



Diagrama de Fontes Aplicado em Cadeias de Suprimentos

Pedro Felipe dos Santos Viola de Araujo

Projeto Final de Curso

Orientador

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Março de 2017

DIAGRAMA DE FONTES APLICADO EM CADEIA DE SUPRIMENTOS

Pedro Felipe dos Santos Viola de Araujo

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Prof. Carlos Augusto Guimarães Perlingeiro, Ph.D.

Bernadete Elizardo Pereira da Costa Delgado, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, B.Sc.

Orientado por:

Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2017

D658d Dos Santos Viola Araujo, Pedro Felipe
Diagrama de Fontes Aplicado em Cadeias de
Suprimentos / Pedro Felipe Dos Santos Viola Araujo.
-- Rio de Janeiro, 2017.
75 f.

Orientador: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de
Química, Bacharel em Engenharia Química, 2017.

1. Diagrama de Fontes. 2. Planejamento Agregado.
3. Tecnologia Pinch. 4. Monografia. 5. Fernando
Luiz Pellegrini Pessoa. I. Pellegrini Pessoa,
Fernando Luiz, orient. II. Título.

Dedicatória

Aos esforços diários de minha avó Neyde.
Cada vitória minha foi pavimentada
com seu carinho e dedicação.
A ela manifesto minha eterna gratidão.

Citação

Todo homem que conheço é superior a mim em algum sentido.

Nesse sentido, aprendo dele.

(Ralph Waldo Emerson)

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

DIAGRAMA DE FONTES APLICADO EM CADEIAS DE SUPRIMENTOS

Pedro Felipe dos Santos Viola de Araujo

Março, 2017

Orientador: Prof. Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, D.Sc.

A indústria global se caracteriza por redes interligadas de fornecedores e consumidores que possuem uma relação de interdependência. Nessas redes multiempresariais, um planejamento estratégico eficiente, que atenda às demandas dos consumidores, é fundamental para uma indústria permanecer competitiva.

No sentido de satisfazer a demanda de uma companhia e prever sua taxa de produção em um período de tempo, surge o Planejamento agregado. Esta é uma técnica que objetiva a maximização das vendas, e conseqüentemente do lucro, levando em consideração os limitantes presentes em uma unidade industrial, tais como mão-de-obra, capacidade produtiva, inventário, entre outros.

Em conjunto com o Planejamento agregado, é conduzida uma análise através do uso da tecnologia *Pinch* (TP), proveniente da Engenharia de Processos. Essa análise se baseia no método de estabelecimento de metas, que é capaz de melhorar o desempenho de um processo de maneira prática, sistemática e rigorosa.

Uma ferramenta consagrada na Engenharia de Processos é o Diagrama de Fontes (DF), desenvolvido pelo Grupo de Integração de Processos Químicos (GIPQ) da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. O DF é largamente utilizado em problemas de Redes de Transferência de Massa.

O objetivo desse trabalho foi utilizar o Diagrama de Fontes na resolução de um exemplo de planejamento de produção de uma Cadeia de Suprimentos. Os resultados encontrados foram satisfatórios e corroboram com os reportados na literatura.

ÍNDICE

Capítulo I – Introdução	8
I.1 – Cadeia de Suprimentos	8
I.2 – Planejamento Agregado	10
I.3 – Objetivo	11
I.4 – Divisão do Trabalho	11
Capítulo II – Revisão Bibliográfica	13
II.1 – Integração de Processos	13
II.2 – Tecnologia <i>Pinch</i>	14
II.3 – Redes de Transferência de Massa	15
II.4 – Diagrama de Fontes – Um Breve Histórico	16
II.5 – Diagrama de Fontes de Água – A Metodologia	18
Capítulo III – Integração de Processos e o Planejamento Agregado	25
III.1 – As Ferramentas de Integração de Processos nas Cadeia de Suprimentos	25
III.2 – O Problema Inicial de Chopra e Meindl (2001)	26
III.3 – Método Gráfico de Singhvi e Shenoy (2002)	32
III.3.1 – Análise sem <i>Backlog</i>	33
III.3.2 – Análise com <i>Backlog</i>	38
III.4 – Análise Cascata de Foo <i>et al.</i> (2008)	43
III.4.1 – Inventário Mínimo e Máximo	47
III.4.2 – Produção de PVC	49
Capítulo IV – Diagrama de Fontes em Cadeias de Suprimentos	54
IV.1 – Introdução ao Método	54
IV.2 – Aplicação do Método	56
IV.3 – Estudo de Caso – Exemplo Industrial de Foo <i>et al.</i> (2008)	63
Capítulo V – Conclusão	71
Referências Bibliográficas	72

I. Introdução

1.1 Cadeia de Suprimentos

A indústria moderna é composta por fábricas de diversos produtos e propósitos que operam em diferentes regiões do mundo e comercializam com clientes globais. Papageorgiou (2009) observa que nas redes multiempresariais, as questões envolvendo planejamento estratégico e resposta às demandas do consumidor nos níveis local e global são críticas para assegurar efetividade, competitividade, sustentabilidade e crescimento da companhia. Nesse contexto, há algum tempo, tem-se reconhecido a importância de uma rede integrada e eficiente que consiga reduzir os custos capitais e operacionais, aumentar a produtividade de sua cadeia e melhorar o negócio.

O mesmo autor define cadeia de suprimento como uma rede de instalações e mecanismos de distribuição que obtém uma matéria-prima, a transforma em produtos intermediários e finais e os distribui aos consumidores. Todos esses elementos em conjunto geram uma rede que inclui as funções envolvidas em receber e suprir a necessidade do consumidor. A rede final é dinâmica e se caracteriza pelos constantes fluxos de informação, produtos e financeiro entre os diferentes estágios que a constituem.

Chopra e Meindl (2001) descrevem bem o objetivo do gerenciamento de uma Cadeia de Suprimentos: maximizar o valor gerado, isto é, a diferença entre o quanto o produto vale para o consumidor e os custos intrínsecos à sua produção e comercialização. Um gerenciamento eficiente permite a tomada de decisões ao longo de toda a cadeia produtiva, desde a compra da matéria-prima, passando por todo o processo produtivo, até distribuição dos produtos finais ao

consumidor. Em cada etapa, devem ser tomadas as melhores decisões visando as necessidades dos clientes e como elas podem ser supridas com o menor custo possível.

Em geral, as cadeias de suprimento só possuem uma fonte de receita: o consumidor. A compra efetuada pelo consumidor é o único fluxo de caixa positivo provido em toda a cadeia produtiva, todos os outros fluxos são negativos. Dessa maneira, para aumentar o lucro, existe uma grande variedade de opções que atuam na redução do custo de produção.

O valor agregado do produto está fortemente relacionado ao rendimento que a Cadeia proporciona, ou seja, é a diferença entre a receita gerada a partir do consumidor e o custo total gasto ao longo do processo. Quanto maior o lucro, mais bem sucedido é o gerenciamento.

A forma utilizada pelas empresas para maximizar o lucro é planejar todos os parâmetros necessários ao suprimento de uma demanda projetada em um dado período de tempo, levando-se em consideração todas as limitações do processo. Os custos em manter altos inventários através de toda a cadeia a fim obter um alto padrão de serviço ao consumidor são significantes. Dessa maneira, geralmente há um grande escopo de possibilidades de redução de inventários, enquanto altos padrões de qualidade podem ser mantidos.

Para tal, a definição de um plano estratégico se torna primordial e começa a partir da estimativa da demanda do mercado. O resultado desse planejamento determina o conjunto de políticas operacionais da empresa no período analisado, a infraestrutura ótima e a identificação de melhorias na produção, a distribuição e a estocagem de recursos para suprir as demandas projetadas de uma maneira eficiente e economicamente viável.

I.2 Planejamento agregado

Chopra e Meindl (2001) definem o planejamento agregado como o processo pelo qual uma companhia determina os níveis ideais de capacidade, produção, terceirização, inventário e preço em um horizonte de tempo específico. A demanda deve ser projetada e a produção deve ser planejada antecipadamente para o suprimento de tal demanda. Seu objetivo é suprir a demanda ao mesmo passo que maximiza o lucro.

Essa ferramenta mostra-se muito útil para tomada de decisão em um tempo futuro médio – geralmente 3 a 18 meses – e estabelece parâmetros aos quais as decisões de produção e de distribuição do inventário devem obedecer.

Tradicionalmente, o planejamento agregado é focado em uma única empresa. Contudo, ele é um importante ponto no universo de uma Cadeia de Suprimentos. Para produzir um resultado eficiente, é necessário obter informações através de toda a cadeia e seus resultados impactam na performance de todos os elementos envolvidos nessa rede.

Uma boa projeção da demanda é essencial em um planejamento eficiente: níveis de inventário ou produção insuficientes resultam em perdas de oportunidade de vendas e podem reduzir o lucro. Dessa forma, o planejamento agregado torna-se necessário no gerenciamento de uma planta industrial.

Uma tendência atual é a aplicação das técnicas de Integração de Processos (IP) na construção de um planejamento de produção. O primeiro estudo nesse sentido foi conduzido por Singhvi e Shenoy (2002). Posteriormente, esse trabalho foi complementado por Foo *et al.* (2008).

1.3 Objetivo

Um procedimento algoritmo-heurístico desenvolvido pelo Grupo de Integração de Processos Químicos (GIPQ) da Escola de Química (EQ) na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) é o Diagrama de Fontes.

Essa metodologia, assim como demais técnicas de IP, surgiu com o objetivo de minimizar o uso de recursos utilizados na indústria.

Diante das motivações apresentadas, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma ferramenta baseada no conceito de Diagrama de Fontes para resolver um problema de planejamento agregado.

1.4 Divisão do Trabalho

No Capítulo 1, são definidas a área à qual pertence o problema-tema e a metodologia de solução que será utilizada. O Diagrama de Fontes será desenvolvido em um problema de planejamento de produção industrial, o Planejamento agregado.

O Capítulo 2 consiste em uma revisão bibliográfica. A Engenharia de Processos é espaço originário das técnicas que serão discutidas. Em consonância com a proposta, a Integração de Processos é descrita através da evidenciação de suas propriedades. Nesse mesmo capítulo, a história e a metodologia utilizada pelo Diagrama de Fontes são delineadas.

O Capítulo 3 apresenta trabalhos anteriores: as técnicas de Integração de Processos já aplicadas em problemas de planejamento agregado são expostas e suas metodologias, esclarecidas.

No Capítulo 4, o problema-tema é apresentado, e a proposta de desenvolvimento do DF é executada e discutida. Seus três tópicos envolvem a introdução ao método e suas particularidades; a aplicação do método proposto; e um Estudo de Caso, através de um exemplo industrial, tendo sido este o mesmo avaliado por Foo *et al.* (2008).

O Capítulo 5 expõe as conclusões pertinentes à adaptação da metodologia do Diagrama de Fontes ao Planejamento agregado de uma Cadeia de Suprimentos.

II. Revisão Bibliográfica

II.1 *Integração de Processos*

Mirre (2012) relata que a Integração de Processos surgiu durante as décadas de 1970 e 1980 em um cenário caracterizado pela escassez de recursos. Esse segmento da Engenharia Química tem o objetivo de buscar soluções tecnológicas para o aproveitamento racional de matérias-primas e recursos energéticos.

A base da IP foi estruturada no desenvolvimento de métodos sistemáticos utilizados na síntese de redes de trocadores de calor: a Integração Energética. Porém, por dispor de mecanismos abrangentes de otimização técnica e econômica, tornou-se uma área utilizada para a tomada de decisões na indústria.

De acordo com Perlingeiro (2005), a Integração de Processos é composta por dois estágios interconectados que se complementam na elaboração do projeto do processo.

Hoje, o projeto é reconhecido como uma combinação de duas atividades complementares e distintas: Síntese e Análise. A primeira trata da geração sistemática dos fluxogramas alternativos, e a segunda, da avaliação desses fluxogramas. O projeto é também considerado como um problema, com um enunciado bem definido, dotado de um conjunto crescente de métodos sistemáticos de resolução (PERLINGEIRO, 2005, p. 11).

Síntese é a etapa criativa do projeto, na adota-se uma abordagem sistemática para a seleção e a interconexão de operações unitárias com o objetivo de desenvolver um fluxograma conceitual. Essa etapa é caracterizada pela multiplicidade de soluções, que aumenta a cada mudança na estrutura do projeto ou número de elementos.

Na Análise, cada uma das estruturas é avaliada através de parâmetros conhecidos e previamente especificados. Procura-se identificar qual opção apresenta o melhor rendimento. Essa etapa consiste essencialmente na resolução do sistema de equações do modelo matemático.

II.2. Tecnologia Pinch

Grande parte dos procedimentos algorítmicos de Síntese presentes na literatura é baseada na tecnologia do Ponto de Estrangulamento (tecnologia *Pinch*).

O contexto de crise energética, em que a Integração de Processos se desenvolveu, estimulou a criação de diversas metodologias destinadas à otimização de Redes de Trocadores de Calor (RTC). Muitas delas tornaram-se populares à época, entre elas a metodologia elaborada por Linnhoff e Hindmarsh (1983) que é utilizada até hoje.

Esse sucesso se deve à praticidade da execução de seus mecanismos, que se fundamentam no estabelecimento de metas para um projeto (e.g. consumo mínimo de energia ou água) e oferecem ao engenheiro a oportunidade de atuação ao longo do processo de síntese. As ferramentas são oriundas de conceitos termodinâmicos simples e, através delas, são obtidas propostas de redes integradas e otimizadas.

A tecnologia *Pinch* (TP) é rigorosa e sistemática, possui uma abordagem estruturada que pode ser utilizada para lidar com uma gama de melhorias relacionadas ao processo e ao sistema de utilidades. Além disso, a TP pode ser aplicada sem o emprego de algoritmos sofisticados, o que a promove como instrumento acessível a qualquer engenheiro de processo.

Os métodos são divididos em gráficos ou algébricos e dependem da técnica utilizada. Os primeiros fornecem boas percepções sobre o problema, mas é uma técnica lenta para usar em problemas complexos e pode gerar erros pelas aproximações durante a leitura do gráfico. Por sua vez, os métodos algébricos não oferecem percepções para os engenheiros, porém são mais aplicáveis em problemas complexos pela sua capacidade de interação computacional com softwares.

Smith (2005) divide a resolução dos métodos da tecnologia *Pinch* em dois passos: estabelecimento de metas e projeto. No estabelecimento de metas ocorre a busca pela força motriz ideal ao longo de todo o processo. Posteriormente, no projeto, os resultados obtidos no estágio anterior são utilizados para gerar uma estrutura compatível com as limitações do problema.

Segundo Foo *et al.*(2008), o princípio fundamental da tecnologia *Pinch* é fazer um bom uso de informações de correntes/fluxos em conjunto com dados qualitativos. Por essa razão, essa técnica tem sido empregada em diversos outros campos que não os tradicionais (RTC e RTM). Uma tendência atual é a sua aplicação na integração de propriedades e funcionalidades (e.g. pH, toxicidade, densidade) e até em áreas cujo escopo ultrapassa os limites iniciais dessa metodologia, tais como: Planejamento Financeiro, Planejamento Energético e Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos – tema base desse trabalho.

II.3. Redes de Transferência de Massa

O Diagrama de Fontes é fundamentado nos conceitos da tecnologia *Pinch* e sua aplicação inicial ocorreu em problemas que consideram Redes de Transferência de Massa.

Takama *et al* (1980) foram os primeiros a abordarem a necessidade do reúso de água em unidades industriais. No entanto, o conceito de Redes de Transferência de Massa ocorreu após os estudos realizados por El-Halwagi e Manousiouthakis (1989). Eles elaboraram uma sistemática para a geração de uma rede na qual o principal objetivo era remover poluentes de um conjunto de correntes ricas e transferi-los para um conjunto de correntes pobres, de modo eficiente e com baixo custo, fazendo uma analogia com a Rede de Transferência de Energia.

Para isso foram usados princípios da tecnologia *Pinch* em uma abordagem similar ao da rede de trocadores de calor desenvolvida por Linnhoff e Hindmarsh (1983): definiu-se uma diferença de concentração mínima permitida para aplicação à rede de transferência de massa.

Um marco no desenvolvimento das redes de reúso e otimização de efluentes aquosos é o artigo de Wang e Smith (1994). Os autores consideraram processos com uni e múltiplos contaminantes serem minimizados numa ampla faixa de processos, utilizando o conceito de força motriz. Novamente a TP se fez presente através do uso da Curva Composta e da Transferência Vertical – duas de suas ferramentas – para o alcance das metas de minimização. Esse trabalho é a base para o desenvolvimento de estudos relacionados às RTMs.

Uma publicação que merece destaque é a de Castro *et al.* (1999), que se baseou no método de Wang e Smith (1994) e gerou uma proposta simultânea de especificação da meta de consumo mínimo e a síntese da RTM.

II.4 Diagrama de Fontes – Um Breve Histórico

Gomes (2002) aperfeiçoou a ferramenta de Castro *et al.* (1999), tornou-a mais abrangente e prática. Em seu trabalho, a autora apresenta o Diagrama de Fontes: um diagrama no qual estão dispostas as concentrações das correntes e as operações analisadas. Essa técnica permite que o engenheiro defina, no momento de sua execução, as melhores trocas mássicas entre as operações, já construindo a rede final. Como surgiu em problemas de alocação de água, essa ferramenta ficou conhecida como Diagrama de Fontes de Água (DFA).

Quatro casos industriais foram tema do trabalho desenvolvido por Delgado (2003), a saber: Unidade de Branqueamento de Papel, Fabricação de Sorbitol e Dextrose, Refinaria de Petróleo e Fabricação de Caixas de Papelão.

