

# OS PRINCÍPIOS DA TEORIA DAS RESTRIÇÕES APLICADOS À GERAÇÃO DE ENERGIA TERMELÉTRICA

**Gisele de Souza Castro**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**Marco Aurélio Amaral**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**Ricardo Antonio Torres Rodrigues**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

**Samuel Cogan**  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

## Resumo

O presente artigo tem por objetivo demonstrar, por intermédio de uma simulação prática, de que forma os conceitos contemplados na Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC), desenvolvida pelo físico israelense Eliyahu M. Goldratt na década de 80, podem ser aplicados na otimização de ganhos no segmento de geração de energia elétrica por usinas termelétricas. Tomando por base os princípios da TOC, os esforços da empresa devem ser direcionados à otimização do seu resultado global, concentrando-se na identificação e gerenciamento de suas principais restrições. Nas usinas termelétricas, destacam-se, preponderantemente, as restrições relativas ao fornecimento de combustível para o processo de geração de energia e a capacidade das linhas de transmissão até os usuários finais. A simulação desenvolvida no artigo se concentrou neste último aspecto, procurando, através da aplicação do processo geral de tomada de decisão proposto pela TOC, encontrar a melhor carteira de clientes para a usina, ou seja, aquela que otimiza o seu lucro total, tendo em vista a restrição de uma das linhas de transmissão para atender alguns de seus clientes potenciais.

**Palavras-chave:** Teoria das Restrições (TOC); otimização de resultados; energia termelétrica; gás natural.

## 1. Introdução

Com o esgotamento dos melhores potenciais hidráulicos do país e a construção do gasoduto Brasil-Bolívia, o gás natural tornou-se uma alternativa importante para a necessária expansão da capacidade de geração de energia elétrica através de usinas termelétricas.

Segundo a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, junto ao setor elétrico, o uso mais generalizado do gás natural tem ocorrido somente nos últimos 15 ou 20 anos. Ainda assim, as restrições de oferta de gás natural, o baixo rendimento térmico das turbinas e os custos de capital relativamente altos foram, durante muito tempo, as principais razões para o baixo grau de difusão dessa tecnologia no âmbito do setor elétrico.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Gás Natural**. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas\\_Natural\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/09-Gas_Natural(2).pdf). Acesso em: 17/02/08.

As usinas termelétricas passaram a ganhar força no País, principalmente em virtude da evolução tecnológica, do crescimento da malha de gasodutos e da maior facilidade em se adquirir o gás natural<sup>2</sup>, combustível principal desse tipo de unidade geradora.

A geração termelétrica tem-se mostrado cada vez mais viável, sobretudo em termos de custos de transmissão, uma vez que as usinas termelétricas podem ser construídas bem próximas dos locais demandantes de energia elétrica, como por exemplo, pólos industriais. Em relação ao custo da geração termelétrica, há de se considerar que o custo mais relevante é o do combustível utilizado, que pode ser: carvão, óleo combustível ou diesel, biomassa e/ou gás. Neste último caso, a inclusão do gás natural na matriz energética nacional, conjugada com a necessidade de expansão do parque gerador de energia elétrica, o esgotamento dos melhores potenciais hidráulicos do país e, sobretudo, os custos competitivos deste combustível frente aos demais, tem despertado o interesse de analistas e empreendedores em ampliar o seu uso na geração termelétrica.

Nesse contexto, insere-se a Teoria das Restrições (*Theory of Constraints* – TOC), que visa otimizar a produção, por meio da identificação das restrições de um sistema, objetivando minimizá-los ou eliminá-los, a fim de se melhorar o desempenho da organização como um todo.

O objetivo do presente estudo é demonstrar, através de uma simulação prática, de que forma a Teoria das Restrições pode ser aplicada na otimização de ganhos no segmento de geração termelétrica.

A simulação tratará de uma usina termelétrica que possui diversos clientes potenciais, mas não pode atender a todos em função das limitações na capacidade da linha de transmissão, tendo assim que avaliar qual cliente deverá atender para ter seu resultado global otimizado.

Para atingir tal objetivo, este estudo pautou-se em pesquisa bibliográfica de cunho exploratório, procurando descrever o processo de geração de energia termelétrica. A pesquisa encontra-se, ainda, fundamentada nos conceitos da Teoria das Restrições, que servirão de base para o desenvolvimento da simulação prática.

## **2. Energia Termelétrica**

### **2.1 – Histórico do gás natural no Brasil**

As nações mais desenvolvidas e aquelas em desenvolvimento são as principais consumidoras das fontes primárias de energia, entre elas petróleo, carvão, gás, nuclear, hidráulica, biomassa e outras. Como reservas conhecidas das fontes não renováveis de energia (principalmente o petróleo) estão concentradas em poucos países ou regiões isso explica o enorme volume de comércio internacional de carvão, petróleo, gás natural e urânio. Sendo a energia o principal insumo para o crescimento dos países há que se ter em mente qual será a matriz energética de uma nação, dada a importância da mesma para o processo de desenvolvimento.

