



# Estudo de viabilidade técnica de um sistema de cogeração para planta de processo, mangueiras hidráulicas

**Beethoven Narváez Romo**

Magíster en Ingeniería Mecánica, Energía y fluidos,  
Especialista en Energías Renovables, Eficiencia Energética y Generación Distribuida.  
Universidad de Sao Paulo, Brasil.

Ingeniero Mecánico. Universidad Nacional de Colombia - Medellín.  
betonarmo@gmail.com

## Resumo

A cogeração é empregada em diferentes campos da indústria e aplicações gerais, visando um melhor aproveitamento energético, tais como a indústria açucareira, termoelétricas, alimentícia, química, petroleira, só para mencionar algumas. No entanto, essa tecnologia não está sendo bem sucedida no Brasil devido às incertezas econômicas com os custos do combustível e a regulação da mesma. Este trabalho foi focado no estudo de um caso real na indústria de mangueiras de borracha, encontrando a melhor configuração em questões técnicas e econômicas. Para isto, foram levantados os valores atuais de operação do sistema convencional e comparados com os possíveis arranjos de cogeração. Os arranjos técnicos foram baseados nas configurações conhecidas na literatura; (1) *bottoming*, (2) *topping*. Além disso, foi realizado um estudo sobre um possível cenário de eficiência energética na configuração atual. Os resultados mostraram umas viabilidades técnicas e econômicas para o ciclo *topping*, tendo um tempo de retorno simples de 2,8 anos. No entanto, a configuração de eficiência energética não foi viável em termos econômicos devido ao custo do gás natural.

**Palavras chave:** Cogeração, *Topping*, *Bottoming*, Eficiência energética.

## 1. Introdução

A cogeração nasceu por uma necessidade evidente de dar melhor aproveitamento do combustível, já que as crises do petróleo dos anos 1973 e 1978 têm obrigado às companhias a procurar alternativas energéticas, como pode ser notado ao longo da história. A palavra cogeração foi instaurada pelos Estados Unidos da América – EUA no ano 1977, pelo presidente James Earl “Jimmy” Carter Jr., referindo-se à produção de eletricidade e outras formas de energia útil na mesma instalação. Foi finalmente definida em 1980, pela *Federal Energy Regulatory Commission – FERC* como a produção sequencial de energia elétrica ou mecânica e de energia útil, a partir da mesma fonte primária (Sala, 1999).

Atualmente, os sistemas de cogeração representam várias vantagens em comparação aos sistemas de produção de potência convencionais, porém o comportamento da cogeração está inerente aos preços dos combustíveis no mercado. Isto significa que pode existir um empreendimento tecnicamente viável, mas a dificuldade econômica não tem o mesmo comportamento, provocando desestímulo para fazer novos investimentos nessa área extremamente importante.

Na cogeração, a facilidade de operação, a confiabilidade dos sistemas, o maior fator de utilização energético, a versatilidade dos equipamentos junto com a necessidade diminuir os impactos ambientais visa um cenário positivo para esse tipo de projeto. Já que, por exemplo, eficiência conjunta de conversão de energia química dos combustíveis em energia útil 35-50% passa para valores perto de 85%, representando um ganho favorável para a instalação.

No Brasil, há vários empreendimentos de cogeração, porém, ainda existe grande potencial de crescimento. No entanto, não há uma política clara nesse campo como preço dos combustíveis, juros e encargos, autoprodução, etc.

O presente trabalho apresenta um estudo de cogeração para uma companhia dedicada à manufatura de mangueiras multiusos de borracha, visando apresentar uma alternativa energética integrada para melhor aproveitamento do combustível, baseado na existência de processos simultâneos e sequenciais, como são a geração de energia elétrica, a produção de frio e o aproveitamento de energia de baixa entalpia para processo de regeneração.

## 2. Desenvolvimento

### 2.1 Conceitos gerais

Ciclo de uma máquina de calor (*cyclic heat Power plant*): o escoamento passa ao longo de um circuito fechado, através de um ciclo termodinâmico, no qual o calor é recebido de uma fonte de alta temperatura (aquecimento indireto), o calor é rejeitado a um meio de baixa temperatura e o trabalho produzido é entregue, usualmente a um gerador elétrico.

