os dados anteriores não interferissem nos resultados e o modelo pudesse entrar em regime. Esta solução promove o uso adequado das instalações, sabendo-se que as mesmas não terão peças para processar no inicio da simulação.

O modelo foi construído no software *Simio*, que simula processos industriais, com a grande vantagem de ter uma modelagem orientada a objeto e interface amigável. O simulador é preparado para trabalhar em 3D (três dimensões).

A fábrica foi modelada no *Simio* nas proporções exatas ao que é na realidade, conforme pode ser visto na Figura 6.7 e o período simulado ocorreu entre 02/01/2012 a 01/01/2013, totalizando 8.754 horas.



Figura 6.7 – Fundição modelada no software Simio. Fonte: Elaboração própria

Foi adotado o calendário de trabalho desse mesmo ano, conforme pode ser visto na Figura 6.8. Neste calendário, os feriados e dias de folga podem ser visualizados pelas cores cinza, roxo e azul.

CALENDÁRIO - FUNDição												ANO 2012	
jan 22 dias de trabalho						fev 21 dias de trabalho						mar 22 dias de trabalho	
Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa	Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11
15	16	17	18	19	20	21	12	13	14	15	16	17	18
22	23	24	25	26	27	28	19	20	21	22	23	24	25
29	30	31					26	27	28	29			
abr 19 dias de trabalho						mai 22 dias de trabalho						jun 19 dias de trabalho	
Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa	Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	6	7	8	9	10	11	12
15	16	17	18	19	20	21	13	14	15	16	17	18	19
22	23	24	25	26	27	28	20	21	22	23	24	25	26
29	30	31					27	28	29	30	31		
jul 21 dias de trabalho						ago 23 dias de trabalho						set 19 dias de trabalho	
Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa	Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11
15	16	17	18	19	20	21	12	13	14	15	16	17	18
22	23	24	25	26	27	28	19	20	21	22	23	24	25
29	30	31					26	27	28	29	30	31	
out 22 dias de trabalho						nov 19 dias de trabalho						dez 19 dias de trabalho	
Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa	Do	Se	Te	Qa	Qi	Se	Sa
1	2	3	4	5	6	7	1	2	3	4	5	6	7
7	8	9	10	11	12	13	4	5	6	7	8	9	10
14	15	16	17	18	19	20	11	12	13	14	15	16	17
21	22	23	24	25	26	27	18	19	20	21	22	23	24
28	29	30	31				25	26	27	28	29	30	31
FERIADOS NACIONAL						FERIADOS REGIONAIS						DIAS COMPENSADOS	

Figura 6.8 – Calendário de trabalho da fundição exibindo feriados e dias de folga. Fonte: Elaboração própria.

O calendário de trabalho da fundição também estabelece os seguintes turnos de trabalho:

**Período diurno:** inicia as atividades às 07h00 e finaliza às 16h48min, trabalhando de segunda-feira a sexta-feira, com parada de uma hora para refeição.

**Período noturno:** inicia as atividades às 22h00 e finaliza as 07h00 do dia seguinte, trabalhando de segunda-feira a sábado, com parada de uma hora para refeição.

**Forno de fusão:** inicia as atividades na segunda-feira às 22h00 até 00h00. De terça-feira a sexta-feira trabalha a partir da 01h00 até as 17h00, retornando os trabalhos as 22h00 até 00h00. Sábado inicia o trabalho a 01h00 finalizando às 12h00. Não tem parada para almoço.

**Corte Maçarico e ArcAir:** além de trabalhar nos turnos diurno e noturno, possui um terceiro turno que inicia os trabalhos a partir das 14h00, encerrando as 22h00 e trabalhando de segunda-feira a sexta-feira, com parada de uma hora para refeição em cada turno.

**Forno de Tratamento térmico:** trabalha 24 horas por dia, 7 dias por semana.

O *Mix* de produtos é determinado no início da rodagem do modelo. Cada nova ordem de fabricação entra no sistema baseada em uma **distribuição exponencial com média de 9 horas**, considerando o calendário previamente criado. Esta taxa de entrada foi definida a partir da análise dos dados históricos.

Na Tabela 6.2 é apresentado o *mix* de produtos composto por 24 famílias com uma taxa específica para cada uma delas. Definiu-se a taxa baseada no volume de peças produzidas dos últimos três anos, onde cada família representa uma porcentagem deste total. Ainda na Tabela 6.2, são apresentados os dados relacionados aos principais ferramentais utilizados para a preparação dos moldes de cada família, que são os Modelos de moldação e as Caixas de moldação. A utilização destes ferramentais será discutida na descrição da simulação.

linha de produto	família de produto	sigla família	MIX	FERRAMENTAL		
				Caixas de Moldação (mm)	Caixas Qtd	Modelos
GERAÇÃO DE ENERGIA	Pá francis	A1	6.6%	5600X5200X500	4	MODELO_A1
MINERAÇÃO	Trator	C1	26.5%	CaixaTrator	4	MODELO_C1
AÇUCAR ETANOL	Castelo	D1	1.3%	5600X5200X500	3	MODELO_D1
MINERAÇÃO	Mesa	S1	1.3%	6160X3250X750	3	MODELO_S1
MINERAÇÃO	Volante	S2	1.3%	3000X3000X430	5	MODELO_S2
AÇUCAR ETANOL	Engrenagem	D2	0.9%	CREUSOT	1	MODELO_D2
MINERAÇÃO	Anelrol	D3	0.9%	CREUSOT	1	MODELO_D3
NAVAL	Bellmouth	E1	0.9%	2800X2800X300	3	MODELO_E1
NAVAL	Lowerrud	E2	0.4%	3600X3600X500	6	MODELO_E2
NAVAL	Rudderhorn	E3	0.4%	2500x2500x350	8	MODELO_E3
NAVAL	Stern	E4	0.4%	3200X2300X400	6	MODELO_E4
NAVAL	Upper	E5	0.4%	3200X2300X400	6	MODELO_E5
MINERAÇÃO	Anelaj	F1	1.0%	5000X5000X500	3	MODELO_F1
MINERAÇÃO	Aneltrav	F2	0.7%	4000x4000x300	4	MODELO_F2
MINERAÇÃO	Bojo	F3	1.0%	4000x4000x500	7	MODELO_F3
MINERAÇÃO	Carcaca	F4	3.3%	5000x5000x500	6	MODELO_F4
GERAÇÃO DE ENERGIA	Pakaplan	I1	1.3%	5000X5000x500	4	MODELO_I1
MINERAÇÃO	Suportecaminhão	K1	42.0%	2800X2800X300	4	MODELO_K1
SIDERUGIA	Lingoteira	V1	4.4%	3600X3600X500	10	MODELO_V1
SIDERUGIA	Massalote	V2	0.9%	3000X3000X430	3	MODELO_V2
SIDERUGIA	Placaint	V3	0.9%	3000X3000X430	4	MODELO_V3
SIDERUGIA	Placasif	V4	1.3%	3600X3600X500	3	MODELO_V4
SIDERUGIA	Pote	V5	0.9%	4000x4000x500	8	MODELO_V5
SIDERUGIA	Ejector	X1	0.7%	3000X3000X430	6	MODELO_X1

Tabela 6.2 – Família de produtos identificando o Mix e os ferramentais. Fonte: Elaboração própria.

Os dados do modelo referentes aos tempos de processo e sequência de operações foram baseados nas informações históricas e no conhecimento dos especialistas e está representado na Tabela 6.3. Nestes tempos não é considerado o tempo de espera em fila, mas por serem tempos estimados admite-se que há segurança agregada. Estes tempos de processo são valores médios estimados e serviram de base para definição dos tempos pessimistas e otimistas, sendo: Tempo Otimista=0.95\*(Tempo médio) ; e Tempo Pessimista=1.25\*(Tempo médio). Estes tempos foram acrescentados em uma tabela dentro do software *Simio*, para cada centro de trabalho como tempo de processo, por meio da distribuição probabilística triangular, pois esta considera os valores mais prováveis, os valores mínimos (tempos otimistas) e os valores máximos (tempos pessimistas).

PEÇA	ROTEIRO DE FABRICAÇÃO (tempo em horas)																						
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
PaFrancis	Tempo médio	40	70	6	12	15	155	6	224	6	92	96	64	48	6	4	16	12	8	6	4	15	16
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
Trator	Tempo médio	16	32	3	10	8	36	2	80	4	14	72	72	36	2	4	5	16	16	1	9	28	12
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
Castelo	Tempo médio	65	65	3	12	12	36	4	200	3	60	70	64	36	3	4	16	12	8	6	4	15	8
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	J	D													
MesaMovel	Tempo médio	64	70	6	4	8	90	4	16	12													
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	J	D													
Volante	Tempo médio	60	50	4	4	4	60	1,5	36	4	4	6	8										
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	G	W	G	J	D	G	I	
Engrenagem	Tempo médio	32	110	4	20	32	36	4	100	3	50	100	32	36	4	16	16	8	4	12	12	1	
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	G	W	G	J	D	G	I	
Anel Rolamento	Tempo médio	48	80	5	16	32	36	4	90	3	50	100	32	36	4	16	16	8	4	12	12	1	
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
BellMouth	Tempo médio	32	32	4	8	8	36	2	24	2	24	36	16	36	2	2	6	4	4	2	8	4	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
LowerRudder	Tempo médio	32	48	3	8	8	36	2	24	2	24	36	16	36	2	2	6	4	4	2	8	4	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
RudderHorn	Tempo médio	22	32	3	8	8	36	2	24	2	24	36	16	36	2	2	6	4	4	2	8	4	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
SternBoss	Tempo médio	64	64	3	10	8	36	3	36	2	36	48	20	36	2	2	10	4	4	2	8	4	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
UpperRudder	Tempo médio	22	32	3	8	8	36	2	24	2	24	36	16	36	2	2	6	4	4	2	8	4	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
AnelAjuste	Tempo médio	48	80	4	16	32	36	4	96	3	50	100	32	36	4	16	16	8	4	12	12	1	
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	G	W	G	J	D	G	I	
Anel Travamento	Tempo médio	48	48	3	3	3	12	2	36	3	8	1											
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	HT	J	D	I											
Bojo	Tempo médio	68	90	5	64	64	36	4	96	6	72	112	48	36	4	3	12	20	32	4	12	10	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
Carcaca Britador	Tempo médio	72	85	5	55	55	36	4	96	6	80	120	48	36	4	3	20	24	32	4	8	10	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
PaKaplan	Tempo médio	50	80	3	12	12	155	4	224	4	36	48	24	48	4	8	10	8	4	3	12	1	
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	G	W	G	J	D	G	I	
Suporte Caminhão	Tempo médio	21	21	2	6	5	36	1,5	32	2	8	48	16	36	1	2	2	8	8	1	2	15	1
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	I
Lingoteira	Tempo médio	85	60	3	4	4	42	1	12	8													
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	D	G													
Massalote	Tempo médio	28	35	3	4	4	35	1	8	4													
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	D	G													
PlacaInterm	Tempo médio	28	35	3	4	4	35	1	8	4													
	Sequência	M1	M2	S	C1	J	G	I	D	G													
PlacaSifao	Tempo médio	50	50	4	4	36	6	60	1	12	15												
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	I	G	W	G	J	D	G	
PoteEscoria	Tempo médio	75	66	4	15	15	36	4	72	3	24	128	32	36	4	3	8	8	12	4	12	12	
	Sequência	M1	M2	S	C1	C2	HT	J	G	I	G	W	G	HT	J	G	W	G	J	D	G	I	
Ejector Holder	Tempo médio	41	75	4	15	64	114	4	112	3	84	130	36	36	2	16	8	4	2	2	1		

Legenda: Moldação=M1 ; Acabamento do Molde=M2 ; Desmolde=S ; CorteMaçarico=C1 ; CorteArcAir=C2 ; Jateamento=J ; TratamentoTérmico=HT ; Rebarbação=G ; Solda=W ; Dimensional=D ; Inspeção=I

Tabela 6.3 – Roteiro de Fabricação das 24 famílias. Fonte: Elaboração própria.

