

RICARDO SCHMIDT ROMEIRO DE OLIVEIRA

APLICAÇÃO DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES NA MANUFATURA DE UMA
EMPRESA SIDERÚRGICA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins

Guaratinguetá
2011

O482a	<p>Oliveira, Ricardo Schmidt Romeiro de Aplicação da teoria das restrições na manufatura de uma empresa siderúrgica / Ricardo Schmidt Romeiro de Oliveira – Guaratinguetá : [s.n], 2011. 77 f : il. Bibliografia: f. 72-77</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011. Orientador: Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins Coorientador: Eng. Luis Alberto Oses Rodriguez</p> <p>1. Teoria das restrições (Administração) 2. Pesquisa operacional. I. Título</p> <p>CDU 658.5</p>
-------	---

APLICAÇÃO DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES NA MANUFATURA DE UMA EMPRESA
SIDERÚRGICA

RICARDO SCHMIDT ROMEIRO DE OLIVEIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **GRADUADO**
EM ENGENHARIA MECÂNICA

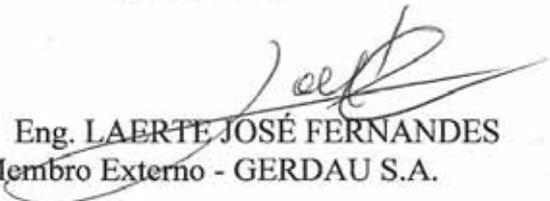
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. FERNANDO AUGUSTO SILVA MARINS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Msc. MARCO AURÉLIO REIS DOS SANTOS
UNESP-FEG


Eng. LAERTE JOSÉ FERNANDES
Membro Externo - GERDAU S.A.

Dezembro de 2011

DADOS CURRICULARES

RICARDO SCHMIDT ROMEIRO DE OLIVEIRA

NASCIMENTO	30.01.1987 – PINDAMONHANGABA / SP
FILIAÇÃO	Antônio Evangelista de Oliveira Neide Schmidt Romeiro Evangelista de Oliveira
2002/2004	Curso Técnico Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá “Prof. Carlos Augusto Patrício Amorim”
2006/2011	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista “Julio Mesquita Filho”

Dedicatória

em especial a meus pais, Antônio e Neide, que nunca perderam a fé em mim e me apoiaram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, *Antônio e Neide*, por me criar, apoiar, incentivar e dar condições de estudar, em todos os momentos, mesmo com todas as dificuldades enfrentadas.

aos meus amigos que sempre estiveram presentes em minha vida, nos momentos alegres e nos difíceis, sempre me apoiando e fazendo com que eu não desistisse nunca.

de modo especial ao *Eng. Laerte José Fernandes*, por ter me proporcionado a primeira oportunidade profissional e por toda a colaboração, paciência, motivação e preciosas dicas, sem as quais este trabalho não poderia ser realizado.

ao *Eng. Luis Alberto Oses Rodriguez*, que como meu co-orientador me auxiliou em todas as dificuldades com o tema e sempre contribuiu com idéias geniais e ao *Prof. Dr. Fernando Augusto Silva Marins* que dedicou seu tempo a esse trabalho e contribuiu com dicas essenciais.

ao pessoal do departamento de planejamento e controle da produção da Gerdau Pindamonhangaba, especialmente nas pessoas do *Sr. Adriano Antônio dos Santos*, que contribuiu com importantes informações, a *Srta. Livia Maria Rodrigues da Costa* que incentivou esse trabalho desde o princípio e o *Sr. Célio Blanco* que deu a idéia inicial desse trabalho.

a *Srta. Natália de Paula Santos*, por todo o incentivo e contribuição ao longo de todo o processo.

Por fim, mas mais importante, agradeço a Deus, por ter colocado todas essas pessoas na minha vida, me dado forças pra continuar mesmo nos momentos mais difíceis, me iluminado, me dado saúde, capacidade e vida.

Epígrafe

"Há homens que lutam um dia, e são bons;
Há homens que lutam muitos dias, e são muito bons;
Há homens que lutam muitos anos, e são melhores;
Mas há os que lutam toda a vida, esses são imprescindíveis!"

Bertold Brecht

OLIVEIRA, R. S. R. **Aplicação da Teoria das Restrições na Manufatura de uma Empresa Siderúrgica**. 2011. 77 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

RESUMO

A competitividade entre as empresas nos dias de hoje, causada pela globalização e com clientes cada vez mais exigentes, faz com que as empresas repensem suas estratégias para sobreviverem. Para melhorar sua competitividade as organizações estão adotando ferramentas de gestão para melhorar o gerenciamento da manufatura, que é considerado um ponto chave no sucesso. O trabalho apresentado teve por objetivo desenvolver um método, baseado nas técnicas de teoria das restrições e pesquisa operacional, para garantir a melhor utilização e melhor decisão dos recursos de uma linha de produção de uma empresa siderúrgica com foco no atendimento ao prazo do cliente, que é uma das exigências do mercado atual. A conclusão desse trabalho é que a utilização correta dessas ferramentas de gestão, como é o caso da teoria das restrições e a pesquisa operacional, podem garantir uma sobrevivência longa às empresas que duelam pelo mercado, principalmente no que se diz respeito ao atendimento ao cliente, que por sua vez gera sua satisfação.

PALAVRAS-CHAVE: Teoria das restrições, pesquisa operacional, competitividade, atendimento ao prazo de entrega.

OLIVEIRA, R. S. R. **Application of the Theory of Constraints in a Steel Company Manufacturing**. 2011. 77 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

ABSTRACT

The competition among companies nowadays, caused by globalization and with customers more and more demanding, makes the companies rethink their strategies for survival. To improve their competition the companies are adopting management tool to improve the manufacturing management, which is considered a key to success. The present study aimed to develop a method, based on techniques of theory of constraints and operational research, to ensure the best use of resources and best decision of a production line on a steel company, with focus in the customers' delivery time, which is a requirement of the current market. The conclusion of this study is that the correct use of the management tools, such as theory of constraints and operational research, can ensure a long survival for the companies that duel for the market share, especially in regard to customers' delivery time, that generates their satisfaction.

KEYWORDS: Theory of constraints, operational research, competition, customers' delivery time.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclos da TOC. (Fonte: adaptado de AGUIAR <i>et al.</i> , 2004).....	27
Figura 2 - Exemplo de fluxograma. (Fonte: adaptado de PINHO <i>et al.</i> , 2007)	39
Figura 3 - Esquema de peças de um laminador. (Fonte: XAVIER, 2010).....	41
Figura 4 – Exemplo de cilindro forjado. (Fonte: Autor).....	42
Figura 5 – Exemplo de cilindro fundido. (Fonte: Autor).....	42
Figura 6 - Cilindros para laminação de planos. (Fonte: Autor).....	43
Figura 7 - Cilindros para laminação de longos. (Fonte: Autor).....	43
Figura 8 - Esquema de um cilindro de trabalho para LTQ. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).	43
Figura 9 - Esquema de fundição centrífuga. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).....	44
Figura 10 - Esquema de fundição convencional. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).	44
Figura 11 - Fluxo de produção de um cilindro FHW. (Fonte: Autor).....	45
Figura 12 – Molde para vazamento do cilindro: (a) coquilha; (b) <i>sleeve</i> ; (c) caixa. (Fonte: Autor).	46
Figura 13 – Gráfico comparativo do previsto x real da fundição de cilindros FHW.....	47
Figura 14 - Atendimento da área de cilindros FHW.	47
Figura 15 – Mapeamento do processo de fundição de cilindro FHW.	50
Figura 16 – Modelo de gráfico de elaboração do metal. Fonte: Autor.	52
Figura 17 – Esquema de conjunto montado para fundição na máquina centrífuga. (Fonte: Autor).	53
Figura 18 - Planilha para definição do tempo útil do equipamento: (a) Máquina centrífuga; (b) Forno 8 toneladas e (c) Forno 20 toneladas.....	55
Figura 19 - Planilha para definição de tempos dos equipamentos.	62
Figura 20 - Planilha de simulação.	63
Figura 21 - Simulação do gargalo com <i>mix</i> 12,5% pesado, 50% médio e 37,5% leve.	64
Figura 22 - Simulação do gargalo com <i>mix</i> 0% pesado, 62,5% médio e 37,5% leve.	64

Figura 23 - Simulação de carga utilizando 2 fornos de 20 toneladas com <i>mix</i> 37,5% pesado, 50% médio e 12,5% leve.	66
Figura 24 - Simulação do gargalo utilizando 2 fornos de 20 toneladas com <i>mix</i> de 50% pesado, 50% médio e 0% leve.	66
Figura 25 - Simulação do gargalo utilizando 2 fornos de 20 toneladas com <i>mix</i> de 75% pesado, 0% médio e 25% leve.	67
Figura 26 - Simulação do modelo com Solver.	68
Figura 27 - Resultado da simulação do modelo pelo Solver.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tempo padrão de cada grupo de produção em cada etapa do processo	57
Tabela 2 - Necessidade de tempos por equipamento	58
Tabela 3 - Comparação entre tempo disponível e tempo necessário por equipamento	59
Tabela 4 - Tempos detalhados do forno de 20 t.	60
Tabela 5 – Alterações na restrição devido variação do <i>mix</i>	65
Tabela 6 – Alterações na restrição devido variação do <i>mix</i> utilizando 2 fornos de 20 t.	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TOC	-	<i>Theory of Constraints</i> (Teoria das Restrições)
OPT	-	<i>Optimized Production Timetables</i>
WIP	-	<i>Work in Process</i> (Estoque em Processo)
TPC	-	Tambor – Pulmão – Corda
DBR	-	<i>Drum – Buffer – Rope</i>
PO	-	Pesquisa Operacional
LTQ	-	Laminador de Tiras a Quente
FHW	-	<i>Finish Hot Work</i> (Cilindro para trabalho final a quente)
WR	-	<i>Work Roll</i> (Cilindro para laminação de produtos longos)
PCP	-	Planejamento e Controle da Produção

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Contextualização.....	16
1.2	Objetivo do trabalho	16
1.3	Natureza do problema	17
1.4	Justificativa do trabalho	17
1.5	Método	18
1.6	Limitações da pesquisa.....	19
1.7	Estrutura do trabalho	19
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	Teoria das Restrições	20
2.1.1	Histórico da TOC.....	20
2.1.2	Definições da TOC	22
2.1.2.1	Definições de restrição.....	22
2.1.2.2	As 5 etapas da TOC	24
2.1.2.3	A programação Tambor-Pulmão-Corda.....	27
2.1.2.4	Os princípios da TOC.....	29
2.2	Pesquisa Operacional	31
2.2.1	Histórico da Pesquisa Operacional	31
2.2.2	Tomadas de decisão	32
2.2.3	Fases de estudo da pesquisa operacional.....	33
2.2.3.1	Definição do problema	33
2.2.3.2	Construção do modelo.....	34
2.2.3.3	Solução do modelo	35
2.2.3.4	Validação do modelo.....	36

2.2.3.5	Implementação da solução	36
2.2.4	Método <i>Simplex</i>	36
2.3	Mapeamento de processo	37
2.3.1	Por que mapear um processo?	38
2.3.2	Fluxograma de processo	38
2.3.3	Como mapear um processo	39
3.	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	41
3.1	O que é cilindro para laminação?	41
3.2	Tipos de cilindros para laminação	42
3.3	Cilindros fundidos	42
3.4	Processo de fabricação de cilindros fundidos FHW	45
3.5	Histórico do problema	46
4.	MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA	49
4.1	Mapeamento do processo de fundição	49
4.2	Equipamentos utilizados para a fundição de um cilindro FHW	54
4.2.1	Tempo útil dos equipamentos	55
4.3	Divisão dos produtos	56
4.4	Tempo necessário para produção	57
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
5.1	Aplicação da Teoria das Restrições	59
5.1.1	Identificação do gargalo	59
5.1.2	Explorar a restrição do sistema	59
5.1.3	Subordinar todas as decisões ao gargalo do sistema	60
5.1.4	Elevar a capacidade da restrição	61
5.1.5	Verificar se o recurso ainda é a restrição do sistema	61
5.2	Modelo de simulação	61

5.3	Consequências da variação do <i>mix</i> da demanda	63
5.4	Consequências da utilização de outro forno de núcleo	65
5.5	Simulação utilizando Solver	67
6.	CONCLUSÃO.....	70
6.1	Verificação dos objetivos	70
6.2	Propostas para continuidade do trabalho	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O mundo globalizado está exigindo cada vez mais das organizações, pois a cada dia os clientes se tornam mais exigentes e a tecnologia avança e aumenta a competição entre empresas que fornecem produtos ou serviços iguais.

Isso faz com que as empresas tenham que reexaminar suas estratégias e a flexibilização da produção é de extrema importância. A luta pela competitividade passa pela quebra de paradigmas, que agora deve ter objetivo de garantir os processos de produção, evitando trabalho improdutivo e sem qualidade, e de gerar valor ao cliente (RODRIGUEZ, 2007).

A realidade do mercado atual é totalmente diferente da vivida em décadas passadas. Até a década de 1960 tudo o que se produzia podia ser vendido, de 60 até 70 houve uma grande briga por preços, a empresa que vendia seu produto mais barato ganhava o mercado. A competição mudou novamente no fim da década de 60 quando os consumidores passaram a exigir a qualidade de seus produtos e ao mesmo tempo surgia a produção enxuta criada pela Toyota. Dos anos 90 para frente o fator relevante é a inovação das empresas, que é a capacidade de se renovar rapidamente de acordo com o mercado e não apenas de adaptação as solicitações dos clientes.

A produção tem o desafio de desenvolver novos métodos e adotar sistemas de gestão para acompanhar e garantir a sobrevivência da empresa no mercado globalizado.

Para tanto técnicas como mapeamento de processo, teoria das restrições e programação linear foram criadas para auxiliar as empresas a se manterem competitivas, ajudando na solução dos problemas enfrentados na atualidade.

1.2 Objetivo do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é aplicar a Teoria das Restrições na manufatura de uma empresa, melhorando os resultados.

O objetivo secundário é definir um método de planejamento para uma linha de produção de fundição de uma empresa siderúrgica a fim de melhorar o desempenho ao atendimento do prazo do cliente.

Tem-se como objetivos específicos:

- Identificar o recurso que está causando atrasos na linha de produção;
- Sugerir alternativas para a solução do problema e melhorar o resultado;
- Desenvolver um modelo de tomada de decisão utilizando a Pesquisa Operacional.

1.3 Natureza do problema

A empresa estudada é uma das líderes de produção de cilindros para laminação.

Devido ao tipo de produto fornecido pela empresa, suas vendas para o mercado exterior representam 80% do total e com isso qualquer atraso gerado pelo processo de produção é capaz de fazer com que o produto perca seu embarque e não chegue ao cliente a tempo. Esse problema vem ocorrendo com frequência devido aos atrasos causados pela área de produção, especificamente pela área que inicia o processo, e a empresa vem perdendo o *market share* conquistado ao longo do tempo.

Para reduzir essa perda é necessária uma melhora do fluxo do processo dentro dessa área e o que pode ser feito de diferente para garantir a entrega e a satisfação do cliente final.

1.4 Justificativa do trabalho

É imprescindível salientar que a ênfase na satisfação dos clientes tem sido um conceito fundamental nas estratégias de *marketing*. O método mais simples de verificar a satisfação do cliente é se a expectativa deste é atendida, ou seja, se o desempenho da empresa fornecedora for ótimo o cliente estará satisfeito, caso o desempenho do fornecedor seja abaixo do esperado o cliente ficará insatisfeito. Devido o foco na satisfação do cliente e a competitividade do mercado leva as organizações a reverem suas estratégias para atender as

expectativas do cliente, da qual faz parte o atendimento ao prazo de entrega do produto comprado.