Planta de potência (*Power plant*): faz referência a um circuito aberto, onde requer fonte térmica (normalmente provem do combustível), porém não há circulação dos gases de combustão no circuito. Entretanto, o seu desempenho pode ser avaliado como um sistema fechado de uma planta cíclica e pode ser calculado como:

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}}$$

*Heat rate*: chamado também de consumo específico, sendo o inverso da eficiência térmica, dado por:

$$HR = \frac{Q_{caldeira}}{W} = \frac{\dot{Q}_{caldeira}}{\dot{W}} = \frac{\dot{m}PCI}{\dot{W}}$$

Calor latente: é a energia necessária para que um fluido passe, desde a linha de líquido saturado até a linha de vapor saturado, isto à mesma pressão de operação.

Calor sensível: é a energia líquida usada unicamente para produzir um diferencial de temperatura no líquido quando interage com outro sistema ou com o meio.

Combustão estequiométrica: oxidação do combustível com a medida certa de comburente. Perto desse ponto, atinge-se a maior temperatura de chama adiabática.

Processo Isocórico: processo a volume constante.

Processo Isobárico: processo a pressão constante.

Processo Isotérmico: processo a temperatura constante.

Processo Isentrópico: processo a entropia constante.

Fator de utilização de energia (FUE): termo que relaciona a energia aproveitada de maneira simultânea (trabalho de eixo mais térmica) por uma unidade de energia consumida.

$$FUE = \frac{W + Q_u}{\dot{m}PCI}$$

Cabe ressaltar que esse parâmetro não é satisfatório pela diferença na qualidade de energia, assim, pode-se usar o rendimento equivalente em função dos preços da energia em forma de calor e eletricidade, ( $p_e$ ) e ( $p_c$ ), respectivamente (Sala, 1999).

$$\eta_{equiv} = \frac{W}{\dot{m}PCI} + \frac{p_e Q_u}{p_c \dot{m}PCI}$$

Ciclo de Carnot: ciclo ideal representado por dois processos isentrópicos e dois processos isotérmicos, em que é atingida a máxima eficiência possível de uma máquina térmica. Usa-se como referência de comparação e pode ser expresso em função das temperaturas de alto ( $T_H$ ) e baixo ( $T_L$ ) nível, sendo:

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

## 2.2 Cogeração

Define-se a cogeração como a geração simultânea e sequencial de duas ou mais formas de energia, tais como energia elétrica, calor ou produção de frio. A Figura 1 apresenta a comparação entre o sistema convencional e o de cogeração, verificando que há um aumento considerável no aproveitamento energético da mesma unidade de combustível. Pode-se ver que as perdas passam de 65% para 15%, significando menor poluição e maior economia. Cabe ressaltar que embora a Figura 1 seja esquemática, há processos reais que podem ter esses comportamentos energéticos.

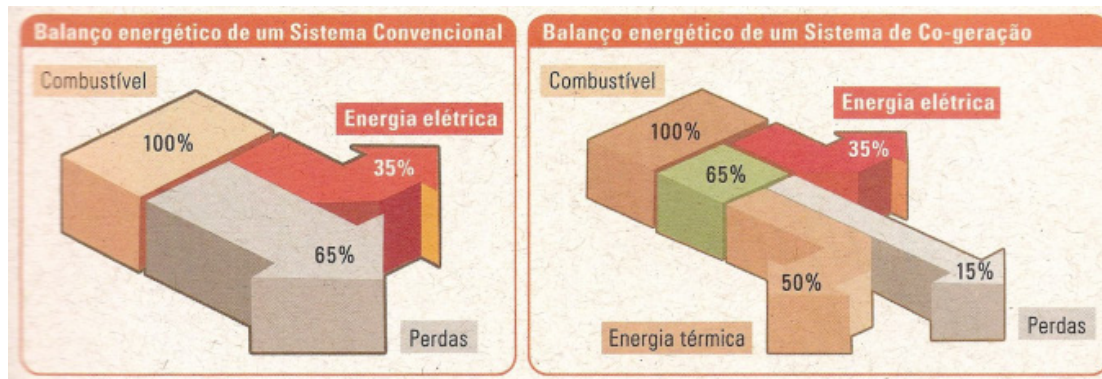


Figura 1. Comparação do balanço energético entre um ciclo convencional e um sistema de cogeração. Fonte: Andreos (2013).