Para definir o *lead time* de projeto das famílias no modelo e o tempo da atividade<sup>9</sup>, foram criadas variáveis que contabilizaram o momento da entrada e da saída em

<sup>9</sup> Conforme Wiendahl (1995) e Wacker (1996) este tempo é chamado de **Tempo de atravessamento de operação** e refere-se ao tempo até a conclusão das operações inclusas no roteiro da ordem. Na primeira operação, a contagem de tempo inicia-se na liberação da ordem. Nas demais, no fim da operação precedente. O **tempo de atravessamento de operação** é composto de: (i) espera após o processamento anterior; (ii) transporte até o centro de trabalho atual; (iii) espera em fila; (iv) preparação; e (v) processamento e inspeção; (vi) tempos de interrupção por falta de materiais; e (vii) manutenção e retrabalhos.

cada centro de trabalho para cada família de peças. Após rodar o modelo com os dados de tempos de processo da Tabela 6.3, e quantificar o *lead time* de projeto para cada família, estes dados foram comparados com os dados históricos da empresa nos três últimos anos para verificar e validar o modelo elaborado. Esta comparação pode ser verificada abaixo na Tabela 6.4:

	Dados Históricos	Cenário simulado (base dados históricos)
<b>Lead Time médio (Horas)</b>	1546	1551
<b>Entregas (peças)</b>	512	530
<b>Entregas no prazo (peças)</b>	230	212

Tabela 6.4 – Comparação dos resultados simulados com os dados históricos. Fonte: Elaboração própria.

Comparando-se os dados históricos com o cenário simulado, foi identificado que existe uma mínima variação quando analisados os indicadores de *lead time* médio de projeto, quantidade de peças entregue e peças entregues no prazo. Dessa forma, conclui-se que o modelo simulado é muito semelhante à realidade da fundição estudada e poderá ser utilizado como base para comparação com o cenário que faz uso da corrente crítica.

Além disso, com a visualização gráfica que a ferramenta de simulação proporciona e com as informações do roteiro de fabricação apresentado na Tabela 6.3, é possível verificar que as peças seguem caminhos distintos com tempos de processamento diferenciados. No entanto, todas as famílias têm em comum o caminho crítico único, não havendo processos que ocorrem em paralelo. Cada operação depende apenas da operação anterior para poder iniciar, isso devido às características do produto não possuir montagens de outros componentes, definindo assim, o caminho crítico como sendo toda a sequência de atividades, desde o início da fabricação até a entrega das peças. No exemplo abaixo, Figura 6.9, é apresentada a rede de atividades da peça Mesa Móvel, onde pode-se visualizar o caminho crítico como sendo todas as atividades M1-M2-S-C1-J-G-I-J-D:

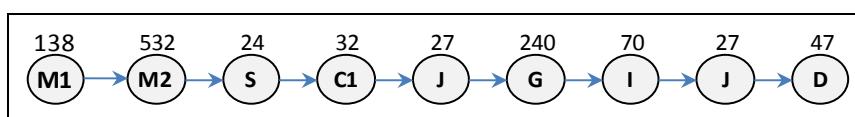


Figura 6.9 – Rede de atividades da peça Mesa móvel utilizando os *lead times* calculados no modelo do estado atual. Fonte: Elaboração própria.

Neste exemplo foi apresentada a rede de atividades de uma peça, no entanto, como pode ser visto no roteiro de fabricação, todas as peças seguem o mesmo procedimento.

Tendo definido alguns conceitos, é possível apresentar abaixo as **etapas da simulação do cenário atual**.

Logo que a Ordem de fabricação é emitida, caso haja transporte disponível, o mesmo encaminha-a para o primeiro centro de trabalho que será responsável por separar o modelo (ferramental) específico da peça. Caso este ferramental não esteja disponível, a ordem de fabricação aguardará na fila até que o modelo seja liberado.

Alocando o modelo para esta ordem de fabricação, a próxima etapa é seguir para outro centro de trabalho que possui função semelhante ao anterior: **alocar as caixas de moldação específicas para esta ordem**. As caixas de moldação são outro ferramental necessário para iniciar a moldação das peças. Como dito anteriormente, caso o ferramental não esteja disponível, a entidade<sup>10</sup> (ordem de fabricação) aguardará na fila até que o tipo e a quantidade específica de caixas estejam disponíveis.

Se ambos os ferramentais (**modelo e caixas**) estiverem disponíveis, só restará iniciar a fabricação. Devido à natureza do modelo de simulação ser aleatória, foi determinado como início da fabricação o momento após a disponibilização dos dois ferramentais. Entende-se que o planejamento avalia a disponibilidade destes recursos para determinar o início da fabricação. Todas as ordens que não foram trabalhadas devido à limitação destes ferramentais foram consideradas no estudo como não atendimento a demanda prevista, ou seja, estes pedidos serão perdidos.

Nesta etapa, as entidades seguirão para um centro de trabalho disponível na área de moldação. Se nenhum dos centros de trabalho estiver disponível, deverá aguardar até que pelo menos um termine sua operação. Além disso, deverá aguardar até que o transporte das caixas “descarregue” o ferramental e inicie a fabricação.

Terminada a operação de Moldação, o **ferramental modelo** é retirado do molde ficando disponível para uma próxima Ordem de fabricação e a entidade moldada seguirá para o setor de acabamento do molde, onde serão realizadas as operações de fechamento do molde, vazamento com metal líquido e em seguida o resfriamento da peça. A

---

<sup>10</sup> A entidade no início da simulação é considerada como a ordem de fabricação. No entanto, após o início da fabricação, a entidade será a peça que está sendo processada.

entidade só não poderá seguir para estes centros de trabalho caso todos estejam ocupados processando outras entidades.

Após efetuar o fechamento do molde, o centro de trabalho solicita o vazamento do metal para a Aciaria, que providenciará o envio de uma panela com metal líquido a ser vazado no molde pronto. Terminado o vazamento, o carro com a panela retorna para o forno de fusão, onde serão preparadas as demais cargas de metal líquido para vazamento em outros moldes prontos. Realizado o vazamento, a peça continuará aguardando no mesmo local até finalizar o **Resfriamento**.

Finalizando-se todas estas etapas, a peça fundida e já resfriada será encaminhada para o setor de desmolde, onde ocorrerá a retirada da peça do molde e a liberação do ferramental Caixas de moldagem. Estas caixas serão carregadas pelo transporte até o depósito de caixas, e estas serão novamente utilizadas, assim que outra ordem de fabricação que necessite deste mesmo tipo de caixa seja solicitada. Já a peça desmoldada seguirá para as próximas etapas de fabricação, de acordo com seu roteiro específico.

Todos os transportes inseridos no modelo de simulação, trafegam a velocidade constante de 10km/h e gastam para carregar ou descarregar, em média, 15 minutos, seguindo uma distribuição exponencial.

Como apresentado anteriormente, todas as peças seguem o mesmo roteiro até o desmolde. A partir deste ponto, cada família de peças possui um roteiro específico, onde são processadas por determinados centros de trabalho e por outros não. Isso se deve principalmente a características como tamanhos das peças, peso, composição química do material, necessidade de tratamento térmico para atingir determinada dureza, além de requisitos especiais solicitados pelos clientes.

Além disso, na maioria dos roteiros, as peças retornam a centros de trabalho onde já efetuaram alguma operação. Exemplo: uma peça passa pela rebarbação para retirar excessos de material e permitir a inspeção da peça. Esta mesma peça será encaminhada para a inspeção, onde serão indicados os pontos a serem recuperados por solda. Terminada a inspeção a peça segue para o departamento de solda, e em seguida, volta para o departamento de rebarbação para esmerilhar a solda aplicada, conforme foi visto no fluxograma da Figura 6.3 na página 86.

O mesmo ocorre com os fornos de tratamento térmico, em que algumas peças retornam para efetuar outro tipo de tratamento térmico, como alívio de tensões após a solda.

Em centros de trabalho como a solda e a rebarbação as peças chegam e são encaminhadas para uma fila, que determinará a ordem dos trabalhos a serem realizados. Estas peças são priorizadas através do uso da regra de priorização, que avalia o tempo em que foram criadas, ou seja, os centros de trabalho priorizam as peças que estão a mais tempo no sistema. Esta regra garante que as peças não fiquem muito tempo aguardando, principalmente aquelas que estão entrando no centro de trabalho pela segunda ou terceira vez. Esta regra de priorização representa o modelo tradicional da fundição estudada.

As falhas nos centros de trabalho foram consideradas apenas nos fornos de tratamento térmico, por se tratarem de máquinas que trabalham continuamente. Em média eles falham a cada 50 dias, seguindo uma distribuição exponencial, e o tempo para serem consertados varia entre 1, 2 e 5 dias, de acordo com uma distribuição triangular. Os demais centros de trabalho falham também (índices de improdutividade, faltas de material, falta de funcionário, doenças, etc.), mas este tempo de falha está embutido nos tempos de processamento pessimistas.