A aplicabilidade do DFA em refinarias de petróleo foi assegurada pelos trabalhos de Magalhães (2005), Cunha, Mirre e Santos (2005), Higa e Penha (2006) e Mirre *et al.* (2006). Esses trabalhos consolidaram o DFA como uma técnica redução do consumo de água em refinarias. Porém, o primeiro trabalho de destaque foi realizado por Mirre (2007).

Marques (2008) demonstrou sua flexibilidade ao diversificar a aplicação do DFA para a resolução de problemas em quatro tipos de indústrias: papel e celulose, alimentos (sucos cítricos), têxtil e petroquímica.

Melo (2008) se propôs a tentar reduzir o impacto ambiental causado pela indústria têxtil. Enquanto França (2012) aplicou o DFA a uma siderúrgica hipotética.

O Diagrama de Fontes iniciou-se com a aplicação para obtenção de redes de alocação de água e foi extensivamente utilizado e aprimorado ao longo dos anos. Uma de suas vantagens é que as metas e as redes de processo são obtidas simultaneamente em apenas um passo, enquanto os outros métodos presentes na literatura necessitam de dois passos.

Ao longo dos anos essa ferramenta evoluiu e foi utilizada em outros segmentos, como o gerenciamento de hidrogênio em refinarias de petróleo – Borges, Pessoa e Queiroz (2012) – e planejamento energético no setor elétrico – Quaresma (2015).

II.5 Diagrama de Fontes de Água – A Metodologia

O trabalho de Wang e Smith (1994) é uma referência no desenvolvimento da tecnologia *Pinch* na sistematização das Redes de Transferência de Massa. Nesse sentido, recorremos a ele para a definição de conceitos básicos na abordagem do Diagrama de Fontes de Água.

Os processos considerados no DFA são operações em que ocorre a redução da carga de alguma espécie (contaminante) através de um agente extrator. Essa operação ocorre em equipamentos de transferência de massa, representados pela Figura 1.

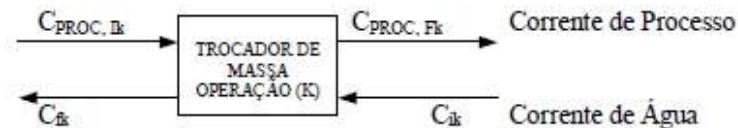


Figura 1 – Equipamento de Transferência de Massa. Fonte: Gomes (2002)

Considere que a corrente de processo possua uma vazão G_k e deseja-se reduzir a concentração do contaminante de $C_{PROC,ik}$ até $C_{PROC,Fk}$. Para isso, é utilizada uma corrente de água de vazão f_k cuja concentração inicial é C_{ik} e ao final da extração eleva-se a C_{fk} . O DFA considera que a troca de material é realizada sempre tendo a água como agente extrator.

A taxa mássica de contaminante transferida entre as correntes da operação k é chamada de Δm_k e pode ser obtida pelo balanço de massa no equipamento em relação ao contaminante. A Equação 1 demonstra a forma de obtenção dessa variável. Nota-se que as concentrações estão em ppm, as vazões em t/h e o Δm_k em kg/h.

$$\Delta m_k = G_k(C_{PROC,ik} - C_{PROC,Fk}) = f_k(C_{fk} - C_{ik})$$

(Equação 1)

A Equação 1 demonstra de maneira simples que para se minimizar a vazão de água utilizada f_k , deve-se maximizar a composição de saída da corrente de água C_{fk} . A concentração máxima de saída é especificada observando uma série de parâmetros, tais como: solubilidade máxima do contaminante, limite de corrosão, limite de deposição, mínima força motriz de transferência de massa no equipamento e máxima concentração de entrada para os processos de tratamento. O consumo mínimo de água nesse processo é garantido se na entrada for usada água primária, $C_{ik} = 0 \text{ ppm}$.

Essa condição é satisfeita para o caso de haver uma única operação. Porém em um sistema composto por inúmeros equipamentos extratores, o uso de água primária em todas as operações não garante o seu mínimo consumo global, já que existe a possibilidade de utilização parcial ou integral do efluente de uma operação como alimentação de outra operação. Essa opção é determinada pela máxima concentração de entrada da corrente de água ($C_{ik,máx}$) nas diversas operações. Evidentemente, o reúso contribui para a diminuição do consumo de água primária. Considerando o reúso como única alternativa de economia de água, quando ele for máximo, o consumo será mínimo.

Tendo apresentado as concepções fundamentais do Diagrama de Fontes de Água, neste momento, é interessante proceder com a exemplificação através de um problema resolvido por Gomes (2002) que utiliza os dados de Wang e Smith (1994). A resolução será conduzida com simultânea explanação.

A Tabela 1 apresenta os dados utilizados pelos autores: as vazões limites (f_k), e as respectivas concentrações máximas na entrada e na saída ($C_{ik,máx}$ e $C_{fk,máx}$), bem como as cargas de contaminante (Δm) correspondentes, aos dados das respectivas correntes. O índice k identifica a operação.

Tabela 1 – Dados do problema de Wang e Smith (1994) resolvido por Gomes (2002).

Operação (k)	f_k (t/h)	$C_{ik,max}$ (ppm)	$C_{fk,max}$ (ppm)	Δmk (kg/h)
1	20	0	100	2
2	100	50	100	5
3	40	50	800	30
4	10	400	800	4

Inicialmente faz-se necessário analisar todas as operações que utilizam água. Então, leva-se em consideração suas concentrações de entrada e de saída das correntes aquosas. A observação de todas essas concentrações dispostas em ordem crescente definem os intervalos intermediários de concentração. Considerando N_{int} como o número de intervalos e N_{op} como o número de operações, a relação entre ambos é dada pela Equação 2.

$$N_{int} \leq (2N_{op}) - 1$$

(Equação 2)

A igualdade da equação só ocorre quando não houver coincidência entre quaisquer das concentrações das operações.

O DFA é aplicado sequencialmente em quatro passos demonstrados a seguir.

Passo 1

Divide-se o problema em intervalos de concentração, limitados pela fonte de água primária (fonte externa) e as fontes de água internas (com concentrações iguais as de entrada e de saída das operações). As fontes são colocadas em ordem crescente de concentração, definindo os intervalos de concentração e também o diagrama de fontes de água conforme a Figura 2. Nesse problema existem quatro intervalos de concentração.

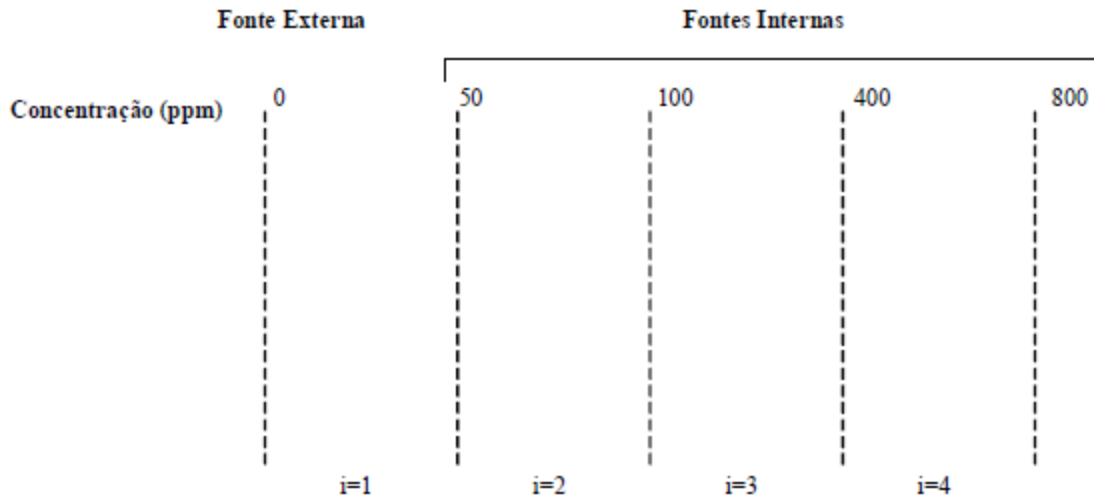


Figura 2 – Diagrama de Fontes de Água. Fonte: Gomes (2002).

Passo 2

Representam-se as operações de transferência de massa por setas. A origem de cada uma delas é uma caixa de identificação da operação, posicionada na respectiva concentração máxima de entrada; e a ponta corresponde à concentração máxima de saída. As vazões limites das operações, f_k , são dispostas no lado esquerdo do diagrama (ver Figura 3).

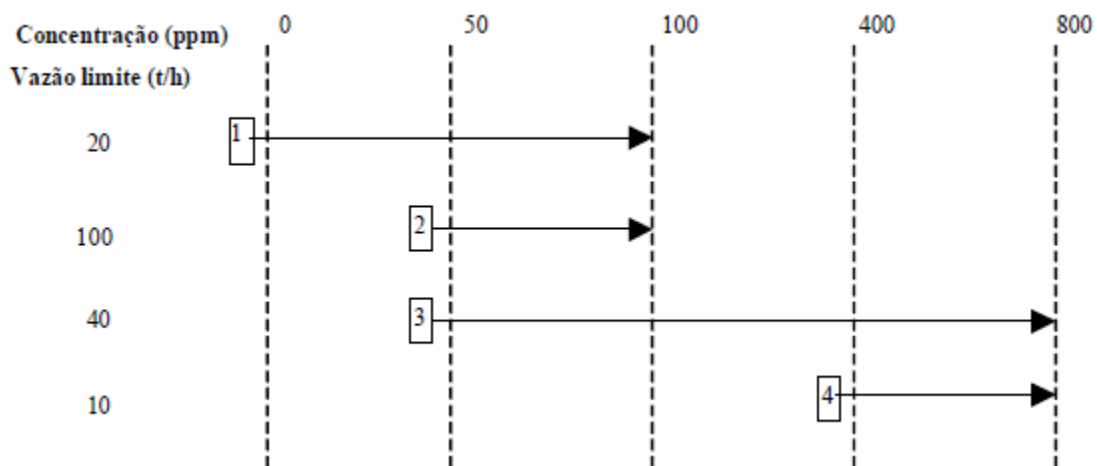


Figura 3 – Representação das operações no Diagrama de Fontes de Água. Fonte: Gomes (2002).

Passo 3

Simplificando a Equação 1, é possível encontrar a carga mássica de cada processo em cada intervalo, conforme a Equação 3.

$$\Delta m_k = f_k(C_{fi} - C_{ii})$$

(Equação 3)

C_{fi} é a concentração final do intervalo i e C_{ii} é a sua concentração inicial, f_k é a vazão mássica limite da corrente k . Os resultados obtidos são dispostos entre parênteses sobre as setas, expressos em kg/h. Segue representado na Figura 4.

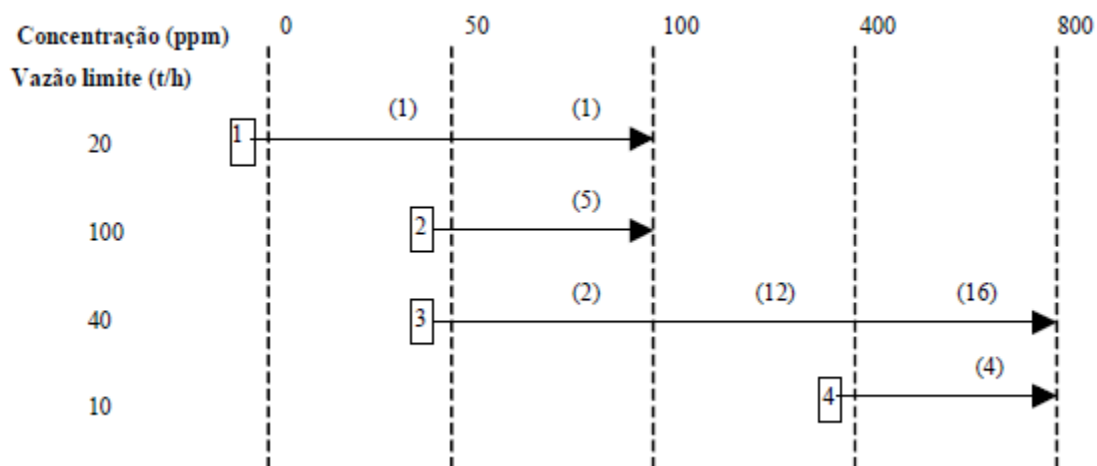


Figura 4 – Representação dos Δm_s no Diagrama de Fontes de Água. Fonte: Gomes (2002).

Passo 4

O procedimento para a construção da rede de transferência de massa inicia-se no intervalo de menor concentração e obedece a duas regras.

Regra 1: Utilizar fontes externas somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em quantidade quanto em qualidade. Na disponibilidade de fonte interna, usar preferencialmente a oriunda da mesma operação.

Regra 2: As concentrações máximas de entrada e de saída não devem ser violadas. Assim, para uma determinada operação, a fonte de água utilizada em um intervalo deve, obrigatoriamente, absorver a quantidade de massa a ser transferida no respectivo intervalo.

Faz-se necessário o cálculo da vazão de água requerida por cada operação k em cada intervalo de concentração i .

No caso de ser utilizada uma fonte externa f_{pki}^e , utiliza-se a Equação 4:

$$f_{pki}^e = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{f=1}^{N_{fia,i}} (f_{jki}^i [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^e}$$

(Equação 4)

Para uma fonte interna f_{pki}^i , usa-se a Equação 5:

$$f_{pki}^i = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=p-1}^p (f_{jki}^i [C_{fi} - C_{ij}])}{C_{fi} - C_p^i}$$

(Equação 5)

Onde:

C_{ij} : concentração na qual a fonte interna j é usada no intervalo i ;

C_p^e : concentração da fonte externa p ;

C_{fi} : concentração final do intervalo i ;

$N_{fia,i}$: número de fontes internas disponíveis no intervalo i .

De acordo com a ordem de cálculo, caso haja utilização de fonte interna no intervalo, os valores dos respectivos f_{pki}^i são calculados antes do f_{pki}^e .

Aplicando-se o método, usando as equações descritas e obedecendo as regras, uma ou mais opções de reúso de água são geradas pelo diagrama. Gomes (2002) descreve o

procedimento mais precisamente e ainda gera um fluxograma representativo do cenário sugerido pelo DFA.

O Diagrama de Fontes é um método já consolidado em problemas de RTM. No sentido de diversificar sua aplicação, o presente trabalho se propõe a traçar um paralelo entre o Diagrama de Fontes e as sistemáticas de obtenção de planejamento agregado.

III. Integração de Processos e o Planejamento agregado

III.1 As Ferramentas de Integração de Processos nas Cadeias de Suprimentos

A administração de uma rede com diferentes elementos e funções oferece inúmeras soluções sustentáveis e econômicas. O monitoramento das atividades relacionadas ao processo produtivo, sua posterior avaliação e economia de recursos tem consequências extraordinárias quanto ao consumo de matéria-prima e energia. Portanto, o gerenciamento eficiente da Cadeia produtiva de uma indústria é uma área estratégica para a minimização de impactos ambientais e sociais adversos.

A Integração de Processos visa o projeto sustentável do processo, a utilização e o consumo racional de matérias-primas e energia. Este é um segmento atrelado à Engenharia de Processos que atua no sentido de melhorar a eficiência e o desenvolvimento dos processos industriais. A IP tem sido comumente aceita como uma ferramenta eficaz no desenvolvimento e avaliação de alternativas de conservação de recursos.

Observados os seus pilares originais, constata-se que a Integração de Processos e o gerenciamento de Cadeias de Suprimentos partilham de ideias sustentáveis. As técnicas de Integração de Processos contemplam as necessidades dos problemas das Cadeias Produtivas. Suscita-se, então, a proposta de utilizá-las em segmentos do gerenciamento de Cadeia de Suprimentos.

Uma das mais bem sucedidas metodologias de IP é a tecnologia *Pinch*. Esse método foi extensivamente abordado em problemáticas de minimização de materiais e energia.

Recentemente tem sido aplicada em outras áreas, tais como: Planejamento Energético com Restrições, redes de Resfriamento, Cadeia de Suprimentos e Análise Financeira.

O uso diversificado dessas técnicas gerou uma família de metodologias que tem a função de combinar diferentes processos com o intuito de reduzir o consumo de recursos e/ou emissões de poluentes no ambiente. Além disso, a IP se tornou uma ferramenta indispensável para assegurar a sustentabilidade dos processos químicos, pois consegue adotar as oportunidades e gerenciar os riscos derivados dos aspectos econômicos, sociais e ambientais do desenvolvimento sustentável.

O Planejamento agregado já foi tema de diversos autores que procuraram executar os mecanismos de estabelecimento de metas em áreas historicamente não usuais. Destacam-se os artigos de Singhvi e Shenoy (2002) e Foo *et al.* (2008). Através desse trabalho, pretende-se flexibilizar o Diagrama de Fontes resolvendo um problema de Planejamento agregado. Para isso, utilizam-se os mesmos dados abordados em trabalhos anteriores, os de Chopra e Meindl (2001).

III.2 O Problema Inicial de Chopra e Meindl (2001)

Imagine uma situação hipotética em que fabricação, transporte, estoque e comunicação são ilimitados e grátis. Considere ainda que não exista *lead time*¹ todos os produtos seriam produzidos e entregues aos consumidores instantaneamente. Nesse mundo, não haveria necessidade de planejar e antecipar as demandas: assim que um cliente desejasse um produto, ele automaticamente teria sua vontade satisfeita. Nesse cenário o Planejamento Agregado não seria importante.

¹ tempo entre o surgimento e o atendimento de uma demanda.

Todavia, no mundo real, capacidade tem um custo e os *lead times* geralmente são longos. Assim, as empresas são obrigadas a tomar decisões quanto às capacidades produtivas, níveis de produção, níveis de matérias-primas (entre muitas outras) bem antes da demanda ser conhecida. Nessa situação, sim, a demanda tem que ser projetada e um planejamento de como alcançá-la deve ser proposto. Nesse mundo real o Planejamento agregado é essencial.