Um sistema de cogeração pode ser classificado de acordo à satisfação da necessidade a ser suprida, seja a energia em forma de calor ou a energia elétrica. Assim, tem-se, o ciclo *bottoming* e o ciclo *topping*. A seguir, é explicado cada um deles.

### 2.2.1 Ciclo Bottoming

Nesse tipo de ciclo o combustível é queimado para produzir altas temperaturas, e calor é rejeitado do processo para produzir potência usando uma caldeira de vapor e um turbo gerador (Figura 2). As áreas típicas de aplicação são indústrias de cimento, cerâmicos, aço e gás, sendo menos comuns comparadas com as plantas *topping* (Thermal Energy Equipment, 2014). Em termos gerais, poderia resumir-se que o ciclo *bottoming* prioriza a demanda térmica em referência à demanda elétrica ou mecânica. Esse ciclo se viabiliza quando o combustível demandado é de baixo custo, como é encontrada nas usinas de cana-de-açúcar e indústria de papel e celulose (Andreas, 2013).



Figura 2. Ciclo Bottoming de cogeração. Fonte: Andreos (2013).

### 2.2.2 Ciclo Topping

Este tipo de ciclo o combustível é usado para produzir potência em primeiro lugar e energia térmica depois, sendo o mais popular na indústria da cogeração. Assim, o combustível inserido na câmara de combustão é empregado para produzir trabalho de eixo, convertendo-a em energia elétrica através de um gerador. Esse ciclo é vantajoso em relação ao ciclo *bottoming* devido ao postulado de Clausius-Kelvin, assim, a prioridade é dada sobre a energia de alta qualidade.



Figura 3. Ciclo Topping de cogeração. Fonte: Andreos (2013).

## 2.3 Descrição e configuração do processo de fabricação das mangueiras

O atual sistema utiliza de uma extrusora que produz as mangueiras continuamente, as quais seguem para uma piscina de resfriamento. A piscina é alimentada por dois *chillers* elétricos, com condensação a água. Após o resfriamento, as mesmas são encaminhadas para a vulcanização, processo que é alimentado

por uma caldeira que produz 8.000 kg/h de vapor de água, na temperatura de 185° C e pressão de 1,03 MPa, sendo impossível reaproveitar o vapor remanescente e o condensado por causa dos compostos corrosivos adquiridos durante o processo. A Figura 3 mostra o esquema da produção.