### **6.5.2 Cenário Utilizando a Corrente Crítica**

A base da lógica de operação para desenvolvimento do cenário utilizando os princípios da corrente crítica foi o modelo descrito anteriormente. No entanto, foram realizadas algumas modificações adequando o modelo aos conceitos da corrente crítica abordados na literatura.

Conforme pode ser visto abaixo no fluxograma da Figura 6.10, as principais alterações ocorreram nas regras de priorização. Além disso, foi modificado o processo de formação de lotes a serem tratados nos fornos de tratamento térmico, visando aumentar a utilização dos mesmos. Após a apresentação do fluxograma, estas alterações serão apresentadas com maiores detalhes.

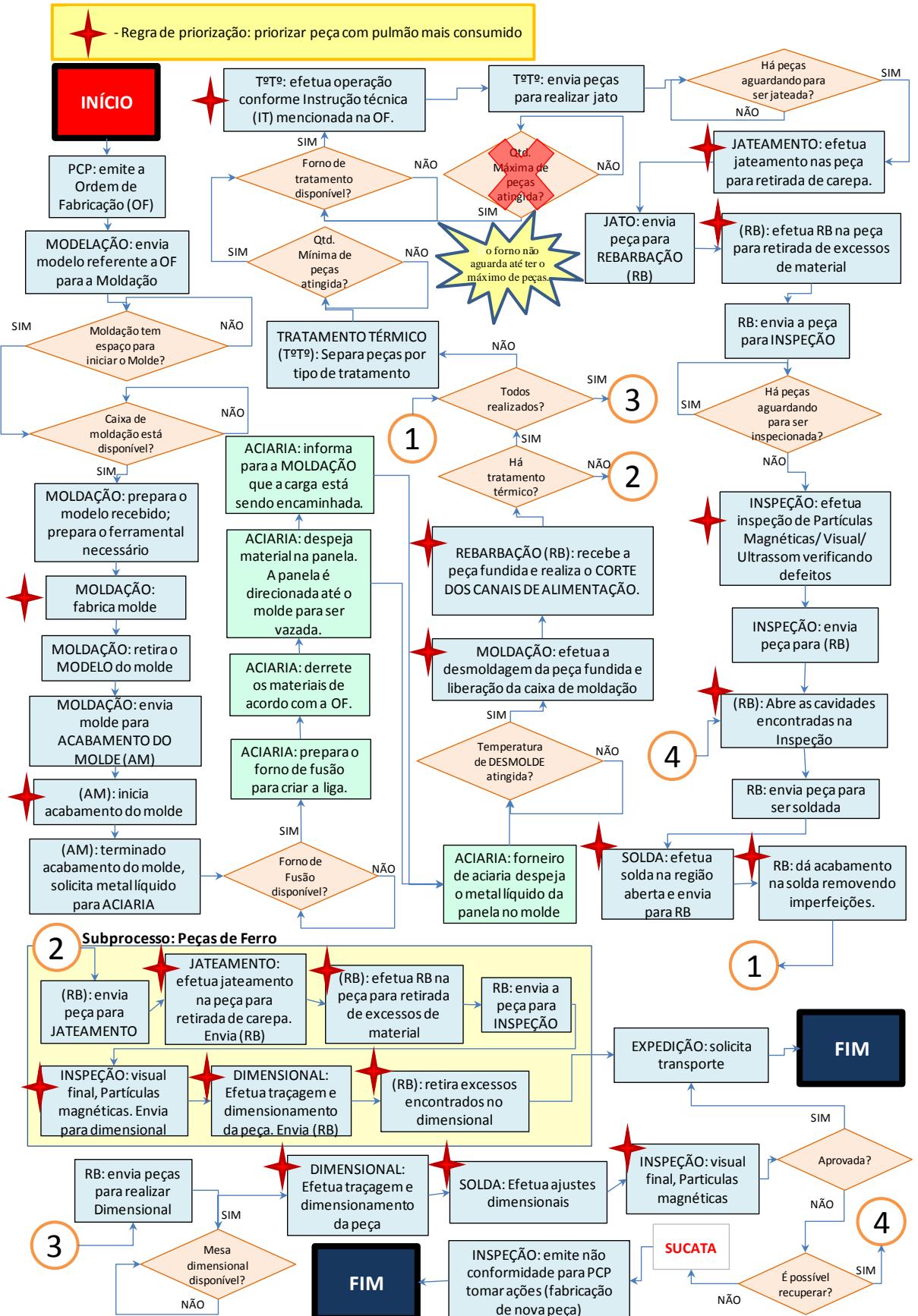


Figura 6.10 – Fluxograma processo de fundição com as alterações para aplicar o método da corrente crítica.

Fonte: Elaboração própria

Primeiramente, foi avaliado o caminho crítico de cada peça e constatou-se, conforme mostrado no desenvolvimento do modelo da situação atual, que o caminho crítico para todas as peças é único. Logo, o uso do pulmão de convergência não foi necessário, restando apenas a definição dos pulmões de projeto e o pulmão de capacidade.

Para isso, reduziu-se o tempo das atividades em 50%, retirando toda a segurança embutida e destinando parte desta segurança para o pulmão de projeto. Para o pulmão de projeto, foi destinado 50% da segurança retirada, ou seja, 25% do *lead time*, conforme o método cortar e colar. O exemplo da Tabela 6.5 mostra três tipos diferentes de peças com seus *lead times* de projeto originais e a modificação com a redução da segurança e inserção do pulmão de projeto.

família de produto	sigla família	lead time original (horas)	lead time Corrente crítica	Pulmão de Projeto (horas)
Pá francis	A1	2432	1216	608
Trator	C1	1586	793	397
Aneltrav	F2	737	369	184

Tabela 6.5 – Exemplo de peças com a redução do lead time e definição do pulmão de projeto. Fonte: Elaboração própria.

Abaixo na Figura 6.11 pode ser verificada a rede de atividades do modelo tradicional e a rede de atividades após redução dos tempos conforme procedimento da corrente crítica para uma peça da família Pá Francis.

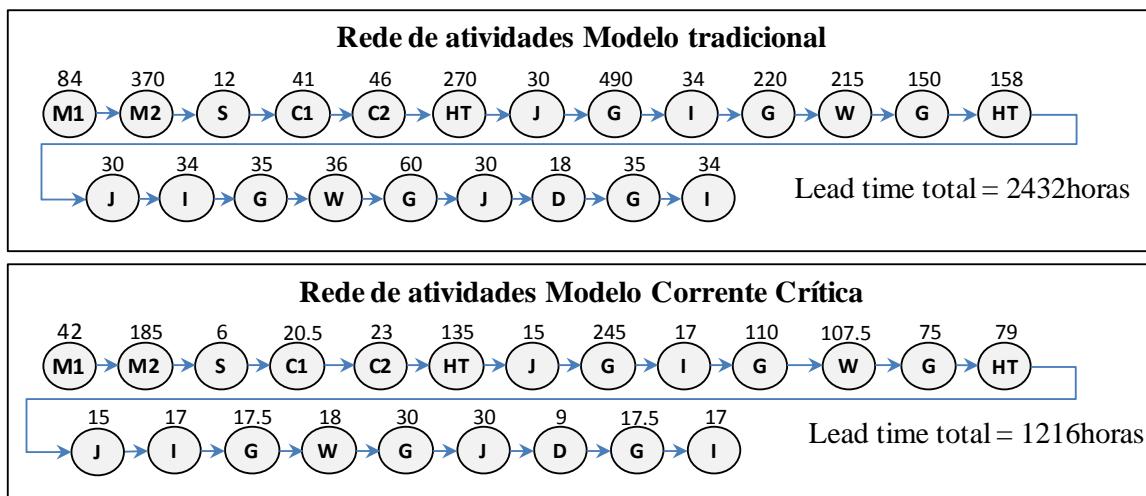


Figura 6.11 – Rede de atividade dos modelos tradicional e corrente crítica para a peça Pá Francis. Fonte: Elaboração própria

Para todas as peças foi acrescentado o pulmão de projeto (PP) localizado no final da Corrente Crítica, ou seja, logo depois da última atividade que será realizada na rede, conforme exemplificado na Figura 6.12. O cálculo deste pulmão é realizado através da

somatória de todo o tempo retirado de cada atividade dividido por dois, sendo o resultado para o exemplo abaixo igual a 608 horas.

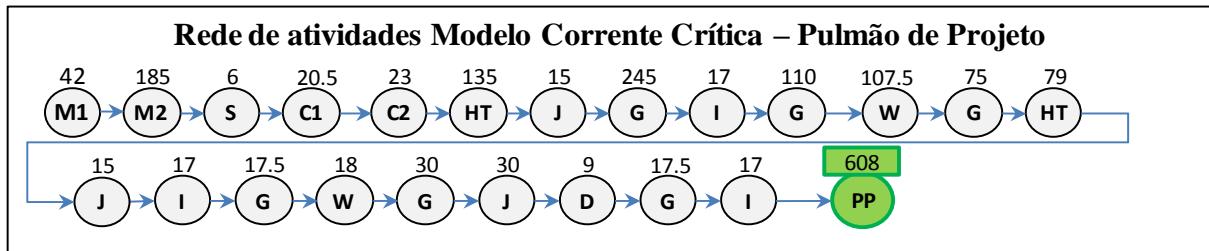


Figura 6.12 – Rede de atividades para a peça Pá Francis apresentando o Pulmão de Projeto. Fonte: Elaboração própria

Além disso, foi acrescentado no modelo um controle do consumo dos pulmões de projeto de cada peça, seguindo a lógica do gráfico de controle sugerido por Leach *apud* Campanini (2008), conforme pode ser visto na Figura 6.13.