O Planejamento agregado permite uma empresa decidir os níveis ótimos de produção e inventário de uma planta industrial para um determinado espaço de tempo. Seu objetivo é satisfazer a demanda e ao mesmo tempo maximizar o lucro.

Nesse sentido, o responsável pelo planejamento é orientado a identificar alguns parâmetros operacionais ao longo de um horizonte de tempo específico em que se baseará a prospecção da demanda. Tais fatores são, por exemplo:

- Nível de Produção: número de unidades a serem fabricadas por unidade de tempo (geralmente mensal ou semanal);
- Mão-de-obra: número de trabalhadores necessários para atingir o total de unidades a serem produzidas;
- Capacidade de Maquinário: quantidade de máquinas necessárias para o atendimento do nível de produção desejado;
- Terceirização: unidades de produto a serem subcontratadas de outras empresas para suprir a demanda;
- *Backlog*: demanda não satisfeita no período em que surge, mas que é contabilizada como ainda podendo ser suprida em períodos futuros (inventário negativo);
- Nível de Inventário: quantidade de produtos estocados ao longo do período.

Através da estimativa desses dados, o Planejamento agregado atua como um modelo de operações e estabelece os parâmetros pelos quais as decisões de produção e distribuição são tomadas.

Assim, pode-se concluir que um problema de Planejamento agregado projeta uma demanda D_t para cada período t em um horizonte de tempo T . Deve-se maximizar o lucro no tempo T , determinando os níveis ótimos produção (P_t), unidades subcontratadas (C_t), mão-de-obra (W_t), capacidade de máquina (M_t), inventário (I_t), entre outros.

A demanda pode ser atingida com a força de trabalho atuando na produção em tempo regular ou em tempo extra, ou ainda, através de subcontratação das unidades produzidas por outras plantas industriais. Essas informações são úteis no momento de decisão quanto aos níveis de terceirização, de compra de materiais com fornecedores, de mão-de-obra (contratação ou dispensa) ou de eventual necessidade de compra de maquinário.

Existem várias maneiras de suprir a demanda sazonal: construir inventário em períodos de baixa demanda; manter um inventário negativo por um período e suprir com atraso as unidades aos clientes; contratar/dispensar mão-de-obra durante períodos de alta/baixa demanda; terceirizar parte da produção, entre outras.

Inventário ou produção insuficiente resulta em uma demanda não sendo suprida, gerando perda de oportunidade de vendas e aumento de lucros. Dessa forma, o Planejamento agregado torna-se necessário no gerenciamento de inventário e produção de uma planta industrial e consequentemente o aumento do seu lucro.

Cabe agora apresentar o problema de Chopra e Meindl (2001), o qual inspirou esse trabalho e que já foi usado como base de estudo de aplicação de métodos desenvolvidos por outros autores.

O objetivo do problema é maximizar o lucro final da empresa. Os níveis de produção e inventário devem ser determinados, utilizando as demandas projetadas para cada período do horizonte de planejamento na Tabela 2.

Tabela 2 – Demandas do Problema. Fonte: Chopra e Meindl (2001).

Período t	Mês	Demanda Projetada D_t
1	Janeiro	1600
2	Fevereiro	3000
3	Março	3200
4	Abril	3800
5	Maió	2200
6	Junho	2200

Os custos de operação são ilustrados na Tabela 3.

Tabela 3 – Custos de Operação do Problema. Fonte: Chopra e Meindl (2001).

Item	Custo (\$)
Custo de Material C_P	10/unidade
Custo de <i>Backlog</i> C_S	5/unidade/mês
Custo de Inventário C_I	2/unidade/mês
Custo de Contratação C_H	300/trabalhador
Custo de Demissão C_L	500/trabalhador
Salário Regular	4/hora
Salário Extra C_O	6/hora
Custo de Terceirização C_C	30/unidade

Não foram especificados limites máximos e mínimos de inventário, *backlog* ou terceirização. Contudo ao final do período toda a demanda deve ser satisfeita e deve-se notar que qualquer inventário construído em um mês pode ser usado em meses posteriores e um *backlog* criado em um mês deve ser suprido com a produção dos meses seguintes.

Considera-se que no início de janeiro há um inventário disponível de 1000 unidades e uma mão-de-obra de 80 trabalhadores. Ao final do período, em junho, deve-se ter 500 unidades em inventário. Cada trabalhador trabalha no máximo dez horas por dia (sendo oito horas regulares e duas de tempo extra), são 20 dias de trabalho a cada mês, cada unidade leva quatro horas para ser confeccionada por trabalhador. A capacidade de produção é definida pelas horas totais de trabalho e a capacidade do maquinário é considerada suficiente. Cada unidade deve ser

vendida por \$40.

Apresentados os dados do problema, Chopra e Meindl (2001) partem para uma análise preliminar. A Figura 5 representa o balanço material desenvolvido para um período de tempo t .

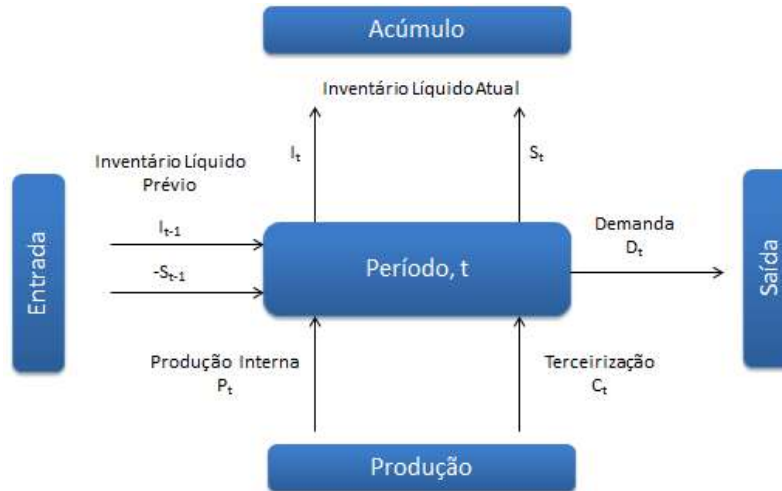


Figura 5 – Balanço Material no Período t . Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

A quantidade de material acumulada no Inventário ou *backlog* em t (I_t ou S_t) resulta da quantidade proveniente do Inventário Líquido Prévio ($I_{t-1} - S_{t-1}$), somado à produção no período t (P_t) e eventuais subcontratações/terceirizações (C_t) menos a demanda (D_t). Chega-se à Equação 6.

$$I_{t-1} - S_{t-1} + P_t + C_t = D_t + I_t - S_t$$

(Equação 6)

Considerando que ao final de um período t , haverá um inventário ou uma falta de inventário (caso seja possível um atraso no suprimento da demanda), as unidades devidas podem ser consideradas um inventário negativo (*backlog*). Da mesma maneira, a quantidade de unidades subcontratadas pode ser considerada parte de uma produção total, como demonstrado na Equação 7.

$$Inventário Anterior + Produção Total = Demanda Total + Inventário Atual$$

(Equação 7)

O objetivo do problema é maximizar o lucro total no horizonte de planejamento, o qual é função da receita e dos custos: de material, de mão-de-obra (pagamentos regulares e extras, contratação e demissão), de terceirização e de inventário. Sendo assim, a equação do lucro pode ser dada pela Equação 8.

$$Lucro = \sum C_D D_t - \sum C_P P_t - \sum C_O O_t - \sum C_C C_t - \sum C_I I_t - \sum C_S S_t - \sum C_W W_t - \sum C_H H_t - \sum C_L L_t$$

(Equação 8)

Onde os custos são indicados na Tabela 3 e H_t e L_t são as quantidades de trabalhadores contratados e demitidos, respectivamente, e O_t representa o número de horas extras feita pelos trabalhadores no período.

Substituindo-se os valores da Equação 8, temos:

$$Lucro = \sum 40D_t - \sum 10P_t - \sum 6O_t - \sum 30C_t - \sum 2I_t - \sum 5S_t - \sum 640W_t - \sum 300H_t - \sum 500L_t$$

(Equação 9)

C_D é o preço de venda do produto (\$40). C_W corresponde ao salário regular pago ao trabalhador por mês, ou seja, \$640 (\$4/hora x 8 horas/dia x 20 dias/mês). Cada operador trabalha, ao todo, 160 horas/mês e leva, em média 4 horas para confeccionar uma peça, então seriam construídas por volta de 40 peças/funcionário/mês.

Uma unidade subcontratada tem o custo de \$30, o qual apresenta um custo benefício maior do que usar o trabalho da mão-de-obra em períodos extra-regulares: \$6/hora x 4 horas/unidade + \$10/material = \$34/unidade. O_t deve ser zero. O custo de variar a quantidade de mão-de-obra é muito expressivo, então a estratégia utilizada será de manter a taxa de produção constante.

A partir desse ponto, a análise de Chopra e Meindl (2001) não cabe mais no escopo desse trabalho. Os autores utilizam alguns métodos de programação matemática para encontrar possíveis respostas para esse problema.

Como a ideia original proposta por esse trabalho é a aplicação das técnicas de Integração de Processos em problemas desse tipo, há a necessidade de apresentar os trabalhos desenvolvidos por Singhvi e Shenoy (2002) e Foo *et al.* (2008) que foram as primeiras abordagens de IP no segmento de Cadeia de Suprimentos. Dessa forma, além de serem inspirações para o Diagrama de Fontes, contribuem com inúmeras considerações essenciais à execução do método.

III.3 Método Gráfico de Singhvi e Shenoy (2002)

Singhvi e Shenoy (2002) foram os pioneiros na proposta de extensão dos métodos de estabelecimento de metas a partir da tecnologia Pinch para a aplicação do Planejamento agregado em na Cadeia de Suprimentos. O objetivo do Planejamento agregado na aplicação em Cadeia de Suprimentos é satisfazer a demanda em um horizonte de tempo especificado de maneira a maximizar o lucro. Sabendo disso, os autores procuram atingir uma taxa de produção mínima para determinada demanda projetada utilizando o método gráfico da Curva Composta (tempo x quantidade de material). Uma Curva Composta Líquida é utilizada para mostrar como o inventário varia durante o tempo. O ponto de *pinch* corresponde ao ponto de inventário zero e mínimo *lead time*.

A tecnologia *Pinch* reconhece a necessidade de definir metas, ou seja, prever a performance ótima de um processo baseado em princípios fundamentais. O estabelecimento de metas, ou estabelecimento de metas, é muito importante na fase conceitual do projeto para uma

avaliação mais objetiva de desempenho da utilização de recursos em processos integrados.

Duas ferramentas gráficas utilizadas com esse propósito são a Curva Composta e a Curva Composta Líquida (CCL). A Curva Composta ilustra a quantidade e o nível de carga disponível e necessária para um recurso. A CCL ilustra a distribuição de excessos e déficits de carga.

A técnica de Planejamento agregado estabelece parâmetros aos quais a produção e as decisões de distribuição de inventário devem obedecer. A demanda deve ser projetada e a produção deve ser planejada antecipadamente para o suprimento de tal demanda. Através do Planejamento agregado determina-se o nível total de produção de uma planta em um período estimado de tempo. Nesse trabalho o Planejamento agregado foi previsto pelo balanço total de fontes e sumidouros feitos através de Curvas Compostas.

Singhvi e Shenoy (2002) partiram de toda a análise básica (já demonstrada) do problema de Chopra e Meindl (2001) e utilizaram o método *pinch* gráfico para a sua resolução.

A análise de Planejamento agregado pode ser feita por duas abordagens: com e sem a permissão de inventário negativo/*backlog* durante o período. O desenvolvimento de ambas foi feito pelos autores.

III.3.1 Análise sem Backlog

É interessante relembrar o enunciado e os dados do problema nas Tabelas 2 e 3. Assim como no exemplo de Chopra e Meindl (2001), os inventários inicial e final são 1000 unidades e 500 unidades, respectivamente. Reorganizando a Equação 7, descobre-se o total de produção necessário no período analisado:

$$\textit{Produção Total} = \textit{Demanda Total} + \textit{Inventário Final} - \textit{Inventário Inicial}$$

$$\text{Produção Total} = 16000 + 500 - 1000 = \mathbf{15500 \text{ unidades}}$$

A Curva Composta é organizada utilizando-se os valores de demanda acumulada em cada mês (eixo x) e seu respectivo mês de referência (eixo y). Essa curva comporta-se como um limitante para a curva de produção, pois estabelece uma fronteira para um nível de produção sem que haja inventário negativo. A Figura 6 ilustra a construção do gráfico.

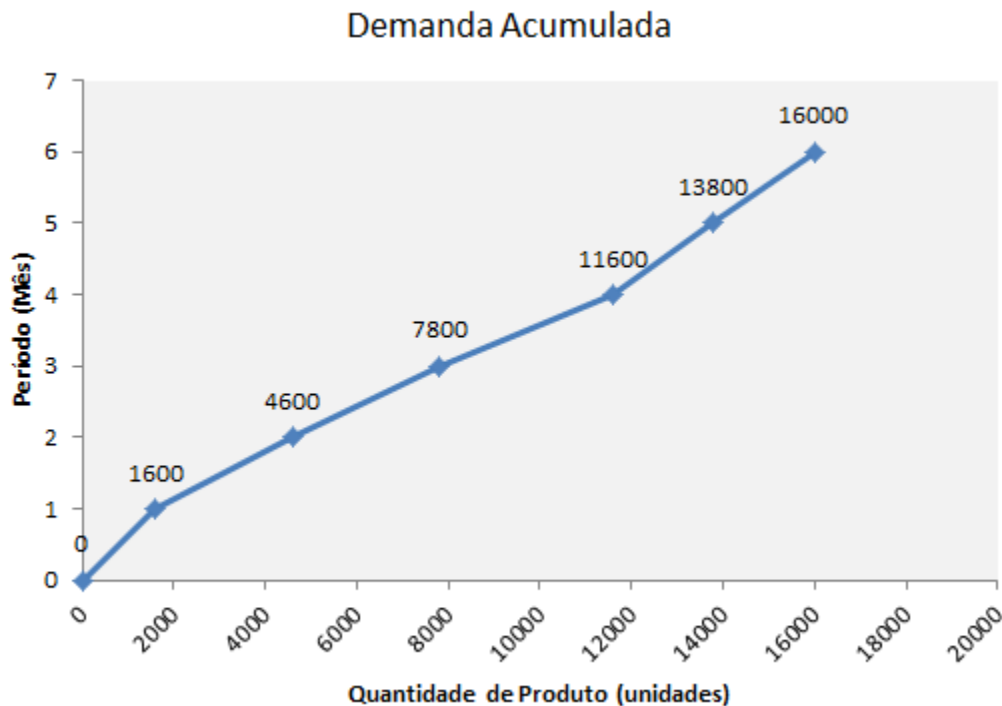


Figura 6 – Gráfico de Demanda Acumulada x Mês. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

No mesmo gráfico, a curva de produção deve ser inserida, iniciando-se no tempo 0 com inventário de 1000 unidades. Em uma análise em que o *backlog* não é permitido, para encontrar a mínima taxa de produção mensal possível, deve-se aumentar o ângulo da curva de produção (partindo de zero) até ela encostar a curva de demanda acumulada, como mostra a Figura 7.

Demanda Acumulada e Curva de Produção

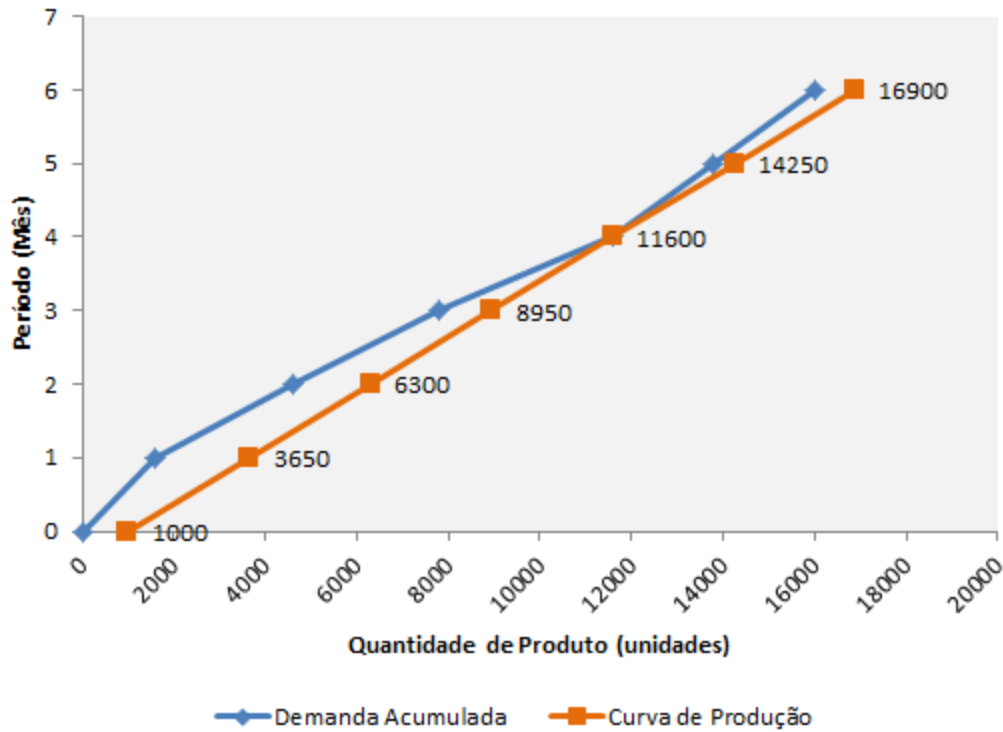


Figura 7 – Curva de Produção Inicial adicionada ao gráfico de Demanda Acumulada. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

O comportamento dessa curva determina a taxa de produção mínima. Isto ocorre no mês 4, em que a demanda acumulada é de 11600 unidades. A taxa de produção é calculada diminuindo-se o inventário inicial (I_0) da demanda acumulada ($\sum D_t$) e dividindo-se pelo número de períodos (t), como na Equação 10.

$$\frac{\sum D_t - I_0}{t} = \frac{(11600 - 1000)}{4} = \mathbf{2650 \text{ unidades/mês}}$$

(Equação 10)

É obtido um resultado de 2650 unidades por mês, nos primeiros quatro meses do período. Caso essa taxa de produção fosse mantida no decorrer do período, o inventário final seria de 900 unidades (Figura 7). Para evitar a produção desnecessária dessas unidades, a taxa de produção deve ser novamente modificada.