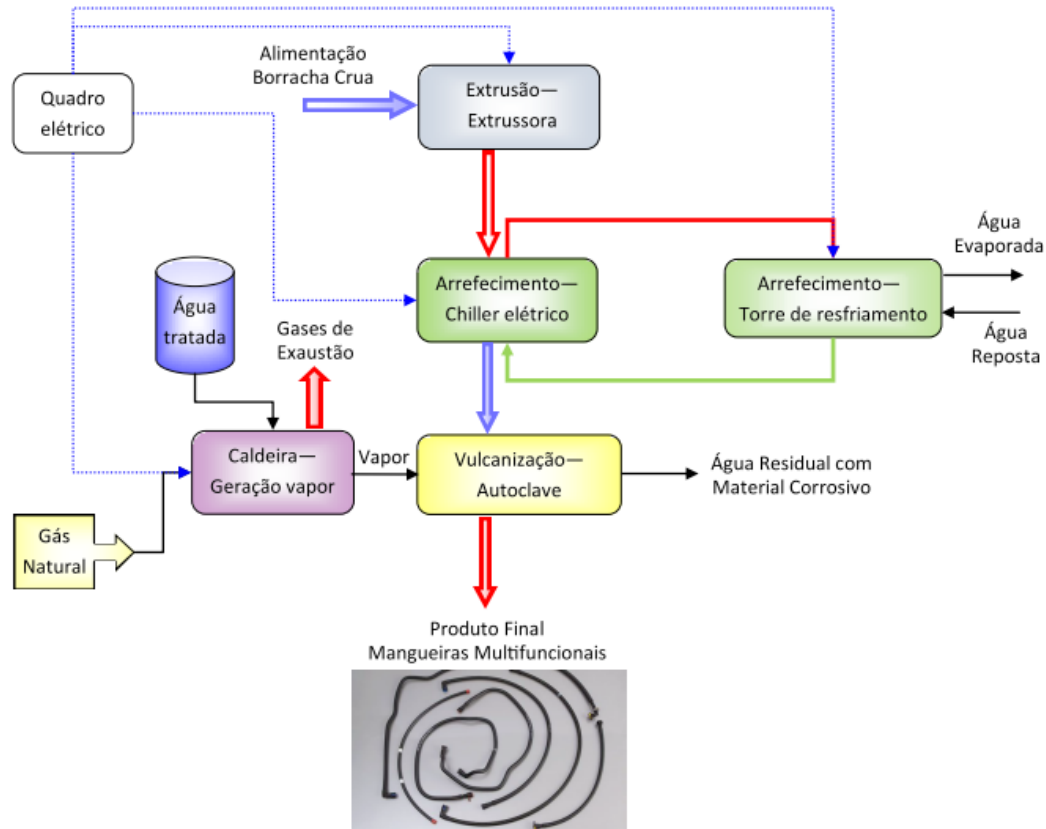


Figura 4. Representação esquemática do processo de produção de mangueiras multiusos.

Nesta configuração, os custos operacionais observados são do consumo de gás natural na caldeira, que gera vapor para o processo de vulcanização e, a demanda e consumo elétrico dos chillers. De forma a constituir uma linha de base de consumo para estabelecer comparações com as alternativas propostas, foram calculados os custos de cada sistema e comparados com as novas alternativas. É importante observar que os dados fornecidos pela empresa foram restritos, portanto, algumas premissas foram adotadas para completar os cálculos.

Os dados fornecidos do sistema elétrico são demanda contratada de 2.900 kW e a conexão da empresa é na rede da AES Eletropaulo, do tipo A4 e a tarifa é Verde.

Na geração de vapor, o consumo médio de gás natural é 658,4 m<sup>3</sup>/h, alcançando um volume mensal de 231.760 m<sup>3</sup>. Para o resfriamento das mangueiras antes do processo de vulcanização são utilizados dois chillers com potência elétrica de 10 kW cada, rendimento de 70%, que utilizam como fluido refrigerante o R-404 e entregam a água com uma temperatura de 8°C. A água é encaminhada para uma piscina que recebe as mangueiras da extrusão. Alerta-se aqui que a mesma é descoberta; se fosse coberta, evitaria a perda térmica para o ambiente, melhorando a eficiência do processo. Os chillers são do tipo condensação a água e, portanto, são alimentados com água de condensação que provem da torre de resfriamento.

### 3. Alternativas propostas para cogeração

A seguir, serão apresentadas propostas de cogeração para o sistema explicado, bem como as devidas análises econômicas.

### 3.1. Proposta Ciclo “Bottoming”

Conforme explicado anteriormente, o ciclo “bottoming” visa o atendimento da energia térmica necessária da planta e a produção de energia elétrica em segundo plano. Esta primeira proposta estabelece uma configuração de cogeração que procura atender toda a demanda térmica (Figura 3.2) da unidade industrial, independente da demanda elétrica.