---

<sup>2</sup> Inicialmente existiu a necessidade de facilitar a aquisição de gás natural, sobretudo em função do contrato de fornecimento firmado com a Bolívia ser do tipo *take-or-pay*, ou seja, se paga pelo volume contratado independentemente se seu consumo. Assim, para tornar esse contrato economicamente viável incentivou-se seu uso.

De acordo com o BP *Statistical Review of World Energy* 2006, o consumo de fontes primárias de energia do Brasil apresentava-se concentrado no petróleo e nas hidrelétricas, observando-se pouca participação de outras fontes como gás natural, carvão e nuclear, conforme *Quadro 1* a seguir:

**Quadro 1 – Consumo de fontes primárias de energia no Brasil – 2006**

| Fontes de energia | Mtoe <sup>3</sup> | %     |
|-------------------|-------------------|-------|
| Petróleo          | 92,1              | 44,6  |
| Gás Natural       | 19,0              | 9,2   |
| Carvão            | 13,1              | 6,3   |
| Nuclear           | 3,1               | 1,5   |
| Hidrelétrica      | 79,2              | 38,4  |
| Total             | 206,5             | 100,0 |

Fonte: BP *Statistical Review of World Energy* 2006.

As termelétricas movidas a carvão e óleo combustível já existiam no Brasil, mas haviam perdido participação na matriz energética ao longo dos anos. Alguns fatores relacionados por Leite (2007) contribuíram para sua expansão nos últimos anos: (a) diminuição dos investimentos estatais no setor elétrico no fim do século XX conjugado a um aumento da demanda de energia; (b) preocupação nacional com o crescimento econômico continuado; (c) usinas hidrelétricas demandam mais tempo que as térmicas para construção; (e) países industrializados onde aproveitamentos hidrelétricos não eram possíveis possuíam boa tecnologia térmica disponível; e a (f) otimização a longo prazo dos recursos hídricos para poupar ou substituir a energia hidrelétrica pela térmica em anos de hidrologia adversa.

Previendo o colapso físico do sistema elétrico, quando em 1999 os principais reservatórios situados na região Sudeste/Centro-Oeste atingiram níveis muito baixos, o governo federal lançou através do Ministério de Minas e Energia (MME) o Programa Prioritário de Termelétricas (PPT) com o planejamento de construção de 15 usinas movidas a gás. Esse programa esbarrou, entre outros problemas, na dificuldade de aquisição de turbinas no mercado internacional que estava saturado de encomendas. O racionamento de energia ocorreu em junho de 2001 com cotas que deveriam ser cumpridas sob o risco de tarifação diferenciada para os consumos excedentes e cortes de energia se as cotas não fossem respeitadas.

Cabe ressaltar que, até então, a geração termelétrica tinha sido pouco utilizada, por antecipação, para sustentar as reservas hídricas e melhorar os níveis de segurança das usinas hidrelétricas.

Segundo Triandopolis Jr (2002), as empresas que investem em usinas termelétricas movidas a gás têm se mostrado como os principais novos compradores para utilização do gás natural. É esperado, conforme planejamento do Governo, que a participação do gás natural na matriz energética brasileira passe dos atuais 2% para 12% em 2010.

Outro fator que impulsionou a utilização de termelétricas a gás foi o acordo Brasil-Bolívia de importação de gás assinado em 1992. Definida uma quantidade inicial de 8 milhões de metros cúbicos diários que deveria crescer gradativamente até atingir 16 milhões de metros cúbicos no oitavo ano a partir da operação com opção de compra de 14 milhões adicionais, a Petrobras construiu um gasoduto que comportava transportar os 30 milhões de metros cúbicos desde a Bolívia até Campinas. O Brasil já havia rejeitado esse combustível no passado por saber que estaria dependente desta fonte de energia, cujas reservas próprias do país até então conhecidas não poderiam satisfazer a demanda de uma economia em crescimento.

A compra do gás foi ainda estruturada sob a cláusula *take-or-pay* que obriga o comprador a pagar pelo gás, usando-o ou não. Sendo assim, precisava-se encontrar usos para o gás natural importado para que a operação do gasoduto fosse economicamente viável.

<sup>3</sup> Mtoe – Million Tons of Oil Equivalent (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo).

Houve, então, um incentivo à troca do óleo combustível pelo gás natural e à construção de usinas termelétricas. Logo, as termelétricas ficaram entre a emergência de suprir a falta de energia através do PPT e a necessidade de tornar viável economicamente o gasoduto Brasil-Bolívia.

Leite (2007) ainda comenta que, com a evolução incentivada dos outros tipos de consumo, não se dispõe de gás nem mesmo para atender à demanda mínima das usinas do PPT. Ou seja, se houver a necessidade de que todas as termelétricas funcionem ao mesmo tempo com carga máxima (por conta de um ano seco, por exemplo) provavelmente não haveria gás suficiente para estas.