Procede-se alterando o ângulo da curva produção após o mês 4 até que ela atinja o valor de 16500 unidades, as quais são referentes à soma Demanda Total + Inventário Final, conforme observado na Figura 8. A taxa de produção é calculada de maneira similar à anterior e encontra-se um total de 2450 unidades/mês nos últimos dois meses do período. O *pinch* é o ponto em que as curvas de demanda acumulada e produção se encontram e o Inventário é zero.

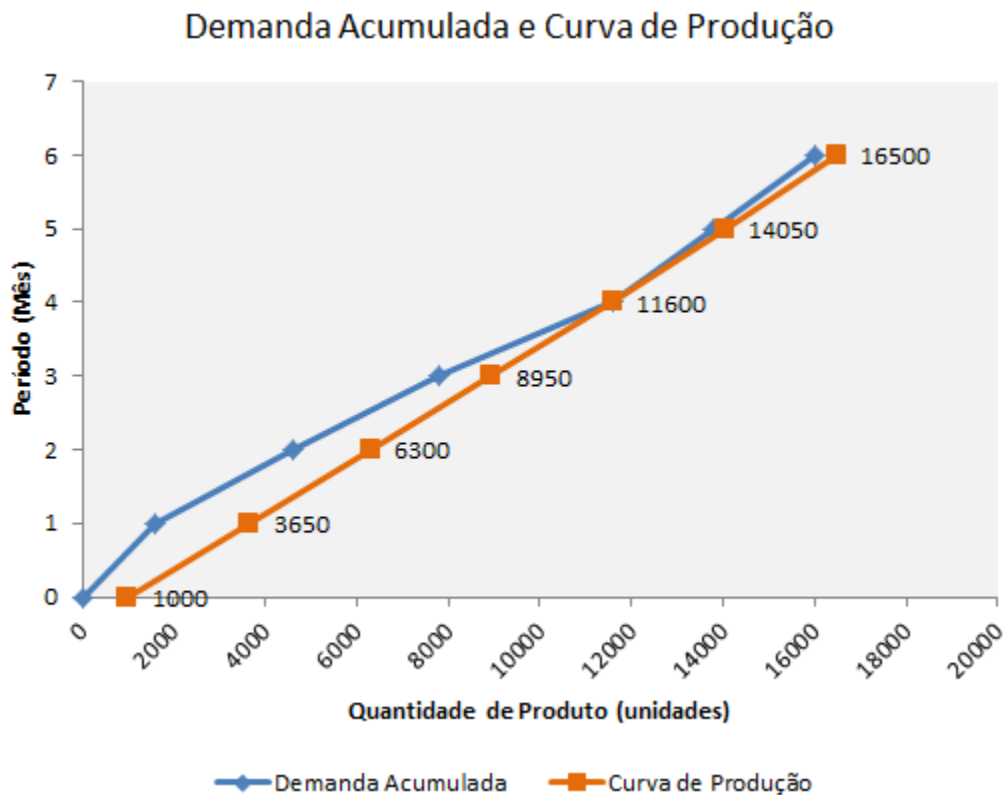


Figura 8 – Curva de Produção Final. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

A Figura 9 mostra a Curva Composta Líquida que é dada pelo Inventário resultante de cada mês do período.

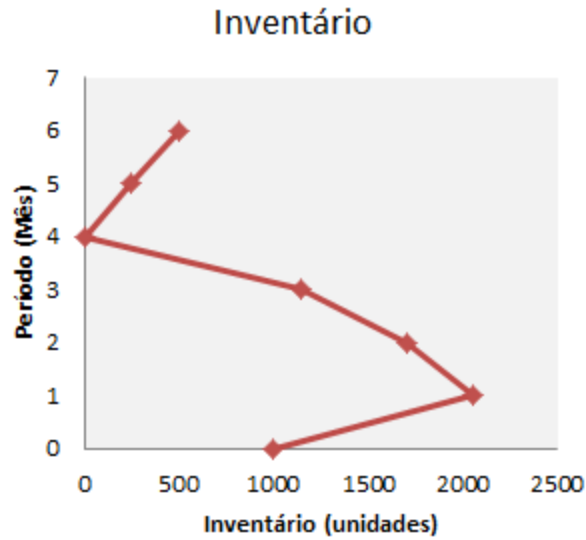


Figura 9 – Inventário Mensal ao longo do período. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

Os autores fizeram a análise financeira do problema baseados na Equação 9. A Tabela 4 especifica os valores de demanda acumulada, produção e terceirização mensais, inventário acumulado, além da quantidade de trabalhadores necessários para a produção.

Tabela 4 – Análise Financeira do problema.

Período	Demanda Acumulada	Produção Interna	Terceirização	Inventário	Stockout	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	0	1000	0	80	0	0
1	1600	2650	0	2050	0	66.25	0	13.75
2	4600	2650	0	1700	0	66.25	0	0
3	7800	2650	0	1150	0	66.25	0	0
4	11600	2650	0	0	0	66.25	0	0
5	13800	2450	0	250	0	61.25	0	5
6	16000	2450	0	500	0	61.25	0	0
Valor	\$ 640,000.00	\$ 155,000.00	\$ -	\$ 11,300.00	\$ -	\$ 248,000.00	\$ -	\$ 9,375.00

O Lucro é dado por:

$$\begin{aligned}
 \text{Lucro} &= \$ 640,000.00 - \$ 155,000.00 - \$ 11,300.00 - \$ 248,000.00 - \$ 9,375.00 \\
 &= \$ 216,325.00
 \end{aligned}$$

III.3.2 Análise com Backlog

Uma análise que permite *backlog* deve ser feita da mesma maneira: posicionar a curva de produção em 1000 unidades no tempo 0 e, em seguida, aumentar o seu ângulo com o eixo x (Figura 10). Porém, a curva de demanda não se torna um limitante para o aumento desse ângulo, ou seja, a curva de produção pode ultrapassar o limite da curva de demanda. Isso é permitido, porque usa-se como referência somente a quantidade total de unidades dada pela soma Demanda Total + Inventário Final (nesse caso: 16500 unidades).

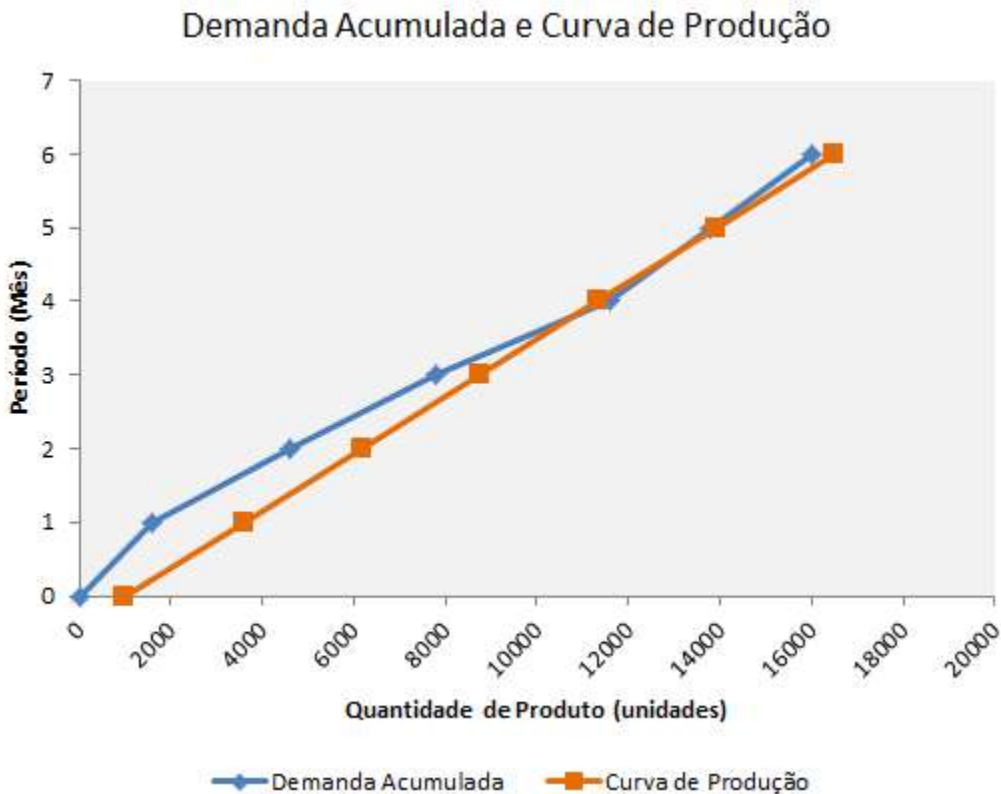


Figura 10 – Curva de Produção admitindo *backlog*. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

Dessa maneira a taxa de produção da planta industrial é mantida constante ao longo de todo período. Em um dado momento a produção mensal e o inventário disponível não serão capazes de suprir a demanda mensal, gerando um *backlog* e comprometendo parte da produção

dos meses posteriores.

Para o caso descrito, a taxa de produção mensal é dada pela Equação 10:

$$\frac{\sum D_t - I_0}{t} = \frac{(11600 - 1000)}{6} = 2583,33 \text{ unidades/mês}$$

Os espaços entre as curvas de composição de demanda e composição de produto correspondem ao *lead time*. É o espaço de tempo entre demanda e oferta de produtos, o tempo entre a produção de um produto e sua entrega ao consumidor. O *lead time* é o dirigente para a produção, o qual tem papel análogo ao da diferença de temperatura na rede de sistemas de troca térmica. No ponto de *pinch* o *lead time* apresenta valor mínimo, que só pode ser menor que zero quando *backlogs* (unidades entregues com atraso ao consumidor) são permitidos.

Novamente o mês 4 representa o ponto de *pinch* do problema, é o mês de menor inventário (no caso, *backlog*) e menor *lead time*. O gráfico da Curva Composta Líquida (Figura 11) e a Tabela 5, de gastos e lucro, estão representados a seguir.

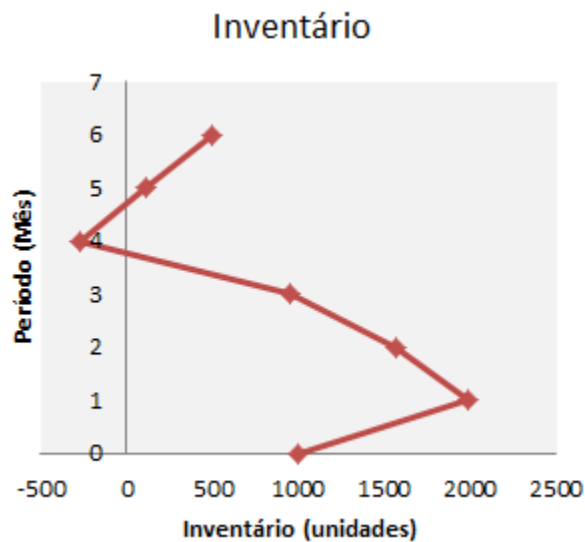


Figura 11 – Inventário Mensal ao longo do período admitindo *backlog*. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

Tabela 5 – Análise Financeira do problema admitindo *backlog*.

Período	Demanda Acumulada	Produção Interna	Terceirização	Inventário	Stockout	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	0	1000.0	0	80	0	0
1	1600	2583.33	0	1983.3	0	64.58	0	15.42
2	4600	2583.33	0	1566.7	0	64.58	0	0
3	7800	2583.33	0	950.0	0	64.58	0	0
4	11600	2583.33	0	0.0	266.67	64.58	0	0
5	13800	2583.33	0	116.7	0	64.58	0	0
6	16000	2583.33	0	500.0	0	64.58	0	0
Valor	\$ 640,000.00	\$ 154,999.80	\$ -	\$ 10,233.26	\$ 1,333.35	\$ 247,987.20	\$ -	\$ 7,710.00

Lucro = \$ 217,725

Nas tabelas 4 e 5, o número de trabalhadores foi de 66,25 e 61,25 e 64,58 respectivamente. Esses números devem ser arredondados para os menores ou maiores números inteiros próximos a eles.

Utilizando como exemplo os dados da Tabela 5, arredondando-se a quantidade (64,58) para o maior inteiro próximo, os 65 trabalhadores produziram 15600 unidades ao longo do período(40 unidades/trabalhador/mês). Seriam 100 unidades acima do previsto. É possível reduzir 120 unidades totais, ou seja, a produção relativa a um trabalhador durante três meses. Assim, haveria um déficit de 20 unidades, o qual poderia ser suprido através da subcontratação. De forma a evitar custos com inventário, essa subcontratação deve ser feita no mês 4, em que a demanda não consegue ser suprida com a produção e inventário. O planejamento após a modificação está descrito na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise Financeira aperfeiçoada.

Período	Demanda Acumulada	Produção Interna	Terceirização	Inventário	Stockout	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	0	1000.0	0	80	0	0
1	1600	2600	0	2000.0	0	65	0	15
2	4600	2600	0	1600.0	0	65	0	0
3	7800	2600	0	1000.0	0	65	0	0
4	11600	2560	20	0.0	220	64	0	1
5	13800	2560	0	140.0	0	64	0	0
6	16000	2560	0	500.0	0	64	0	0
Valor	\$ 640,000.00	\$ 154,800.00	\$ 600.00	\$ 10,480.00	\$ 1,100.00	\$ 247,680.00	\$ -	\$ 8,000.00

Lucro = \$217,340

Por outro lado, o número de trabalhadores poderia ter sido arredondado para 64. Ao longo do período teriam sido produzidas 15360 unidades, 140 a menos do que o necessário, as quais deveriam ser subcontratadas para suprir a demanda. Essa possibilidade é retratada na Tabela 7.

Tabela 7 – Novo exemplo de Analise Financeira aperfeiçoada.

Período	Demanda Acumulada	Produção Interna	Terceirização	Inventário	Stockout	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	0	1000.0	0	80	0	0
1	1600	2560	0	1960.0	0	64	0	16
2	4600	2560	0	1520.0	0	64	0	0
3	7800	2560	0	880.0	0	64	0	0
4	11600	2560	140	0.0	220	64	0	0
5	13800	2560	0	140.0	0	64	0	0
6	16000	2560	0	500.0	0	64	0	0
Valor	\$ 640,000.00	\$ 153,600.00	\$ 4,200.00	\$ 10,000.00	\$ 1,100.00	\$ 245,760.00	\$ -	\$ 8,000.00

Lucro = \$217,340

Os dois planejamentos possuem margens de lucro idênticas, mas se por um lado o planejamento da Tabela 7 depende mais de unidades subcontratadas, o da Tabela 6 depende de mais unidades produzidas pela planta. À vista disso, este último planejamento proporciona uma margem de segurança relativa à capacidade de produção, a qual deve ser utilizada se a demanda for maior do que a projetada. Além disso, torna possível a manutenção da força de trabalho em caso de aumento de demanda nos meses finais.

A estratégia utilizada por Singhvi e Shenoy (2002) é chamada de Estratégia de Nível (*Level Strategy*) e utiliza o inventário como um ponto de apoio ao suprimento da demanda. Através dessa estratégia, pode-se manter uma taxa de produção constante, nível de mão-de-obra e capacidade de maquinário estáveis. Em contrapartida, o inventário flutua durante o período.

Outra estratégia que poderia ser utilizada seria a chamada de Estratégia de Busca (*Chase Strategy*), a qual permite que a taxa de produção flutue ao longo do período, enquanto o inventário se mantém constante. A taxa de produção estaria sincronizada com a demanda. A

sincronização seria possível alternando a capacidade de produção (maquinário) e variando a mão-de-obra.

A primeira estratégia deve ser utilizada quando os custos de manutenção de inventário são baixos em comparação com os gastos de contratação e demissão de mão-de-obra e de variação de capacidade produtiva. Quando o oposto ocorre, a Estratégia de Busca torna-se mais vantajosa. A Figura 12 ilustra essa estratégia.