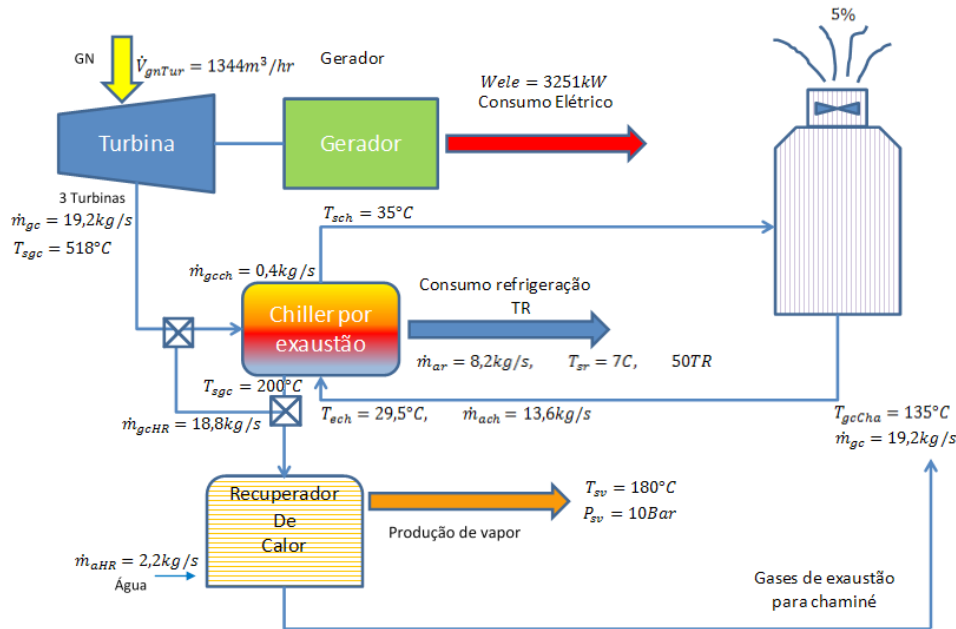


Figura 5. Representação esquemática do arranjo proposto para o ciclo “Bottoming”.

Como resultado, a geração de energia elétrica terá excedente na produção, que devem ser comercializados para melhorar o resultado financeiro da implantação. Para a geração de energia elétrica será utilizado três turbinas a gás, um recuperador de calor para geração de vapor e um chiller de absorção alimentado por gases de exaustão. As turbinas a gás, da marca *Turbomach*, modelo *Saturn 20*.

Após a saída dos gases, os mesmos são conduzidos ao recuperador de calor, que deverá gerar o vapor a ser utilizado no processo de vulcanização. Como a temperatura de saída de turbinas a gás é alta, este tipo de aproveitamento é comum principalmente na indústria.

### 3.2. Proposta Ciclo “Topping”

Nesta proposta, o ciclo “topping” visa o atendimento da demanda de energia elétrica, independente da demanda por energia térmica. Também serão utilizadas turbinas a gás, chiller de absorção e recuperador de calor, mas como o foco é o atendimento da demanda elétrica, será necessário um consumo adicional de gás natural para complementar a geração de vapor e aproveitamento térmico pelo chiller.

Apesar de se tratar de outro conceito de ciclo, os equipamentos selecionados serão os mesmos, porém, em quantidades ou capacidades diferentes (Figura 3.3). No caso das turbinas a gás, serão utilizadas apenas duas. Cabe ressaltar, embora haja outras referências de turbinas, a temperatura de saída foi a chave para a escolha. No caso do chiller, será o mesmo, pois, como mencionado anteriormente, a seleção do mesmo foi em função da capacidade térmica. Como a demanda térmica de resfriamento é pequena, foi selecionado o chiller com a menor capacidade térmica disponível. Também será utilizado um recuperador de calor, porém, com a diferença de que, neste caso, este recuperador deverá possuir um queimador auxiliar para complementar a carga térmica de aquecimento para geração de vapor. Além da geração de vapor, a queima auxiliar deverá fornecer calor suficiente aos gases de exaustão para serem aproveitados no chiller de absorção.