O papel da manufatura passa a ser de uma arma de competitividade entre as empresas, pois conecta as forças e recursos da empresa à competitividade do mercado. Devido a isso técnicas de melhoria contínua e aumento de desempenho da manufatura, como a TOC, são imprescindíveis para a sobrevivência de uma empresa no mundo atual. A chave do sucesso é a boa utilização dessas ferramentas para garantir a competitividade de sua manufatura.

1.5 Método

O trabalho foi realizado através de pesquisa-ação, utilizando técnicas da teoria das restrições e pesquisa operacional.

A pesquisa-ação é um tipo de método de base empírica que é realizada em uma associação com uma ação ou resolução do problema e os pesquisadores e participantes representativos da situação ou problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo. A pesquisa-ação tem 10 características principais (RODRIGUEZ, 2009):

- 1 – Pesquisador toma ação;
- 2 – Envolve a resolução de um problema e a contribuição para a ciência;
- 3 – É interativa;
- 4 – Objetiva desenvolver um entendimento holístico;
- 5 – É fundamentalmente relacionada à mudança;
- 6 – Requer um entendimento dos valores e normas;
- 7 – Pode incluir todos os tipos de coletas de dados (quantitativas e qualitativas);
- 8 – Requer um vasto entendimento da organização estudada;
- 9 – Deve ser conduzida em tempo real;
- 10 – Requer critérios próprios de qualidade para sua avaliação.

1.6 Limitações da pesquisa

O trabalho realizado limita-se a explorar uma organização com características peculiares, de produção não seriada e produtora de produtos diferenciados: cilindros para laminação. Portanto os resultados obtidos devem ser analisados nesse ambiente fabril.

1.7 Estrutura do trabalho

O Capítulo 1 mostra a introdução do trabalho.

No capítulo 2 são apresentadas e explicadas as ferramentas utilizadas para atingir os resultados do trabalho.

O Capítulo 3 faz considerações e explica como se dá o processo de fabricação de um cilindro para podermos compreender o processo para aplicar as técnicas.

No Capítulo 4 são definidas as técnicas utilizadas e como elas foram aplicadas no trabalho.

O Capítulo 5 e o Capítulo 6 mostram os resultados, discussões e conclusões que podem ser realizadas a partir das soluções encontradas, seguidos da bibliografia consultada.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Teoria das Restrições

A Teoria das Restrições (do inglês *Theory of Constraints* ou TOC) tem como objetivo identificar possíveis restrições do sistema de produção, também chamados de gargalos, e visa minimizá-los ou eliminá-los para assim identificar os produtos com maior ganho no mercado e priorizá-los de acordo com o fator limitativo de produção. (RODRIGUEZ, 2007), subordinando todas as decisões de produção e vendas ao gargalo do sistema. A TOC propõe então uma sequência de passos que devem ser seguidos para uma organização ter foco no aprimoramento contínuo.

A TOC também é considerada uma metodologia de aplicações multifuncionais que leva as organizações a pensarem sobre seus problemas e suas causas, desenvolvendo soluções criativas e com sucesso de implementação (MABIN; BALDERSTONE, 2003), assegurando o processo de melhoria contínua.

A grande diferença da TOC para as demais práticas é que as ações por ela geradas são concentradas na restrição do sistema, que é o recurso de menor capacidade, e as ações em outros recursos só acontecem se são necessárias para a eficiência do gargalo. (AGUIAR *et al.*, 2004).

O planejamento, a execução e o controle são feitos sobre a restrição, pois é baseado no fato de que o recurso de menor capacidade impede que o sistema a principal meta, que é a maximização do ganho e da rentabilidade geral do sistema (APICS *Dictionary*, p.85).

2.1.1 Histórico da TOC

De acordo com Watson, Blackstone e Gardner (2007) a TOC surgiu primariamente em 1979 com o *software* chamado *Optimized Production Timetables* (OPT), de uma empresa americana na qual o Dr. Eliyahu M. Goldratt era sócio proprietário. O *software* criado buscava otimizar a produção das indústrias e já trazia as idéias da TOC. Mas ficou constatado que um programa de computação não garantia à empresa um processo de melhoria contínua (RODRIGUEZ, 2009). Para que isso fosse possível era necessária a quebra de paradigmas que

regiam as organizações da época, então foi evidente que era necessário desenvolver um método que permitiria criar, comunicar e implementar boas soluções para a indústria.

Motivado por esses paradigmas da gestão industrial da época o físico israelense Eliyahu M. Goldratt desenvolveu, sem conhecimento das técnicas de administração, um novo modelo de gestão denominado “Teoria das Restrições”, desenvolvida quando o físico se envolveu com problemas de logística de produção em uma fábrica de gaiolas em Israel. Goldratt se embasou nos métodos de solução de problemas que aprendeu na Física para resolução de problemas de produção (CORBETT,1997; ALVES; SANTOS, 2008; GUIMARÃES *et al.*, 2008).

A TOC foi popularizada pelo romance “A Meta” publicado em 1984, escrito por Goldratt juntamente com Jeff Cox. A obra é um livro técnico escrito na forma de romance onde um gerente de fábrica lida com as dificuldades de administrar a empresa, entregando produtos no prazo, reduzindo estoques e maximizando o lucro. Goldratt é personificado pelo consultor Jonah que auxilia o gerente com dicas importantes de como pensar e agir para melhorar os índices da fábrica (GOLDRATT; COX, 2002).

“A Meta” tem um foco em manufatura e na base da TOC, Goldratt então publicou mais livros baseados na TOC que também ajudaram a popularizar sua teoria. “A Síndrome do Palheiro” de 1992 foca a TOC na contabilidade de custos, ganhos e programação, “Corrente Crítica” de 1998 foca em gerenciamento de projetos, “Necessária sim, mas não suficiente” de 2000 foca em cadeia de suprimentos e sistemas de controle de produção.

Porém após o lançamento de “A Meta” o livro consagrado mais importante por estudiosos da TOC é “Mais que sorte... um processo de raciocínio”, lançado em 1994 que foca em negociação e processos de raciocínio criando uma ramificação da TOC.

Esta obra foi feita em torno dos problemas mais estratégicos das empresas (RODRIGUEZ, 2009), com um método de raciocínio que parte do princípio que existe uma restrição dentro das empresas que as impede de obter resultados ótimos, além de causar eventuais problemas.

Esse método usa uma técnica de causa e efeito que procura determinar a causa dos problemas, busca soluções para essa causa e as implementa (MARTINS, 2002; CORBETT, 2003; COGAN, 2005).

Após tantos estudos a TOC é dividida em três grandes grupos:

- Produção: Resolvendo os problemas de gargalos, programação de produção e estoques com o método do Tambor-Pulmão-Corda, que é a primeira aplicação da TOC sobre gargalos (POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008);

- Contabilidade: Definindo questões de ganho, estoque e despesa operacional e utilizando essas definições como base para tomadas de decisões sem considerar custos (ALVES; SANTOS, 2008);

- Processo de raciocínio: Utilizado para identificar fatores limitantes de uma organização e desenvolver soluções para atingir suas metas, com cinco ferramentas fundamentais: árvore da realidade atual, diagrama de dispersão de nuvem, árvore da realidade futura, árvore de pré-requisitos e árvore de transição (POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008).

Com essa base a teoria das restrições não atinge somente o sistema produtivo, mas a empresa como um todo, tratando de questões financeiras e de mercado, para otimizar todo o processo (RODRIGUEZ, 2009).

“A TOC é, na verdade, uma nova filosofia gerencial que pode ser justificada apenas por uma grande mudança na base” (GOLDRATT, 1998, p. 90).

2.1.2 Definições da TOC

A TOC é um método de gestão que pode ser aplicado em organizações de manufatura, operações, gerenciamento de projetos, estratégia, cadeia de suprimentos e até mesmo *marketing* (MOELLMAN, 2008).

A proposição da TOC é que o planejamento, a execução e controle de todo o sistema seja feito na origem da restrição, que impede que o sistema de alcançar a sua meta, compreendida como maximização de resultados (MOELLMAN, 2008).

Para compreender esse modo de gestão, devem-se conceituar os fundamentos da TOC.

2.1.2.1 Definições de restrição

Restrição ou gargalo é a operação realizada em determinado equipamento que tem menor capacidade produtiva (peças, serviços, etc) na linha, restringindo então a capacidade de

produção de todo o sistema. Caso existam várias operações no sistema com diferentes tempos de ciclo, a operação com maior ciclo limita a produção de toda a linha, gerando ociosidade nos demais equipamentos.

Pode existir em um mesmo sistema mais de um gargalo (COX III; SPENCER, 2002). Em resumo a restrição é qualquer elemento ou fator que impede o sistema de conquistar um melhor desempenho de sua meta, podendo ser a restrição física ou gerencial (APICS *dictionary*, p.85).

Watson *et al.* (2007) reforça que as restrições não são apenas físicas mas podem se apresentar em três formas diferentes:

- Física: capacidade de algum recurso é menor que a demanda exigida para ele. São exemplos de restrições físicas equipamentos com capacidade menor, falta de matéria-prima ou pessoas.;

- Política: Regras, normas, procedimentos ou práticas usuais que limitam a capacidade de produção. Essas restrições são geralmente de difícil identificação e também de difícil solução. Deve-se observar que vários casos de restrição física podem ser reflexos de uma restrição política (NUMA, 2007; MARTINS 2002);

- Mercado: Demanda do mercado é menor que a capacidade do recurso restritivo, ou seja, o mercado exige uma quantidade menor de serviços ou peças que o sistema pode produzir, tornando-se então o gargalo do sistema.

Corbett (2003) afirma que todo sistema deve possuir uma restrição, pois caso não exista algo que limite o desempenho, este seria infinito, ou seja, se não houver nenhum gargalo no sistema seu lucro seria infinito. Como a restrição é o que impede o sistema de obter um melhor desempenho, este deve ser melhor gerenciado (RODRIGUEZ, 2009).

É importante diferenciar claramente um recurso gargalo de um não-gargalo, pois se um recurso gargalo fica ocupado todo o tempo, já que a demanda exigida dele é maior que sua capacidade, uma hora perdida neste é uma hora perdida em todo o sistema e não será recuperada em nenhum momento.

Já ao contrário, o recurso não-gargalo, que opera com folga, ou seja, sua capacidade de produção é maior que a demanda, e uma hora ganha nesse recurso não passa de um engano de ganho, pois o recurso já é ocioso (CSILLAG; CORBETT, 1998). Há ainda o recurso com

capacidade restritiva que não é um gargalo, mas deve ser bem gerenciado para não se tornar uma restrição (RODRIGUEZ, 2009).

A TOC visualiza a restrição positivamente, diferente de outros modelos de administração que enxergam as restrições negativamente, pois essa restrição determina o desempenho do sistema e se o gargalo é elevado o desempenho de todo o sistema é progressivamente aumentado (MOELLMAN, 2008).

2.1.2.2 As 5 etapas da TOC

Toda organização fabril é considerada como uma corrente e o que determina sua resistência é seu elo mais fraco. Existe apenas um elo mais fraco em uma corrente e este determina a capacidade da corrente inteira, ou seja, o elo mais fraco é o gargalo (restrição) do sistema e impede que a corrente tenha um melhor desempenho, ou analogamente todo o processo. (COGAN, 2005).

Essa restrição é a que deve ser trabalhada prioritariamente, porém depois de eliminada a primeira restrição (ou o elo mais fraco) outras restrições irão surgir, assim promovendo uma melhoria contínua e fortalecimento do processo produtivo e empresarial, pois sempre haverá uma nova restrição para ser tratada.

Com o intuito de melhorar o desempenho do sistema global, recomenda-se que as restrições físicas sejam gerenciadas por um procedimento constituído por cinco passos, denominado Processo Decisório da Teoria das Restrições (COGAN, 2005), que são:

1. Identificar a(s) restrição(ões) do sistema.

O primeiro passo do processo decisório da teoria das restrições é identificar a restrição do sistema para que seja determinado o fator que limita o desempenho do sistema, já que o resultado global da organização depende da exploração do gargalo (RODRIGUEZ, 2009).

O gargalo do sistema pode ser determinado pela análise de entrada e saída de cada recurso produtivo. Caso a carga de trabalho na entrada de um setor (ou equipamento) seja maior que sua capacidade diária de produção, este será o gargalo do sistema (COGAN, 2005).

Se o mercado for a restrição do sistema a empresa deve analisar as possíveis causas desse efeito, como por exemplo entrega de produtos fora de especificação e pouca variedade

de produtos oferecidos pode reduzir a fatia de mercado que a empresa atua (AGUIAR *et al.*, 2004).

A identificação da restrição é de extrema importância, pois permite que a organização foque seus esforços no fator que limita o ganho (HENRIQUES; GONÇALVES, 2008). Após a identificação de todas as restrições do sistema é necessário priorizar as ações sobre as que tem maior impacto para o alcance dos objetivos (BOSCHETTO *et al.*, 2007).

A identificação do trabalho deve ser baseada em estudos concretos e não em premissas de capacidades produtivas, já que capacidade real de um recurso pode ser muito diferente da sua capacidade nominal (AGUIAR *et al.*, 2004).

2. Decidir como explorar a(s) restrição(ões) do sistema.

O objetivo desse passo é fazer com que a restrição, no caso de restrição física, seja mais eficaz possível, já que o tempo perdido no gargalo é perdido no sistema como um todo.

Existem duas maneiras de se explorar a restrição, a primeira é adicionar capacidade no recurso restritivo, aumentando os recursos de pessoas ou aumentando recursos financeiros. A segunda maneira de se explorar o gargalo é melhorar o aproveitamento da capacidade, melhorando sua eficiência (RODRIGUEZ, 2009).

Essas duas maneiras tem como objetivo maximizar a capacidade do sistema, aumentando conseqüentemente o resultado global. (NUMA, 2007; MARTINS, 2002).

No caso de uma restrição política, deve-se eliminar essa restrição e desenvolver uma nova política que viabilize o processo (BOSCHETTO *et al.*, 2007).

3. Subordinar todo sistema à restrição.

Os recursos não restritivos do sistema devem ser programados de forma que forneçam todo o necessário para o perfeito funcionamento da restrição, evitando perda de tempo no recurso gargalo (COGAN, 2005), portanto esses recursos devem estar subordinados a restrição do sistema.

Todos os recursos devem ser subordinados a restrição, pois a melhora das condições desses recursos não irá afetar o resultado global. Esses recursos devem ter sua utilização subordinada a utilização do gargalo, para não comprometer a máxima utilização do recurso restritivo (NUMA, 2007; MARTINS, 2002) e reduzir o acúmulo do estoque de produtos em processo (*Work in process* – WIP).

A grande dificuldade de aplicação desse passo é ir contra o paradigma dos custos, pois esse mundo preconiza que pessoas e recursos ociosos são sinônimos de prejuízo (MOELLMAN, 2008).

4. Elevar a(s) restrição(ões) do sistema.

Devem-se buscar alternativas para aumentar a capacidade do recurso gargalo, como a compra de mais máquinas realizem o mesmo processo da restrição ou a contratação de pessoas, já que o aumento da capacidade da restrição corresponde à melhoria do desempenho do sistema (RODRIGUEZ, 2009).

O cuidado com restrições políticas deve ser ativo porque o problema para elevação da restrição não está restrito a compra de um equipamento, mas também existem procedimentos e normas que restringem o bom desempenho (MARTINS, 2002; COGAN, 2005; BOSCHETTO *et al.*, 2007).