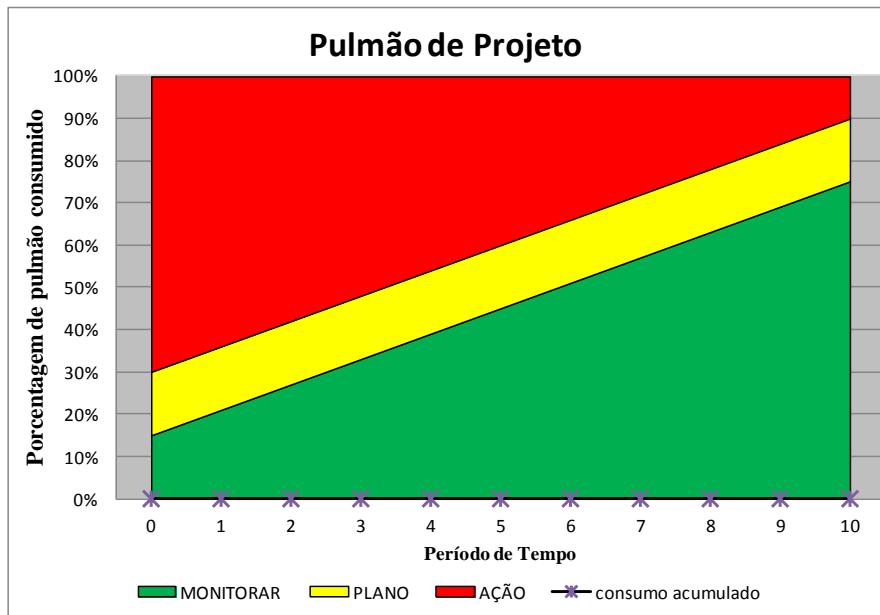


Figura 6.13 – Gráfico de pulmão de tempo . Fonte: Leach *apud* Campanini (2008)

A área verde que é a faixa de monitoramento, inicia-se com limite superior de 15% de consumo do pulmão e termina no período 10 com limite superior igual a 75%. A faixa determinada pelo plano de ação (faixa amarela) inicia-se com seu limite inferior de consumo do pulmão em 15% e o superior em 30% e termina no período 10 com limite inferior igual a 75% e limite superior igual a 90%. A faixa de ação definida pela área vermelha possui inicialmente o limite inferior em 30% e no período 10 seu limite inferior é igual a 90%, onde toda a área acima deste limite é considerada crítica.

Os valores apresentados no gráfico da Figura 6.13 são considerados mais adequados por não serem rigorosos a ponto de atrapalhar o andamento do projeto. No

entanto, existem gráficos nos quais a faixa verde de monitoramento é muito pequena e a faixa de definição de plano é muito larga, sendo que, qualquer atraso no andamento do projeto já remete a elaboração de um plano de ação. Há ainda gráficos onde a faixa de monitoramento é extremamente larga, indicando ações a serem tomadas somente quando o pulmão estiver muito consumido, levando a possíveis atrasos na entrega do projeto.

Para acompanhar o consumo do pulmão, definiu-se um monitor no modelo de simulação que verifica constantemente o consumo conforme as atividades vão sendo desempenhadas. Para adequar o processo de simulação ao gráfico proposto por Leach, foram utilizados 10 períodos de monitoramento sendo cada período diferente para cada peça, pois o cálculo é feito baseado no *lead time* reduzido (*lead time* - da corrente crítica) mais o pulmão de projeto (**(L+PP)/10 horas**, onde L=*lead time* e PP=Pulmão de projeto). Por exemplo, na Tabela 6.5 o período de monitoramento para a Pá Francis ocorre a cada 182 horas ((1216+608)/10) e para o Trator a cada 119 horas ((793+397)/10).

Cada vez que o monitoramento é acionado, o modelo avalia se para terminar a atividade corrente foi utilizado mais ou menos tempo do que o tempo estimado para cada atividade. Se o tempo gasto for maior do que o tempo estimado da atividade, a diferença será subtraída do pulmão. Caso contrário, é entendido que a atividade foi terminada antes do tempo estimado, aumentando desta maneira o pulmão remanescente. Este procedimento pode ser visto no exemplo apresentado na Figura 6.14, onde o pulmão de projeto começa a ser consumido a partir do segundo período de monitoramento.

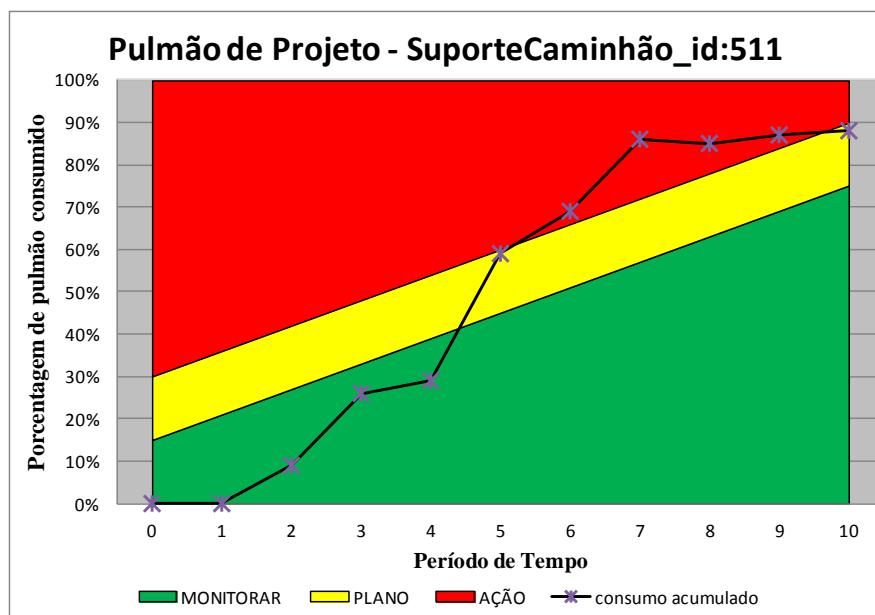


Figura 6.14 – Consumo do pulmão de projeto para a peça SuporteCaminhão\_id:511. Fonte: Elaboração própria

Neste exemplo, o pulmão de projeto vai sendo consumido, pois as atividades levam mais tempo do que o tempo estimado. No entanto, até o período 4 não é necessário fazer nada, apenas acompanhar o andamento da fabricação. Já no período 5 houve um grande consumo do pulmão (59%), sendo necessário elaborar um plano de ação para o caso deste consumo alcançar a faixa vermelha do gráfico nos períodos seguintes. No modelo simulado, o plano de ação é o uso de horas extras, logo para todos os casos que estiverem na faixa vermelha são utilizadas horas extras para recuperar os atrasos até que o consumo do pulmão saia desta área. No exemplo, mesmo utilizando horas extras durante os próximos quatro períodos o pulmão foi sendo consumido, no entanto, mesmo que o consumo do pulmão tenha sido igual a 88%, a peça foi entregue no prazo.

Todos os centros de trabalho que estiverem trabalhando com as peças críticas, ou seja, as peças que estiverem com o pulmão consumido situado no gráfico na área vermelha, trabalharão em regime de horas extras, limitadas a 2,5 horas por dia útil. Portanto, enquanto a peça não sair da área vermelha deverá ser utilizado hora extra. Mesmo que a atividade corrente termine, o próximo centro de trabalho avaliará a situação do pulmão na entrada da peça e continuará trabalhando em regime de hora extra até que esta situação se amenize. Importante ressaltar que a ação de hora extra **não é aplicada** no caso das peças que estiverem no forno de tratamento térmico, por se tratar de um recurso que trabalha 24 horas por dia, 7 dias por semana.

Quando as peças chegam ao forno de tratamento térmico para formar o lote, é avaliado se os fornos estão ocupados e se há fila de peças aguardando para serem tratadas. Se pelo menos um forno estiver disponível, a quantidade mínima de peças será encaminhada para ser processada. Caso todos os fornos de tratamento térmico estejam ocupados, pelo menos um lote de peças deverá aguardar na fila para ser processada. Quando todos os fornos estiverem tratando peças e houver mais de um lote aguardando na fila, o lote será aumentado até seu limite (capacidade máxima do forno) ou até que a condição anterior tenha sido quebrada. Neste caso, será formado um lote que comportará um número entre o mínimo e o máximo de peças possível. Conforme os lotes vão sendo processados, estas regras são novamente avaliadas, buscando manter os centros de trabalho sempre trabalhando e produzindo o máximo possível. Esta situação pode ser vista no fluxograma apresentado anteriormente na Figura 6.10.

O tamanho mínimo e máximo dos lotes é definido pelos especialistas, baseado no espaço físico do forno de tratamento térmico, bem como, o peso das peças e a composição

do metal. O tamanho dos lotes de peças tratadas no forno ao invés de serem fixos, agora são flexíveis para garantir que o recurso esteja sempre trabalhando, além das peças com pulmão mais consumido serem priorizadas frente às demais.

O conceito de pulmão da capacidade é definido por Goldratt (1998) como sendo uma proteção ao recurso gargalo em múltiplos projetos, garantindo que os recursos estratégicos estejam disponíveis quando necessário a sua utilização. Portanto, esse tipo de pulmão tem como objetivo principal seqüenciar as tarefas, protegendo-as entre o fim de um projeto anterior e o início de um próximo.

Nesse estudo estão sendo analisados múltiplos projetos, contudo, foram identificadas algumas limitações em se aplicar esse conceito de pulmão da capacidade, devido a:

1. As peças chegam de maneira aleatória ao recurso gargalo – forno -, o que inviabiliza sua programação e seqüenciamento;
2. Dificuldade em priorizar os projetos, pois a demanda por tratamento térmico é desconhecida;

Então, considerando as limitações apresentadas acima, decorrentes ao fato do modelo estudado ser estocástico, não foi possível aplicar o conceito de pulmão da capacidade conforme a teoria. Nesse estudo foram utilizados princípios da TOC no intuito de melhorar a utilização do recurso gargalo.

Outra alteração significante no modelo original ocorreu nas regras de priorização, onde cada centro de trabalho avalia dentre todas as peças que estiverem na fila para serem processadas, aquela na qual o pulmão de projeto tiver sido mais consumido e prioriza sobre as demais peças. Ou seja, as peças mais atrasadas deverão ser priorizadas, ou como Goldratt (1998) cita que esta medida de desempenho deve ser similar a uma “batata quente”: quanto maior o tamanho do pedido e quanto mais atrasado ele estiver, tanto mais quente a batata.

### **6.5.3 Cenário Utilizando a Corrente Crítica - Tempos de Processo Reduzidos**

Neste cenário adicional, foi avaliado o mesmo modelo utilizando a corrente crítica abordado no item anterior. No entanto, os dados referentes aos tempos de processo,

foram reduzidos, considerando que as estimativas dadas pelos especialistas tenham segurança embutida. Neste sentido, procurou-se neste cenário avaliar o impacto do método da corrente crítica caso estes tempos possam ser reduzidos.

Para simular este outro cenário da corrente crítica, foram tomados todos os tempos de processo (pessimistas, mais prováveis e otimistas) de cada atividade e de cada família de peças, sendo estes reduzidos em 25% do tempo original. Utilizou-se esta redução levando em conta o tempo da atividade na corrente crítica, mais o seu tempo de contribuição para formação do pulmão de projeto. Logo, se uma atividade possui o tempo médio de processo igual a 40 horas, neste cenário o tempo será igual a  $40*50\%+40*25\% = 30$  horas. Para os tempos pessimistas e otimistas foi utilizada a mesma lógica.