## 2.2 – Usinas Termelétricas

Segundo a ANEEL<sup>4</sup>, o Brasil possui no total 1.429 usinas de geração de energia elétrica, onde 1.076 estão em operação, gerando 76.136.364 kW de potência, 110 usinas em construção e outras 243 com sua construção prevista. Das usinas em operação, 618 são termelétricas, representando uma potência de 11.174.321 kW, o que representa 14,68% da potência total. As termelétricas estão também entre 52, das 110 usinas em construção (62,9% da potência total prevista) e 82, das 243 usinas outorgadas, representando 59,23% da potência prevista para as mesmas. Os números apresentados demonstram que o governo vem incentivando a maior participação das termelétricas na matriz energética do país.

As usinas termelétricas, como o próprio nome diz, utilizam o calor para gerar energia elétrica. Comumente chamadas de Usinas Térmicas de Eletricidade (UTE), estas usinas utilizam algum combustível (carvão, óleo combustível ou diesel, biomassa e/ou gás) para seu funcionamento.

O funcionamento das centrais termelétricas é semelhante, independentemente do combustível utilizado. O combustível (no caso daqueles estocáveis, como carvão, óleo combustível e biomassa) é armazenado em parques ou depósitos adjacentes, de onde é enviado para a usina, onde será queimado na caldeira. Esta gera vapor a partir da água que circula por uma extensa rede de tubos que revestem suas paredes. A função do vapor é movimentar as pás de uma turbina, cujo rotor gira juntamente com o eixo de um gerador que produz a energia elétrica.<sup>5</sup>

Essa energia é transportada por linhas de alta tensão aos centros de consumo. O vapor é resfriado em um condensador e convertido outra vez em água, que volta aos tubos da caldeira, dando início a um novo ciclo. A água em circulação que esfria o condensador expulsa o calor extraído da atmosfera pelas torres de refrigeração, sendo estas grandes estruturas que identificam as centrais. Parte do calor extraído passa para um rio próximo ou para o mar.

Como o calor produzido é intenso, devido às altas correntes geradas, é importante o resfriamento dos geradores. O hidrogênio é melhor veículo de resfriamento que o ar; como tem apenas um quatorze avos da densidade deste, requer menos energia para circular. Recentemente, foi adotado o método de resfriamento líquido, por meio de óleo ou água. Os

---

<sup>4</sup>Dados retirados do site: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 15/02/2008.

<sup>5</sup> Toda a descrição do funcionamento de uma usina termelétrica está baseada no seguinte artigo: **Usina Termelétrica**. Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/termelétrica.html>. Acesso em: 15/02/08.

líquidos nesse processamento são muito superiores aos gases, e a água é 50 vezes melhor que o ar.

A potência mecânica obtida pela passagem do vapor através da turbina fazendo com que esta gire - e no gerador, que também gira acoplado mecanicamente à turbina - é que transforma a potência mecânica em potência elétrica.

A energia assim gerada é levada através de cabos ou barras condutoras, dos terminais do gerador até o transformador elevador, onde tem sua tensão elevada para adequada condução, através de linhas de transmissão, até os centros de consumo. Daí, através de transformadores abaixadores, a energia tem sua tensão levada a níveis adequados para utilização pelos consumidores.

A descrição anterior refere-se às centrais clássicas, uma vez que existe, ainda que em fase de pesquisa, outra geração de termelétricas que melhorem o rendimento na combustão do carvão e diminuam o impacto sobre o meio ambiente: são as centrais de combustão de leito fluidificado. Nessas centrais, queima-se carvão sobre um leito de partículas inertes (por exemplo, de pedra calcária), através do qual se faz circular uma corrente de ar que melhora a combustão.

A principal vantagem das usinas termelétricas é poderem ser construídas onde são mais necessárias, economizando assim o custo das linhas de transmissão. Essas usinas podem ser encontradas na Europa e em alguns estados do Brasil.

Conforme a ANEEL<sup>6</sup>, entre as vantagens adicionais da geração termelétrica a gás natural estão o prazo relativamente curto de maturação do empreendimento e a flexibilidade para o atendimento de cargas de ponta.

Por outro lado, as turbinas a gás são máquinas extremamente sensíveis às condições climáticas, principalmente em relação à temperatura ambiente, e apresentam também alterações substanciais de rendimento térmico no caso de operação em cargas parciais.

Além disso, outras desvantagens seriam o alto preço do combustível e os impactos ambientais, que dependem preponderantemente do combustível utilizado, como por exemplo, a poluição do ar, o aquecimento das águas, entre outros.