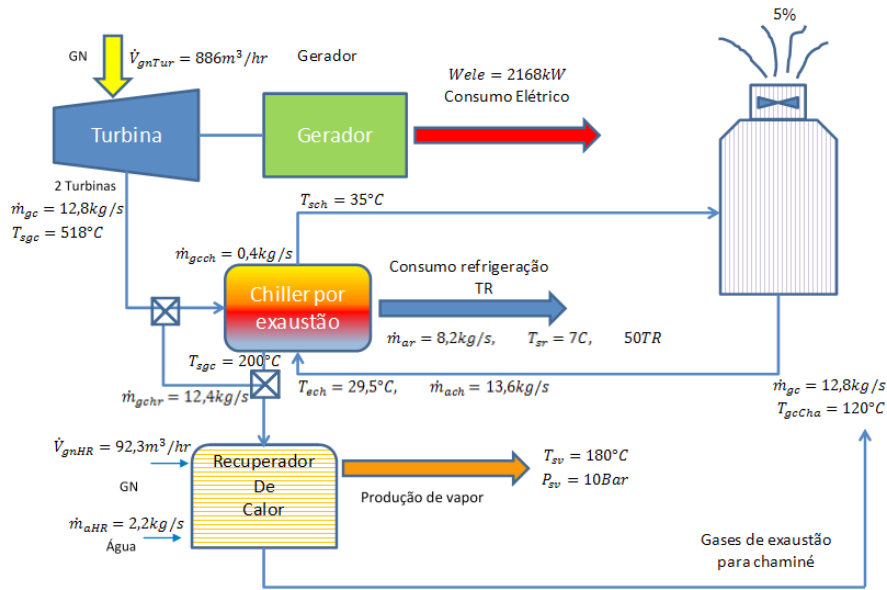


Figura 6. Representação esquemática do arranjo proposto para o ciclo “Topping”.

### 3.3 Ações de Eficiência Energética

Além dos resultados obtidos com a cogeração, também é possível fazer algumas modificações na instalação atual, visando o uso eficiente da energia. Atualmente, os gases de exaustão da caldeira são descarregados na atmosfera, sem nenhum aproveitamento da sua energia térmica. Apenas com o uso dos gases, pode-se substituir os chillers elétricos por um chiller de absorção, que aproveita a energia térmica dos gases para resfriar, reduzindo a demanda elétrica da instalação, e para o preaquecimento da água de ingresso à caldeira (Figura 3.4).

Estas ações podem ser realizadas com menores investimentos e no curto prazo, indicadas para o início de um processo de eficiência energética na empresa, que acarreta benefícios para os investidores, para o processo, o sistema elétrico brasileiro e o meio ambiente.

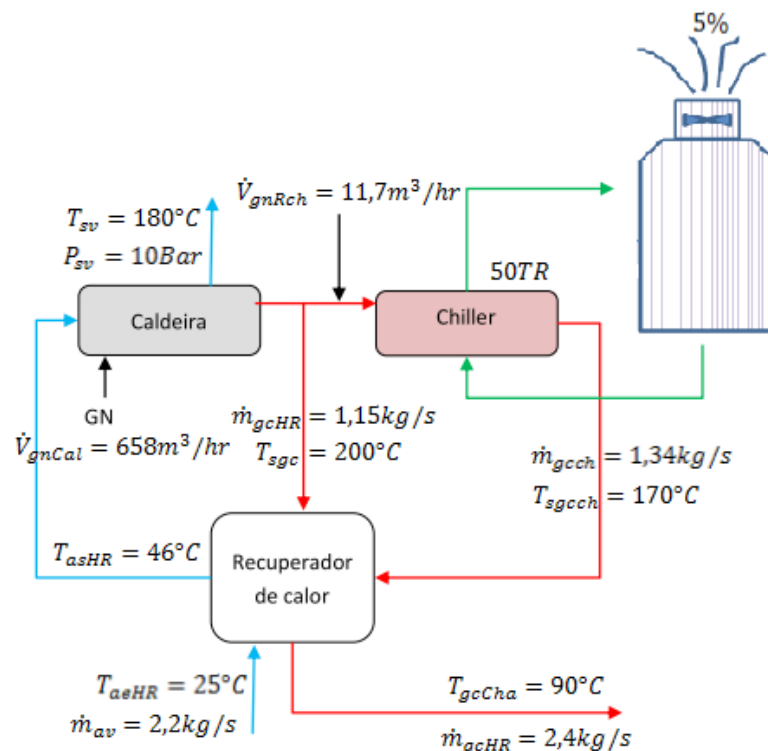


Figura 7. Representação esquemática da proposta de eficiência energética.



Para a sugestão proposta, seria necessário de uma queima suplementar de gás natural, visto que a temperatura dos gases de exaustão da caldeira é da ordem de 200°C e, a temperatura mínima de entrada no chiller é 275°C, que implica no consumo de 11,7 m<sup>3</sup>/h a mais de gás natural para operar o chiller de absorção.