Quando se eleva a capacidade do recurso restritivo aparecerão outras restrições, pois um sistema sem restrições tem lucro infinito (RODRIGUEZ, 2009).

No caso de uma restrição de mercado a empresa deve incentivar a expansão para novos horizontes de clientes e localidades, que poderá gerar um aumento de vendas (MOELLMAN, 2008).

5. Se, em algum passo, a restrição foi quebrada, voltar ao passo 1.

Ao explorar e elevar uma restrição o sistema se tornará mais forte e com melhor desempenho, porém se o processo for repetido e nada acontecer quer dizer que a restrição foi quebrada.

Caso isso ocorra deve-se retornar ao passo 1 para identificar a nova restrição do sistema para gerar um processo de melhoria contínua (MARTINS, 2002).

No caso de uma restrição política o quinto passo deve ser complementado da seguinte forma: Se, em algum passo, a restrição for quebrada, voltar ao passo 1, mas não deixe que a inércia se torne a restrição do sistema (RODRIGUEZ, 2009).

A partir dos cinco passos da TOC pode-se afirmar que são criados ciclos, pois uma vez a primeira restrição quebrada novas restrições irão aparecer. A representa os ciclos da TOC (AGUIAR *et al.*, 2004).

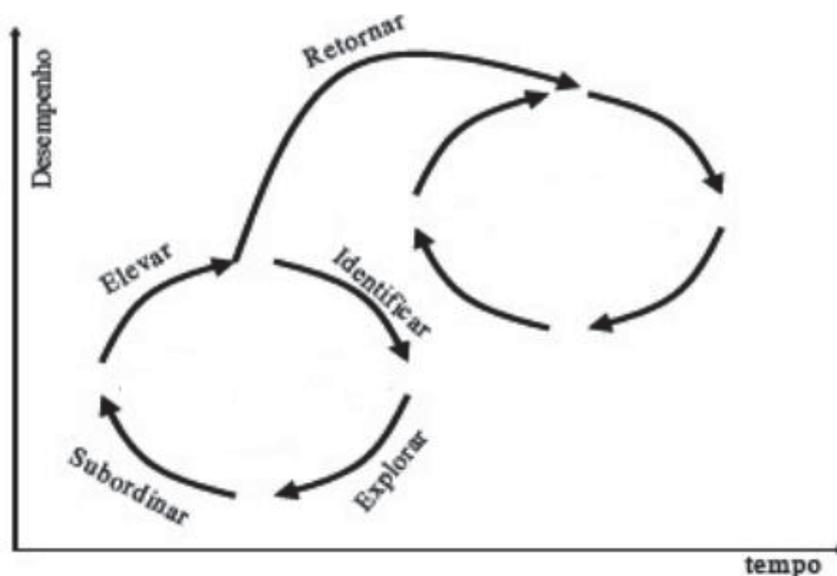


Figura 1 - Ciclos da TOC. (Fonte: adaptado de AGUIAR *et al.*, 2004).

Os ciclos devem acontecer em pequenos intervalos de tempo no sistema de programação e controle da produção para verificar o desempenho do processo em relação ao gargalo (AGUIAR *et al.*, 2004; GUIMARÃES *et al.*, 2008).

2.1.2.3 A programação Tambor-Pulmão-Corda

Uma forma de realizar os passos 2 e 3 das cinco etapas da TOC em nível operacional é empregar o método Tambor – Pulmão – Corda (TPC) (RODRIGUEZ, 2009).

O TPC (ou em inglês *Drum-Buffer-Rope* – DBR) é um método utilizado para o gerenciamento dos recursos produtivos para que se maximize o ganho (COX III; SPENCER, 2002).

Esta técnica é baseada nas cinco etapas da TOC e tem como objetivo sincronizar a produção balanceando o fluxo produtivo e não otimizando a produção de cada recurso individualmente (AGUIAR *et al.*, 2004; COGAN; CORREIA; BUENO, 2008).

O nome dessa técnica é dado pelos mecanismos utilizados para a programação da produção visando otimizar a utilização dos recursos gargalos. Esses mecanismos são descritos a seguir:

- Tambor (*Drum*) – é a lista de programação do recurso gargalo de acordo com a demanda de trabalho a ser processado nele com o objetivo de atingir maior fluxo possível no processo de produção (AGUIAR *et al.*, 2004).

O nome tambor é dado, pois é quem determina o ritmo da produção como um todo, pois não é possível produzir um ritmo maior que o do gargalo. Como uma hora perdida no gargalo é uma hora perdida em todo o sistema é importante que esse recurso não pare de produzir, devido a isso deve existir um estoque imediatamente antes do gargalo, para que este não pare por falta de matéria-prima (COGAN, 2005; SEED, 2011; GUIMARÃES *et al.*, 2008);

- Pulmão (*Buffer*) – é o estoque imediatamente antes do recurso gargalo. Esse estoque protege o gargalo de incertezas e flutuações do fluxo de produção.

Apesar de necessário o estoque deve ter seu tamanho gerenciado, pois um estoque pequeno é provável que o gargalo pare em algum momento, já um estoque elevado contribui para o aumento do estoque em processo (*work in process* – *WIP*), além de não ser usado completamente (COGAN, 2005; SEED, 2011; FIGUEIREDO, 2008).

Existem 3 tipos de pulmão que são utilizados: Pulmão de Restrição, que objetiva proteger o gargalo de problemas que antecedem este; Pulmão de Mercado/Expedição, que procura proteger o desempenho de entrega de produtos evitando atrasos para o cliente; Pulmão de Montagem, que visa garantir que as peças produzidas pelo recurso gargalo cheguem sincronizadas ao processo de montagem final (SOUZA *et al.*, 2004);

- Corda (*Rope*) – é a sincronização dos recursos para balancear o fluxo dentro da linha de produção. A corda permite a liberação de material para o interior do sistema de acordo com o ritmo do gargalo, assim evitando o estoque excessivo nos outros processos (SANTOS *et al.*, 2006; SEED, 2011; FIGUEIREDO, 2008).

Em resumo, a técnica TPC consiste em: o Tambor que dita o ritmo de produção; a Corda controla a produção, liberando mais material de acordo com o ritmo ditado pelo Tambor; e o Pulmão deve evitar que o recurso gargalo pare por falta de peças, evitando perdas no ganho da empresa (COGAN, 2005).

De acordo com o método Tambor-Pulmão-Corda não se deve produzir mais que a quantidade que o gargalo processa, fora a produção destinada a formação do pulmão, pois o recurso com restrição define o fluxo de produção e os estoques (FIGUEIREDO, 2008).

O TPC defende que se alguma etapa anterior ao gargalo produzir mais que este haverá um aumento no desperdício (COGAN, 2005).

2.1.2.4 Os princípios da TOC

A fim de aperfeiçoar a produção, reduzir o WIP e melhorar os processos a TOC estabelece 9 princípios (RODRIGUEZ, 2009) apresentados a seguir:

Princípio 1 – a ênfase deve ser dada ao fluxo dos materiais no processo e não a capacidade instalada de cada recurso. Para uma organização melhorar seu desempenho é preciso que o fluxo produtivo seja dinâmico e ampliado, acelerando a produção de produtos acabados a partir da matéria-prima (POZO; TACHIZAWA; SOUZA, 2008; GUIMARÃES *et al.*, 2008). Para que isso seja feito é preciso identificar o recurso gargalo, balanceando a produção em função da restrição, que irá determinar o desempenho de todo o sistema (FIGUEIREDO, 2008);

Princípio 2 – a utilização de um recurso que não é gargalo não é determinada pela sua capacidade individual, mas pela capacidade do recurso gargalo. Caso um recurso não restritivo trabalhe com toda sua produtividade, o resultado será um aumento de estoque e de despesas (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Princípio 3 – a ativação e a utilização do recurso não gargalo não são a mesma coisa, uma vez que a utilização é determinada em função da capacidade do recurso restritivo e a ativação é o uso do recurso não gargalo com sua capacidade nominal, ou seja, produz mais que a necessidade do gargalo. Devido a isso o recurso não gargalo deve ficar sem produzir após a produção da capacidade do recurso gargalo (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Princípio 4 – qualquer perda no gargalo é uma perda no sistema inteiro, portanto qualquer tempo de preparação da máquina, produção de peças fora de qualidade ou de produtos fora da demanda é considerado como perda de tempo disponível para atender a demanda e o ganho. Porém, qualquer ganho de tempo no gargalo será refletido como um ganho em todo o sistema (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Princípio 5 – não existirá nenhum benefício em reduzir os tempos de operação para recursos que não são gargalo, o único efeito dessa redução é o aumento da ociosidade destes recursos (RODRIGUEZ, 2009).

Princípio 6 – uma vez que o recurso restritivo determina o fluxo de todo o sistema, este também irá determinar todo o ganho da empresa, além de definir os níveis de estoque para que os gargalos não sejam dependentes de flutuações estatísticas causadas pelos outros recursos. A capacidade do pulmão do gargalo é definida pelo consumo estimado do recurso e o tempo de reposição (RODRIGUEZ, 2009).

Princípio 7 – o lote de transferência não deve ser igual ao lote de processamento. O lote de processamento se refere a quantidade que deve ser produzida no sistema, mas esse lote pode ser dividido em pequenas partes chamados de lotes de transferência. O objetivo dessa divisão é reduzir o tempo de passagem dos produtos pela produção, de atividade em atividade (RODRIGUEZ, 2009).

Princípio 8 – o lote de processo deve ser variável e não ter tamanho fixo, pois as operações não devem ter, necessariamente, o mesmo tamanho de lote porque as características de cada operação, que individualmente são diferentes, podem levar a cálculos de lotes diferentes o que dificulta a determinação de um tamanho fixo para os lotes (RODRIGUEZ, 2009).

Princípio 9 – os programas de produção devem ser realizados considerando as restrições simultaneamente e não sequencialmente. Para realizar uma programação é necessário que seja considerado o conjunto de restrições para responder questões como o que, quanto e quando produzir. O resultado da programação é o ciclo de produção.

Os nove princípios citados podem ser resumidos na regra que diz que a soma dos ótimos de cada equipamento não refletem o ótimo do sistema, ou seja, altas eficiências de cada equipamento podem levar a uma baixa eficiência do sistema inteiro, mostrando que, devido ao fluxo de produção, as soluções das empresas devem ser desenvolvidas pensando no ótimo global e não em ótimos individuais (GUIMARÃES *et al.*, 2008).

Como a demanda é uma grande variável em todos os sistemas empresariais a TOC deve ser cuidadosa, pois dependendo da variação da demanda o gargalo ficará indo de um recurso para o outro o que irá dificultar a identificação do gargalo e propor soluções concretas para melhorar o desempenho e o ganho.

2.2 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional (PO) é uma ciência que tem como objetivo fornecer ferramentas quantitativas para a tomada de decisões, resolvendo problemas reais, além de introduzir objetividade e racionalidade nas resoluções e ainda se preocupar com os elementos subjetivos e de enquadramento organizacional dos problemas (LISBOA, 2002; INDG, 2011).

O foco da PO é a tomada de decisões aplicando conceitos e métodos de outras áreas científicas para concepção, planejamento ou operação de sistemas para atingir objetivos (RODRIGUEZ, 2007).

De uma forma geral a PO se apóia em quatro áreas fundamentais da ciência: Economia, Matemática, Estatística e Informática. Porém a pesquisa operacional é constituída de disciplinas isoladas dentro das ciências como: programação linear, teoria das filas, simulação, programação dinâmica e outras (INDG, 2011).

Devido empregar inúmeras ciências a pesquisa operacional tem características horizontais, com uso em diversas atividades, desde engenharia até medicina, passando por economia e gestão empresarial (LISBOA, 2007).

2.2.1 Histórico da Pesquisa Operacional

O termo PO foi utilizado pela primeira vez em 1939 para tentar englobar em uma única denominação todas as técnicas que já existiam ou que seriam criadas para alcançar o mesmo objetivo (INDG, 2011).

A PO surgiu na Segunda Guerra Mundial, quando os Aliados tomaram ciência de problemas de natureza logística, tática e de estratégia. Grupos de matemáticos, físicos engenheiros e cientistas foram criados para apoiar as tomadas de decisão, ajudando para obter uma melhor utilização de recursos que eram mais limitados (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

Para resolver esses problemas os grupos criados desenvolveram idéias para criar modelos matemáticos, apoiados sobre fatos e dados, que permitissem perceber o problema, simular e avaliar os resultados de cada decisão, antes que ela fosse tomada (RODRIGUEZ, 2007).

Esses grupos criados pela Grã-Bretanha obtiveram resultados positivos e incentivaram os Estados Unidos a promover atividades semelhantes, mas a origem da PO não é creditada a Inglaterra, mas foi difundida por uma equipe de cientistas liderada por George B. Dantzig, que era americano, durante a Segunda Guerra Mundial. Ao resultado dessa pesquisa, concluída em 1947, foi dado o nome de Método *Simplex* (LISBOA, 2007).

Com o grande sucesso desses grupos durante a guerra, que logo terminado o conflito os grupos de cientistas que estudavam a PO foram convocados por empresas, que devido ao crescimento econômico pós-guerra, foram tomadas por problemas de tomadas de decisão muito complexos (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

O desenvolvimento da informática na década de 1950 tornou possível o desenvolvimento e a utilização de novas metodologias para solução de problemas práticos.

Esse desenvolvimento juntamente com a popularização da utilização de computadores pelas empresas permitiu um grande progresso a pesquisa operacional, pois os computadores começaram a ter mais velocidade de processamento e mais memória para a resolução dos complexos problemas matemáticos, que também passaram a ser interativos, com a possibilidade da participação do usuário durante os cálculos (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

Com todo o desenvolvimento em torno da PO, atualmente é possível simular e avaliar várias decisões diferentes e encontra a solução mais adequada para garantir o objetivo das pessoas ou organizações (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

2.2.2 Tomadas de decisão

Problemas que envolvem tomadas de decisão importantes estão sempre presentes no dia-a-dia. Para melhor solucioná-los é preciso escolher uma decisão dentro todas as possíveis que satisfaça um ou mais objetivos (VALENTE, 2011).

A tomada de decisão pode ter duas formas: identificar o problema, que é quando o estado atual de um processo é diferente do que se deseja; ou identificar uma oportunidade, que é quando existe uma chance de se melhorar o processo e ultrapassar a meta da organização. O fim das duas formas é selecionar uma ação para a resolução do problema (LACHTERMACHER, 2004).

Muitos fatores afetam a tomada de decisão, principalmente: o tempo disponível para a tomada de decisão, a importância da decisão, o conflito de interesses e o risco da decisão (LACHTERMACHER, 2004).

2.2.3 Fases de estudo da pesquisa operacional

Qualquer que seja o problema que envolve tomada de decisão o passo fundamental para compreender o problema é identificar todos os fatores envolvidos que tenham os elementos necessários para análise e conclusão (YBARRA, 2007).

Para se tomar uma decisão, quem estiver realizando o estudo deve tomar contato com o problema, identificando sua importância, valor e consequências da ação ou inação. Após a focalização no problema devem-se criar alternativas para a solução, estabelecer um critério para definir a melhor alternativa e então chegar a uma conclusão final para a tomada da decisão correta (YBARRA, 2007).

Portanto o processo de resolução do problema pode contar com cinco etapas que podem ser repetidas conforme a situação (LACHTERMACHER, 2004), são elas:

- 1 – definição do problema;
- 2 – construção do modelo;
- 3 – solução do modelo;
- 4 – validação do modelo;
- 5 – implementação da solução.

Apesar de não ser regra a sequência das etapas, ela indica as principais etapas que devem ser superadas para um bom resultado.