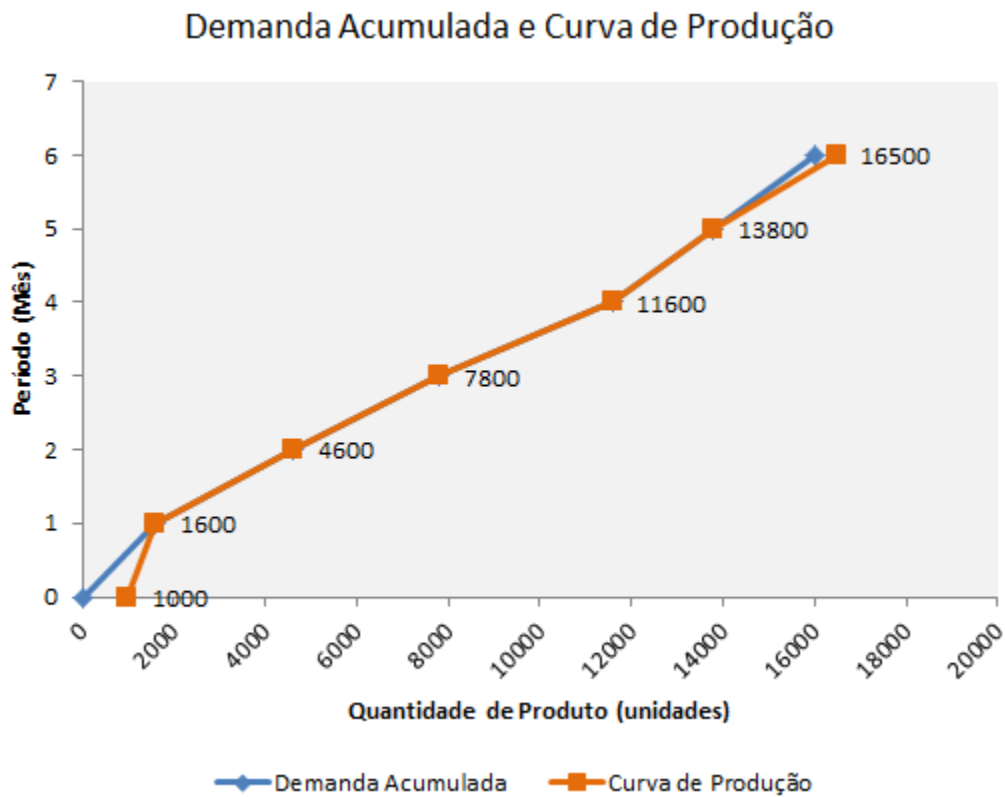


Figura 12 – Curva de Produção de acordo com a Estratégia de Busca. Adaptado de Singhvi e Shenoy (2002).

A tecnologia *Pinch* proposta se baseia na produção para alcançar uma demanda projetada. A partir dela, são determinados outros fatores importantes na solução do problema, tais como inventário, mão-de-obra e lucro.

Os autores constroem a Curva de Produção Composta de produção de maneira a atingir o menor valor possível para a taxa de produção e o inventário mensal, sujeitos a diversos limitantes, tendo em consideração os valores de custo e receita.

Apesar do resultado proposto não ser comprovadamente o de menor custo, ele representa uma meta otimizada que pode ser usada como ponto inicial para uma análise mais rigorosa. Essa aproximação gera percepções importantes e tem o potencial de se tornar uma poderosa ferramenta na geração de planejamentos e análises econômicas de problemas ligados a Cadeia de Suprimentos.

III.4 Análise Cascata de Foo et al.(2008)

No artigo de Foo *et al.* (2008), a Análise em Cascata é utilizada para a gerar uma proposta de Planejamento agregado na área de Cadeia de Suprimentos. Essa metodologia tem a intenção de complementar as ferramentas gráficas apresentadas por Singhvi e Shenoy (2002) com o mesmo problema. Os autores, inclusive, estenderam sua magnitude adicionando variáveis como inventário mínimo e máximo e a programação de *shutdown* de plantas.

A limitação mínima do inventário é fundamental para assegurar unidades emergenciais de demandas imprevistas, enquanto sua limitação máxima inclui situações em que há limite de capacidade de estocagem.

A Análise Cascata aplicada em Cadeia de Suprimentos pode ser representada pela Figura 13 a seguir (adaptação da Figura 8 para essa análise). As unidades acumuladas no intervalo anterior (inventário líquido, ΔI_{t-1}) juntamente com a produção atual (produzida de fato ou

subcontratada, P_t) supre a demanda do consumidor (D_t). A quantidade que sobrar ou faltar constitui o inventário líquido atual (ΔI_t), o qual fica disponível para o próximo intervalo ($t + 1$).

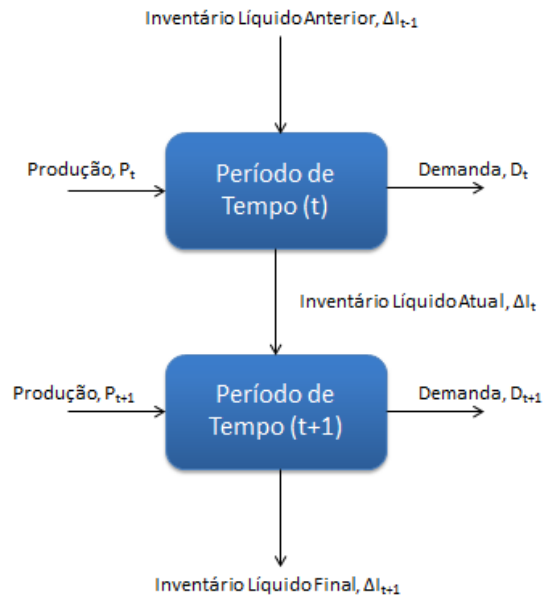


Figura 13 – Representação Esquemática da Análise Cascata. Adaptado de Foo *et al.* (2008).

A Equação 11 utilizada para o período t é uma versão abreviada da Equação 6 de Chopra e Meindl (2001).

$$\Delta I_{t-1} + P_t = D_t + \Delta I_t$$

(Equação 11)

Novamente utilizam-se os dados da Tabela 3 de Chopra e Meindl (2001). Contudo os valores de demanda projetada são os da Tabela 8.

Tabela 8 – Demandas do Problema. Fonte: Foo *et al.* (2008).

Período t	Mês	Demanda Projetada D_t
1	Janeiro	1600
2	Fevereiro	3000
3	Março	3200
4	Abril	5060
5	Maio	1760
6	Junho	1760

Os autores chegaram à solução de que um Planejamento agregado sem *backlog* e com inventários inicial e final de 1000 e 500 unidades respectivamente deve ter produção mínima de 2965 unidades/mês de janeiro a abril e 2010 unidades/mês em maio e junho. A Análise Cascata é apresentada a seguir.

O processo de análise é feito a partir do preenchimento da Tabela 9. Primeiro são colocados os intervalos de tempo e suas respectivas demandas projetadas. É interessante notar que o inventário inicial é alocado no intervalo 0. A produção relativa a cada intervalo, até o momento, não é conhecida. Dessa forma, os valores preenchidos são iguais a zero.

Tabela 9 – Análise Cascata com Déficit.

Período (mês)	Demanda (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Meta de Produção (unidades)
0	0	0	0	1000	0
1	1600	0	-1600	-600	-600
2	3000	0	-3000	-3600	-1800
3	3200	0	-3200	-6800	-2267
4	5060	0	-5060	-11860	-2965
5	1760	0	-1760	-13620	-2724
6	1760	0	-1760	-15380	-2563

A quarta coluna refere-se ao saldo entre a quantidade produzida e demandada em um mês. Os saldos mensais devem ser negativos, antes de as taxas de produção serem calculadas.

A seguir, deve-se obter os valores de inventário acumulado. Essas quantidades são a soma do inventário inicial e de todos os saldos mensais até o mês de referência. Esse método de somar o déficit/superávit mensal ao inventário acumulado anterior é o que define a Análise Cascata. O processo deve ser aplicado ao longo de todo o período. Esta é a representação numérica da Figura 13.

Como os valores de produção atuais são nulos, eles não serão suficientes para suprir a demanda mensal, gerando saldos e inventários mensais negativos. A fim de eliminar os números

deficitários, uma produção mensal mínima (que ao menos mantenha um inventário zero) deve ser identificado. A última coluna ilustra esse parâmetro: a “*Produção Alvo*” é obtida através da Equação 12, dividindo o inventário acumulado pelo número de intervalos até aquele mês.

$$Produção\ Alvo = \frac{\Delta I_t}{t}$$

(Equação 12)

Então, identifica-se o maior valor negativo entre as produções alvo do período. Esse valor deve ser considerado como a taxa de produção mensal mínima da fábrica. No exemplo, o mês de abril tem uma produção de 2965 unidades, necessária para suprir um déficit de inventário de 11860 unidades. A Tabela 10 ilustra a Análise Cascata realizada para o problema.

Tabela 10 – Análise Cascata com Déficit zerado.

Período (mês)	Demanda (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)
0	0	0	0	1000
1	1600	2965	1365	2365
2	3000	2965	-35	2330
3	3200	2965	-235	2095
4	5060	2965	-2095	0
5	1760	2965	1205	1205
6	1760	2965	1205	2410

O Inventário Líquido igual a zero no mês de 4 indica que o ponto de *pinch* está localizado nesse mês. Esse período é o mais restrito no tempo analisado; ao final desse mês o inventário de unidades fica vazio.

Os meses de maio e junho registram um inventário de 1205 unidades, gerando um inventário final acumulado de 2410 unidades, valor muito superior às 500 unidades limitadas pelo planejamento inicial. Em consequência, a taxa de produção relativa aos dois últimos meses do período deve ser revista.

São produzidas 1910 unidades extras (2410 – 500) nos dois meses, sendo, então 955 unidades extras mensais. Esse último valor deve ser subtraído da taxa de produção de 2965 unidades, reduzindo-o para uma quantidade de 2010 unidades/mês em maio e junho. Sendo assim, o inventário final exigido de 500 unidades foi respeitado e o Planejamento agregado final está na Tabela 11.

Tabela 11 – Planejamento agregado Final pela Análise Cascata.

Período (mês)	Demanda (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)
0	0	0	0	1000
1	1600	2965	1365	2365
2	3000	2965	-35	2330
3	3200	2965	-235	2095
4	5060	2965	-2095	0
5	1760	2010	250	250
6	1760	2010	250	500

Foo *et al.* (2008) chegaram a um resultado idêntico ao que Singhvi, Madhavan e Shenoy (2004) obtiveram quando abordaram o mesmo problema através do método gráfico.

III.4.1 Inventário Mínimo e Máximo

O valor de inventário acumulado em abril é igual a zero, indicando que o *pinch* está localizado nesse mês. Isso significa que ao final de abril não existe nenhuma unidade disponível em estoque para a venda. Essa situação é arriscada e muitas indústrias optam por estabelecer que uma quantidade mínima sempre esteja disponível para eventuais emergências. Assim, os autores decidiram introduzir o conceito de mínimo inventário no problema.

Para o mesmo exemplo anterior, os autores decidiram adicionar o limitante de inventário mínimo igual a 200 unidades. A forma de obedecer a essa restrição é adicionar o valor à

demanda de janeiro, como se fosse uma demanda fictícia. Os passos seguintes são os mesmos utilizados anteriormente no passo-a-passo da Análise Cascata e os resultados podem ser vistos na Tabela 12. O inventário atual referente a cada mês é resultado da soma do inventário acumulado com o inventário mínimo exigido.

Tabela 12 – Análise Cascata com Inventário Mínimo de 200 unidades.

Período (mês)	Demanda (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)
0	0	0	0	1000	0
1	1800	3015	1215	2215	2415
2	3000	3015	15	2230	2430
3	3200	3015	-185	2045	2245
4	5060	3015	-2045	0	200
5	1760	1910	150	150	350
6	1760	1910	150	300	500

A limitação de um inventário máximo também foi avaliada pelos autores. Isso se deve às limitações de estocagem que são comuns em qualquer caso real de produção. Essas podem ocorrer devido ao espaço físico, ao custo de manutenção do estoque, às políticas da empresa, entre outros.

Estimando um inventário máximo de 2000 unidades, nota-se que para os números da Tabela 12, essa capacidade foi excedida durante os meses de janeiro a março. Uma das opções para lidar com essa situação é diminuir a taxa de produção nos meses que extrapolam a capacidade de estocagem e aumentar a produção nos meses cuja capacidade fica abaixo do máximo. A resolução sugerida pelos autores foi reduzir a taxa de produção nos meses de janeiro e fevereiro e aumentá-la em março e abril. O resultado pode ser visto na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise Cascata com Inventários Mínimo de 200 e Máximo de 2000 unidades.

Período (mês)	Demanda (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)
0	0	0	0	1000	0
1	1800	2600	800	1800	2000
2	3000	3000	0	1800	2000
3	3200	3200	0	1800	2000
4	5060	3260	-1800	0	200
5	1760	1910	150	150	350
6	1760	1910	150	300	500

Foo *et al.* (2008) ainda utilizam a Análise Cascata em dois exemplos de casos industriais. Um deles será ilustrado a seguir e posteriormente será debatido com a utilização do Diagrama de Fontes.

III.4.2 Produção de PVC

O exemplo industrial sobre a produção de plástico PVC é resolvido por Foo *et al.* (2008) para a ilustração da Análise Cascata em um problema real.

A demanda projetada para um ano de produção de PVC e os custos e receita da produção estão apresentados nas tabelas 14 e 15. Os custos com demissões e contratações foram convertidos em base de unidades de produto. O lucro da planta pode ser definido através da aplicação da Equação 13. (Adaptado de Foo *et al.* (2008))

$$Lucro = \sum C_D D_t - \sum C_P P_t - \sum C_I I_t - \sum C_W W_t$$

(Equação 13)

Tabela 14 – Demanda Projetada de PVC.

Período (t)	Mês	Demanda de PVC (unidades)
1	Janeiro	3000
2	Fevereiro	4000
3	Março	5000
4	Abril	5500
5	Maio	5000
6	Junho	5000
7	Julho	2000
8	Agosto	3000
9	Setembro	4500
10	Outubro	4000
11	Novembro	5000
12	Dezembro	3000

Tabela 15 – Custos do Problema.

Item	Custo
Preço de Venda	\$20/unidade
Custo de Produção	\$4/unidade
Custo de Inventário	\$2/unidade
Contratação / Demissão	\$5/unidade

O inventário inicial é de 5000 peças e o inventário mínimo requerido é de 750 peças; o inventário máximo não é limitado. O objetivo do problema é determinar o inventário final, mantendo o inventário e a produção com os mínimos valores possíveis, e determinar o melhor mês para fazer o *shutdown* completo da planta.

O inventário mínimo é tratado como uma demanda fictícia adicionada à demanda de janeiro. Aplica-se a Análise Cascata, como mostrada na Tabela 16, dividindo-se o Inventário Líquido de cada mês pelo período de tempo.

Tabela 16 – Análise Cascata para a Produção de PVC.

Período (t)	Mês	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Saldo Mensal (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Meta de Produção (unidades)
0	Dezembro	0	0	0	5000	0
1	Janeiro	3750	0	-3750	1250	1250
2	Fevereiro	4000	0	-4000	-2750	-1375
3	Março	5000	0	-5000	-7750	-2583
4	Abril	5500	0	-5500	-13250	-3313
5	Maio	5000	0	-5000	-18250	-3650
6	Junho	5000	0	-5000	-23250	-3875
7	Julho	2000	0	-2000	-25250	-3607
8	Agosto	3000	0	-3000	-28250	-3531
9	Setembro	4500	0	-4500	-32750	-3639
10	Outubro	4000	0	-4000	-36750	-3675
11	Novembro	5000	0	-5000	-41750	-3795
12	Dezembro	3000	0	-3000	-44750	-3729

Os resultados obtidos, juntamente com a análise econômica, são mostrados na Tabela 17. A taxa de produção constante mensal mínima determinada foi de 3875 unidades e o ponto de *pinch* foi encontrado em junho. Como o inventário deve ser o menor possível, pode-se reduzir a produção após o *pinch*.

Tabela 17 – Análise Cascata e Econômica Concluída para a Produção de PVC.

Período (t)	Análise Cascata			Análise Econômica				
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	3875	5125	5875	\$ 75,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,750.00	\$ 19,375.00
2	4000	3875	5000	5750	\$ 80,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,500.00	\$ -
3	5000	3875	3875	4625	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 9,250.00	\$ -
4	5500	3875	2250	3000	\$ 110,000.00	\$ 15,500.00	\$ 6,000.00	\$ -
5	5000	3875	1125	1875	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 3,750.00	\$ -
6	5000	3875	0	750	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3700	1700	2450	\$ 40,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,900.00	\$ 875.00
8	3000	3700	2400	3150	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 6,300.00	\$ -
9	4500	3700	1600	2350	\$ 90,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,700.00	\$ -
10	4000	3700	1300	2050	\$ 80,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,100.00	\$ -
11	5000	3700	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,800.00	\$ 1,500.00	\$ -
12	3000	3700	700	1450	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 2,900.00	\$ -
Total					\$ 995,000.00	\$ 181,800.00	\$ 78,150.00	\$ 20,250.00

$$\text{Lucro} = \$995,000 - \$181,800 - \$78,150 - \$20,250 = \$714,800$$

Considerando que a companhia permita demissões somente uma vez ao ano, só seria possível reduzir a produção total também uma única vez. A magnitude da redução é calculada

identificando o excesso de produção em cada mês e dividindo-o pelo número de períodos considerados (somente após o *pinch*). Basicamente essa metodologia é a repetição do processo em Cascata e encontra-se um novo ponto de mínimo inventário em novembro. A produção mensal após junho é de 3700 unidades.

Outro objetivo do problema é determinar o mês ideal para um *shutdown* e para isso, inicialmente, duas alternativas são exploradas: planejar a parada completa em janeiro e no mês de ocorrência do primeiro *pinch*. O melhor resultado foi encontrado com o *shutdown* ocorrendo o mais breve possível e distante do *pinch*, pois gasta-se menos com o inventário. Caso a segunda alternativa fosse implementada, o inventário em fevereiro seria de 7300 peças. Ambas estão representadas das tabelas 18 e 19.

Tabela 18 – Análise Cascata e Econômica com *shutdown* em janeiro.

Período (t)	Análise Cascata				Análise Econômica			
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	0	1250	2000	\$ 75,000.00	\$ -	\$ 4,000.00	\$ -
2	4000	4650	1900	2650	\$ 80,000.00	\$ 18,600.00	\$ 5,300.00	\$ 23,250.00
3	5000	4650	1550	2300	\$ 100,000.00	\$ 18,600.00	\$ 4,600.00	\$ -
4	5500	4650	700	1450	\$ 110,000.00	\$ 18,600.00	\$ 2,900.00	\$ -
5	5000	4650	350	1100	\$ 100,000.00	\$ 18,600.00	\$ 2,200.00	\$ -
6	5000	4650	0	750	\$ 100,000.00	\$ 18,600.00	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3700	1700	2450	\$ 40,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,900.00	\$ 4,750.00
8	3000	3700	2400	3150	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 6,300.00	\$ -
9	4500	3700	1600	2350	\$ 90,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,700.00	\$ -
10	4000	3700	1300	2050	\$ 80,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,100.00	\$ -
11	5000	3700	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,800.00	\$ 1,500.00	\$ -
12	3000	3700	700	1450	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 2,900.00	\$ -
Total					\$ 995,000.00	\$ 181,800.00	\$ 54,900.00	\$ 28,000.00

$$Lucro = \$995,000 - \$181,800 - \$54,900 - \$28,000 = \$730,300$$

Tabela 19 – Análise Cascata e Econômica com *shutdown* em janeiro.