A seguir serão apresentados os resultados de todos os cenários e suas análises.

#### **6.5.4 Comparação dos Resultados dos Três Cenários**

Neste tópico são apresentados todos os resultados significativos, comparando-se os cenários simulados. Para avaliar a eficácia do modelo proposto, foram utilizadas as seguintes medidas de desempenho:

- **Quantidade de peças expedidas:** registra o número de peças que terminaram todo o processo;
- **Quantidade de peças entregues no prazo:** esta variável calcula a quantidade de peças que terminaram o processo e foram expedidas dentro do *lead time* do projeto;
- **Trabalho em processo (WIP):** calculado a partir da entrada na moldação, pois é nesta etapa que a produção é iniciada;
- **Tempo médio de atraso:** calculado baseado no momento da entrega e comparado ao *lead time* do projeto;
- **Tempo médio de espera na fila do recurso Gargalo:** neste caso foi criado um controle no modelo que avalia o tempo médio gasto por peça aguardando para ser processada no forno de tratamento térmico;
- **Lead time médio:** avaliado para cada família de peças em cada um dos cenários simulados;

- **Consumo médio do pulmão:** calculado no modelo utilizando a corrente crítica;

- **Horas extras utilizadas:** calcula o volume de horas extras gastos durante o período simulado;

- **Utilização dos recursos de cada centro e ferramentais:** calculado a partir da disponibilidade de cada centro de trabalho, considerando o calendário e os turnos de trabalho.

Para esta análise, foi utilizado um **intervalo de confiança de 95%** e cada cenário foi **replicado 100 vezes**, sendo que, nestas simulações o estado inicial do sistema não se modifica, apenas as sementes dos geradores de números aleatórios em cada simulação. A variável utilizada para determinar as replicações foi a taxa de entrada das peças, considerando a distribuição exponencial com média igual a 9 horas.

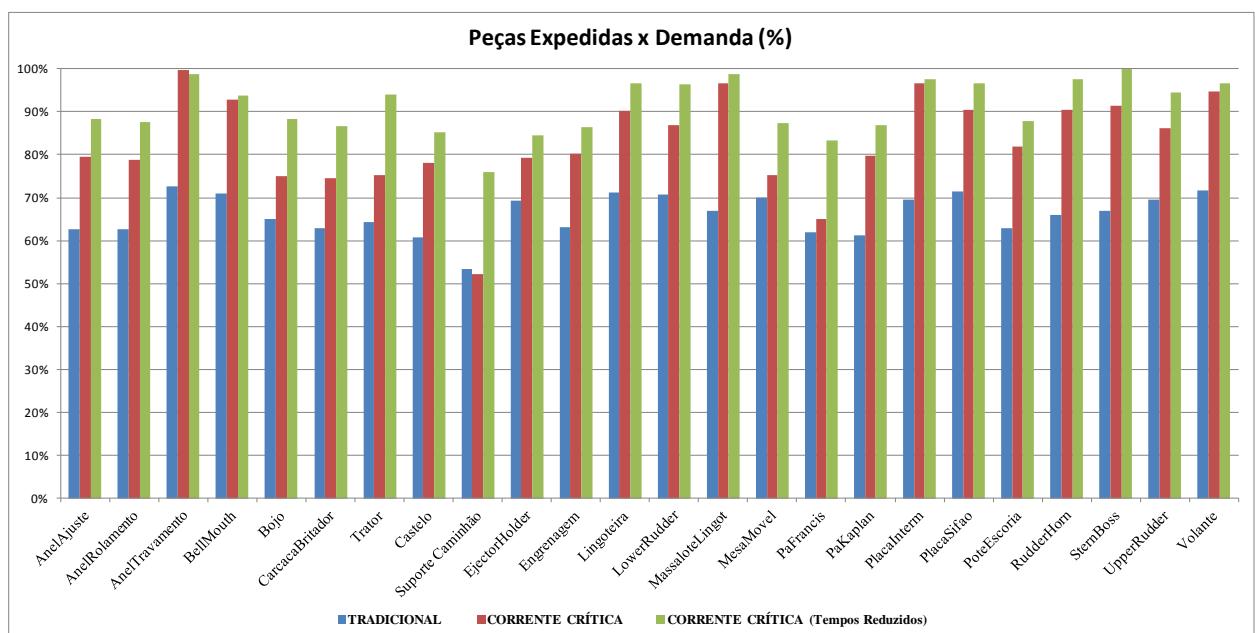


Figura 6.15 – Relação peças expedidas e peças demandadas. Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 6.15 é mostrado o nível de atendimento a demanda. Este gráfico representa se a demanda solicitada pelos clientes foi atendida, não necessariamente no prazo, mostrando o excelente desempenho da corrente crítica frente ao modelo tradicional, permitindo que mais peças pudessem ser entregues. Considerando todo o volume de peças, houve um aumento de 7% no atendimento a demanda para o cenário da corrente crítica e de 25% no cenário da corrente crítica com redução nos tempos de processo.

Na Tabela 6.6 abaixo pode-se notar um aumento significativo no **atendimento da demanda no prazo** utilizando a corrente crítica. Houve também uma grande redução no

atraso das peças, passando de 298 horas no modelo tradicional para 100 horas no modelo utilizando a corrente crítica. Avaliando o modelo da corrente crítica com as reduções no tempo de processo, o atraso em média foi de 64 horas.

	Peças expedidas	Peças entregues no prazo	Atendimento (%)	Atraso médio (horas)
<b>tradicional</b>	530	272	<b>51%</b>	298,20
<b>corrente crítica</b>	596	418	<b>70%</b>	100,83
<b>corrente crítica - tempos reduzidos</b>	751	733	<b>98%</b>	64,90

Tabela 6.6 – Peças expedidas no prazo e Atraso médio de fornecimento. Fonte: Elaboração própria.

Abaixo, são apresentadas as demais medidas de desempenho dos outros cenários.

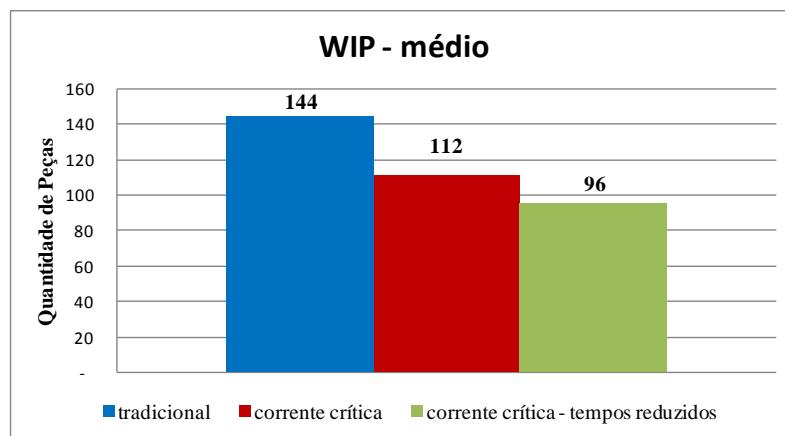


Figura 6.16 – WIP médio considerando os cenários simulados. Fonte: Elaboração própria.

Como pode ser verificado na Figura 6.16, houve uma redução significativa da quantidade de peças em processo quando utilizou-se a corrente crítica. Isto se deve, principalmente, pela redução da segurança embutida nos tempos de processo e o aumento da ênfase nos projetos que estiverem com o pulmão mais consumido. Ainda na Tabela 6.7 abaixo, é possível verificar esta redução para todo o conjunto de peças simuladas.

WIP - por família de peças					
PEÇA	tradicional	corrente crítica	Variação (comparado ao modelo tradicional)	corrente crítica (tempos reduzidos)	Variação (comparado ao modelo tradicional)
AnelAjuste	1,39	0,96	31%	0,98	29%
AnelRokamento	1,27	0,90	29%	0,89	30%
AneITravamento	0,70	0,22	68%	0,23	67%
BellMouth	1,11	0,61	46%	0,54	51%
Bojo	1,43	1,11	22%	1,20	16%
CarcacaBritador	4,82	3,65	24%	3,97	18%
CaseTrator	36,68	27,06	26%	20,72	44%
Castelo	2,01	1,45	28%	1,45	28%
Suporte Caminhão	65,98	56,82	14%	47,34	28%
EjectorHolder	1,05	0,72	31%	0,77	26%
Engrenagem	1,23	0,90	27%	0,88	28%
Lingoteira	4,50	2,40	47%	1,92	57%
LowerRudder	0,51	0,27	47%	0,25	51%
MassaloteLingot	0,87	0,21	76%	0,21	76%
MesaMovel	1,59	1,25	21%	1,35	15%
PaFrancis	10,90	8,85	19%	8,77	20%
PaKaplan	1,92	1,35	29%	1,47	23%
PlacaInterm	0,81	0,26	68%	0,22	73%
PlacaSifao	1,30	0,59	55%	0,54	59%
PoteEscoria	1,24	0,77	38%	0,79	37%
RudderHorn	0,50	0,24	51%	0,23	54%
SternBoss	0,47	0,30	37%	0,28	41%
UpperRudder	0,43	0,22	48%	0,21	51%
Volante	1,40	0,65	53%	0,66	53%
<b>TOTAL</b>	<b>144,10</b>	<b>111,76</b>	<b>22%</b>	<b>95,85</b>	<b>33%</b>

Tabela 6.7 – WIP para todas as famílias de peças. Fonte: Elaboração própria.

O próximo indicador é o *lead time* de projeto médio encontrado para os cenários simulados. Na Tabela 6.8 é possível verificar que nos resultados encontrados utilizando a corrente crítica houve, na maioria das famílias, uma redução no *lead time* de projeto médio. Em um caso específico, na peça suporte caminhão, a redução não foi tão representativa e remete a uma análise mais detalhada, conforme será visto adiante.