### **3. Teoria das Restrições**

As idéias do físico israelense Eliyahu M. Goldratt sobre a teoria das restrições, desenvolvida através de uma formulação matemática, tornaram-se a base do *software* OPT (*Optimized Production Technology*) para programação da produção. À medida que o software foi sendo aplicado em empresas espalhadas por vários países, Goldratt pôde realizar diversos aperfeiçoamentos e, através dessa experiência chegou à conclusão de que o funcionamento do sistema estava embasado em alguns princípios específicos. Com base nessas observações, é que Goldratt foi formalizando, em paralelo à evolução do próprio *software*, uma série de princípios que acabaram levando à construção do pensamento OPT – ou seja, a tecnologia de produção otimizada. (GUERREIRO, 1999)

Na década de 80, Goldratt desenvolveu a Teoria das Restrições (TOC – *Theory of Constraints*), que pode ser entendida como uma ampliação do conceito de OPT, uma vez que se utiliza em grande parte de suas idéias e premissas. A diferença seria o fato de a TOC ser

---

<sup>6</sup> ANEEL. Op. Cit.

mais ampla que a OPT, podendo o conceito de gerenciamento das restrições ser aplicado a todas as áreas da empresa e não somente à produção. Os fundamentos desta teoria foram publicados no livro *A Meta* e, posteriormente, aperfeiçoados através de diversas publicações onde o autor foi introduzindo alterações e novos conceitos a sua teoria.

A Teoria das Restrições parte do pressuposto básico de que a meta de qualquer empresa é ganhar dinheiro hoje e no futuro, e que, na maioria das vezes, esta meta não consegue ser alcançada devido aos efeitos da restrição do sistema, ou seja, o fator que restringe a atuação do sistema como um todo. (CEVEY e RODRIGUES, 2006).

Segundo Garrison e Noreen (2001), uma restrição significa qualquer obstáculo que limita o melhor desempenho do sistema em direção à meta. Uma vez que a restrição representa algo que a empresa não possui o suficiente, a Teoria das Restrições sustenta que a chave do sucesso é o gerenciamento eficaz da restrição.

Conforme Guerreiro (1999) tem-se dois tipos de restrições. A primeira é chamada de física e engloba mercado, fornecedor, máquinas, materiais, pedido, projeto, pessoas, sendo denominada restrição de recurso, sendo gargalo o recurso cuja demanda seja superior a sua capacidade. O segundo tipo é a restrição de política, sendo esta formada por normas, procedimentos e práticas usuais do passado, que restringem a empresa de aumentar seus lucros.

Cogan (2007) observa ainda que as restrições podem ser classificadas em internas e externas. Segundo o autor, ela será interna quando ocorre em algum recurso interno da empresa. Por outro lado, será considerada uma restrição externa se o mercado for a restrição, impedindo a empresa de trabalhar em sua capacidade total. Será ainda externa no caso de haver restrição de fornecimento de materiais, o que faz com que o mercado fornecedor limite a capacidade de produção por não poder atender a demanda em sua totalidade. Em ambos os tipos de restrições, as técnicas de gerenciamento de restrições podem ser aplicadas.

A partir da premissa da teoria das restrições de que a empresa opera sempre com algum tipo de restrição, Goldratt e Cox (2002, p. 319) propõem um processo geral de tomada de decisão empresarial constituído de cinco passos:

1. IDENTIFICAR a(s) restrição(ões) do sistema.
2. Decidir como EXPLORAR a(s) restrição(ões) do sistema.
3. SUBORDINAR tudo o mais à decisão anterior.
4. ELEVAR a(s) restrição(ões) do sistema.
5. CUIDADO!!!! Se em um passo anterior uma restrição tiver sido quebrada, volte ao passo 1, mas não deixe que a INÉRCIA cause uma restrição no sistema.

O objetivo desses passos é focalizar a atenção dos gerentes nos recursos restritos, que são fatores de inibição do crescimento do lucro. Um dos pressupostos principais da teoria das restrições é que toda linha de produção possui gargalos e sempre haverá, em um dado momento, aquele de maior poder restritivo. (COGAN, 2007).

Para medir o grau de atendimento da meta (fazer dinheiro agora e no futuro) faz-se necessário que sejam observados alguns indicadores de desempenho financeiro, devendo-se concentrar em três parâmetros: ganho, inventário e despesas operacionais.(GUERREIRO, 1996).

Para Plantullo (1994), o ganho (G) seria simplesmente a diferença aritmética entre o faturamento total e a matéria-prima consumida. Por inventário (I), entende-se todo o dinheiro

que o sistema investe na compra de ‘coisas’ que pretende vender. Já as despesas operacionais (DO) são todo o dinheiro que o sistema gasta para transformar inventário em valor agregado.

Santos *et al.* (2006) ressaltam que a TOC faz uso integrado dessas três medidas como fatores para a tomada de decisão, devendo sempre se voltar para o impacto global dentro da empresa e serem analisadas conjuntamente.

De acordo com Marques e Cia (1998), essas três medidas de desempenho dão origem a três conceitos que irão possibilitar a avaliação do cumprimento da meta. O primeiro deles é o lucro líquido do período, sendo este uma medida absoluta da lucratividade obtido da diferença entre o ganho e os custos (e as despesas operacionais). Têm-se ainda, o retorno sobre o investimento que é resultante da divisão entre o lucro líquido e o investimento empregado, constituindo-se numa medida relativa da lucratividade. Por fim, o fluxo de caixa, que é uma medida absoluta de liquidez sendo necessária à manutenção de níveis adequados às medidas de lucratividade, podendo ser encontrado pela dedução ao capital de giro das operações da variação positiva líquida dos ativos circulantes (exceto disponível) e inclusão da variação positiva líquida dos passivos circulantes.