2.2.3.1 Definição do problema

Apesar de parecer a etapa mais simples da sequência, a definição do problema é fundamental para o sucesso, pois uma má definição do problema a ser resolvido não trará ganhos, mas somente uma perda de tempo e esforço (RODRIGUEZ, 2007).

Para definir um problema deve-se basear em três aspectos: descrição e definição exata e clara dos objetivos; identificação de alternativas das decisões; e reconhecimento das limitações, restrições e exigências do sistema (LISBOA, 2007; YBARRA, 2007).

A descrição dos objetivos é muito importante porque a partir dos objetivos citados é que o modelo será construído, também é de suma importância que as restrições sejam todas identificadas, para que a solução a ser obtida seja válida e aceitável (LISBOA, 2007).

2.2.3.2 Construção do modelo

Um modelo representa um sistema real, que pode já existir, e o modelo pretende reproduzir o funcionamento desse sistema de modo a aumentar a produtividade, ou um projeto aguardando execução, no qual o modelo tem como objetivo definir a estrutura ideal (LACHTERMACHER, 2004).

O modelo deve ser escolhido cuidadosamente para garantir a qualidade do resultado. Caso o modelo seja já conhecido pode-se utilizar métodos matemáticos convencionais, tornando-se problemas simples, já modelos mais complexos utilizarão métodos matemáticos de alta complexidade, até mesmo combinação de metodologias, tornando a solução bastante complicada (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

Três tipos distintos de modelos são utilizados: físicos, matemáticos e análogos. Modelos físicos são exemplificados como o modelo de aeronaves utilizado por engenheiros. O modelo análogo representa as relações por diversos meios, como por exemplo, mapas rodoviários que representam estradas e rodovias sobre um papel através de traços (LACHTERMACHER, 2004).

Os modelos mais utilizados para situações empresariais são os matemáticos, nos quais as grandezas são representadas por variáveis de decisão as relações por expressões matemáticas (RODRIGUEZ, 2007).

Três conjuntos principais de elementos são incluídos em um modelo matemático (VALENTE, 2011; YBARRA, 2007):

1 – Variáveis de decisão e parâmetros: variáveis de decisão são as incógnitas do problema que devem ser determinadas pela solução do modelo, já os parâmetros são os valores fixos do problema estudado;

2 – Restrições: para que a solução seja possível ou viável o modelo deve levar em consideração as limitações do sistema, que irão restringir as variáveis de decisão;

3 – Função-objetivo: função matemática que definirá a qualidade da solução encontrada a partir das restrições, parâmetros e variáveis de decisão.

Os modelos matemáticos são divididos em dois grandes grupos (YBARRA, 2007):

Modelos de simulação: objetiva fornecer uma representação real, com a geração e análise das alternativas, com a possibilidade de se escolher a ação mais conveniente.

Modelos de otimização: são estruturados para escolher apenas uma alternativa que levará ao ótimo do sistema, portanto não são flexíveis na escolha de alternativas. O critério de escolha é parte da estrutura do modelo e a melhor alternativa se dá através de uma análise matemática.

Os modelos matemáticos devem ser vistos como aproximações dos problemas reais que são representados. Para que seja útil o modelo deve ser bem estruturado, o que exige certa habilidade, e deve contemplar todos os detalhes do sistema para tenha uma solução coerente (LACHTERMACHER, 2004).

Também é fundamental uma boa capacidade de análise de quem desenvolve o modelo, que exige experiência prática e entendimento da teoria dos modelos matemáticos (VALENTE, 2011).

2.2.3.3 Solução do modelo

A solução do modelo é baseada em técnicas matemáticas existentes, ao contrário de outras fases que não possuem uma regra rígida. A escolha do método para solução é feita de acordo com o modelo criado e as análises e questões que o modelo deve responder.

O objetivo básico desse passo é fornecer uma solução viável para o problema proposto (LISBOA, 2007; YBARRA, 2007).

Em um modelo matemático a solução é encontrada a partir do algoritmo mais adequado ao problema, em termos de rapidez e precisão da resposta. Devido a isso é necessário um conhecimento avançado das técnicas existentes (LISBOA, 2007).

2.2.3.4 Validação do modelo

Consiste em verificar se o modelo adotado e a solução encontrada são adequados para a realidade do problema (VALENTE, 2011).

O modelo é validado caso ele seja capaz de fornecer resultados aceitáveis com as mudanças de comportamento do sistema, levando em conta que o modelo não é totalmente exato na representação do sistema (LISBOA, 2007).

Geralmente para se validar um modelo é verificar se ele reproduz o mesmo comportamento que o sistema apresentou com dados passados, ou seja, é realizado um teste com dados passados para verificar se o modelo apresenta os mesmos resultados obtidos, se as características relevantes do sistema foram consideradas e houve uma boa aderência o modelo pode ser implementado (LISBOA, 2007; VALENTE, 2011).

Sistemas em projeto, que não existem realmente, devem ser validados a partir da comparação do comportamento esperado do sistema e dos resultados obtidos com o modelo (LISBOA, 2007).

2.2.3.5 Implementação da solução

Consiste em transformar a solução encontrada pelo modelo em instruções na linguagem utilizada pelos administradores do sistema (VALENTE, 2011).

Por alterar uma situação já existente, a implementação da solução é uma etapa crítica que deve ser acompanhada pela equipe responsável pelo desenvolvimento, pois uma vez colocada em prática a solução pode precisar de ajustes no modelo (LISBOA, 2007).

2.2.4 Método *Simplex*

O método *Simplex* é o principal método da programação linear, que é uma das ferramentas mais poderosas da pesquisa operacional (RODRIGUEZ, 2007).

Esse método é um procedimento iterativo, desenvolvido por George Dantzig durante a Segunda Guerra Mundial, que resolve qualquer problema de programação linear em um número finito de interações (MARINS *et al.*, 2010).

O *Simplex* consiste basicamente na aplicação de duas etapas (MARINS *et al.*, 2010):

Etapa 1 – Identificar uma solução ótima: deve-se verificar se o resultado satisfaz a otimização do algoritmo, caso o critério seja satisfeito o método é encerrado, caso contrário aplica-se a etapa 2;

Etapa 2 – Melhoria de uma solução básica viável: objetiva-se obter uma solução básica melhor que a atual (RODRIGUEZ, 2007).

O método *Simplex* é o mais utilizado pelos programas de computador para a solução de problemas de programação linear. O programa Solver do Excel utiliza o *Simplex*.

O modelo pode gerar uma única solução, várias soluções, solução degenerada, solução não-factível (*infeasible*) ou solução ilimitada (*unbounded*) (EHRlich, 2004).

Os programas de computador listam os resultados através do valor da função objetivo assim como o conjunto de atividades básicas e o conjunto de atividades não-básicas, que são zeradas para atingir um ponto ótimo.

Maiores detalhes de programação linear e método *Simplex* não serão tratados no trabalho, podendo ser encontrados nas bibliografias citadas.

2.3 Mapeamento de processo

Um processo é composto por entradas, saídas, tempo espaço, ordenação, objetivos e valores que resultam em uma estrutura para tem como objetivo fornecer produtos ou serviços. Um processo é tão importante que empresas japonesas investem 70% de seus fundos de pesquisa em desenvolvimento de processo ao contrário de empresas americanas que investem em desenvolvimento de produto (GONÇALVES, 2000).

Para analisar um processo e determinar onde podem ser realizadas melhorias ou eliminar fontes de desperdício (PINHO *et al.*, 2007) é necessário que o processo seja mapeado. Quatro são os enfoques principais quando se trata de mapeamento de processo: eliminar todo o trabalho desnecessário; combinar operações; modificar sequência de operações; simplificar operações. (PINHO *et al.*, 2007).

2.3.1 Por que mapear um processo?

Mapas e fluxogramas ajudam a tornar o trabalho visível e essa visibilidade melhora a comunicação e a compreensão daqueles envolvidos no processo. O mapeamento de processo é frequentemente usado para mostrar como o trabalho é feito em uma organização, mostrando uma combinação específica de funções, atividades, entradas e saídas que a organização utiliza para fornecer valor aos seus clientes.

O mapeamento de processo pode documentar o modo de se fazer um produto para garantir a satisfação do cliente e através de sua análise pode ajudar a aumentar ainda mais a satisfação do cliente, como por exemplo: reduzir o tempo de ciclo de produção, reduzir defeitos, reduzir custos, estabelecer medidas orientadas para o cliente, reduzir o valor não-agregado das atividades e aumentar a produtividade (DAMELIO, 1996).

Além de mostrar como o trabalho é realizado ou como ele deveria ser realizado o mapeamento de processo também tem como função:

- Orientar novos empregados;
- Avaliar ou estabelecer alternativas para que a empresa chegue ao produto final;
- Chegar a velocidade desejada que uma atividade necessite para atender o resto da organização;
- Identificar oportunidades de melhoria;
- Avaliar, estabelecer ou fortalecer medidas de desempenho.

A principal defesa do mapeamento de processo é definir exatamente como deve realizar o processo de produção do sistema, deixando claro cada etapa a ser seguida e sua ordem para garantir um processo forte.

2.3.2 Fluxograma de processo

A principal ferramenta para se mapear um processo é o fluxograma, que facilita a visualização de todas as etapas do sistema, identificando os produtos produzidos, os clientes e fornecedores internos e externos e os pontos-críticos. (PINHO *et al.*, 2007).

O fluxograma mostra o fluxo de informação, pessoas, equipamentos e materiais através de cada atividade do processo. Os fluxogramas são traçados com caixas que contém uma breve descrição da atividade e com linhas e setas que mostram a sequência das operações.

A Figura 2 (PINHO *et al.*, 2007) ilustra um exemplo de fluxograma e os principais símbolos utilizados para sua construção.

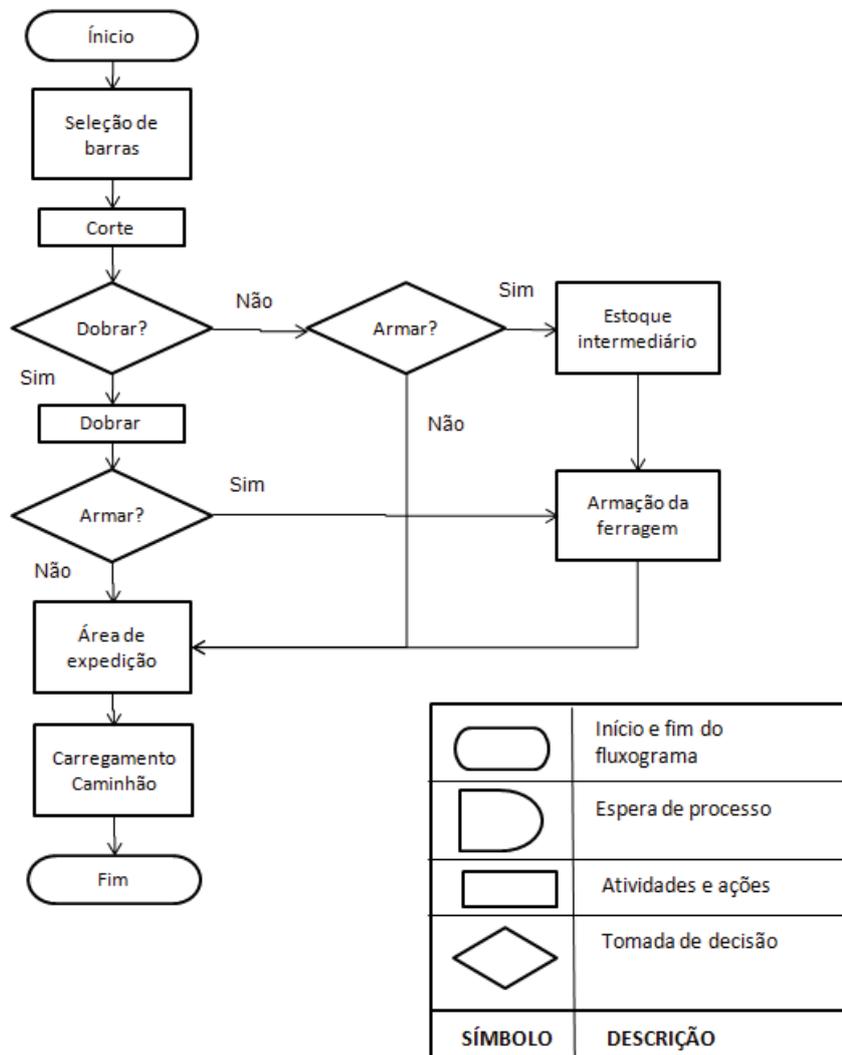


Figura 2 - Exemplo de fluxograma. (Fonte: adaptado de PINHO *et al.*, 2007)

2.3.3 Como mapear um processo

Existem três maneiras básicas de se realizar o mapeamento de processo (DAMELIO, 1996):

- Auto-geração: se a pessoa já conhece o processo, ela mesma pode desenhar o mapeamento do processo de fazer uma avaliação de reação com outras pessoas envolvidas nas atividades mapeadas. Esse método é mais rápido, porém é limitado ao conhecimento do processo da pessoa que realiza o mapeamento;
- Entrevistas um a um: o responsável pelo mapeamento do processo entrevista fornecedores, clientes e operadores um a um de como o processo é desenvolvido, o que possibilita realizar o mapeamento.

Após o mapeamento pode-se mostrar o resultado para as pessoas entrevistadas ou outras pessoas que conheçam o processo, para sugestão de melhorias e validação. Este método funciona bem quando o entrevistador possui boas habilidades de questionamento, compreensão e sintetização de informações. Também é preferível que o entrevistador esteja familiarizado com o processo;

- Entrevistas em grupo: convocam-se as pessoas que tem maior conhecimento do processo para gerar o mapeamento. Este método permite grande interação entre todos os envolvidos nas atividades (fornecedores, clientes e operadores) que pode gerar um senso de propriedade no mapa de processo e melhorar ainda mais o resultado.

O método funciona muito bem quando um facilitador bem preparado participa da discussão, ajudando a identificar as entradas, saídas e atividades do processo. Esse facilitador não precisa estar familiarizado com o processo, mas deve ter boas habilidades de questionamento e compreensão, além de conhecimento nas técnicas de mapeamento de processo.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa alvo desse trabalho é uma produtora de cilindros para laminação situada em Pindamonhangaba – São Paulo. Para que o trabalho seja realizado de forma ideal esse capítulo tratará sobre os processos utilizados na empresa.

3.1 O que é cilindro para laminação?

Cilindros para laminação são ferramentas utilizadas no processo de conformação mecânica denominada laminação, que consiste na passagem do material entre dois cilindros que giram com velocidade periférica igual, porém em sentidos opostos (XAVIER, 2010).

O espaçamento entre os cilindros é menor que a espessura inicial do material a ser conformado, para que ocorra a redução da peça. O equipamento que utiliza o cilindro de laminação é denominado laminador, a Figura 3, ilustra onde são aplicados os cilindros.



Figura 3 - Esquema de peças de um laminador. (Fonte: XAVIER, 2010).

3.2 Tipos de cilindros para laminação

Há dois processos de fabricação dos cilindros de laminação, por forjamento e por fundição. Este trabalho restringirá somente ao processo de fundição. Abaixo temos exemplo de cilindro forjado (Figura 4) e cilindro fundido (Figura 5).



Figura 4 – Exemplo de cilindro forjado. (Fonte: Autor).



Figura 5 – Exemplo de cilindro fundido. (Fonte: Autor).