PEÇAS	TRADICIONAL		CORRENTE CRÍTICA			CORRENTE CRÍTICA - tempos reduzidos		
	Média peças expedidas	Lead Time médio	Média peças expedidas	Lead Time médio	Variação Lead time Comparado ao método tradicional	Média peças expedidas	Lead Time médio	Variação Lead time Comparado ao método tradicional
AnelAjuste	5	2.511,06	7	1.900,28	24%	8	1.390,38	45%
AnelRolamento	5	2.494,64	7	1.887,50	24%	7	1.378,73	45%
AnelTravamento	4	1.606,28	6	603,41	62%	6	463,20	71%
BellMouth	6	2.073,31	8	1.190,32	43%	7	800,99	61%
Bojo	5	2.686,04	7	2.219,19	17%	8	1.642,66	39%
CarcacaBritador	18	2.741,83	22	2.258,90	18%	25	1.697,77	38%
Trator	152	1.803,60	177	1.311,53	27%	221	1.038,05	42%
Castelo	7	2.583,86	9	2.103,50	19%	10	1.527,29	41%
Suporte Caminhão	198	590,18	194	525,84	11%	284	554,87	6%
EjectorHolder	4	2.556,89	5	2.065,36	19%	5	1.577,86	38%
Engrenagem	5	2.457,04	7	1.911,53	22%	7	1.374,47	44%
Lingoteira	28	1.304,98	35	668,96	49%	37	504,32	61%
LowerRudder	3	1.859,21	3	1.171,39	37%	3	834,62	55%
MassaloteLingot	5	1.585,06	8	437,05	72%	8	292,07	82%
MesaMovel	8	1.231,74	9	902,69	27%	10	719,70	42%
PaFrancis	36	2.419,58	38	2.184,83	10%	48	1.762,80	27%
PaKaplan	7	2.550,91	9	2.065,75	19%	10	1.561,64	39%
PlacaInterm	5	1.524,35	8	490,58	68%	8	311,63	80%
PlacaSifao	8	1.491,06	11	700,78	53%	11	517,03	65%
PoteEscoria	5	2.385,19	6	1.779,99	25%	7	1.240,79	48%
RudderHorn	2	1.994,66	3	1.193,96	40%	3	836,11	58%
SternBoss	2	2.226,26	3	1.488,24	33%	3	1.084,19	51%
UpperRudder	2	2.015,57	3	1.082,45	46%	3	786,25	61%
Volante	8	1.689,71	11	891,82	47%	11	704,55	58%

Tabela 6.8 – Avaliação do Lead time médio e peças expedidas para os cenários simulados. Fonte: Elaboração própria.

Para os cenários utilizando a corrente crítica o **consumo médio do pulmão de projeto** foi analisado considerando todos os projetos. Após as 100 replicações obteve-se o consumo médio do pulmão igual a 169,24% no cenário da corrente crítica com os tempos de processo iguais aos tempos do cenário tradicional e 72,77% de consumo no cenário da corrente crítica com os tempos reduzidos. Este indicador permite concluir que:

- os *lead times* e o dimensionamento dos pulmões devem ser reavaliados no caso da corrente crítica com os tempos de processo médio iguais ao cenário tradicional, utilizando-se outros métodos como os apresentados na revisão bibliográfica para este cálculo;

- no caso do cenário da corrente crítica com os tempos de processo reduzidos, o consumo foi alto, mas não o suficiente para prejudicar a entrega das peças. Importante avaliar se os tempos de processo estimados pelos especialistas são coerentes com a realidade, ou seja, é necessária a avaliação *in loco* utilizando métodos de avaliação dos tempos, como por exemplo, a cronometragem das atividades.

O uso da hora extra também foi avaliado após o fim da simulação, considerando todos os projetos. Comparando-se os três cenários, verificou-se uma redução das horas extras no caso do método da corrente crítica quando comparada ao cenário tradicional, conforme pode ser visto na Tabela 6.9. No entanto, esta redução é muito mais significativa quando comparada ao cenário da corrente crítica com os tempos de processo reduzidos.

		Média	Redução
<b>Horas extras:</b> <b>Tradicional</b>	➡	30.725,00	
<b>Horas extras:</b> <b>Corrente Crítica</b>	➡	27.498,16	<b>11%</b>
<b>Horas extras:</b> <b>Corrente Crítica tempos reduzidos</b>	➡	7.823,89	<b>75%</b>

Tabela 6.9 – Avaliação horas extras utilizadas. Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar os resultados apresentados referentes ao uso de horas extras, cabe citar que as horas disponíveis de trabalho nos turnos normais são de 331.555 horas, logo temos a seguinte relação:

Cenário Tradicional: utilizou 9% de horas extras;

Cenário Corrente Crítica: utilizou 8,2% de horas extras;

Cenário Corrente Crítica com tempos reduzidos: utilizou 2,3% de horas extras;

### 6.5.5 Análise da Capacidade com os Resultados Gerados

Nesse item serão analisados os resultados das simulações desenvolvidas, objetivando a verificação do comportamento da capacidade fabril em cada cenário. Contudo, no processo de simulação não foi possível alterar o calendário de trabalho de maneira interativa (se algo ocorrer faça isso) ou utilizando alguma heurística, somente de maneira determinística. Portanto, optou-se por desenvolver as simulações, para então, avaliar os dados apresentados e propor alternativas para alteração da capacidade.

Nos gráficos e tabelas a seguir é possível avaliar algumas situações geradas após o término da simulação.

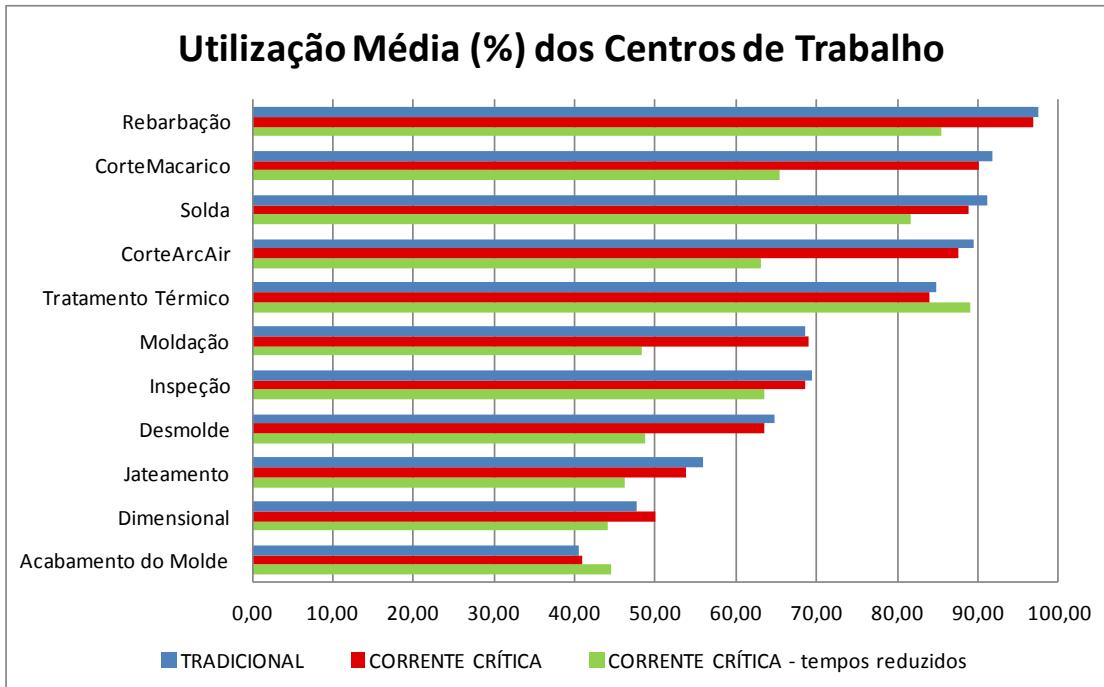


Figura 6.17 – Comparaçāo da utilizāo mādia dos Centros de Trabalho. Fonte: Elaboraçāo própria.

De acordo com Vollmann (2006), os recursos gargalos sāo aqueles no qual a utilizāo estiver acima de 80%. Pelo gráfcio de utilizāo mādia dos Centros de Trabalho, apresentado na Figura 6.17 acima, é possivel identificar os cinco centros de trabalho mais críticos: Rebarbação, Corte Maçarico, Solda, Corte ArcAir e Tratamento Térmico. No entanto, como citado anteriormente, o único recurso que nāo pode ter sua capacidade aumentada é o Tratamento Térmico, exceto pela construçāo de outro forno (investimento de longo prazo) ou terceirizaçāo do serviço (procedimento nāo usual).

Com o mētodo da corrente crítica reduzindo os tempos de processo, o uso do forno de tratamento foi aumentado, devido a melhoria no processo de formação dos lotes. Além disso, a utilizāo dos outros recursos gargalos (Rebarbação, Solda, Corte Maçarico e ArcAir) foi reduzida, devido a diminuiçāo dos prazos de segurança nestas etapas, além do uso da hora extra nos momentos adequados.

Baseado nestas informaçōes foi avaliado tambéo o tempo mādio de peças na fila do forno de tratamento térmico, aguardando para serem tratadas.

TEMPO MÉDIO DE PEÇAS NA FILA AGUARDANDO PARA SEREM TRATADAS		
TRADICIONAL	CORRENTE CRÍTICA	CORRENTE CRÍTICA (tempo reduzido)
87,71 HORAS	65,43 HORAS	39,13 HORAS

Tabela 6.10 – Avaliaçāo do tempo mādio na fila do Tratamento Térmico. Fonte: Elaboraçāo própria.

Na Tabela 6.10, é possível verificar o forte impacto da modificação da formação dos lotes de peças no forno de tratamento térmico, bem como, a utilização de regras de priorização baseadas no consumo do pulmão, garantindo que as peças com pulmão crítico sejam processadas na frente das demais.

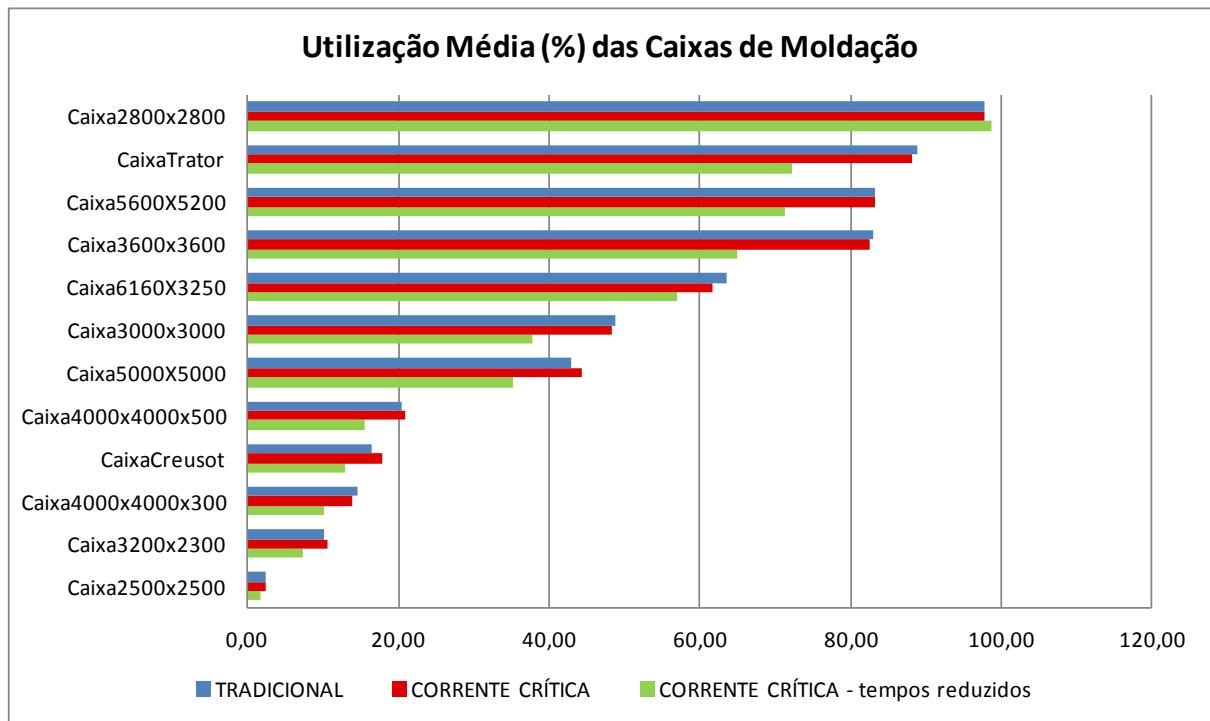


Figura 6.18 – Comparação da utilização média das caixas de moldação. Fonte: Elaboração própria.