**Quadro 2 – Parâmetros para avaliação do cumprimento da meta**

| Parâmetro                  | Fórmula                                   |
|----------------------------|---|
| Lucro Líquido              | $LL = G - DO$                             |
| Retorno sobre Investimento | $RSI = (G - DO) / I$                      |
| Fluxo de Caixa             | $FC = CG - (AC_F - AC_I) + (PC_F - PC_I)$ |

Fonte: elaborado pelos autores.

O modelo de produção proposto por Goldratt e Fox recebeu o nome de tambor-pulmão-corda (TPC) e permite limitar o planejamento do fluxo de produção ao recurso restritivo de capacidade da linha de produção.

Segundo Cogan (2007, p. 17), o método TPC pode ser explicado da seguinte forma:

Em qualquer empresa, existem alguns recursos com restrição de capacidade (RCR) – esses seriam os soldados mais lentos. A maneira tambor-pulmão-corda reconhece que essa restrição imporá o índice de produção da empresa toda. Por isso, considere-se o recurso principal com restrição de capacidade como o tambor. O seu índice de produção servirá como batida de tambor para a fábrica inteira. Também é necessário criar um pulmão de inventário (pulmão de tempo) para manter o recurso com restrição de capacidade ocupada durante o intervalo predeterminado seguinte de tempo. Dessa forma, esse pulmão protegerá o ganho da empresa contra qualquer interrupção que possa ser superada dentro do intervalo predeterminado de tempo. Para assegurar que o inventário não crescerá além do nível imposto pelo pulmão, deve-se limitar o índice pelo qual a matéria-prima é liberada para a fábrica. A corda deve prender o RCR à operação inicial (primeira).

Com base neste raciocínio, Marques e Cia (1998) observam que em qualquer linha de manufatura existe pelo menos um recurso com restrição de capacidade (RCR). Mesmo assim, os estoques de proteção devem ser planejados em dois lugares: (a) antes do RCR, e (b) após o último recurso (não-gargalo), a fim de atender às demandas do mercado.



Observando-se o exposto, nota-se que em muitos aspectos a abordagem proposta pela TOC se assemelha ao custeio direto no tocante às medidas de desempenho. Todavia, Marques e Cia (1998), apesar de concordarem de não se tratar de uma metodologia radicalmente inovadora, afirmam que a abordagem TOC significa uma evolução ao método de custeio direto revestida por uma visão sistêmica.

Mais algumas críticas à TOC podem ser encontradas em Husby (2007), que considera a linguagem original e o processo de pensamento da TOC difíceis de dominar, o que pode criar uma barreira ao uso eficaz da mesma através da empresa. Ele afirma ainda, que o processo de resolução de problemas usa uma linguagem "intelectual" que requer peritos bem treinados para sua aplicação eficaz. Para ele, aliado a isso estaria sua natureza de cima para baixo, a qual não considera propícia ao comprometimento de todos os membros da equipe. Por fim, o autor alerta para o fato de que as metodologias de melhoria não devem ser vistas como estratégias competitivas, uma vez que cada uma tem um valor significativo e devem ser aplicadas diferentemente, dependendo do objetivo.

#### 4. TOC aplicada na otimização de ganhos em usinas termelétricas

Já foi comentado que as usinas termelétricas utilizam algum combustível (carvão, óleo combustível ou diesel, biomassa e/ou gás) para gerar energia elétrica. No entanto, cada tipo de combustível possui um poder calorífico<sup>7</sup> inerente. Assim, a quantidade de matéria-prima utilizada por uma usina termelétrica para gerar energia elétrica é função direta de seu poder calorífico.

Apesar do fator preponderante à determinação do custo da energia gerada por centrais termelétricas ser o custo do combustível utilizado, Lora e Nascimento (2004) ressaltam que o custo de geração não se limita ao custo do combustível, devendo também ser considerado o custo relacionado à operação e manutenção (O&M).

No que se refere à capacidade de geração de receita das usinas termelétricas, deve-se considerá-la uma função direta do preço de venda e da quantidade de energia elétrica produzida e vendida, uma vez que não é possível estocar energia.

Assim, pode-se concluir que o resultado de uma usina termelétrica, conforme os conceitos estabelecidos na Teoria das Restrições será avaliado através dos seguintes parâmetros:

**Quadro 3 – Parâmetros para avaliação do resultado de uma usina termelétrica**

| Parâmetro             | Fórmula   |
|-----------------------|---|
| Lucro Global da Usina | Ganhos na Geração – Despesas Operacionais da Geração                          |
| Ganhos na Geração     | Receita de Vendas de Energia Elétrica – Custo do material direto <sup>8</sup> |
| Despesa Operacional   | Mão-de-obra direta + Despesas Indiretas                                       |

Fonte: elaborado pelos autores.