3.3 Cilindros fundidos

Cilindros fundidos são aplicados em cadeiras de laminadores de tiras a quente (LTQ), que produzem placas para outras aplicações (por exemplo: para a linha branca e automobilística). Os cilindros também são utilizados para laminadores de produtos longos que são tarugos, barras, perfis, entre outros que são utilizados por vários segmentos industriais. A Figura 6 e a Figura 7 apresentam os cilindros para laminação plana e para laminação de longos, respectivamente.

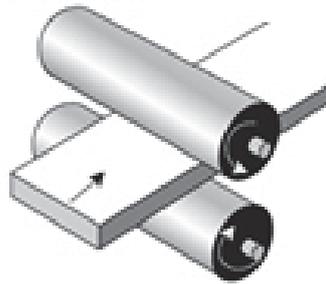


Figura 6 - Cilindros para laminação de planos. (Fonte: Autor).

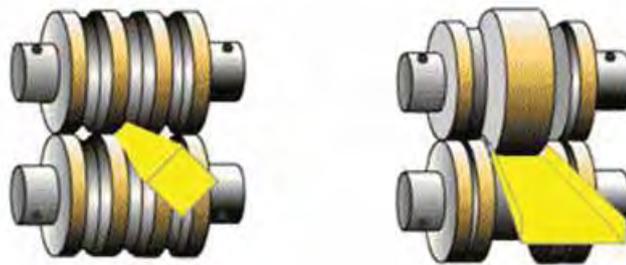


Figura 7 - Cilindros para laminação de longos. (Fonte: Autor).

Os cilindros de trabalho destinados aos laminadores de tiras a quente para produção de placas são, em grande parte, produtos bi-metálicos, constituídos de uma casca externa, resistente ao desgaste, e um núcleo de ferro fundido nodular. Devido ao cilindro ter a composição bi-metálica, conforme Figura 8, eles são produzidos pelo processo de fundição centrífuga (Figura 9) (VALENTINE, 2002). Os cilindros para laminação de produtos longos, em grande parte, são produzidos por fundição estática (Figura 10).

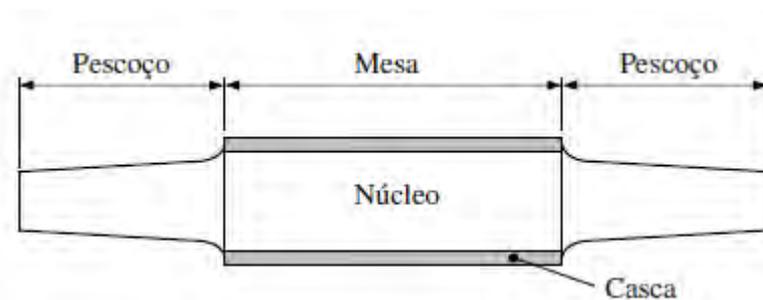


Figura 8 - Esquema de um cilindro de trabalho para LTQ. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).

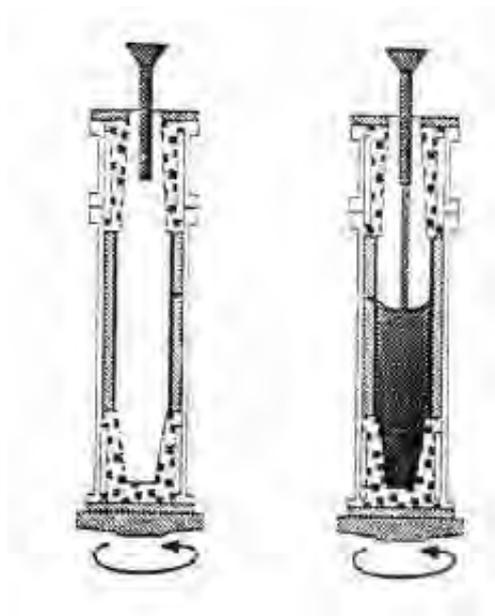


Figura 9 - Esquema de fundição centrífuga. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).



Figura 10 - Esquema de fundição convencional. (Fonte: CORNÉLIO, 2006).

Os cilindros produzidos por centrifugação, aplicados em laminação de produtos planos são denominados de *Finish Hot Work* (FHW), do inglês trabalho final a quente, ou seja, são cilindros para acabamento. Já os cilindros para laminação de produtos longos são denominados *Work Roll* (WR) ou convencionais, dependendo do processo de fundição.

Este trabalho, devido ao problema apresentado no capítulo 1, tratará do processo de produção de cilindros FHW, que é onde o atraso está concentrado.

3.4 Processo de fabricação de cilindros fundidos FHW

O processo de fabricação de um cilindro FHW, está representado pelo fluxo do processo na Figura 11.

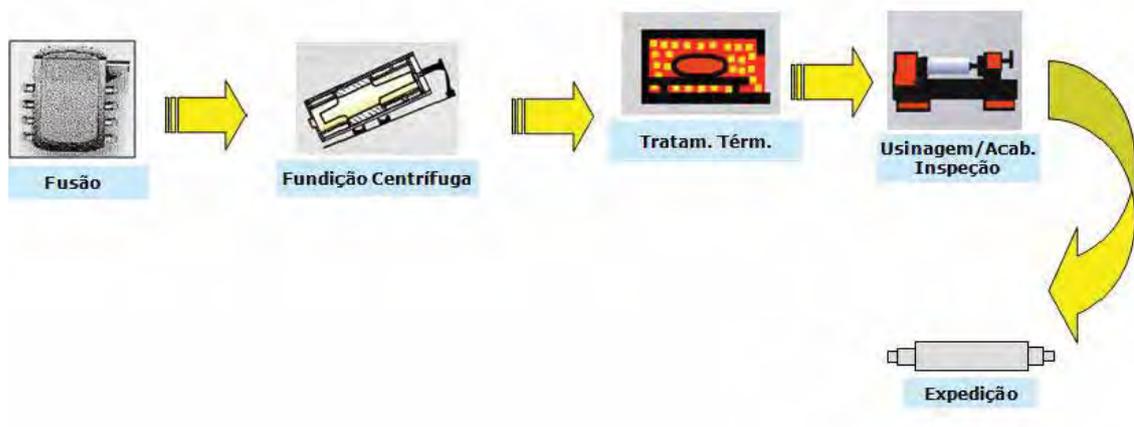


Figura 11 - Fluxo de produção de um cilindro FHW. (Fonte: Autor).

O processo inicia no forno de fusão onde é preparada a carga e fundido o metal a ser utilizado para fabricação do cilindro. São utilizados dois fornos para esse processo, pois tratando de um material bi-metálico, teremos duas composições químicas diferentes, uma para a casca e outra para o núcleo.

Após o metal pronto esse será vazado em um molde (coquilha, *sleeve* e caixa conforme Figura 12) na máquina centrífuga. O primeiro vazamento é o metal de casca e depois o metal de núcleo.

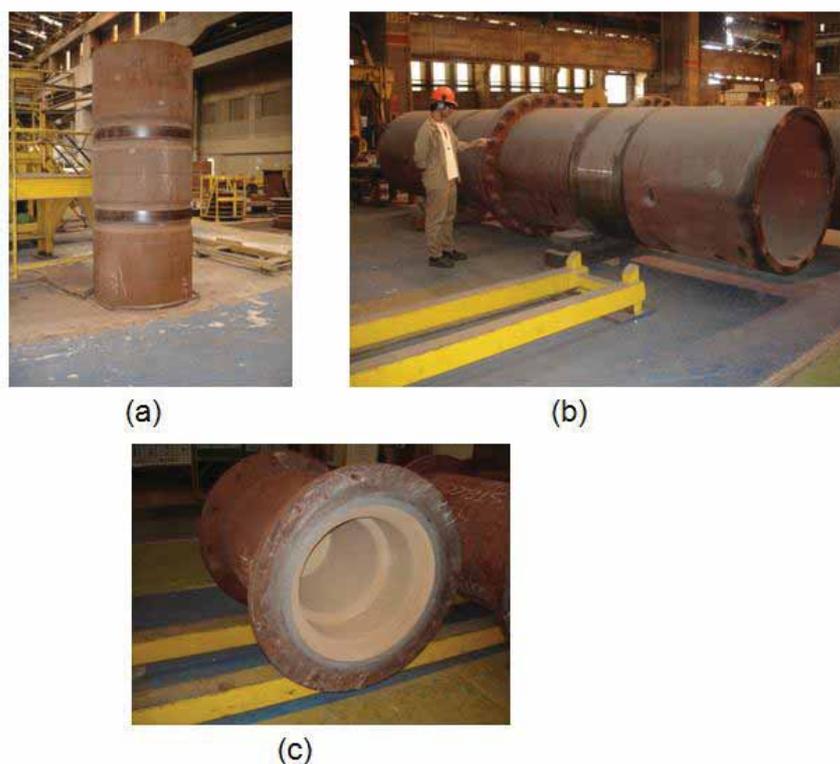


Figura 12 – Molde para vazamento do cilindro: (a) coquilha; (b) *sleeve*; (c) caixa. (Fonte: Autor).

Após o resfriamento o mesmo passa por uma etapa de desmolde, rebarbação e inspeção por ultrassom para verificar possíveis defeitos. Uma vez o cilindro liberado este será tratado termicamente.

O processo de tratamento térmico poderá ser: normalização, revenimento ou recozimento subcrítico, dependendo da aplicação do produto. E, finalmente, inicia-se o processo de usinagem que será de acordo com as especificações do cliente.

3.5 Histórico do problema

O planejamento da fundição diária é definido no Departamento de Planejamento e Controle da Produção (PCP), que tem como função garantir a entrega do produto final ao cliente no prazo acordado com este.

As capacidades das áreas de tratamento térmico e usinagem são maiores do que a da área de fundição, portanto elas não são o gargalo do sistema e com isso não serão estudadas nesse trabalho. Devido a inúmeros atrasos e problemas no atendimento da área de fundição a

empresa não está atendendo os prazos acordados conforme demonstrado na Figura 13 e na Figura 14.

O período analisado na Figura 13 foi de 120 dias, desses, 45 dias não foi atingido o programado, ou seja, 37,5% da programação não foi cumprida, o que levou um patamar de atendimento ao cliente de 81% para 72% nessa linha de produção.

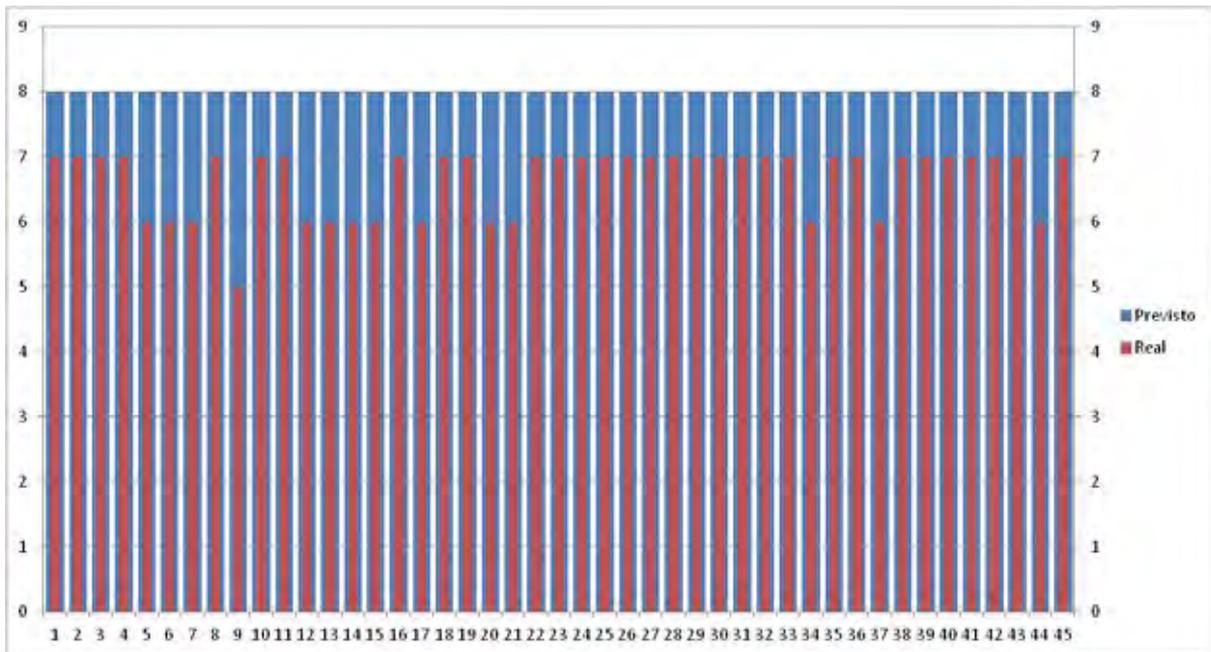


Figura 13 – Gráfico comparativo do previsto x real da fundição de cilindros FHW.

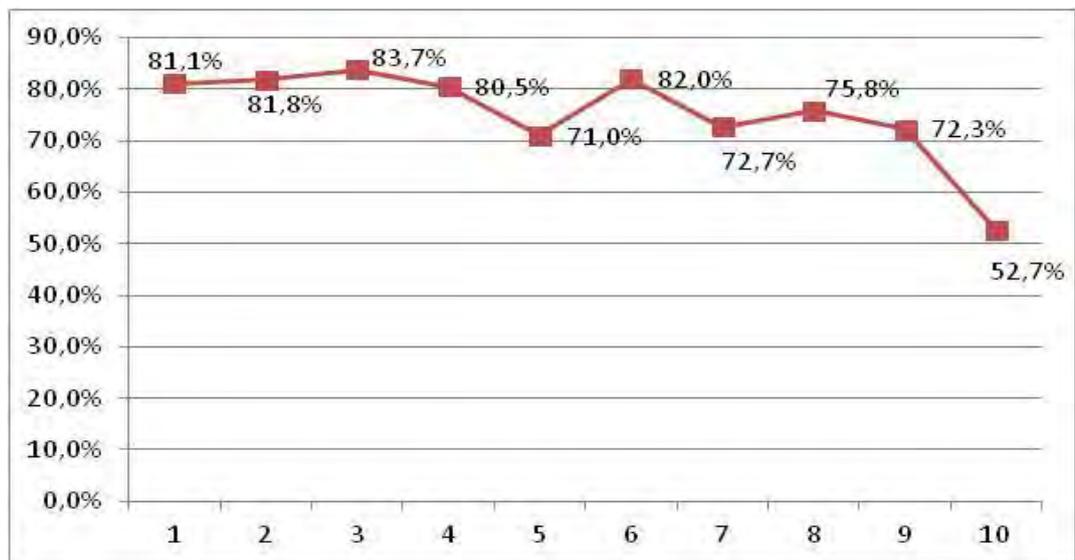


Figura 14 - Atendimento da área de cilindros FHW.

Não se utiliza forma alguma de controle do tempo e qual o impacto do atraso de um equipamento sobre o outro, portanto não há a definição do gargalo desse processo de fundição. Detalharemos e aprofundaremos esse processo para determinar possíveis problemas de planejamento, determinando onde está o gargalo da produção da fundição. Com isto será possível melhorar o desempenho deste processo para garantir o atendimento ao prazo acordado com o cliente.

Este acerto é de suma importância, pois 80% das vendas correspondem ao mercado externo, assim as exportações são pré-agendadas com reservas de navios e contêineres e qualquer atraso pode comprometer o faturamento do produto, levando a empresa a ter prejuízo com gastos desnecessários, além de utilizar os equipamentos de uma forma desorganizada, gerar maiores custos para produção dos cilindros e principalmente prejudicar nossos clientes e a imagem da empresa.