Período (t)	Análise Cascata				Análise Econômica			
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	4650	5900	6650	\$ 75,000.00	\$ 18,600.00	\$ 13,300.00	\$ 23,250.00
2	4000	4650	6550	7300	\$ 80,000.00	\$ 18,600.00	\$ 14,600.00	\$ -
3	5000	4650	6200	6950	\$ 100,000.00	\$ 18,600.00	\$ 13,900.00	\$ -
4	5500	4650	5350	6100	\$ 110,000.00	\$ 18,600.00	\$ 12,200.00	\$ -
5	5000	4650	5000	5750	\$ 100,000.00	\$ 18,600.00	\$ 11,500.00	\$ -
6	5000	0	0	750	\$ 100,000.00	\$ -	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3700	1700	2450	\$ 40,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,900.00	\$ 4,750.00
8	3000	3700	2400	3150	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 6,300.00	\$ -
9	4500	3700	1600	2350	\$ 90,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,700.00	\$ -
10	4000	3700	1300	2050	\$ 80,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,100.00	\$ -
11	5000	3700	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,800.00	\$ 1,500.00	\$ -
12	3000	3700	700	1450	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 2,900.00	\$ -
Total					\$ 995,000.00	\$ 181,800.00	\$ 101,400.00	\$ 28,000.00

$$\text{Lucro} = \$995,000 - \$181,800 - \$101,400 - \$28,000 = \$683,800$$

Por outro lado, o *shutdown* poderia ser programado para antes ou depois do segundo *pinch*. Os autores calcularam os custos relacionados a cada alternativa e as apresentaram em tabelas. Não cabe ilustrar todos os casos nesse trabalho (mais detalhes podem ser vistos em Foo *et al.* (2008)). Como resultado final, definiu-se o *shutdown* para janeiro, pois o lucro foi maior devido ao menor gasto com inventário.

O trabalho de Foo *et al.* (2008) representou uma grande contribuição na melhora do conceito de estabelecimento de metas em Cadeia de Suprimentos, inicialmente introduzido por Singhvi e Shenoy (2002). Nele foi apresentada a Análise Cascata baseada em cálculos algébricos para a construção de Planejamento agregado. Esse método é complementar às ferramentas gráficas apresentadas e facilita a localização e obtenção de metas rigorosas com melhor precisão. Além disso, novos limitantes foram introduzidos nos exemplos, tais como, mínimo e máximo inventário e programação de *shutdown*.

IV. Diagrama de Fontes em Cadeias de Suprimentos

IV.1 Introdução ao Método

Essa etapa do trabalho tem como objetivo propor uma adequação do Diagrama de Fontes ao problema de Planejamento agregado. A proposta aqui apresentada se baseia nos trabalhos de Singhvi e Shenoy (2002) e Foo *et al.* (2008), as mais importantes publicações sobre o tema.

De acordo com Singhvi e Shenoy (2002), o *lead time* é o dirigente para a produção em um problema de Planejamento agregado. Nessa função, ele tem papel análogo ao da diferença de temperatura na rede de sistemas de troca térmica. Ou seja, de certa forma, a demanda é o termômetro que rege os níveis produção.

Um termo muito usado por Gomes (2002) é o de força motriz. Nos processos de transferência de massa, a força motriz para que o processo ocorra é a diferença de concentração de contaminantes entre as correntes que se misturam.

No Planejamento agregado, a demanda projetada de um período possui função análoga à diferença de concentrações, $(C_{fi} - C_{ii})$, em uma Rede de Transferência de Massa. Enquanto houver demanda, D_t , a ser suprida, deverá haver produção e inventário para supri-la.

Em cada intervalo de concentração existe uma carga mássica disponível para ser transferida de uma operação “menos suja” para uma “mais suja”, o Δm disponível. Da mesma maneira, a soma da produção do período com o inventário residual $(P_t + I_{t-1})$ deve ser utilizada no suprimento da demanda.

Nos dois casos, a oferta de massa e produto pode não ser o suficiente para satisfazer à quantidade requerida. Assim, faz-se uso da utilização de água pura e da terceirização da

produção para suprir as necessidades do intervalo. Então, o Δm de uma operação “menos suja” tem função semelhante à da soma $P_t + I_{t-1}$ de um intervalo.

Outra similaridade entre os problemas é que, em uma RTM, existe uma vazão limite, f_k , para cada operação, enquanto no Planejamento agregado, a taxa de produção, P_t , que limita a capacidade de atingir uma demanda sem recorrer à terceirização. Já uso de uma fonte externa, f_{pki}^e , é semelhante ao uso da terceirização da produção, S_t .

Gomes (2002) relata que “o ponto de *pinch* (...) pode ser percebido quando o somatório das vazões em cada intervalo muda”. O *pinch* ocorre quando há mudança no somatório das vazões de um intervalo para o outro.

Para o DF aplicado em Cadeias de Suprimentos (DFCS), o *pinch* é o ponto em que inventário fica igual a zero e se caracteriza pela equivalência ou déficit de quantidade de oferta de produtos, $P_t + I_{t-1}$, em relação à sua demanda, D_t .

Essas considerações estão resumidas na Tabela 20.

Tabela 20 – Paralelos entre DFA e DFCS.

Paralelos	DFA	DFCS
Força motriz	$C_{fi} - C_{ii}$	D_t
Limitante	f_k	P_t
Recurso Interno	Δm de operações menos sujas	$P_t + I_{t-1}$
Recurso Externo	f_{pki}^e	S_t
<i>Pinch</i>	mudança na vazão total utilizada	inventário zerado

IV.2 Aplicação do Método

Da mesma maneira que o Diagrama de Fontes aplicado a uma RTM foi elucidado através da solução do exemplo de Wang e Smith (1994), sua abordagem no Planejamento agregado será feita pela ilustração do exemplo de Chopra e Meindl (2001). Os dados estão disponíveis nas tabelas 2 e 3.

O mecanismo é constituído por quatro passos, com sucessivas repetições do último. Segue a resolução do exemplo.

Passo 1

Para a construção do diagrama deve-se dispor os meses no topo do diagrama. Incluir os meses anterior e posterior ao período. Eles serão úteis na alocação dos inventários inicial e final.

Passo 2

Calcular a taxa de produção mensal ideal (p_t) pela Equação 14:

$$p_t = \frac{(D_t - I_0 + I_n)}{n}$$

(Equação 14)

D_t : Demanda Acumulada Total

I_0 : Inventário Inicial

I_n : Inventário Final

n : Número de Períodos

A quantidade p_t ficará à esquerda do diagrama.

Passo 3

Alocar demanda de cada mês (d_t) na parte de baixo do diagrama.

Para os valores de Chopra e Meindl (2002), temos:

$$p_t = \frac{(16000 - 1000 + 500)}{6} = 2584 \text{ unidades/mês}$$

A Figura 14 ilustra os passos 1, 2 e 3.

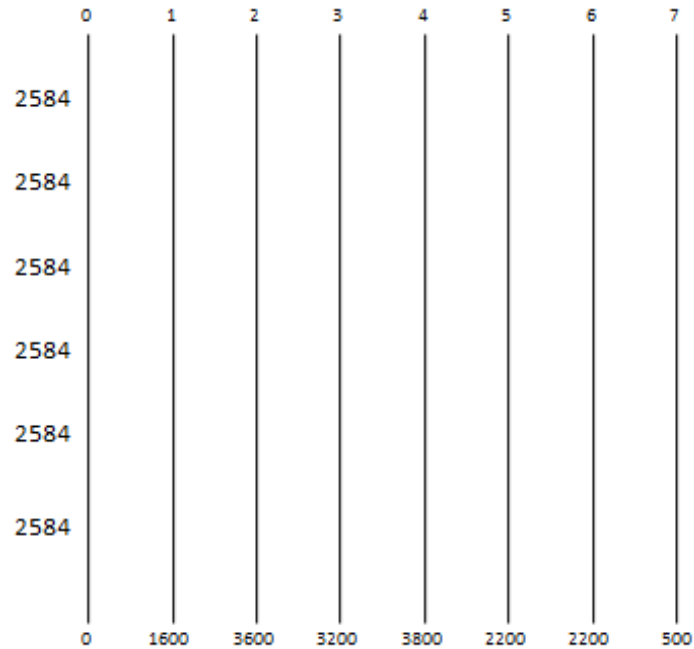


Figura 14 – Ilustração dos três primeiros passos.

Passo 4

Começar do primeiro intervalo:

- i. Inserir o valor do Inventário resultante do intervalo anterior (i_t). (A representação deverá ser uma linha tracejada)
- ii. Inserir a quantidade produzida p_t disponível para o intervalo t .
- iii. Seguir para o próximo intervalo, calculando o inventário resultante do mês anterior pela Equação 7 reorganizada:

$$p_{t-1} + i_{t-1} - d_{t-1} = i_t$$

(Equação 7).

- iv. i_t será representado no intervalo seguinte pela linha tracejada proveniente do intervalo $t - 1$

- v. Repetir o procedimento.
- vi. Possíveis terceirizações devem ser representadas por uma linha contínua do primeiro período até o período em que serão utilizadas.

A Figura 15 mostra o procedimento feito para os dois primeiros intervalos do diagrama.

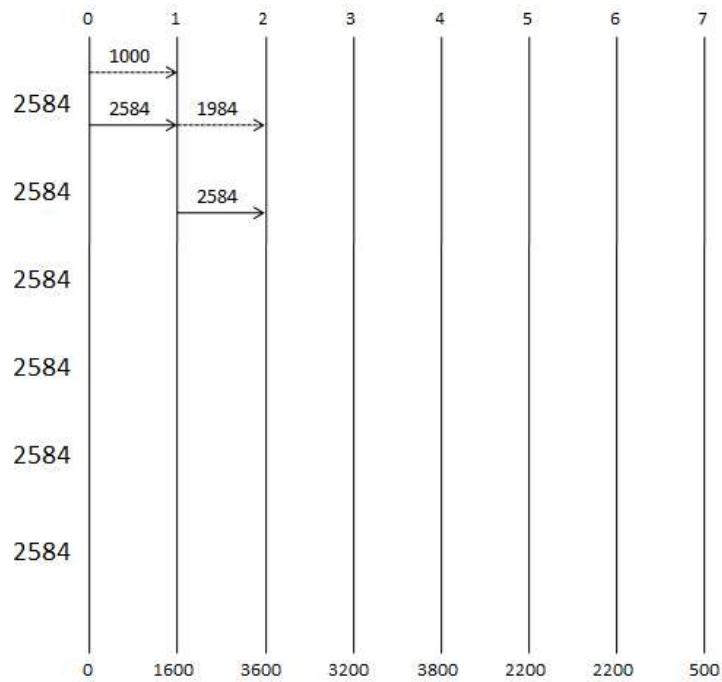


Figura 15 – Os dois primeiros intervalos preenchidos.

Deve-se repetir o mecanismo ao longo de todos os intervalos, o que é ilustrado na Figura

16.

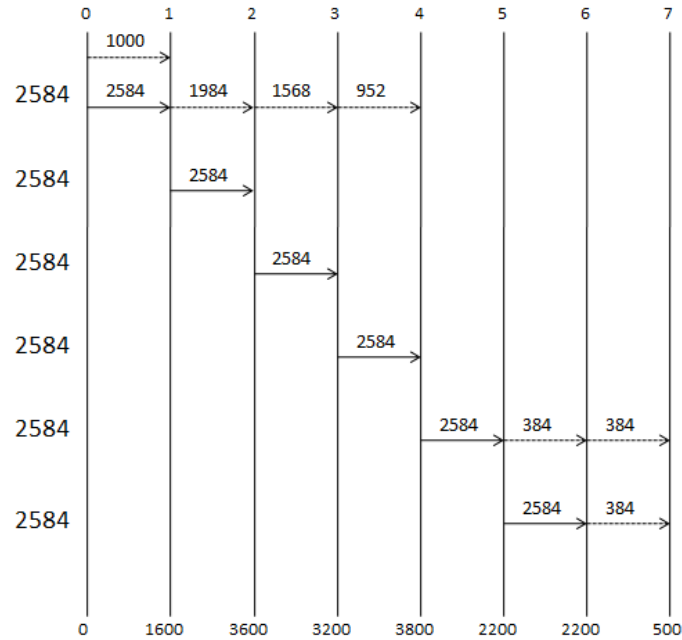


Figura 16 – O Diagrama completo.

Assim, o diagrama é construído. Contudo, notam-se duas lacunas no procedimento nos intervalos entre os meses 3 e 4 e entre os meses 6 e 7.

Em relação ao primeiro caso, a produção mensal e o inventário acumulado (2584 e 952 unidades, respectivamente) não somam as 3800 unidades demandadas no mês 4. Ao todo a produção e o inventário somam 3536 unidades, 264 a menos do que o necessário. Por outro lado, entre os meses 6 e 7, há um excesso de 268 unidades. O inventário final é de 768 unidades, enquanto a quantidade requerida no problema são 500.

No mês 4 ocorre o ponto de *pinch*, é o mês em que inventário zera. Nele, a produção e o inventário não são suficientes para atingir a demanda. Como não há o suprimento da demanda, deve-se reorganizar os níveis de produção o mínimo possível até as quantidades de oferta e demanda serem equivalentes.

De maneira geral, sempre existirão três opções para evitar a perda de oportunidade de venda no mês de *pinch* e o excesso unidades produzidas ao final do período. Todas devem ser

avaliadas e a que apresentar o melhor resultado financeiro no período analisado deve ser a escolhida.

A primeira opção é adicionar a quantidade de unidades deficitárias na produção de um único mês antes do *pinch* e reduzir as unidades sobressalentes da produção de um único mês após o *pinch*.

Outra opção é aumentar igualmente as unidades deficitárias entre os meses antes do *pinch* e reduzir igualmente as unidades excedentes nos meses após o *pinch*.

A terceira opção é compensar as unidades deficitárias através da terceirização de unidades no *pinch* e redução das unidades produzidas após o *pinch*.

Para o problema apresentado, é necessário ressaltar que a produção é proporcional ao número de trabalhadores e o custo mensal de um trabalhador (e contratação e demissão) é muito maior que o custo com inventário.

Utilizando a opção 1, a redução e o aumento da produção devem ocorrer nos meses extremos do período: 1 e 6. O maior gasto com mão-de-obra ocorrerá no mês que tiver a maior produção. Assim, nos meses seguintes, pode-se reduzir a mão-de-obra, ao invés de manter mão-de-obra ociosa que somente será usada em um período ou demitir, recontratar e novamente demitir um grupo de funcionários. Utilizando essa estratégia, o diagrama resultante está apresentado na Figura 17.

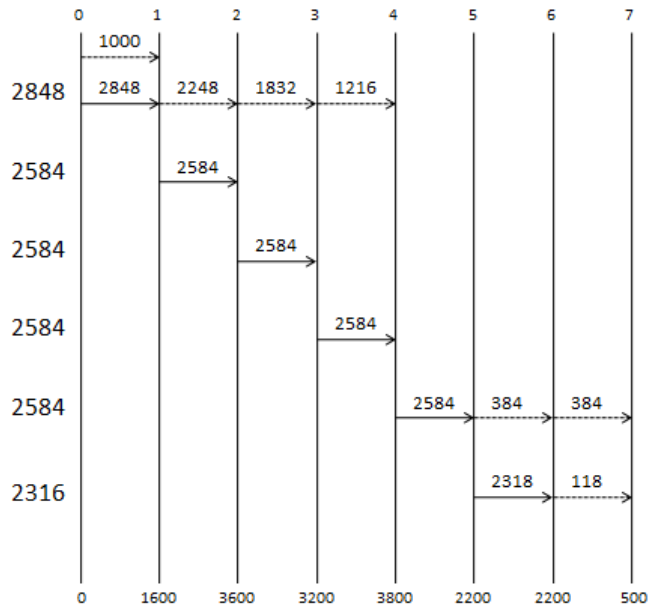


Figura 17 – Opção 1 do diagrama.

Fazendo uso da Opção 2 encontra-se o diagrama exposto na Figura 18.

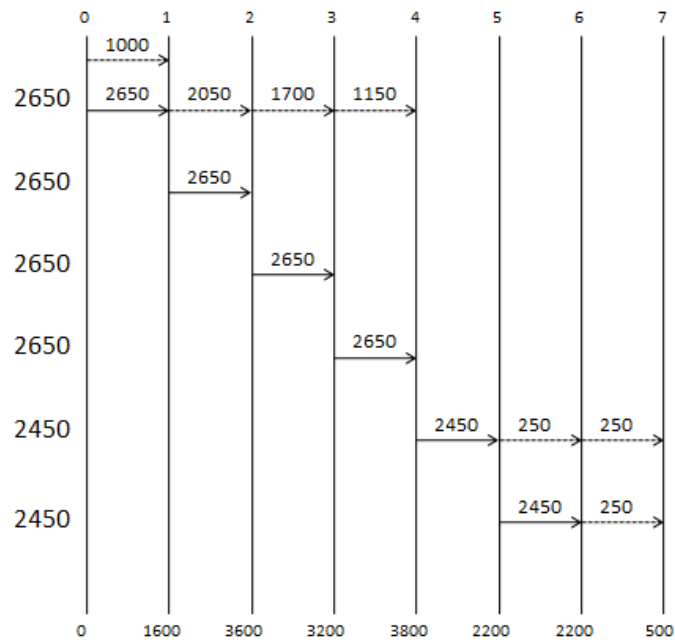


Figura 18 – Opção 2 do diagrama.