<sup>7</sup> Conforme explicam Lora e Nascimento (2004), poder calorífico de um combustível é a quantidade de energia liberada durante a combustão completa da unidade de massa (1 kg) ou unidade de volume (1 Nm<sup>3</sup>) do referido combustível.

<sup>8</sup> O custo do material direto é composto preponderantemente pelo custo do combustível, apesar de incluir também valores referentes ao material direto utilizado na operação e manutenção (O&M).

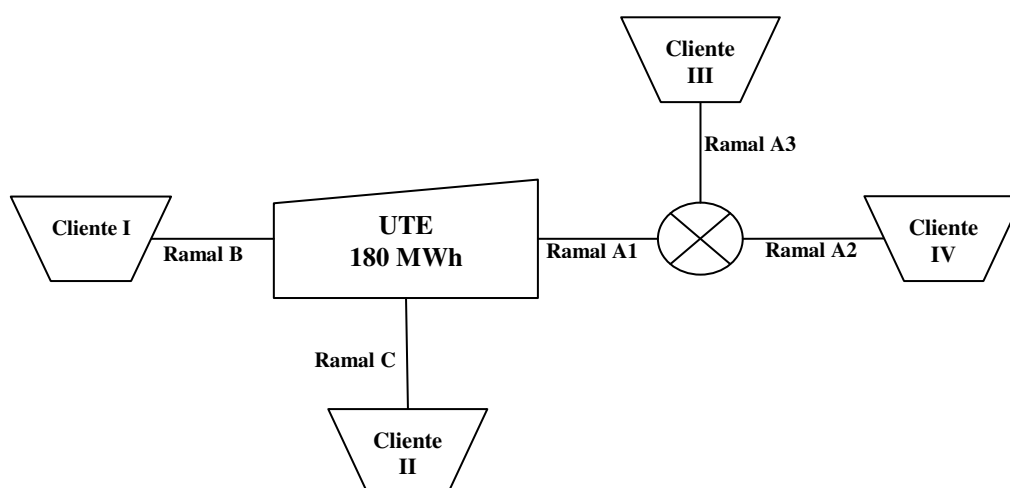
Após a análise dos dados financeiros, deve-se observar o contexto do fornecimento dos insumos necessários à atividade, bem como a demanda de energia elétrica existente no mercado que pode ser atendido pela usina. No que se refere aos insumos necessários ao processo de geração é preciso prestar especial atenção ao combustível.

Já em relação à demanda, faz-se indispensável uma análise da capacidade das linhas de transmissão da energia produzida, uma vez que, conforme mencionado, não é possível armazená-la, sendo esta uma das maiores restrições ao processo de geração termelétrica.

## 5. Simulação da aplicação da TOC numa usina termelétrica

A fim de consolidar a teoria apresentada e exemplificar a aplicação prática de seus conceitos, será realizada uma simulação da aplicação da TOC em uma usina termelétrica (UTE) movida a gás natural.

A usina utilizada nesta simulação utiliza como combustível o gás natural e possui capacidade instalada de geração de energia igual a 180 MWh que podem ser disponibilizados através de três linhas de transmissão (A, B e C) para quatro clientes potenciais (I, II, III e IV) localizados em áreas geográficas distintas, conforme demonstrado na Figura 1.



**Figura 1 – Rede de distribuição de energia**

Fonte: elaborado pelos autores.

A capacidade de transmissão de cada ramal, bem como a demanda e o preço de venda da energia elétrica para cada cliente estão demonstrados nas *Tabelas 1 e 2* apresentadas a seguir. Os preços são definidos através de negociação com os próprios clientes no momento de assinatura do contrato de fornecimento, por isso podem apresentar diferenças.

**Tabela 1 – Capacidade de transmissão por ramal**

| Ramal | Capacidade de transmissão |
|-------|---------------------------|
| A1    | 70 MWh                    |
| A2    | 50 MWh                    |
| A3    | 60 MWh                    |
| B     | 90 MWh                    |
| C     | 80 MWh                    |

Fonte: elaborado pelos autores.

**Tabela 2 – Demanda e preço de venda de energia elétrica por cliente**

| Cliente | Demanda | Preço (por MWh) |
|---------|---------|-----------------|
| I       | 50 MWh  | \$190,00        |
| II      | 70 MWh  | \$230,00        |
| III     | 55 MWh  | \$290,00        |
| IV      | 45 MWh  | \$310,00        |

Fonte: elaborado pelos autores.

Cumprе ressaltar que o fornecimento de energia elétrica aos clientes deve ser efetuado continuamente e pela totalidade da carga contratada no prazo estabelecido, ou seja, não é possível o fornecimento parcial de energia.

Como visto anteriormente, a usina utiliza como combustível o gás natural (matéria-prima principal), tendo ainda que serem adicionados ao custo da matéria-prima, os materiais diretos utilizados na operação e manutenção (O&M).