#### 4. Conclusões

A cogeração é um tipo de geração distribuída que apresenta viabilidade técnica e muitas possibilidades de arranjos e equipamentos que podem ser utilizados. Infelizmente, muitos destes equipamentos ainda são importados, o que torna o investimento inicial alto, tornando o período de retorno maior.

Outra dificuldade na análise econômica é o fato das tarifas de gás natural terem aumentado constantemente nos últimos anos e, por outro lado, as tarifas de energia elétrica reduziram. Como a viabilidade econômica é estabelecida na comparação do custo de geração pela cogeração e pela tarifa de energia elétrica, muitos projetos foram abandonados por conta disso.

Atualmente, o Brasil enfrenta um momento delicado no setor energético. A exposição provocada pela estiagem reduziu a capacidade de geração hidrelétrica e aumentou a participação das térmicas centralizadas no setor elétrico, tornando a energia elétrica mais cara. Porém, pelas regras atuais, os consumidores só irão sentir estes efeitos na revisão tarifária do ciclo seguinte. O problema desta forma de tarifação é o sinal econômico errado ao consumidor, que durante o período de energia mais cara, ainda paga um preço que não reflete a realidade do setor. As bandeiras tarifárias serão implantadas para corrigir parte deste erro. Neste contexto, a cogeração deve ser incentivada para reduzir a demanda do sistema através do uso racional da energia e promover a eficiência energética e redução de perdas nas redes de distribuição.

Em alguns casos específicos, como no sistema analisado por este trabalho, que demanda um alto consumo de gás natural para geração de vapor para processo, torna a cogeração viável, principalmente pelo fato do aproveitamento térmico gerado pelas turbinas a gás e pela mudança nas tarifas, já que a cogeração tem incentivo e possui uma tarifa menor que para o segmento industrial.

#### Referencias

- Andreos, R. (2013). Slides de Aula – Cogeração. Especialização em energias renováveis, geração distribuída e eficiência energética. Programa de Educação Continuada em Engenharia da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Sala, J. (1999). Cogeneración: Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos. Universidade de País Vasco, Bilbao, Espanha.

#### Bibliografia

- ANEEL. (2014). Resolução Homologatória nº 1.759, de 03 de Julho de 2014. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/reh20141759.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- \_\_\_\_\_. (2006). Resolução Normativa nº 235, de 14 de Novembro de 2006. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- Arsesp. (2014). Deliberação ARSESP nº 496, de 27 de Maio de 2014. Disponível em <<http://www.arsesp.sp.gov.br/LegislacaoArquivos/ldl4962014.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2014.
- Brizuela, E. (2003). Apuntes de Clase para Turbomáquinas 67. UBA.
- Bureau of Energy Efficiency. Waste heat recovery. Disponível em <[http://beeindia.in/energy\\_managers\\_auditors/documents/guide\\_books/2Ch8.pdf](http://beeindia.in/energy_managers_auditors/documents/guide_books/2Ch8.pdf)>. Acesso em: 20 out. 2014.
- Çengel, Y. A., B. M. A. (2006). Termodinâmica. (5ª. Ed.). Mc Graw Hills. ISBN 85-86804-66-5
- Frank, J. Gas turbine performance characteristics. Power Systems. Schenectady, NY. GER-3567H. pp. 1-16.
- Narváez, R. (2015) Monografia. Estudo de viabilidade técnico-econômica de cogeração e eficiência energética aplicada ao processo de fabricação de mangueiras multiusos. Universidade de São Paulo, Brasil.
- Simões-Moreira, J. (2012). Aplicações da termodinâmica. Notas de aula. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica. Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos - SISEA.

Thermal Energy Equipment – Cogeneration. Energy Efficiency Guide for industry in Asia. Disponível em <[www.energyefficiencyasia.org](http://www.energyefficiencyasia.org)>. © UNEP. Pag. 1-19. Acesso em: 20 out. 2014.

Thermax India. (2014). Catálogos Técnicos. Disponível em <<http://www.thermaxindia.com/Absorption-Cooling/Products/Vapour-Absorption-Machines/Exhaust-Vapour-Absorption-Machine.aspx>>. Acesso em: 07 nov. 2014.