Ainda existe a opção de terceirizar parte da produção no mês 4 e reduzir a produção do último mês. Essa opção está exposta no diagrama da Figura 19.

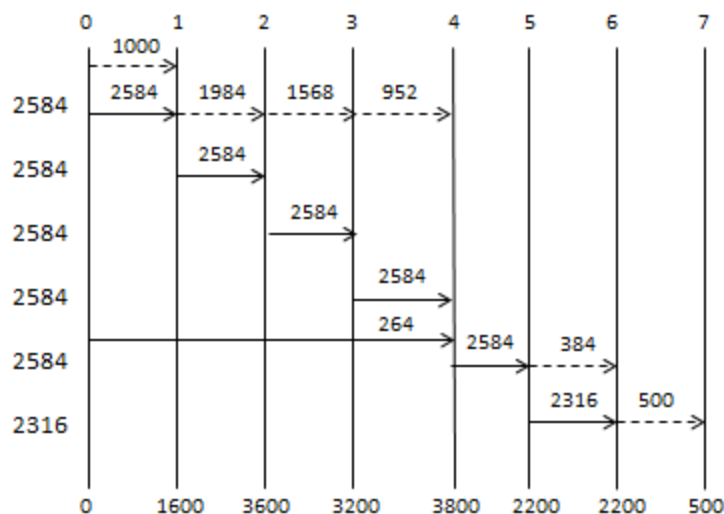


Figura 19 – Opção 3 do diagrama.

Além dessas opções, existe sempre a possibilidade de mesclar ambas as opções apresentadas. Contudo, uma análise nesse sentido seria demasiada longa e não cabe, nesse momento, avaliar todas as opções possíveis.

A segunda opção reflete o resultado obtido por Singhvi e Shenoy (2002) na Tabela 4. Como a análise financeira já foi retratada nessa tabela, somente se faz necessário ilustrar as finanças relacionadas às opções 1 e 3, que seguem nas tabelas 21 e 22.

Tabela 21 – Análise Financeira da Opção 1 do Diagrama de Fontes.

Período	Demanda	Produção	Inventário	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	1000	80	0	0
1	1600	2848	2248	71.2	0	8.8
2	3000	2584	1832	64.6	0	6.6
3	3200	2584	1216	64.6	0	0
4	3800	2584	0	64.6	0	0
5	2200	2584	384	64.6	0	0
6	2200	2316	500	57.9	0	6.7
Valor	\$ 640,000.00	\$ 155,000.00	\$ 14,360.00	\$ 248,000.00	\$ -	\$ 11,050.00

$$\text{Lucro} = \$ 640,000 - \$ 155,500 - \$ 14,360 - \$ 248,000 - \$ 11,050 = \$ 211,590$$

Tabela 22 – Análise Financeira da Opção 3 do Diagrama de Fontes.

Período	Demanda	Produção	Inventário	Terceirização	Mão-de-obra	Contratação	Demissão
0	0	0	1000	0	80	0	0
1	1600	2584	1984	0	64.6	0	15.4
2	3000	2584	1568	0	64.6	0	0
3	3200	2584	952	0	64.6	0	0
4	3800	2584	0	264	64.6	0	0
5	2200	2584	384	0	64.6	0	0
6	2200	2316	500	0	57.9	0	6.7
Valor	\$ 640,000.00	\$ 152,360.00	\$ 12,776.00	\$ 7,920.00	\$ 243,776.00	\$ -	\$ 11,050.00

$$Lucro = \$640,000 - \$152,360 - \$12,776 - \$7,920 - \$243,776 - \$11,050 = \$220,038$$

Comparando os resultados, conclui-se que, para esse problema, é mais vantajoso utilizar a terceirização para evitar a perda da oportunidade de venda no mês 4 do que reorganizar a produção do período. Dessa forma, a solução encontrada pelo DFCS é superior à de Singhvi e Shenoy (2002), pois obtém um lucro maior.

No tópico seguinte, o Diagrama de Fontes será abordado em um problema industrial, o mesmo utilizado por Foo *et al.* (2008). Os limitantes de inventário mínimo e máximo também serão abordados nesse exemplo.

IV.3 Estudo de Caso – Exemplo Industrial de Foo *et al.* (2008)

Após a ilustração do método do Diagrama de Fontes aplicado em Cadeia de Suprimentos, cabe nesse momento testá-lo em um problema industrial. Dessa maneira, para melhor comparar os resultados, será abordado o mesmo problema de Foo *et al.* (2008), sobre a Produção de Plásticos PVC.

As tabelas 14 e 15 serão utilizadas novamente. O diagrama da Figura 20 é construído através dos três primeiros passos de resolução apresentados no capítulo anterior.

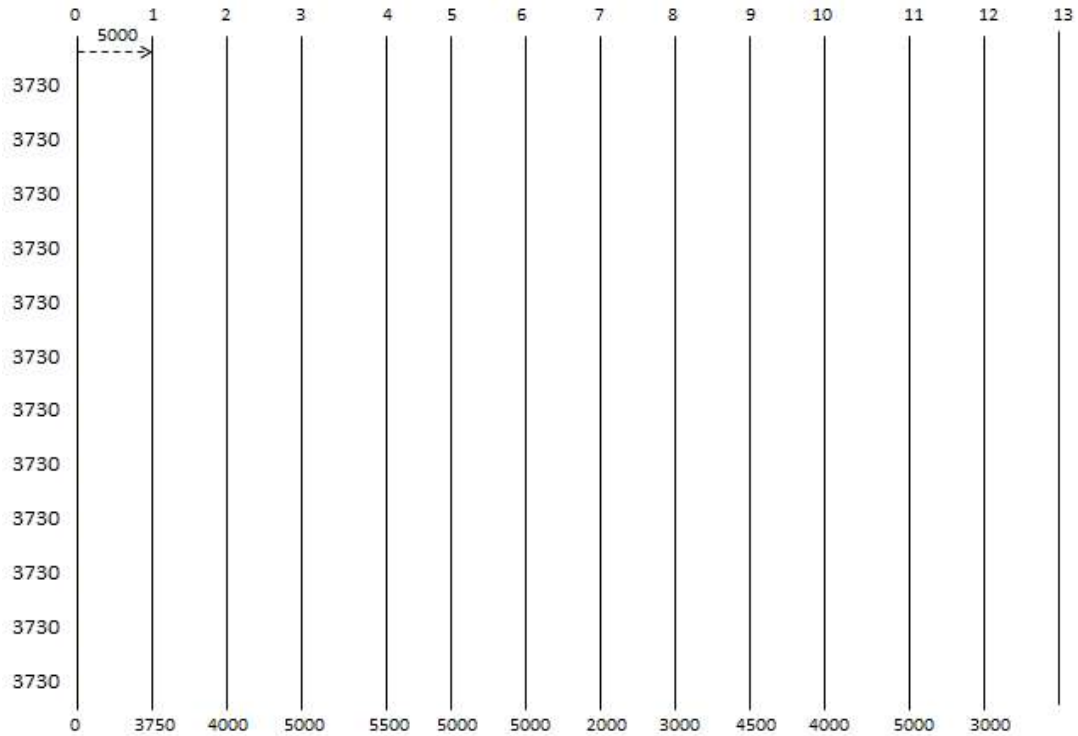


Figura 20 – Diagrama de Produção de PVC a ser preenchido.

Como não é exigido um inventário final, o período 13 não tem a representação da quantidade desejada para tal.

Para garantir o inventário mínimo exigido pelo problema, utilizou-se o mesmo método que Foo *et al.* (2008): a adição, no primeiro mês, de uma demanda fictícia com a mesma quantidade relativa ao inventário mínimo.

Seguindo o passo a passo já demonstrado anteriormente e utilizando a Equação 7 para calcular o inventário a cada mês, constrói-se o diagrama da Figura 21. O inventário mensal ilustrado é líquido: desconsiderando o inventário mínimo.

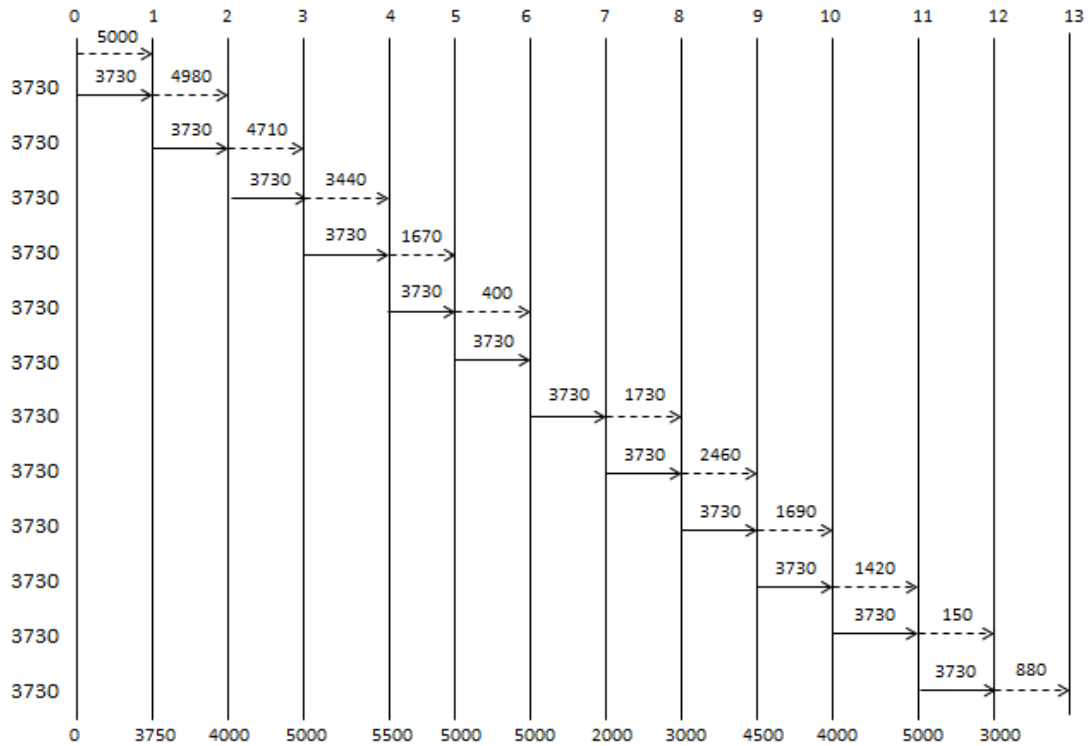


Figura 21 – Diagrama inicial para a Produção de PVC.

Com o diagrama concluído, cabe a sua avaliação. Observa-se o seguinte: a demanda do mês 6 não pode ser atingida pelo inventário e pela produção daquele mês e o inventário final é de 880 unidades acima do inventário mínimo.

Essa situação já é prevista pelo DFCS e a metodologia apresenta três alternativas para o caso. As duas primeiras serão avaliadas, porém a alternativa de terceirização não se aplica a esse problema, já que vai de encontro às suas restrições.

No primeiro caso, a produção do mês 6 (3730 unidades) somada ao inventário disponível daquele mês (400 unidades) resulta em um total 4130 unidades, 870 a menos que o exigido para aquele mês. Nem se o limitante de inventário mínimo fosse desrespeitado, a demanda poderia ser atingida.

A primeira opção prevista pelo DFCS é aumentar as unidades deficitárias em um único mês. Fazendo isso para o primeiro mês, encontra-se o diagrama da Figura 22.

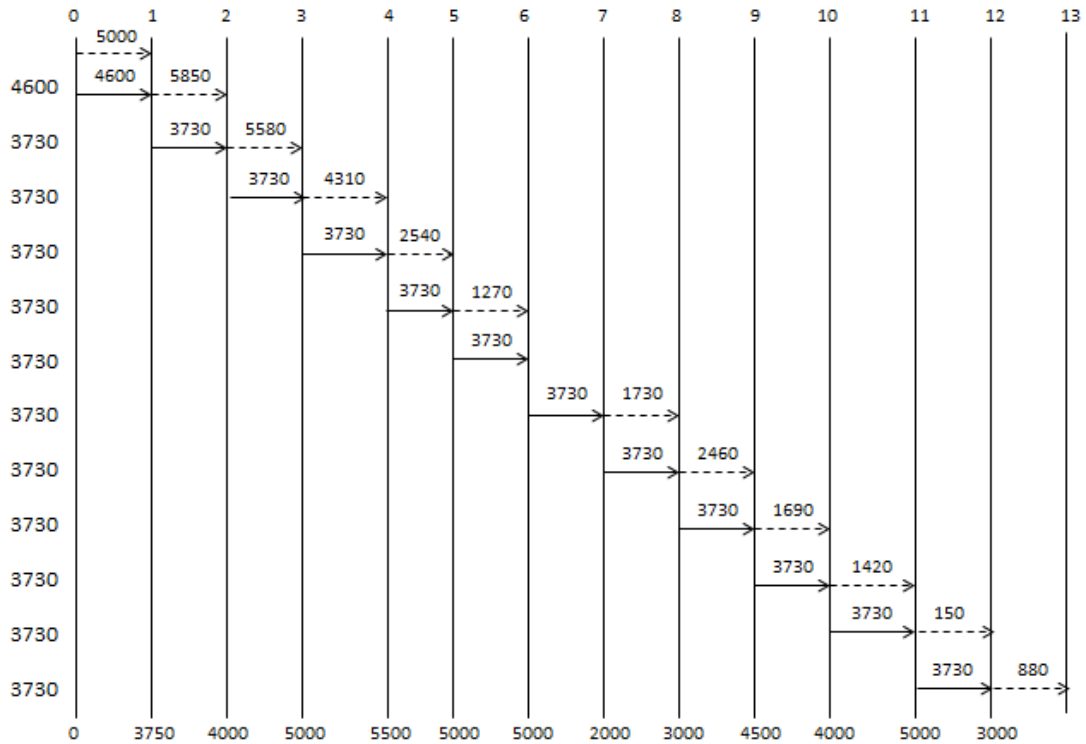


Figura 22 – Primeira opção do DFCS para unidades deficitárias.

Dessa maneira, as quantidades produzidas e demandadas são equivalentes no mês 6. Nesse mês encontra-se um *pinch*.

No último intervalo restam 880 unidades no inventário, essa quantidade deve ser reduzida da produção entre os meses 7 e 12. Nota-se que o menor inventário nessa segunda metade do período ocorre no mês 11 (150 unidades). Dessa maneira, não se pode reduzir as 880 unidades antes desse mês. Como previsto na metodologia, opta-se por reduzir 150 unidades no mês 11 e mais 730 unidades no mês 12. O resultado está ilustrado na Figura 23.

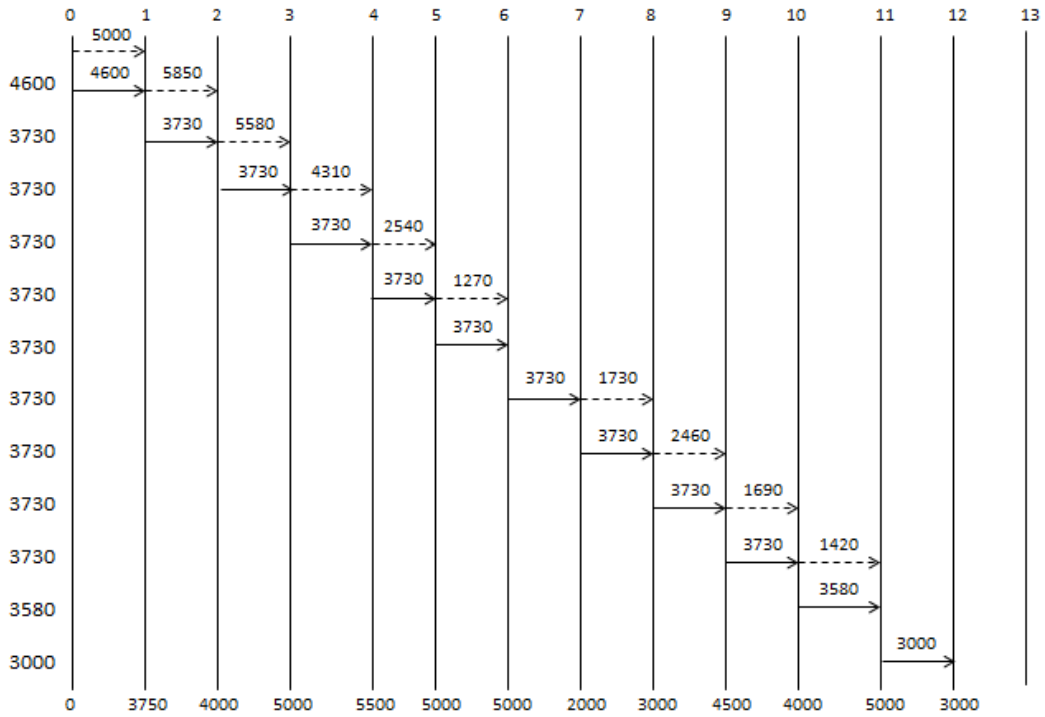


Figura 23 – Primeira opção pelo DFCS totalmente ajustada.

A outra tratativa no rearranjo da produção é aumentar igualmente a produção mensal dos seis meses iniciais. Ou seja, aumenta-se a produção em 145 unidades mensais (870 unidades/6 períodos) e encontra-se um *pinch* no sexto mês. Isso é ilustrado na Figura 24.