O custo da matéria prima (gás natural e materiais diretos de O&M) monta em \$100/MWh, enquanto as despesas/custos necessários para a operação da usina totalizam \$20/MWh.

Diante dos fatos apresentados, construiu-se a tabela a seguir com o intuito de identificar qual o cliente que proporciona o maior lucro global unitário na venda de energia elétrica.

**Tabela 3 – Lucro global unitário por cliente**

| Cliente | Receita de venda (\$/MWh) | Custo da matéria-prima (\$/MWh) | Ganho na geração (\$/MWh) | Despesas (\$/MWh) | Lucro global (\$/MWh) | Prioridade     |
|---------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------|-----------------------|----------------|
| I       | \$190,00                  | \$100,00                        | \$90,00                   | \$20,00           | \$70,00               | 4 <sup>a</sup> |
| II      | \$230,00                  | \$100,00                        | \$130,00                  | \$20,00           | \$110,00              | 3 <sup>a</sup> |
| III     | \$290,00                  | \$100,00                        | \$190,00                  | \$20,00           | \$170,00              | 2 <sup>a</sup> |
| IV      | \$310,00                  | \$100,00                        | \$210,00                  | \$20,00           | \$190,00              | 1 <sup>a</sup> |

Fonte: elaborado pelos autores.

Conforme a ordem de rentabilidade de cada cliente apresentada na coluna “Prioridade” da *Tabela 3*, o fornecimento de energia elétrica deverá priorizar os clientes que apresentam maior lucro global unitário. Entretanto, essa análise inicial não identificou as restrições impostas ao sistema sob análise, que no caso, é a limitação da capacidade das linhas de transmissão mencionada na *Tabela 1*.

Ao examinar a restrição existente na linha de transmissão, ou seja, na capacidade da UTE entregar a quantidade de energia elétrica demandada, verifica-se que não é possível atender, simultaneamente, a demanda dos dois clientes mais rentáveis (clientes III e IV), uma vez que a capacidade de transmissão do ramal A1 é inferior ao somatório das demandas desses dois clientes, conforme demonstrado na *Tabela 4* apresentada a seguir.

**Tabela 4 – Demanda de energia elétrica por cliente e ramal de transmissão**

| Recurso  | Demanda por cliente |        |        |        | Demanda ramal | Capacidade ramal | % de carga |
|----------|---------------------|--------|--------|--------|---------------|------------------|------------|
|          | I                   | II     | III    | IV     |               |                  |            |
| Ramal A1 | -                   | -      | 55 MWh | 45 MWh | 100 MWh       | 70 MWh           | 142,9%     |
| Ramal A2 | -                   | -      | -      | 45 MWh | 45 MWh        | 50 MWh           | 90,0%      |
| Ramal A3 | -                   | -      | 55 MWh | -      | 55 MWh        | 60 MWh           | 91,7%      |
| Ramal B  | 50 MWh              | -      | -      | -      | 50 MWh        | 90 MWh           | 55,6%      |
| Ramal C  | -                   | 70 MWh | -      | -      | 70 MWh        | 80 MWh           | 87,5%      |

Fonte: elaborado pelos autores.

Assim, após a identificação da restrição do sistema, Goldratt e Cox (2002) ensinam que ela deve ser explorada com o objetivo de maximizar o lucro global da empresa. Neste sentido, é necessário considerar o lucro global total obtido na venda de energia para cada cliente submetido à restrição identificada, conforme cálculos demonstrados na *Tabela 5* a seguir.

**Tabela 5 – Lucro global total por cliente submetido à restrição identificada**

|                   | Cliente III | Cliente IV |
|-------------------|-------------|------------|
| Demanda           | 55 MWh      | 45 MWh     |
| Ganho por unidade | \$170,00    | \$190,00   |
| Ganho total       | \$9.350,00  | \$8.550,00 |

Fonte: elaborado pelos autores.

Feito isto, pode-se verificar que o ganho total proporcionado pelo cliente III é superior ao cliente IV. Com base nesta demonstração e, considerando que o passo 3 do processo geral de tomada de decisão empresarial elaborado por Goldratt e Cox (2002) determina que tudo deve ser subordinado a exploração das restrições do sistema visando à maximização do lucro global da empresa, deve-se optar pelo fornecimento ao cliente III, tendo em vista que apenas um deles poderá ser atendido em função da restrição observada. A *Tabela 6* apresenta o resultado global da empresa levando em consideração a melhor carteira de clientes.

**Tabela 6 – Lucro global da UTE**

| Cliente           | I          | II         | III        | Total       |
|-------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Demanda           | 50 MWh     | 70 MWh     | 55 MWh     | 175 MWh     |
| Ganho por unidade | \$70,00    | \$110,00   | \$170,00   |             |
| Ganho total       | \$3.500,00 | \$7.700,00 | \$9.350,00 | \$20.550,00 |

Fonte: elaborado pelos autores.