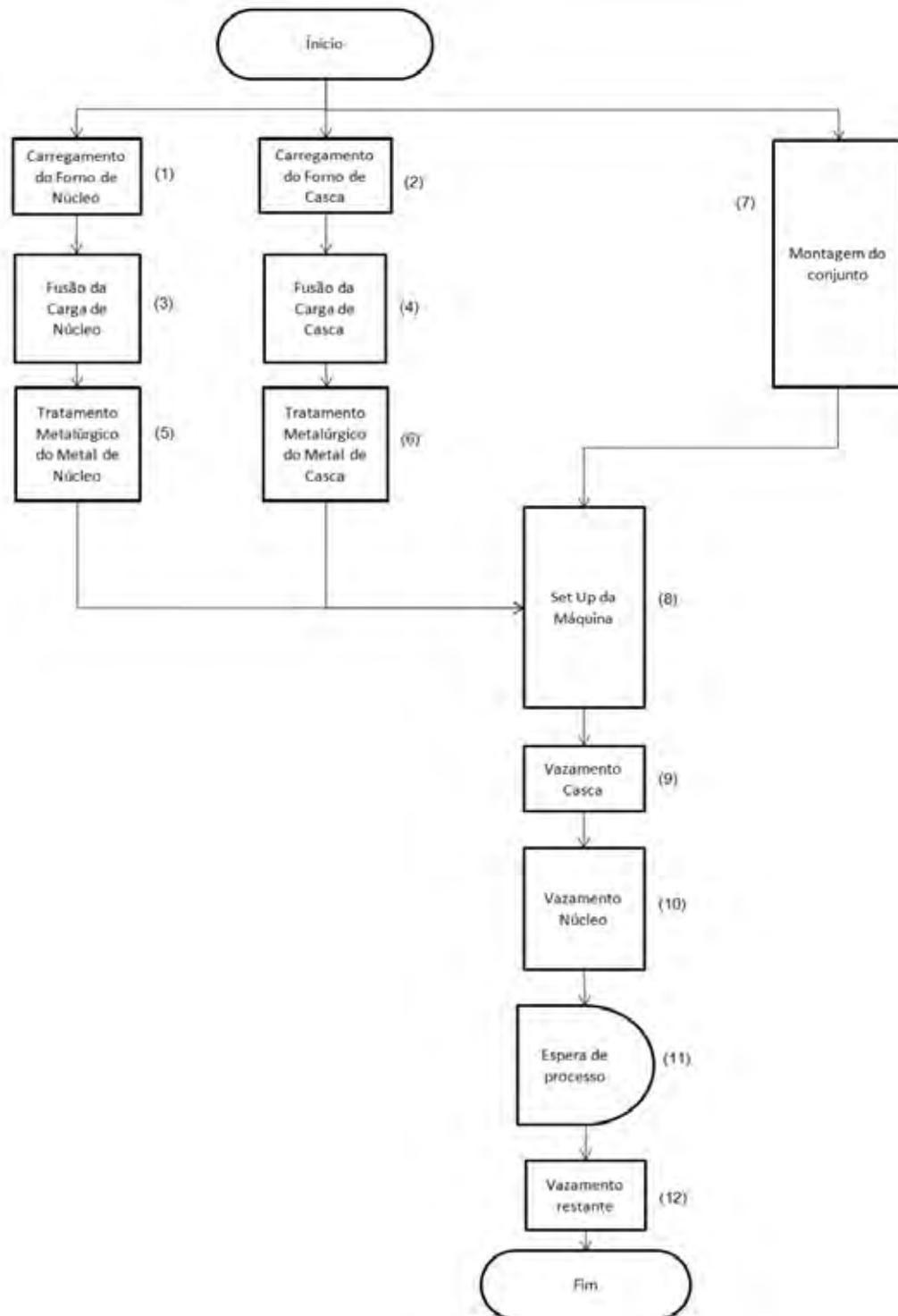
4. MÉTODOS E ETAPAS DA PESQUISA

Para determinação do gargalo foi mapeado o processo da fundição para verificar quais equipamentos são utilizados, a sequência do processo e os tempos para realizar cada etapa. Foram utilizadas as técnicas da Teoria das Restrições (TOC – *Theory Of Constraints*), conforme descrito no capítulo 2, para realizar um modelo de simulação de planejamento no *software* Excel. As variáveis deste modelo são os tempos de cada processo necessário para a fundição de um cilindro contra a capacidade de produção em horas de cada equipamento utilizado no processo.

A seguir será demonstrada cada etapa para determinação do gargalo.

4.1 Mapeamento do processo de fundição

O mapeamento de processo foi realizado através de levantamento com os colaboradores da área em questão e realizada reunião para validar o resultado com todos os envolvidos, obtendo assim o resultado demonstrado na 0Figura 15.



0Figura 15 – Mapeamento do processo de fundição de cilindro FHW.

Pode-se descrever o processo passo a passo como se segue:

Etapa 1 – Carregamento do forno de núcleo

De acordo com a composição química dos cilindros, especificada pela Engenharia, a matéria prima é carregada no forno para a fusão e elaboração do metal. Essa etapa consiste em separar a matéria-prima e colocá-la dentro do forno com o auxílio de um pórtico.

Etapa 2 – Carregamento do forno de casca

Essa etapa é equivalente a Etapa 1 – Carregamento do forno de núcleo, porém para a casca do cilindro.

Etapa 3 – Fusão da carga de núcleo

Essa etapa consiste na fusão da carga de acordo com a taxa de fusão do forno. As taxas de fusão foram consideradas com um forno trabalhando com 50% de residual, que consiste na quantidade de carga líquida que é deixada dentro do forno após vazamento do produto para acelerar a próxima fusão, entre um cilindro e outro.

Devido ao sigilo empresarial não foi divulgado as taxas de fusão dos fornos.

Etapa 4 – Fusão da carga de casca

Essa etapa é equivalente a Etapa 3 – Fusão da carga de núcleo, porém para a carga de casca.

Etapa 5 – Tratamento metalúrgico do metal de núcleo

Consiste na etapa em que o metal sofre as correções de composição química necessárias para o vazamento. As temperaturas e os tempos entre correções de vazamentos são ilustradas na Figura 16.

Após o metal totalmente fundido é retirada uma amostra para verificar a composição química, caso necessário é corrigida, após tempo pré-definido para cada tipo de produto é retirada uma segunda amostra para validar a composição química, caso esteja conforme a temperatura é elevada até a temperatura de vazamento e o metal é disponibilizado para a próxima etapa.

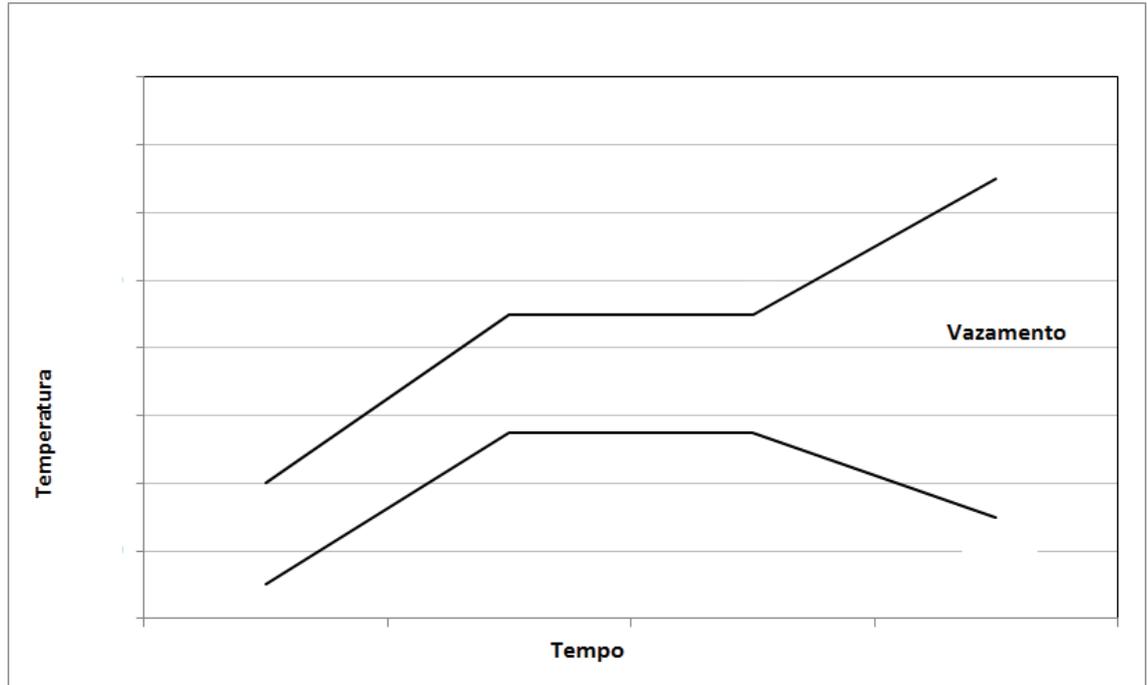


Figura 16 – Modelo de gráfico de elaboração do metal. Fonte: Autor.

Devido ao fato de serem informações sigilosas da empresa os valores de tempo e temperatura não serão divulgados.

Etapa 6 – Tratamento metalúrgico do metal de casca

Essa etapa é equivalente a Etapa 5 – Tratamento metalúrgico do metal de núcleo, porém para o metal da casca do cilindro.

Etapa 7 – Montagem do conjunto

Ocorre a preparação do ferramental (conjunto montado) que consiste em: caixa, coquilha e *sleeve*, para o recebimento do metal dentro da máquina centrífuga. Duas caixas moldadas são parafusadas junto à coquilha e esse conjunto é montado dentro do *sleeve* que irá rotacionar todo o conjunto na máquina. Este esquema está na Figura 17.

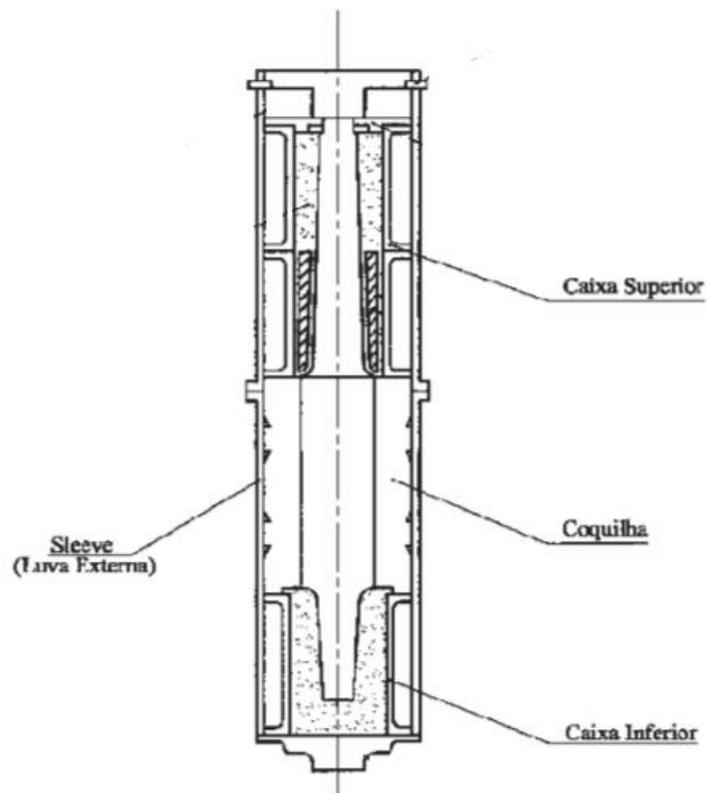


Figura 17 – Esquema de conjunto montado para fundição na máquina centrífuga. (Fonte: Autor).

Etapa 8 – Preparação (*Setup*) da máquina

Na preparação da máquina centrífuga para a fundição do cilindro é realizada a sua limpeza, a regulagem do equipamento, troca de refratários, colocação do conjunto montado (conjunto de ferramental) para fundição e alinhamento da máquina para evitar vibrações.

Etapa 9 – Vazamento casca

Após o metal totalmente pronto, com composição química correta e a máquina pronta para a fundição, o metal é vazado em uma panela, passa por um conversor (para realizar processo metalúrgico), chamados de inoculação e nodulização, que se tratam da adição de magnésio e silício respectivamente.

Após esta etapa a panela com o metal é transportada até a máquina, onde será vazado dentro do molde em rotação, formando a casca do cilindro.

Etapa 10 – Vazamento núcleo

Etapa onde o metal do núcleo é vazado, após vazamento do metal da casca e aguardar tempo definido pelo departamento de engenharia, em uma panela, que também passa pelo conversor. O metal é transportado para a máquina, onde será vazado dentro do molde em rotação completando o núcleo do cilindro, que já está com uma casca de um material diferente.

Etapa 11 – Aguardar tempo de processo

Após o vazamento do núcleo o molde não está totalmente preenchido com metal de núcleo, portanto se faz necessário aguardar um tempo para poder completar o restante do cilindro.

Etapa 12 – Vazamento restante

Após espera do tempo pré-definido, o molde é completado com o metal do núcleo restante finalizando a sua fundição. Nesta etapa a máquina pode ou não estar em rotação, ou mesmo pode ser vazado na fossa de solidificação, porém o forno que produz o metal de núcleo fica aguardando o tempo de processo para poder ser disponibilizado para o próximo produto.

4.2 Equipamentos utilizados para a fundição de um cilindro FHW

Para se fundir um cilindro FHW é necessário a utilização de três equipamentos essenciais que podem ser o gargalo do sistema:

- Forno de fusão com capacidade de 20 toneladas para núcleo;
- Forno de fusão com capacidade de 8 toneladas para casca;
- Máquina centrífuga.

As pontes rolantes utilizadas para fundição e a montagem do conjunto de ferramental não são gargalo do sistema, pois a disponibilidade de tempo é muito maior que a demanda.

4.2.1 Tempo útil dos equipamentos

Para definir o tempo útil para programação desses equipamentos foi criada uma planilha para definir os tempos livres e tempos improdutivo. As planilhas foram definidas diferentes para os fornos e para a máquina devido aos diferentes tipos de paradas para cada equipamento.

Os tempos podem ser modificados conforme necessidade do usuário, alterando tempos improdutivo de acordo com a necessidade do equipamento e da área de produção e o tempo calendário de acordo com o período analisado.

As planilhas descritas estão na Figura 18, já com os tempos disponíveis por dia para cada equipamento de acordo com seu funcionamento dentro da empresa.

TEMPO CALENDÁRIO	24,00
PARADAS PROGRAMADAS	5,90
- REFEIÇÕES	3,00
- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50
- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00
- TROCA DE REFRATÁRIO	0,40
- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,30
- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	1,70
TEMPO LIVRE	0,00
- PARADA HORA-SAZONAL	0,00
- FALTA DE MERCADO	0,00
- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00
TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	5,90
TEMPO DISPONÍVEL	17,10

(a)

TEMPO CALENDÁRIO	24,00
PARADAS PROGRAMADAS	3,50
- REFEIÇÕES	0,00
- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50
- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00
- TROCA DE REFRATÁRIO	2,00
- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,00
- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	0,00
TEMPO LIVRE	0,00
- PARADA HORA-SAZONAL	0,00
- FALTA DE MERCADO	0,00
- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00
TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	3,50
TEMPO DISPONÍVEL	20,50

(b)

TEMPO CALENDÁRIO	24,00
PARADAS PROGRAMADAS	3,50
- REFEIÇÕES	0,00
- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50
- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00
- TROCA DE REFRATÁRIO	2,00
- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,00
- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	0,00
TEMPO LIVRE	0,00
- PARADA HORA-SAZONAL	0,00
- FALTA DE MERCADO	0,00
- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00
TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	3,50
TEMPO DISPONÍVEL	20,50

(c)

Figura 18 - Planilha para definição do tempo útil do equipamento: (a) Máquina centrífuga; (b) Forno 8 toneladas e (c) Forno 20 toneladas.