Na análise apresentada na Figura 6.18, pode-se verificar o uso intensivo de determinados ferramentais, tanto no modelo tradicional quanto no uso da corrente crítica. Na análise da capacidade, o gerente poderia aumentar a quantidade de quatro tipos diferentes de caixas em proporções que possivelmente fossem subutilizadas. No entanto, com o uso da corrente crítica com os tempos de processo reduzidos, o foco seria dado apenas na compra de mais caixas do tipo 2800mm x 2800mm, por ser o único ferramental que limita a demanda. Isso se deve dentre outros fatores à redução do *lead time* nas operações de uso deste ferramental como a Moldação, o acabamento do molde e o desmolde. Além disso, aumentando-se a quantidade deste ferramental, seria possível melhorar o *lead time* das peças Suporte de Caminhão que fazem uso destas caixas de moldação.

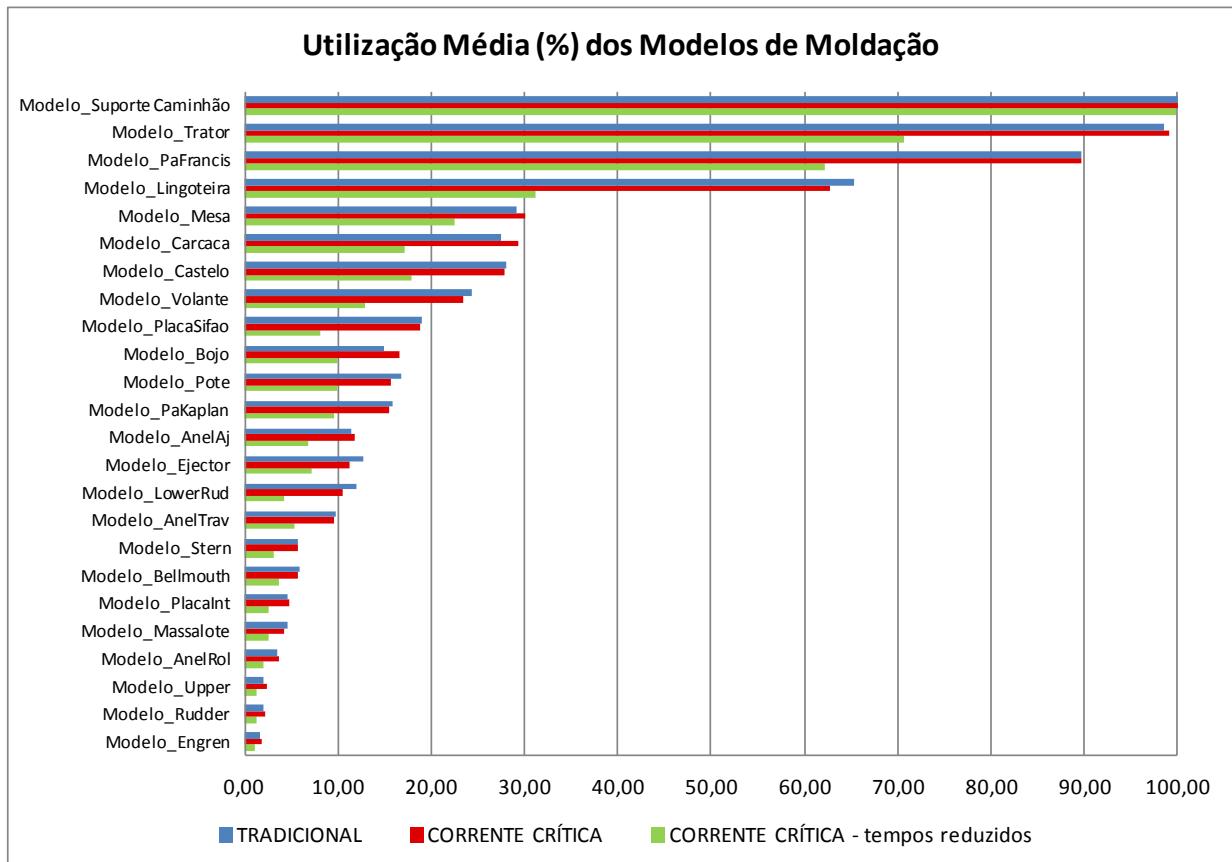


Figura 6.19 – Comparação da utilização média dos Modelos para moldação. Fonte: Elaboração própria.

Na análise do uso dos modelos (ver acima Figura 6.19), verificou-se uma grande redução quando aplicada a técnica da Corrente crítica com os tempos reduzidos. No entanto, como pode ser visto, o modelo para Suporte Caminhão está sendo utilizado durante todo o tempo, isso se deve ao grande volume de vendas deste tipo de peça. A tomada de ação neste caso poderia ser comprar mais um modelo deste tipo, analisando a viabilidade financeira, bem como, a oportunidade de novas vendas deste tipo de produto. Pode ser observado que se a decisão fosse tomada com base nos resultados do modelo tradicional, haveria uma forte tendência em se aumentar a capacidade de três tipos de modelo, o que provavelmente não traria tantos resultados na análise feita pelo método da corrente crítica.

## 7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi aplicar o método da corrente crítica em uma fundição através da simulação, no intuito de verificar se o planejamento da capacidade desenvolvida atualmente pode ser aprimorado, e como consequência, melhorar o desempenho de entrega.

Aplicando a técnica da corrente critica com o uso da simulação no chão de fábrica do ambiente estudado, foi verificado que esse método proporcionou melhores resultados dos indicadores avaliados em detrimento aos dados verificados no modelo tradicional. Identificou-se a redução nos *lead times* médios das peças, implicando na melhora do desempenho no atendimento a demanda, ou seja, houve redução nos atrasos. E ainda, observou-se uma redução no volume médio do trabalho em processo (*WIP*), melhorando o fluxo das peças e reduzindo assim, o tempo de fila de espera nos centros de trabalho.

Além disso, a análise dos dados apresentados nas simulações com a aplicação da técnica da corrente crítica, aliado a experiência dos especialistas, proporcionam informações mais concisas para a tomada de decisão gerencial. Essa decisão agora será direcionada a algumas etapas de produção relacionadas à utilização do recurso gargalo, e consequentemente melhorando a capacidade do sistema como um todo. Portanto, o planejamento da capacidade será mais eficaz e refletirá no posicionamento competitivo da empresa.

Com este estudo de simulação foi possível entender que o gerenciamento da produção e da capacidade através do monitoramento dos pulmões de projeto facilita a tomada de decisões na priorização das ordens de produção e na forma como os recursos são administrados, considerando todos os projetos e evitando-se a tomada de decisões de forma precipitada e sem embasamento.

As características do modelo proposto foram aplicadas por meio do simulador *Simio* que atendeu as necessidades inerentes aos cenários estudados, proporcionando relatórios que possibilitaram a análise dos resultados gerados. O simulador também permite que novos experimentos sejam realizados, apenas modificando ou acrescentando novos parâmetros.

No entanto, foram encontradas algumas limitações na elaboração do trabalho, sendo elas:

- A inviabilidade em se aplicar o pulmão da capacidade na simulação como é apresentado na literatura, pois as características estocásticas do modelo dificultaram a fase de seqüenciamento dos projetos frente ao recurso gargalo;

- Devido ao modelo não utilizar dados financeiros, não foi possível implementar as informações relacionadas a fase de suprimentos e custo da mão-de-obra.

Tendo em vista que a comparação dos resultados se mostrou satisfatória, a próxima etapa será apresentar estas informações para a alta gerência da fundição e propor a aplicação do método estudado. Esta proposta caberia para novos trabalhos, como exemplo a Pesquisa-Ação.

Além disso, com o uso da simulação e da corrente crítica será possível apresentar resultados mês a mês para um horizonte de 12 meses, onde o gerente de produção poderá substituir o uso das planilhas utilizadas no cálculo do plano de capacidade e avaliar cenários diferenciados.

Dentro do modelo simulado, será possível avaliar alterações da capacidade da fábrica: contratando, demitindo, adquirindo mais recursos, etc., bem como, envolver aspectos financeiros para avaliar se as ações tomadas podem ser atrativas. Com a influência de dados financeiros, buscar soluções que aumentem o lucro/ reduzam despesas. Através disso, será possível verificar qual o *mix* de produção será mais interessante, considerando o ganho *versus* o consumo do recurso gargalo. Também possibilitará trabalhar com a priorização das ordens baseada na contribuição marginal dos gargalos.

Ainda, como sugestão para novos trabalhos, pode-se alterar o gráfico de monitoramento dos pulmões de tempo, aumentando-se a faixa de ação para que deste modo as horas extras sejam realizadas de maneira mais reativa.

Mesmo não sendo o objetivo principal deste trabalho, vale a pena comentar que o foco principal na implementação do Método da corrente crítica muitas vezes não está na técnica, mas sim na mudança cultural necessária a sua aplicação. É importante lembrar que a incerteza é uma variável inerente a todo tipo de projeto, e lidar com este problema pode significar a diferença entre o sucesso e o fracasso de um projeto.