Caso tivéssemos optado por atender à demanda do cliente IV, o lucro global da UTE seria menor, o que pode ser confirmado pela comparação do resultado obtido na *Tabela 6* com a *tabela 7* a seguir.

**Tabela 7 – Lucro global da UTE**

| Cliente           | I          | II         | IV         | Total       |
|-------------------|------------|------------|------------|-------------|
| Demanda           | 50 MWh     | 70 MWh     | 45 MWh     | 165 MWh     |
| Ganho por unidade | \$70,00    | \$110,00   | \$190,00   |             |
| Ganho total       | \$3.500,00 | \$7.700,00 | \$8.550,00 | \$19.750,00 |

Fonte: elaborado pelos autores.

Constata-se que, apesar da análise do lucro global unitário por cliente, constante da *Tabela 3*, induzir a decisão de fornecimento de energia para o cliente IV em detrimento ao cliente III, a opção que maximiza o lucro global da empresa é o fornecimento para o cliente III.

Finalmente, deve-se ressaltar que as informações utilizadas são hipotéticas e possuem como único objetivo permitir a aplicação prática dos conceitos apresentados anteriormente, não constituindo dados reais do processo de geração termelétrica.

## 6. Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo apresentar a aplicação dos conceitos contemplados na teoria das restrições, desenvolvida por Goldratt, em uma situação prática da indústria de geração de energia termelétrica. No entanto, deve-se salientar que a identificação das restrições inerentes ao processo de geração e transmissão de energia elétrica não foi objeto, nem objetivo do escopo desta pesquisa. Isso porque, cada usina tem suas próprias particularidades, que irão influenciar em maior ou menor intensidade no processo de geração de energia.

Procurou-se, portanto, evidenciar de forma abrangente que o processo de gestão da TOC pode ser empregado nesse tipo de indústria para otimizar os problemas relativos a fornecimento de combustível; atendimento da demanda (ou cumprimento de contratos firmados), entre outras particularidades do processo que possam representar restrições às usinas termelétricas.

De acordo com os princípios da TOC, os esforços da empresa devem ser concentrados nas restrições que possam influenciar seu desempenho, ou seja, para a otimização do resultado global, a empresa deve concentrar-se em seus gargalos, o que irá impactar na otimização do sistema como um todo.

Apesar das críticas à TOC levantadas no presente artigo, deve-se observar que os instrumentos que a mesma se utiliza para gerenciar as restrições de um sistema e otimizar o lucro global da empresa são bastante úteis, na medida em que proporcionam uma melhor integração entre a Contabilidade Gerencial e os princípios da teoria das restrições, revestida por uma visão sistêmica.

## Referências Bibliográficas

AMBIENTE BRASIL. **Usina Termelétrica.** Disponível em: <http://www.ambientebrasil.com.br/composer.php3?base=./energia/index.html&conteudo=./energia/termelétrica.html>. Acesso em: 15/02/08.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Gás Natural.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/09-Gas\\_Natural\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicações/atlas/pdf/09-Gas_Natural(2).pdf). Acesso em: 17/02/08.

CEVEY, M. de J.; RODRIGUES, L. H. Desenvolvimento de uma abordagem metodológica para construção de painel de controle executivo, utilizando os conceitos do *balanced scorecard* e a sistemática de indicadores da teoria das restrições: uma aplicação para atividade de operadoras de planos de saúde. In: Congresso ANPCONT, I, 2007, Gramado/RS. **Anais ...** Gramado/RS: ANPCONT, 2007.

COGAN, S. **Contabilidade Gerencial**: uma abordagem da teoria das restrições. São Paulo: Saraiva, 2007.

GARRISON, R. H.; NOREEN, E. W. **Contabilidade gerencial**. 9 ed., Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2001.

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

GUERREIRO, R. **A meta da empresa**: seu alcance sem mistérios. 2 ed. São Paulo: Atlas, 1999.

\_\_\_\_\_. Os princípios da Teoria das Restrições sob a ótica da mensuração econômica. **Cadernos de Estudos**, n. 13, São Paulo, FIPECAFI, jan./jun. 1996.

HUSBY, P. Competition or complement: Six Sigma and TOC. **Material Handling Management**. Oct, 2007. p. 51-55.

LEITE, A. D. **A Energia do Brasil**. 2. ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica**: planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. 2 vol.

MARQUES, J. A. V. C.; CIA, J. N. S. Teoria das Restrições e Contabilidade Gerencial: Interligando Contabilidade à Produção. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo, v.38, n.3, p. 34-46, jul./set. 1998.

PLANTULLO, V. L. Um pouco além do Just-in-Time: uma abordagem à Teoria das Restrições. **Revista de Administração de Empresas**. São Paulo, v. 34, n.5, p.32-39, set./out. 1994.

SANTOS, O. M. ; SILVA, P. D. A. ; FURTADO, K. G. ; COGAN, S. A Teoria das Restrições no processo de refino de petróleo. In: Congresso USP Controladoria e Contabilidade, 6, 2006, São Paulo. **Anais ...** São Paulo: FEA - USP, 2006.