Os tempos, todos em horas, que estão na Figura 18 são:

Tempo Calendário: é o período do calendário considerado para produção calculado através dos dias do período multiplicados por 24 horas por dia.

Exemplo: 3 dias * 24 horas = 72 horas de tempo calendário.

Paradas programadas: é o tempo necessário para realizar paradas, caracterizadas pela sua previsibilidade. Essas paradas são programadas antecipadamente e/ou sistematicamente.

Exemplos de paradas programadas: horário de refeição, paradas para treinamento, manutenções programadas, trocas de refratários programadas, entre outras.

Tempo livre: é o tempo em que, embora o equipamento esteja disponível para operar, o mesmo ficou parado por decisão da empresa.

Exemplos de tempo livre: paradas de produção no horário horo-sazonal (horário de pico de energia elétrica), falta de mercado e paradas corporativas.

Tempo disponível: é o tempo em que o equipamento opera sem interrupções, no seu ritmo. No caso este valor é calculado pela subtração do tempo calendário da soma das paradas programadas e tempo livre.

Os tempos utilizados foram informados pelos especialistas das áreas de produção e engenharia.

4.3 Divisão dos produtos

Devido à diversidade de produtos oferecidos ao mercado e suas diferentes características foi necessário dividi-los em três grupos de acordo com seus diferentes tempos padrões em cada etapa da fundição.

Os grupos criados foram: grupo leve, grupo médio e grupo pesado de acordo com o tempo total gasto para a fundição de cada produto. Obtendo assim o tempo padrão para cada grupo em cada etapa de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 – Tempo padrão de cada grupo de produção em cada etapa do processo

Agrupamento	Tempo máquina	Tempo forno	Tempo forno
		8 t	20 t
Grupo pesado	2,53	2,64	3,33
Grupo médio	1,83	2,49	2,83
Grupo leve	1,25	2,34	2,16

O tempo de máquina é a somatória do tempo necessário para o cilindro ficar na máquina em centrifugação, especificado pela engenharia de produto, e o tempo de *setup* da máquina.

O tempo dos fornos é o somatório dos tempos listados a seguir:

- Tempo de fusão da carga (obtido pelo peso carregado no forno dividido pela sua taxa de fusão);
- Tempo de elaboração do metal (especificado pela engenharia de produto);
- Tempo de carregamento do forno;
- Tempo de espera do processo para o vazamento para completar o cilindro, no caso do forno de 20 toneladas.

Todas as etapas que consomem tempo foram descritas na seção 4.1.

Os tempos de cada grupo de cilindro foram informados pelos especialistas das áreas de engenharia e produção.

4.4 Tempo necessário para produção

A demanda do mercado para cilindros FHW são de 8 peças por dia, com uma divisão de produtos clara, sendo 25% do grupo pesado, 50% do grupo médio e 25% do grupo leve. Essa demanda foi levantada pelos especialistas das áreas comerciais, planejamento e controle de produção e engenharia, com base no histórico da empresa. Com essas informações de

demanda conseguiu-se obter o tempo total necessário em cada equipamento para suprir a necessidade do mercado.

A Tabela 2 apresenta o tempo total necessário por dia em cada equipamento para a produção dos cilindros de cada grupo.

Tabela 2 - Necessidade de tempos por equipamento

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrifuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	25,00%	2	5,07	5,29	4,32	2,33
Grupo médio	50,00%	4	7,33	9,97	8,64	2,67
Grupo leve	25,00%	2	2,50	4,69	4,32	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	14,90	19,94	22,27	

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Aplicação da Teoria das Restrições

Após a definição de todos os dados de tempos e necessidades do processo podemos passar pelos 5 passos da TOC apresentados no capítulo 2 e que definirão todo o processo de produção para a demanda de cilindros informada (8 peças/dia, 25% do grupo leve, 50% do grupo médio e 25% do grupo pesado).

5.1.1 Identificação do gargalo

A partir das definições de tempo útil de cada equipamento e das necessidades de tempos de acordo com a demanda do mercado, é possível fazer uma tabela comparativa entre o tempo disponível e o tempo necessário e assim definir o gargalo do sistema. Essa comparação está na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação entre tempo disponível e tempo necessário por equipamento

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrífuga	17,10	14,90	●
Forno 8 t	20,50	19,94	●
Forno 20 t	20,50	22,27	✘

De acordo com os resultados obtidos podemos afirmar que com essa demanda de produção (8 peças/dia sendo: 25% grupo pesado, 50% grupo médio e 25% grupo leve) o gargalo do sistema está no forno de 20 toneladas, utilizado para o núcleo.

5.1.2 Explorar a restrição do sistema

A Tabela 4 mostra os tempos detalhados do forno de núcleo que é o gargalo do sistema.

Tabela 4 - Tempos detalhados do forno de 20 t.

TEMPO CALENDÁRIO	24,00
PARADAS PROGRAMADAS	3,50
- REFEIÇÕES	0,00
- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50
- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00
- TROCA DE REFRATÁRIO	2,00
- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,00
- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	0,00
TEMPO LIVRE	0,00
- PARADA HÓR- SAZONAL	0,00
- FALTA DE MERCADO	0,00
- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00
TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	3,50
TEMPO DISPONÍVEL	20,50

Pela análise das perdas de tempo no equipamento podemos trabalhar para reduzir o tempo em troca de turno e diálogo da segurança, porém mesmo zerando essa parada o forno de núcleo continuaria sendo o gargalo do sistema.

Para explorar ainda mais o gargalo deveria ser realizado um estudo das trocas de refratário que não podem deixar de ser realizadas devido à garantia do processo, mas que poderiam ter refratários mais resistentes ou uma troca rápida.

Os fornos já operam em todos os turnos, portanto não conseguimos explorar a restrição com mais operários.

Um ponto de atenção é o trabalho da engenharia de produto para reduzir os tempos de espera de processo, caso seja possível essa hipótese conseguiríamos um grande ganho na restrição do sistema.

5.1.3 Subordinar todas as decisões ao gargalo do sistema

Como o processo de fundição é o primeiro de toda a fabricação de um cilindro, todas as decisões já estão subordinadas a ele, e como se trata de um processo com uso de metal líquido não é possível uma criação de estoque. Porém existem alguns pontos que deve ser ressaltado a partir dessa restrição que são descritos abaixo.

Como a restrição do sistema é o forno de 20 toneladas, o forno de 8 toneladas e a máquina centrífuga tem tempo disponível para realizar os seus processos com mais cautela, garantindo a qualidade do produto e o perfeito funcionamento dos equipamentos.

A programação diária emitida pelo PCP deve priorizar os cilindros com maior margem de lucro, garantindo assim um maior ganho financeiro para a empresa. Caso a programação seja feita de forma errônea a empresa pode ter prejuízo.

As vendas de produtos devem ser verificadas, pois na situação atual a empresa não está atendendo seus clientes. Pode ser criado um trabalho para restringir as vendas de produtos que consomem o maior tempo do gargalo, impondo limites, para assim garantir o atendimento ao cliente.

5.1.4 Elevar a capacidade da restrição

A única maneira de elevação da capacidade do forno de núcleo é a compra de um novo equipamento para esse mesmo processamento, porém é necessário realizar um estudo econômico para verificar a viabilidade de compra desse equipamento. A análise econômica não será verificada nesse trabalho, mas faremos uma análise do que ocorrerá caso seja adquirido um novo forno nos próximos itens.

5.1.5 Verificar se o recurso ainda é a restrição do sistema

Para a demanda informada o forno de núcleo será sempre a restrição do sistema a menos que seja comprado um novo forno e que a demanda por grupo de produção seja alterada. Essas duas hipóteses serão verificadas nos próximos itens dos resultados do trabalho.

5.2 Modelo de simulação

Devido à demanda do mercado ser uma grande variável do sistema foi criado um modelo no *software* Excel, no qual o responsável pela garantia do atendimento da demanda pode realizar simulações para diferentes tipos de demanda entre os grupos já estabelecidos e caso necessário modificar os tempos dos equipamentos e dos processos dos grupos.

O resultado final dessa simulação é o comparativo entre o tempo necessário para produção em cada equipamento e o tempo disponível para produção dos equipamentos.

A Figura 19 apresenta a planilha para definição dos tempos disponíveis para cada equipamento, que pode ter seus dados alterados conforme necessidade.

A Figura 20 apresenta o modelo de simulação, no qual o usuário altera a demanda dos grupos e verifica a criação ou não de um novo gargalo.

MÁQUINA CENTRÍFUGA		FORNO 8 TONELADAS		FORNO 20 TONELADAS	
TEMPO CALENDÁRIO	24,00	TEMPO CALENDÁRIO	24,00	TEMPO CALENDÁRIO	24,00
PARADAS PROGRAMADAS	6,90	PARADAS PROGRAMADAS	3,50	PARADAS PROGRAMADAS	3,50
- REFEIÇÕES	3,00	- REFEIÇÕES	0,00	- REFEIÇÕES	0,00
- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50	- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50	- TROCA DE TURNO E DIÁLOGO DIÁRIO DE SEGURANÇA	1,50
- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00	- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00	- PARADAS PARA TREINAMENTO	0,00
- TROCA DE REFROTÁRIO	0,40	- TROCA DE REFROTÁRIO	2,00	- TROCA DE REFROTÁRIO	2,00
- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,30	- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,00	- MANUTENÇÃO PROGRAMADA	0,00
- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	1,70	- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	0,00	- PARADAS OPERACIONAIS PROGRAMADAS	0,00
TEMPO LIVRE	0,00	TEMPO LIVRE	0,00	TEMPO LIVRE	0,00
- PARADA HORO-SAZONAL	0,00	- PARADA HORO-SAZONAL	0,00	- PARADA HORO-SAZONAL	0,00
- FALTA DE MERCADO	0,00	- FALTA DE MERCADO	0,00	- FALTA DE MERCADO	0,00
- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00	- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00	- PARADA PARA REUNIÕES E FESTAS CORPORATIVAS	0,00
TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	6,90	TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	3,50	TEMPO TOTAL IMPRODUTIVO	3,50
TEMPO DISPONÍVEL	17,10	TEMPO DISPONÍVEL	20,50	TEMPO DISPONÍVEL	20,50

Figura 19 - Planilha para definição de tempos dos equipamentos.

L11		fx						
	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2		Demanda de produção	8			Diário/Mensal/Semanal		
3								
4		Tempo padrão dos grupos por equipamento						
5		Agrupamento	Tempo Máquina Centrífuga	Tempo Forno 8t	Tempo Forno 20t	Tempo de espera		
6		Grupo pesado	2,53	2,64	2,16	1,17		
7		Grupo médio	1,83	2,49	2,16	0,67		
8		Grupo leve	1,25	2,34	2,16	0,00		
9								
10								
11								
12								
13								
14		Agrupamento	Demanda	Tempo Máquina Centrífuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t		
15			%	Qty	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
16		Grupo pesado	25,00%	2	5,07	5,29	4,32	2,33
17		Grupo médio	50,00%	4	7,33	9,97	8,64	2,67
18		Grupo leve	25,00%	2	2,50	4,69	4,32	0,00
19		Necessidade de tempos	100%	8	14,90	19,94	22,27	
20								
21								
22								
23								
24								
25					Tempo Disponível	Tempo necessário	Status	
26		Máquina Centrífuga			17,10	14,90	●	
27		Forno 8 t			20,50	19,94	●	
28		Forno 20 t			20,50	22,27	✘	

Figura 20 - Planilha de simulação.

Os itens tarjados em amarelo são os que podem ser modificados pelo usuário. Todos os outros itens não devem ser alterados, pois são fórmulas para gerar o resultado.

5.3 Consequências da variação do *mix* da demanda

A variação do *mix*, que é a alteração da demanda de cada grupo dentro da demanda total, pode causar uma alteração no gargalo do sistema. Utilizando o modelo de simulação criado, verificam as alterações que podem criar mudanças no gargalo do sistema.

Para qualquer *mix* em que a participação de produtos do grupo pesado ultrapasse 25% o gargalo do sistema é o forno de 20 toneladas. Caso a demanda do grupo pesado passe para 12,5% o gargalo continuará sendo o forno de 20 toneladas caso a demanda do grupo médio seja igual ou maior que 50%, como demonstrado na Figura 21. Se a demanda do grupo

médio for menor que 50% do total, o gargalo do sistema passará a ser a demanda total de 8 peças/dia.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrífuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	12,50%	1	2,53	2,64	2,16	1,17
Grupo médio	50,00%	4	7,33	9,97	8,64	2,67
Grupo leve	37,50%	3	3,75	7,03	6,48	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	13,62	19,64	21,11	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrífuga	17,10	13,62	●
Forno 8 t	20,50	19,64	●
Forno 20 t	20,50	21,11	✘

Figura 21 - Simulação do gargalo com *mix* 12,5% pesado, 50% médio e 37,5% leve.

Caso a demanda o grupo pesado seja zerada o gargalo do sistema continuará sendo o forno de núcleo para demanda do grupo médio maior ou igual a 62,5%, conforme Figura 22.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrífuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	0,00%	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Grupo médio	62,50%	5	9,17	12,46	10,80	3,33
Grupo leve	37,50%	3	3,75	7,03	6,48	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	12,92	19,49	20,61	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrífuga	17,10	12,92	●
Forno 8 t	20,50	19,49	●
Forno 20 t	20,50	20,61	✘

Figura 22 - Simulação do gargalo com *mix* 0% pesado, 62,5% médio e 37,5% leve.

Para todas as outras combinações de demanda o gargalo do sistema é a demanda total.

Todas as possíveis variações de *mix* da demanda causam as alterações do gargalo conforme Tabela 5. As variações demonstradas podem não ocorrer na prática, mas estão demonstradas para estudos posteriores e caso haja uma nova diretriz de demanda.

Tabela 5 – Alterações na restrição devido variação do *mix*.

Grupo Pesado	Grupo Médio	Grupo Leve	Restrição
$\geq 25\%$	Qualquer	Qualquer	Forno 20 toneladas
12,50%	$\geq 50\%$	Qualquer	Forno 20 toneladas
0%	$\geq 62,5\%$	Qualquer	Forno 20 toneladas
$< 25\%$	$< 50\%$	Qualquer	Demanda

5.4 Consequências da utilização de outro forno de núcleo

Caso a empresa decida por um investimento para elevar a capacidade da restrição do sistema, ou seja, opte pela compra de outro forno para produção de metal pra o núcleo, deve verificar para onde irá o gargalo do sistema, uma vez que o tempo disponível para produção de núcleo dobrará devido ao novo equipamento.

Para a demanda do caso (8 peças por dia, sendo 25% do grupo pesado, 50% do grupo médio e 25% do grupo leve) a restrição do sistema passa a ser a própria demanda, ou seja, a demanda do mercado não permite que a capacidade seja usada ao máximo.

Variando o *mix* da demanda haverá resultados diferentes, para um *mix* até 37,5% do grupo pesado a restrição continua sendo a demanda total, conforme Figura 23.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrifuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	37,50%	3	7,60	7,93	6,48	3,50
Grupo médio	62,50%	5	9,17	12,46	10,80	3,33
Grupo leve	0,00%	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	16,77	20,39	24,11	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrifuga	17,10	16,77	●
Forno 8 t	20,50	20,39	●
Forno 20 t	41,00	24,11	●

Figura 23 - Simulação de carga utilizando 2 fornos de 20 toneladas com *mix* 37,5% pesado, 50% médio e 12,5% leve.