## Referências Bibliográficas

- APICS – The Association for Operations Management. The Educational Society for Resource Management. Master Planning of Resources. Virginia, 2000
- ANTUNES JÚNIOR, J. A. V. Em Direção a uma Teoria Geral do Processo na Administração da Produção: Uma Discussão sobre a Possibilidade de Unificação da Teoria das Restrições e a Teoria que Sustenta a Construção dos Sistemas de Produção com Estoque Zero. Tese de Doutorado, UFRGS 1998
- ARAÚJO, S. A.: Modelos e métodos para o planejamento e programação da produção aplicados no setor de fundições. Tese de Doutorado, USP, São Carlos, 2003.
- BADRI, M. A simulation Model for Multi-Product Inventory Control Management, Simulation, v.72, pp.20, 1999.
- BANKS, J. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice, 1<sup>a</sup> edição, Wiley-IEEE, 1998.
- BARCAUI, A.B.; QUELHAS O.L.G. – Corrente Crítica: Uma Alternativa à Gerência de Projetos Tradicional. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção n.2, p1-21, 2004.
- BERTRAND, J.W.M.; FRANSOO, J.C. Modelling and Simulation: Operations management research methodologies using quantitative modeling. International Journal of Operations & Production Management, v.22, n. 02, p. 241-264, 2002.
- BOYER, R.; FREYSSENET, M. The world that changed the machine. In: Rencontre Internationale du GERPISA. Paris, Junho de 2000.
- BRYMAN, A. Research Methods and Organization Studies. London: Routledge, 1989.
- BURBIDGE, J.L. Production Control: a universal conceptual framework. Production Planning and Control, v. 1, n. 1, p. 3-16, 1990.
- CAMPANINI, L. Gerenciamento de projetos em uma empresa de bens de capital: uma comparação entre os procedimentos utilizados e o método da corrente crítica. UFSCar 2008.
- CHASE, R. B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N. J. Administração da Produção para a vantagem competitiva. 10<sup>a</sup> ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. Cap.10; Cap.13.
- COHEN, I.; MANDELBAUM, A.; SHTUB, A. Multi-project scheduling and control: A process-based comparative study of the critical chain methodology and some alternatives. Project Management Journal, v.35, n.2. 2004.
- CONTADOR, J.C; CONTADOR, J.L. Programação e Controle da produção para indústria intermitente (Cap. 19, p.237-256). In: CONTADOR, J.C. (Coordenador): Gestão de Operações. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda., 1997.

- CORRÊA, H.; GIANESI, I. Sistemas de planejamento e controle da produção Manufatura (Cap. 21, p.287-308). In: CONTADOR, J.C.(Coordenador): Gestão de Operações. São Paulo: Editora Edgar Blücher Ltda, 1997.
- CORRÊA, H.L.; GIANESI, I.G.N.; CAON, M. Planejamento, programação e controle da produção: MRPII/ERP: conceitos, uso e implantação: base para SAP, Oracle Applications e outros softwares integrados de gestão. 5<sup>a</sup> ed. São Paulo: Atlas, 2009.
- COUGHLAN, P.; COUGHLAN, D. Action Research: Action Research for Operations Management. International Journal of Operations & Production Management, v. 22, n.2, p. 2220-240, 2002.
- DEMO, P. Metodologia do conhecimento científico. São Paulo: Atlas, 2000.
- FERNANDES F. C. F.; GODINHO FILHO M. Planejamento e Controle da Produção – Dos Fundamentos ao Essencial. São Paulo: Atlas, 2010. Cap. 1; Cap. 3; Cap. 6; Cap. 7.
- FERNANDES F. C. F.; LEITE R. B. Automação industrial e sistemas informatizados de gestão da produção em fundições de mercado. Gestão & Produção, VOL. 9, Nº 3, PP.235-266, 2002.
- FREELAND, J. R.; LANDEL, R. D. Aggregate production planning: text and cases. Reston: Reston, 1984. Darden Case Series.
- FREITAS FILHO, P. Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas – com Aplicações em Arena. Florianópolis: Visual Books, 2001.
- GOOD, I. J. Categorization of classification. In: Mathematics and computer science in medicine and biology. London: HMSO, p. 115-128, 1965.
- GROOVER, M. P. Introduction. In: Automation, Production Systems and Computer Integrated Manufacturing. Prentice Hall, 2nd Edition, 2001.
- GOLDRATT, E.M. Corrente Crítica. São Paulo: Nobel, 1998.
- GOLDRATT, E.M.; COX, J. A meta. São Paulo: Educator, 1994.
- HARREL, C. R.; GHOSH, B. K.; BOWDEN, R. Simulation Using Promodel. McGraw-Hill. 1996.
- HERROELEN, W.; LEUS, R. On the merits and pitfalls of critical chain scheduling. Journal of Operations Management, n.19, p.559-577, 2001.
- HO, L.L. In: MIGUEL, P.A.M. (org.). Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.
- JOHNSON, L.A.; MONTGOMERY, D.C. Operations research in production planning, scheduling and inventory control. New York: John Wiley, 1974.
- LANDMANN, R. Um Modelo Heurístico para a Programação da Produção em Fundições com Utilização da Lógica Fuzzy. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis, 2005.

- LAW, A. M.; KELTON, W. D. *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1991.
- LEACH, L.P. Critical Chain Project Management Improves Project Performance. Project Management Institute, Vol.30. Nº2, p.39-51. USA, 1999.
- MACCARTHY, B. L.; FERNANDES, F. C. F. A multidimensional Classification of Production Systems for the Design and Selection of Production Planning and Control Systems. *Production: Planning and Control*, v.11, n.5, p.481-496, 2000.
- MARTINS, R.A. In: MIGUEL, P.A.M. (org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap.1; Cap.3.
- MCAR. Metal Casting Annual Report, Metal Casting Industry of the Future. Office of Industrial Technologies – U.S. Department of Energy, 2004.
- MCCLAIN J. O.; THOMAS L. J. *Operations Management: Production of Goods and Services*, Prentice-Hall, 1985, p.70-90.
- MIGUEL, PAULO A. C. Adoção do estudo de caso na engenharia de produção. In: MIGUEL, Paulo A.M (org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010, p.129-143.
- MME. Anuário da indústria da Fundição. Ministério das Minas e Energia do Brasil, Brasil, <http://www.mme.gov.br>, 2007
- MORABITO, R.; PUREZA, V. In: MIGUEL, P.A.M. (org.). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010. Cap.8.
- NAHMIAS, S. Facilities *Layout and Location* (Cap. 10, p.557-592). In: NAHMIAS, S.: *Production and Operations Analysis* (4th ed.). Irwin: McGraw-Hill, 2001.
- PEDGEN, C. D.; SHANON, R. E.; SADOWSKI, R. P. *Introduction to simulation using SIMAN*. McGraw-Hill: 2nd ed., NY, 1995.
- PEDGEN, C. D. *Introduction to Simio*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference. USA, 2008.
- PEREIRA, I. C. Proposta de Sistematização da Simulação para Fabricação em Lotes. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UNIFEI, Itajubá, MG, 2000.
- PIRES, S. R. I. *Estratégia de Manufatura* (Cap. 3, p.47-108). In: PIRES, S.: *Gestão Estratégica da Produção*. São Paulo: Editora Unimep, 1995.
- PIRES, S. R. I. *Gestão da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Management) – Conceitos, Estratégias e Casos*. São Paulo, Atlas, 2004.
- RAND, G.K. Critical Chain: the theory of constraint applied to project management. *International Journal of Project Management* n.18, p.173-177, 2000.

RITZMAN, LARRY P.; KRAJEWSKI, L.J. – Administração da produção e Operações; tradução Roberto Galman. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2004

SILVA, R.J.; MORABITO, R. Otimização da programação de cargas de forno em uma fábrica de fundição em aço-inox. Revista Gestão e Produção, Vol. 11, Num.1/ 2004, p.135-151

SILVA, O.S.; CEZARINO, W.; RATTO, J. Planejamento Agregado da Produção: Modelagem e Solução Via Planilha Excel & Solver. Revista Produção Online, Vol. IX/ Num.III/ 2009, p.572-599

SILVA, E.M.; RODRIGUES, L.H.; LACERDA, D.P. Aplicabilidade da corrente crítica da teoria das restrições no gerenciamento de projetos executivos de engenharia: um estudo de caso em uma refinaria de petróleo. Gestão & Produção, São Carlos, v.19, n.1, p.1-16, 2012.

SIPPER, D.; BULFIN JR., R.L. Production: Planning, Control and Integration, New York: Mc Graw Hill, 1997, p. 24-55

SLACK N.; CHAMBERS S.; HARLAND C.; HARRISON A.; JOHNSTON R. Administração da Produção. São Paulo: Atlas, 2002.

SOUZA, Fernando Bernardi de. Do OPT à teoria das restrições: avanços e mitos. Revista Produção, v.15, n.2, p.184-197, maio/ago. 2005.

STEYN, H. An investigation into the fundamentals of critical chain project scheduling. International Journal of Project Management. n.19, p.363-369, 2000.

STEYN, H. Project Management applications of the theory of constraints beyond critical chain scheduling. International Journal of Project Management. n.20, p.75-85, 2002.

TAHA, H. A.; Pesquisa Operacional. Pearson Addison Wesley, 8ª Edição, 2008

TEIXEIRA JUNIOR, R. F. Sistema de apoio à decisão para programação em fundições de mercado. Tese de Doutorado, UFSCar São Carlos, 2005.

TUBINO, D.F. Manual de planejamento e controle da produção. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2006.

TUKEL, O.I.; ROM, W.O.; EKSIOLLU, S.D. An investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling. European Journal of Operational Research – Vol.172 p. 401-416 North Holland, 2006.

VOLLMANN, T. E.; BERRY, W.L.; WHYBARK, D. C.; JACOBS, F. R. Sistemas de Planejamento & Controle da Produção para gerenciamento da cadeia de suprimentos. 5ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.648 p.

WALLACE, T. F.; Planejamento de Vendas e Operações - S&OP Guia Prático; Tradução Edgar Toporcov; 2ª edição. São Paulo: IMAM, 2008.

WOMACK, J.P.; JONES, D.T.; ROOS, D. As origens da produção enxuta. In: A máquina que mudou o mundo. Rio de Janeiro, Campus. 3ª edição, 1992, Capítulos 2 e 3, p. 7-62.

WU, S.D., M. ERKOC; S. KARABUK. Managing Capacity in The High-Tech Industry: A Review of Literature. *The engineering economist*, 50: 125-158. USA, 2005

Consulta a Sites:

- Associação Brasileira de Fundição (ABIFA), disponível em <<http://www.abifa.com.br/>>.