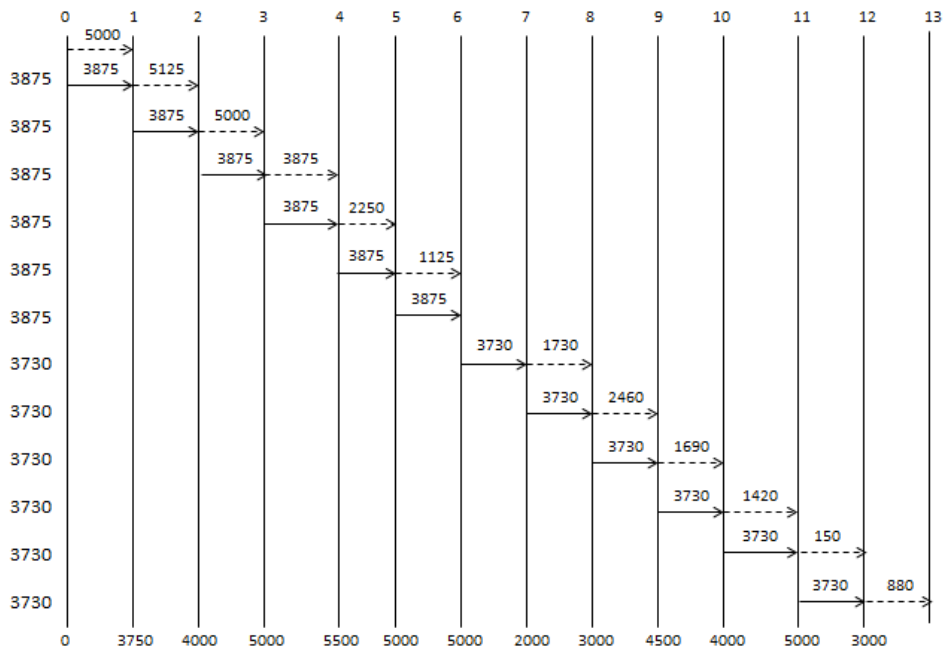


Figura 24 – Segunda opção pelo DFCS para unidades deficitárias.

Para o excesso de produção de 880 unidades nos meses finais, divide-se igualmente a redução nas produções mensais do mês 7 ao mês 12. Novamente encontra-se a limitação do inventário de 150 unidades no mês 11. Nesse caso, a opção é reduzir 30 unidades mensais (150 unidades/5 períodos) entre os meses 7 e 11.

Se a produção do mês 12 for mantida em 3700 unidades resultado será o mostrado na Figura 25. Esse resultado é igual ao reportado por Foo *et al.* (2008).

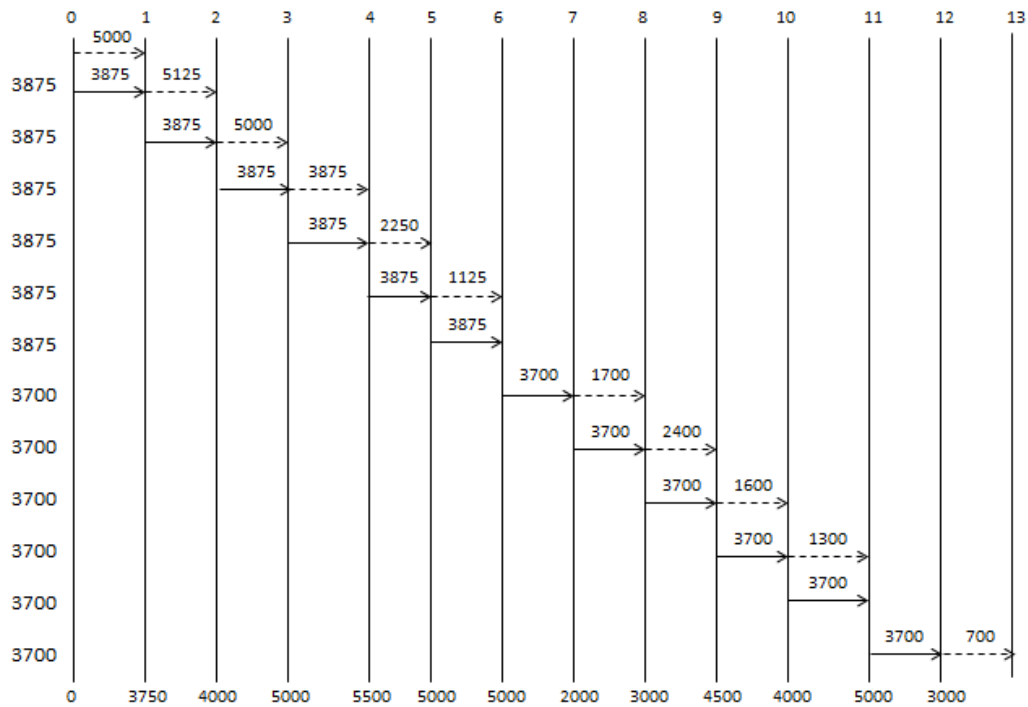


Figura 25 – Segunda opção pelo DFCS parcialmente ajustada.

O inventário final continua sendo superior ao mínimo, em 700 unidades. Pode-se, então, reduzir a produção do mês 12 em 700 unidades, o que gera o diagrama da Figura 26.

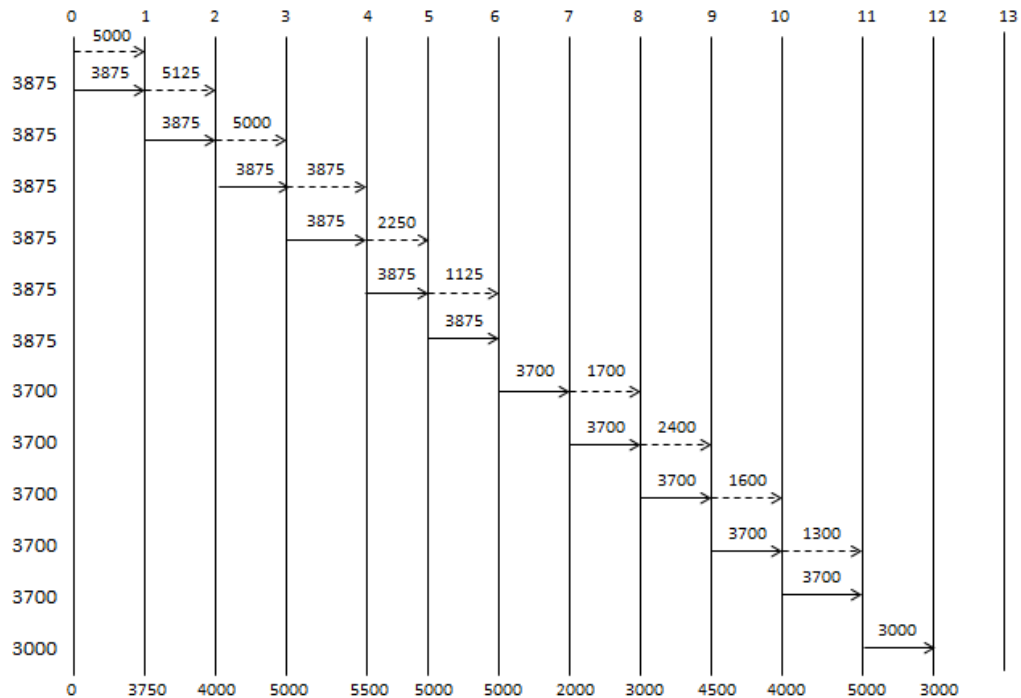


Figura 26 – Segunda opção pelo DFCS totalmente ajustada.

A seguir, deve-se proceder com a Análise Econômica utilizando os dados da Tabela 15.

Para a primeira análise, a Tabela 23 representa a solução ao se fazer o ajuste de produção em meses únicos. A segunda opção de tratativa parcialmente ajustada está na Tabela 24 e a totalmente ajustada está representada na tabela 25.

Tabela 23 – Análise Econômica pela primeira opção do DFCS.

Período (t)	Quantidades				Análise Econômica			
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	4600	5850	6600	\$ 75,000.00	\$ 18,400.00	\$ 13,200.00	\$ 23,000.00
2	4000	3730	5580	6330	\$ 80,000.00	\$ 14,920.00	\$ 12,660.00	\$ 4,350.00
3	5000	3730	4310	5060	\$ 100,000.00	\$ 14,920.00	\$ 10,120.00	\$ -
4	5500	3730	2540	3290	\$ 110,000.00	\$ 14,920.00	\$ 6,580.00	\$ -
5	5000	3730	1270	2020	\$ 100,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,040.00	\$ -
6	5000	3730	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,920.00	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3730	1730	2480	\$ 40,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,960.00	\$ -
8	3000	3730	2460	3210	\$ 60,000.00	\$ 14,920.00	\$ 6,420.00	\$ -
9	4500	3730	1690	2440	\$ 90,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,880.00	\$ -
10	4000	3730	1420	2170	\$ 80,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,340.00	\$ -
11	5000	3580	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,320.00	\$ 1,500.00	\$ 750.00
12	3000	3000	0	750	\$ 60,000.00	\$ 12,000.00	\$ 1,500.00	\$ 3,650.00
Total					\$ 995,000.00	\$ 179,000.00	\$ 81,700.00	\$ 31,750.00

$$Lucro = \$995,000 - \$179,000 - \$81,700 - \$31,750 = 702,550$$

Tabela 24 – Análise Econômica pela segunda opção do DFCS parcialmente ajustada.

Período (t)	Quantidades				Análise Econômica			
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	3875	5125	5875	\$ 75,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,750.00	\$ 19,375.00
2	4000	3875	5000	5750	\$ 80,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,500.00	\$ -
3	5000	3875	3875	4625	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 9,250.00	\$ -
4	5500	3875	2250	3000	\$ 110,000.00	\$ 15,500.00	\$ 6,000.00	\$ -
5	5000	3875	1125	1875	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 3,750.00	\$ -
6	5000	3875	0	750	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3730	1730	2480	\$ 40,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,960.00	\$ 725.00
8	3000	3730	2460	3210	\$ 60,000.00	\$ 14,920.00	\$ 6,420.00	\$ -
9	4500	3730	1690	2440	\$ 90,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,880.00	\$ -
10	4000	3730	1420	2170	\$ 80,000.00	\$ 14,920.00	\$ 4,340.00	\$ -
11	5000	3730	150	900	\$ 100,000.00	\$ 14,920.00	\$ 1,800.00	\$ -
12	3000	3730	880	1630	\$ 60,000.00	\$ 14,920.00	\$ 3,260.00	\$ -
Total					\$ 995,000.00	\$ 182,520.00	\$ 79,410.00	\$ 20,100.00

$$Lucro = \$995,000 - \$182,520 - \$79,410 - \$20,100 = \$712,970.$$

Tabela 25 – Análise Econômica pela segunda opção do DFCS totalmente ajustada.

Período (t)	Quantidades				Análise Econômica			
	Demanda de PVC (unidades)	Produção (unidades)	Inventário Líquido (unidades)	Inventário Atual (unidades)	Venda	Produção	Inventário	Contratação / Demissão
0	0	0	5000	5000	\$ -	\$ -	\$ 10,000.00	
1	3750	3875	5125	5875	\$ 75,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,750.00	\$ 19,375.00
2	4000	3875	5000	5750	\$ 80,000.00	\$ 15,500.00	\$ 11,500.00	\$ -
3	5000	3875	3875	4625	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 9,250.00	\$ -
4	5500	3875	2250	3000	\$ 110,000.00	\$ 15,500.00	\$ 6,000.00	\$ -
5	5000	3875	1125	1875	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 3,750.00	\$ -
6	5000	3875	0	750	\$ 100,000.00	\$ 15,500.00	\$ 1,500.00	\$ -
7	2000	3700	1700	2450	\$ 40,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,900.00	\$ 875.00
8	3000	3700	2400	3150	\$ 60,000.00	\$ 14,800.00	\$ 6,300.00	\$ -
9	4500	3700	1600	2350	\$ 90,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,700.00	\$ -
10	4000	3700	1300	2050	\$ 80,000.00	\$ 14,800.00	\$ 4,100.00	\$ -
11	5000	3700	0	750	\$ 100,000.00	\$ 14,800.00	\$ 1,500.00	\$ -
12	3000	3000	0	750	\$ 60,000.00	\$ 12,000.00	\$ 1,500.00	\$ -
Total					\$ 995,000.00	\$ 179,000.00	\$ 76,750.00	\$ 24,625.00

$$Lucro = \$995,000 - \$179,000 - \$76,750 - \$24,625 = \$714,625.$$

Percebe-se que a opção mais lucrativa foi a da segunda opção prevista pelo DFCS com ajuste total. Isso ocorre porque ao diminuir a produção do mês 12, o número de funcionários também é reduzido. Então, ter um inventário final mínimo é mais atrativo do que produzir 700 unidades excedentes e estoca-las. O resultado encontrado foi semelhante ao de Foo *et al.* (2008) e ainda houve melhor visualização do problema, a partir do método do Diagrama de Fontes.

V. Conclusão

Esse trabalho teve como objetivo aplicar o Diagrama de Fontes na área de Cadeia de Suprimentos, contribuindo para aumentar sua gama de aplicações. Como teste, foi escolhido um problema de Planejamento agregado de produção desenvolvido por Chopra e Meindl (2001).

O problema foi resolvido pelo método proposto atingiu o resultado de Singhvi e Shenoy (2002) e o Estudo de Caso corroborou com a solução feita por Foo *et al.* (2008). Conclui-se, assim, que a aplicação da ferramenta foi conduzida de forma satisfatória.

Sugere-se que outros trabalhos podem sejam desenvolvidos no sentido de complementando o algoritmo aqui proposto, automatizando-o e levantando outros limitantes comuns aos problemas de Planejamento agregado.

Referências Bibliográficas

BORGES, J. L.; PESSOA, F. L. P.; QUEIROZ, E. M. “Hydrogen Source Diagram: A Procedure for Minimization of Hydrogen Demand in Petroleum Refineries”, **Industrial & Chemical Engineering Research**, v. 51, p. 12877-12885, 2012.

CASTRO, P. *et al.* “Improvements for mass-exchange networks projeto”. **Chemical Engineering Science**, v. 54(1), p. 1649-1665, 1999.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Supply chain management**. Singapore: Pearson Education, Inc., Addison Wesley Longman Pte. Ltd., 2001

CUNHA, F. R.; MIRRE, R.C., SANTOS, R.P., **Minimização de efluentes aquosos na indústria de processos químicos: o caso de uma refinaria de petróleo**. 2005. Projeto Final de Curso de Graduação – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

DELGADO, B. E. P. C. **Minimização de efluentes aquosos em plantas industriais - Extensão do algoritmo diagrama de fontes de água para regeneração diferenciada**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

EL-HALWAGI, M.; MANOUSIOUTHAKIS, V. “Synthesis of mass exchange networks”, **AIChE Journal**, v. 35(8), p. 1233-1244, 1989.

FOO, D. C. Y.; Ooi, M. B. L.; Tan, R. R.; Tan, J. S. “A heuristic-based algebraic targeting technique for aggregate planning in supply chains”, **Computers and Chemical Engineering**, v. 32, p. 2217–2232, 2008.

FRANÇA, A. L. F. **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes líquidos em siderurgia**. 2012. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GOMES, J. F. S. **Procedimento para minimização de efluentes aquosos**. 2002. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

HIGA, C.M., PENHA, N. P. **Minimização de Efluentes Aquosos: O Caso de Uma Refinaria de Petróleo**. 2006. Projeto Final de Curso de Graduação – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

LINNHOF, B.; HINDMARSH, E. “The pinch design method of heat exchanger networks”, **Chemical Engineering Science**, v. 38(5), p. 745-763, 1983.

MAGALHÃES, C.C. **Minimização de Efluentes Aquosos em Refinarias Usando DFA – Análise da utilização de Processos de Regeneração**. 2005. Projeto Final de Curso de Graduação – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MARQUES, S. V. **Minimização do consumo de água e da geração de efluentes aquosos - estudos de casos**. 2008. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

MELO, A. R. **Uso integrado e eficiente da água nas indústrias têxteis catarinense**. 2008. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Química) Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina. 2008.

MIRRE, R. C. **Recuperação e reúso de água na indústria de petróleo: síntese de redes de transferência de massa**. 2007. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

MIRRE, R. C. **Metodologia para o Gerenciamento Sustentável do Reúso de Águas e Efluentes Industriais por meio da Integração de Processos**. 2012. Tese de Doutorado (Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MIRRE, R. C. *et al.* **Application of WSD procedure to petroleum industry**. 7th INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING (CHISA 2006), 9th CONFERENCE “PROCESSINTEGRATION, MODELLING AND OPTIMIZATION OF ENERGY SAVING AND POLLUTION REDUCTION”. Praga, Republica Theca: [s.n.]. 2006. p. 1-16. CD-ROM.

PAPAGEORGIU, L. G. “Supply chain optimization for the process industries: Advances and opportunities”, **University College London. Computers and Chemical Engineering**, v. 33, p. 1931–1938, 2009.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos - Análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos**. 1ª. ed. [S.l.]: Blucher, 2005. ISBN: 9788521203681.

SINGHVI, A.; SHENOY, U. V. “Aggregate planning in supply chains by pinch analysis”, **Transactions of the Institute of Chemical Engineering**, v. Part A, n. 80, p. 597-605, 2002.

SINGHVI, A.; MADHAVAN, K. P.; SHENOY, U. V. “Pinch analysis for aggregated production planning in supply chains”. **Computers and Chemical Engineering**, v 28, p. 993–999, 2004.

SMITH, R. **Chemical Process Projeto and Integration**. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.

WANG, Y. P.; SMITH, R. “Wastewater minimisation”, **Chemical Engineering Science**, v. 49(7), p. 981-1006, 1994.

TAKAMA, N., KURIYAMA, T., SHIROKO, K., UMEDA, T. “Optimal water allocation in a petroleum refinery A”. **Comp. Chemical Engineering**, v. 4, p. 251-258, 1980.