A partir de uma demanda com 50% do grupo pesado e 50% do grupo médio ou uma demanda com 75% do grupo pesado e 25% do grupo leve a restrição passa a ser a máquina centrífuga, para todas as outras combinações de *mix* o gargalo é a própria demanda, como demonstrado na Figura 24 e na Figura 25.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrifuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	50,00%	4	10,13	10,57	8,64	4,67
Grupo médio	50,00%	4	7,33	9,90	8,64	2,67
Grupo leve	0,00%	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	17,47	20,47	24,61	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrifuga	17,10	17,47	✘
Forno 8 t	20,50	20,47	●
Forno 20 t	41,00	24,61	●

Figura 24 - Simulação do gargalo utilizando 2 fornos de 20 toneladas com *mix* de 50% pesado, 50% médio e 0% leve.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrifuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	75,00%	6	15,20	15,80	12,95	7,00
Grupo médio	0,00%	0	0,00	0,00	0,00	0,00
Grupo leve	25,00%	2	2,50	4,69	4,32	0,00
Necessidade de tempos	100%	8	17,70	20,49	24,27	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrifuga	17,10	17,70	✘
Forno 8 t	20,50	20,49	✔
Forno 20 t	41,00	24,27	✔

Figura 25 - Simulação do gargalo utilizando 2 fornos de 20 toneladas com mix de 75% pesado, 0% médio e 25% leve.

Em resumo a utilização de um segundo forno de 20 toneladas tem como consequência as mudanças no gargalo conforme Tabela 6, considerando todas as variações de demanda possíveis.

Tabela 6 – Alterações na restrição devido variação do *mix* utilizando 2 fornos de 20 t.

Grupo Pesado	Grupo Médio	Grupo Leve	Restrição
25%	50%	25%	Demanda
$\leq 37,5\%$	Qualquer	Qualquer	Demanda
$\geq 50\%$	$\geq 50\%$	Qualquer	Máquina Centrifuga
$\geq 75\%$	Qualquer	$\geq 25\%$	Máquina Centrifuga

5.5 Simulação utilizando Solver

A planilha criada pode ser considerada a entrada para uma programação linear, ajustada então para realizar uma simulação para melhorias.

Para verificar os resultados e obter uma solução ótima foi realizada uma simulação através do Solver do *software* Excel com objetivo de maximizar o número de peças produzidas por dia.

Para essa simulação foram utilizadas as seguintes restrições:

- A quantidade de peças do grupo pesado tem que ser maior que 2;
- A quantidade de peças do grupo médio tem que estar entre 4 e 6;
- A quantidade de peças do grupo leve tem que ser menor que 3;
- O tempo necessário para operação nos equipamentos tem que ser menor ou igual ao tempo disponível;
- Nenhum valor de quantidade de peças pode ser negativo;
- O valor da quantidade de peças deve ser inteiro.

A Figura 26 ilustra a simulação.

The image shows an Excel spreadsheet with the following data:

Demanda de produção: 8 (highlighted in yellow), Diária/Mensal/Semanal

Tempo padrão dos grupos por equipamento:

Agrupamento	Tempo Máquina Centrífuga	Tempo Forno B1	Tempo Forno 201	Tempo de espera
Grupo pesado	2,53	2,54	2,56	1,17
Grupo médio	1,83	2,49	2,50	0,67
Grupo leve	1,25	2,34	2,36	0,00

Summary Table:

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrífuga		Tempo Forno B1		Tempo Forno 201	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera	
Grupo pesado	75,00%	6	15,20	15,06	15,36	12,96	7,00	
Grupo médio	0,00%	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Grupo leve	25,00%	2	2,50	4,63	4,32	0,00		
Necessidade de tempo	100%	8	17,70	20,54	24,27			

Parâmetros do Solver:

Definir célula de destino: **\$D\$10** (Max)

Ígual a: Máx MÍN Valor de: 0

Células variáveis: **\$D\$15:\$D\$17** (Set) (Espinar)

Submeter às restrições:

- \$D\$15 >= 2
- \$D\$16 <= 6
- \$D\$17 <= 3
- \$F\$25 <= \$G\$25
- \$F\$26 <= \$G\$26

Figura 26 - Simulação do modelo com Solver.

O resultado da simulação é apresentado na Figura 27 e podemos concluir que não podemos oferecer 8 peças/ dia ao mercado com o *mix* atual, devido a restrição no forno de núcleo.

Agrupamento	Demanda		Tempo Máquina Centrifuga	Tempo Forno 8 t	Tempo Forno 20 t	
	%	Qtd	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de processo	Tempo de espera
Grupo pesado	25,00%	2	5,07	5,29	4,32	2,33
Grupo médio	50,00%	4	7,33	9,97	8,64	2,67
Grupo leve	12,50%	1	1,25	2,34	2,16	0,00
Necessidade de tempos	88%	7	13,65	17,60	20,11	

	Tempo Disponível	Tempo necessário	Status
Máquina Centrifuga	17,10	13,65	●
Forno 8 t	20,50	17,60	●
Forno 20 t	20,50	20,11	●

Figura 27 - Resultado da simulação do modelo pelo Solver.

6. CONCLUSÃO

6.1 Verificação dos objetivos

O objetivo principal desse trabalho era aplicar a TOC na manufatura de uma empresa siderúrgica e foi possível aplicar o método com sugestões de melhora no sistema.

O objetivo secundário desse trabalho era definir um método para melhorar o atendimento ao cliente. Com o estudo das técnicas de TOC e aplicando um modelo foi possível verificar que foi construído um método capaz de atender as necessidades, garantindo a redução de atrasos ao cliente.

Os objetivos específicos identificar o recurso gargalo, sugerir alternativas para solução do problema e melhora do resultado e desenvolver um modelo de tomada de decisão utilizando PO, esses objetivos foram todos atingidos com resultados satisfatórios e aplicabilidade.

Apesar da teoria das restrições ser uma ciência já muito estudada por especialistas, ela não é tão aplicada na prática e pode resolver problemas simples como o caso estudado.

A partir das técnicas da TOC foi possível definir um modelo do sistema de produção e gerar decisões para reduzir o número de atrasos ao cliente, pois com o *mix* de demanda atual o sistema não consegue atender o mercado e acaba atrasando por prometer uma produção que não pode cumprir. Portanto para reduzir os efeitos de atraso deve ser oferecida uma quantidade menor de produtos, ou seja, reduzir a demanda para 7 peças por dia para garantir o atendimento do prazo, como demonstrado pela simulação no Solver, ou até mesmo dividir o *mix* produtos para que a restrição seja na demanda conforme demonstrado no caso.

Apesar de o gargalo estar em lugares diferentes dependendo da demanda foi possível mapear sempre onde ele se encontra e garantir o resultado da empresa.

Foi possível demonstrar que o uso correto das ferramentas de gestão é uma poderosa ferramenta para se obter melhor planejamento da produção e assim garantir um melhor atendimento ao cliente, fazendo com que a organização continue sobrevivendo no atual mundo competitivo a partir da satisfação do cliente.

6.2 Propostas para continuidade do trabalho

Para trabalhos futuros deve-se continuar o Processo Decisório da Teoria das Restrições, pois em algum momento a restrição encontrada será quebrada e uma nova restrição irá surgir no sistema.

Pode-se também incrementar o modelo, criando um método de simulação através de *softwares* mais avançados, que podem conter os outros equipamentos do sistema e otimizar ainda mais o processo.

Outros trabalhos que podem ser sugeridos é a aplicação do método Seis Sigma (*Six Sigma*) ou Kaizen, para a redução de perdas de tempo nos equipamentos críticos e elevar o desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R. F.; SILVA, L. T.; CAULLIRAUX, H. M.; PRADO, C. A. S. **A Teoria das restrições em um processo produtivo de fabricação de chapas de gesso acartonado no Brasil.** In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Florianópolis, 3 A 5 de nov de 2004. ENEGEP, 2004.

ALVES, J. M.; SANTOS, R. F. **Custeio baseado em atividades e teoria das restrições: um caso real na indústria de eletrodomésticos.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

BOSCHETTO, S. N.; LÜDERS, R.; NEVES JR, F.; ARRUDA, L. V. R. **Otimização da programação de operações em terminais petrolíferos.** In: 4º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS, Campinas, 21 a 24 de out de 2007. PDPETRO, 2007.

COGAN, S. **Teoria das Restrições** In: Seminários da Controladoria Geral, 2005, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www7.rio.rj.gov.br/cgm/comunicacao/publicacoes/cadernos/?2005/02/1>> Acesso em 21 set. 2011.

COGAN, S.; CORREIA, A. B.; BUENO, C. R. **A teoria das restrições aplicada à geração de energia hidrelétrica.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

CORBETT, T. **Contabilidade de ganhos.** São Paulo: Editora. Nobel, 1997.

CORBETT, T. **Contabilidade de ganhos e activity-based costing: curto prazo versus longo prazo?**, 2003. Disponível em <<http://www.corbett.pro.br>> Acesso em: 04 ago. 2011.

CORNÉLIO, G. T. **Caracterização de materiais utilizados na fabricação de cilindros de laminação submetidos ao desgaste abrasivo.** 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006.

COX III, J. F.; SPENCER, M. S. **Manual da teoria das restrições.** Porto Alegre: Bookman, 2002. 280p.

CSILLAG, J. M.; CORBETT NETO, T. **Utilização da teoria das restrições no ambiente de manufatura em empresas no Brasil.** EAESP/FGV/NPP – Núcleo de Pesquisas e Publicações, relatório de pesquisa n. 17, 1998.

DAMELIO, R. **The basics of process mapping.** Boca Raton: Productivity Press, 1996. 65p.

EHRlich, P.J. **Programação Linear e decisão.** São Paulo: FGV, 2004. 16p. Disponível em: <http://www.fgvsp.br/academico/professores/Pierre_J_Ehrlich/ProgramacaoLineareDecisao.pdf> Acesso em: 04 ago. 2011.

FIGUEIREDO, J. C. B. **Construção de um modelo de dinâmica de sistemas voltado para o ensino da teoria das restrições.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

GOLDRATT, E. M.; COX, J. **A meta: um processo de melhoria contínua.** 2.ed. São Paulo: Nobel, 2002. 365p.

GOLDRATT, E. M. **A síndrome do palheiro: garimpendo informação num oceano de dados.** São Paulo: Educator, 1992. 245p.

GOLDRATT, E. M. **Corrente crítica**. São Paulo: Nobel, 1998. 260p.

GOLDRATT, E. M.; SCHRAGENHEIM, E.; PTAK, C.A. **Necessária, sim, mas não suficiente**. Great Barrington: The North River, 2000. 252p.

GOLDRATT, E. M. **Não é sorte**. São Paulo: Nobel, 2004. 248p.

GONÇALVES, J. E. L. **Processo, que processo?**. RAE – Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v.40, n.4, p.8-19, Out/Dez, 2000.

GUIMARÃES, I. F. G.; PEREIRA, D. M.; MURTA, J. L. B.; SILVA, R. T. L. **A simulação computacional na identificação dos princípios da teoria das restrições: o caso de uma empresa de ferro-ligas na região do quadrilátero ferrífero**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

HENRIQUES, R. P.; GONÇALVES, A. A. **Modelo computadorizado para simulação dos prazos de produção e de entrega na indústria de confecção**. In: XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, 13 A 16 de out de 2008. ENEGEP, 2008.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO GERENCIAL - INDG. Nova Lima. Disponível em: <<http://www.indg.com.br/po>>. Acesso em: 04 ago. 2011.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2004. 384p.

LISBOA, E. F. A. **Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: Pesquisa e Desenvolvimento, 2002. 58 p.

MABIN, V. J.; BALDERSTONE, S. J. **The performance of the theory of constraints methodology: analysis and discussion of successful TOC applications.** International Journal of Operations & Production Management, v.23, n.6, p.568-595, 2003.

MARINS, F. A. S.; PEREIRA, M. S.; BELDERRAIN, M. C. N.; URBINA, L. M. S. **Métodos de Tomada de Decisão Com Múltiplos Critérios: Aplicações na Indústria Aeroespacial.** São Paulo: Blucher Acadêmico, 2010. 248 p.

MARTINS, F. A. **O processo de raciocínio da teoria das restrições na indústria moveleira de pequeno porte: um estudo de caso.** 2002. 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

MOELLMANN, A. H. **Aplicação da teoria das restrições no gerenciamento da cadeia de suprimentos.** 2008. 163p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Produção) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2008.

NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA – NUMA. São Paulo. Disponível em: <http://www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/TOC.html >. Acesso em: 21 set. 2011.

PINHO, A. F.; LEAL, F.; MONTEVECHI, J. A. B.; ALMEIDA, D. A. **Combinação entre as técnicas de fluxograma e mapa de processo no mapeamento de um processo produtivo.** In: XXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Foz do Iguaçu, 9 a 11 de out de 2007. ENEGEP, 2007.

POZO, H.; TACHIZAWA, T.; SOUZA, J. H. **Teoria das restrições: um estudo de caso através da redução do tempo de set up em uma metalúrgica do ABC.** In: XI SIMPÓSIO DE ADMINISTRAÇÃO DA PRODUÇÃO, LOGÍSTICA E OPERAÇÕES INTERNACIONAIS, São Paulo, 27 a 29 de ago de 2008. SIMPOI, 2008.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Aplicação da teoria das restrições e de técnicas da pesquisa operacional na melhoria de manufatura.** 2007. 116p. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

RODRIGUEZ, L. A. O. **Modelo de tomada de decisão integrando teoria das restrições, programação linear inteira e simulação:** estudo de caso numa indústria siderúrgica. 2009. 180 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Produção) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

SANTOS, O. M.; SILVA, P. D. A.; FURTADO, K. G.; COGAN, S. **A Teoria das Restrições no Processo de Refino de Petróleo.** Rio de Janeiro. 2006, 15p.

SEED TECNOLOGIA LTDA. Disponível em: <[http://www.seed.com.br/pt /Scheduler /TOC.aspx](http://www.seed.com.br/pt/Scheduler/TOC.aspx)>. Acesso em 21set. 2011.

SOUZA, F. B.; TAKAO, E. L.; SILVA, M. A. C.; ANTONIOLLI, P. D.; VICENTINI, J. P. **Utilização da abordagem da teoria das restrições na gestão da cadeia de suprimentos:** uma revisão conceitual. In Simpósio de Engenharia de Produção - SIMPEP, 11, 2004, Bauru. Anais... Bauru: UNESP, 2004.

THE ASSOCIATION FOR OPERATIONS MANAGEMENT. **APICS Dictionary.** 13th ed. New York: APICS, 2009. 469 p.

VALENTE. **Pesquisa operacional.** Campinas, 2007. cap.1, p.1-8. Disponível em <http://www.dt.fee.unicamp.br/~valente/capt1_044.pdf> Acesso em: 04 ago. 2011.

VALENTINE, J.R. Horizontal Centrifugal Casting. In:____. **Rolls for the Metalworking Industries,** Warrendale, PA, USA: Iron & Steel Society, 2002. p. 153 - 159.

XAVIER, R. R. **Efeito do tratamento térmico nas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste de um ferro fundido branco multicomponente**. 2010. 95 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica - Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

YBARRA, L. A. C. **A programação linear e o processo de decisão**. São Paulo: 2007. 35p. Disponível em <<http://phpmetar.incubadora.fapesp.br/portal/Faculdade/Pesquisa%20Operacional/Programacao%20linear%2027-09.pdf>> Acesso em: 04 ago. 2011.

WATSON, K. J.; BLACKSTONE, J. H. Jr.; GARDINER, S. C. **The evolution of a management philosophy: the theory of constraints**. Journal of Operations Management, n.25, p.387-402, 2007.