

Avaliação da Performance em uma Caldeira de Recuperação de Calor com a Utilização de Tubos Aletados Tipo H

L. S. Passos* . L. O. Guimarães**

V. S. Monteiro*** M. Z. Fortes**** J. G. Pacheco, Jr.***** R. C. Furtado*****

*Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.
(e-mail: lspassos@id.uff.br).

**Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.
(e-mail: lucasguimaraes@id.uff.br).

***Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.
(e-mail: victor_monteiro@id.uff.br).

**** Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ, Brasil.
(e-mail: mzamboti01@gmail.com).

***** Ternium, Santa Cruz, RJ, Brasil.
(e-mail: jose.pacheco@hotmail.com).

***** Ternium, Santa Cruz, RJ, Brasil.
(e-mail: furtado.rafael@outlook.com)

Abstract: This paper presents a case study applied to a heat recovery boiler located at a coke production plant of an integrated steel mill located in the state of Rio de Janeiro. In this case study the thermal efficiency was evaluated by replacing the evaporator and economizer finned tubes. The results showed an increase in boiler performance after modification. In addition, the proposal proved financially favorable with short payback time.

Resumo: Este artigo apresenta um estudo de caso aplicado a uma caldeira de recuperação de calor instalada em uma planta de produção de coque de uma siderúrgica integrada localizada no estado do Rio de Janeiro. Neste estudo de caso foi avaliada a eficiência térmica da caldeira a partir da substituição dos tubos aletados do economizador e do evaporador. Os resultados mostraram um aumento na performance da caldeira após a modificação. Além disso, a proposta se mostrou favorável financeiramente economizando com manutenção e um tempo de *payback* relativamente curto.

Keywords: Boilers; Energy Efficiency; Cogeneration; H-Type Finned Tubes; Evaporator; Economizer.

Palavras-chaves: Caldeiras; Eficiência Energética; Cogeração; Tubos Aletados Tipo H; Evaporador; Economizador.

1. INTRODUÇÃO

Cogeração é o termo utilizado quando se tem a conversão de duas ou mais formas de energia, a partir de um ou mais combustíveis. Com isso, pode-se, por exemplo, converter a energia térmica oriunda de um processo de geração de calor em energia elétrica.

A cogeração é uma técnica antiga, mas que tem sido bastante explorada, devido à atual crise energética, como observa Raj et al. (2011). A grande vantagem dessa técnica é a possibilidade de se reduzir perdas, através do reaproveitamento de energias vindas de processos diferentes. Um sistema de cogeração gerando eletricidade e calor, por exemplo, é bem mais eficiente que dois sistemas que gerem esses produtos separadamente, e pode ser utilizada como sistema de conversão de energia elétrica total ou parcial em alguns setores industriais.

Em consequência da preocupação com o meio ambiente, há o desejo de se ter processos cada vez mais eficientes. Um dos pontos do processo de cogeração que pode ser analisado com relação à eficiência energética é o desempenho da caldeira.

O artigo apresenta um estudo de caso que objetiva analisar a performance desse tipo de equipamento com relação ao aparecimento de uma grande área de incrustação nos tubos aletados do economizador e do evaporador. Esse estudo foi baseado em uma caldeira localizada em uma planta de produção de coque de uma siderúrgica da cidade do Rio de Janeiro sob as tais condições. Foi verificado que esse acúmulo de resíduos nas aletas dos tubos reduz a troca térmica e aumenta perdas, o que impacta na eficiência do sistema. Além da redução no desempenho, há ainda um aumento no número de paradas para manutenção, reduzindo a duração de uma campanha, que no caso do projeto deveria ser de 6 meses, mas que na situação esse período foi reduzido

pela metade. É chamado de campanha o período de funcionamento da caldeira entre as paradas para manutenção.

De acordo com alguns estudos, como Jin et al. (2013) e Chen et al. (2014), tubos aletados tipo H possuem boa troca térmica e baixa área de depósitos de resíduos e, além disso, esse tipo de componente tem uma função de autolimpeza. Devido a essas características, este tipo de tubo tem sido amplamente utilizado em caldeiras no setor industrial.

Assim, uma possível solução a ser testada é a substituição dos tubos do economizador e do evaporador, que são do modelo de aletas espirais, por tubos aletados do tipo H.

Então, com o objetivo de aprimorar a caldeira, serão feitas análises das condições anteriores e posteriores à modificação, para que seja possível mensurar as melhorias no desempenho e na eficiência da mesma. Cabe destacar que o equipamento em análise faz parte de uma central termelétrica que produz parte da energia elétrica utilizada no complexo industrial em estudo e que a melhoria da performance deste equipamento significa um aumento da energia gerada de forma direta, devido a um melhor aproveitamento do volume de vapor produzido.

2. A CALDEIRA

A caldeira é um sistema de geração de vapor comumente utilizado em indústrias e em plantas de conversão de energia. Segundo Macintyre (2011), são equipamentos destinados a mudar o estado da água, do líquido para o vapor, a fim de ser utilizado em acionamento de máquinas motrizes, que neste caso em específico é uma turbina a vapor para a conversão de energia elétrica.

A NR-13 (2017) define caldeira como “equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refratores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo”.

A caldeira avaliada é do tipo aquatubular. Nesse tipo de caldeira, os gases de combustão passam por fora dos tubos, aquecendo-os e realizando a troca térmica com a água que flui pelo interior dos tubos, gerando então o vapor.

A caldeira tem configuração vertical e é composta por 1 tambor, 4 paredes de água, 2 super aquecedores, 2 evaporadores e 1 economizador, produzindo vapor superaquecido a uma vazão de 40 t/h, com pressão de 80MPa e temperatura de 540 °C. A seguir serão descritos os principais equipamentos dessa caldeira.

2.1 Evaporador

O evaporador é o principal trocador de calor da caldeira. É projetado especificamente para fornecer a um fluido o seu calor latente de vaporização. De maneira geral, um evaporador, segundo Barbieri (2018), é qualquer superfície de transferência de calor na qual o líquido volátil é vaporizado, removendo calor de um espaço ou material. O formato da superfície para absorver a carga térmica

necessária é objeto de diversos estudos. Sua dinâmica é complexa principalmente devido a mudança de fase do refrigerante no interior dos tubos, variando bastante a transferência de calor e, portanto, seu desempenho, como explica Wattlelet, (1994).

De acordo com Jia et al. (1999), os evaporadores são fabricados em uma grande variedade de tipos, tamanhos e formas. Isso se deve não apenas ao fato de serem equipamentos alvo de muitos estudos, mas principalmente devido as inúmeras aplicações em sistemas de refrigeração.

Neste artigo, a caldeira analisada dispõe de duas seções de evaporador, sendo a primeira de tubos lisos e arranjo linear e a segunda de tubos com aletas espirais e arranjo triangular, como mostra a Fig. 1.

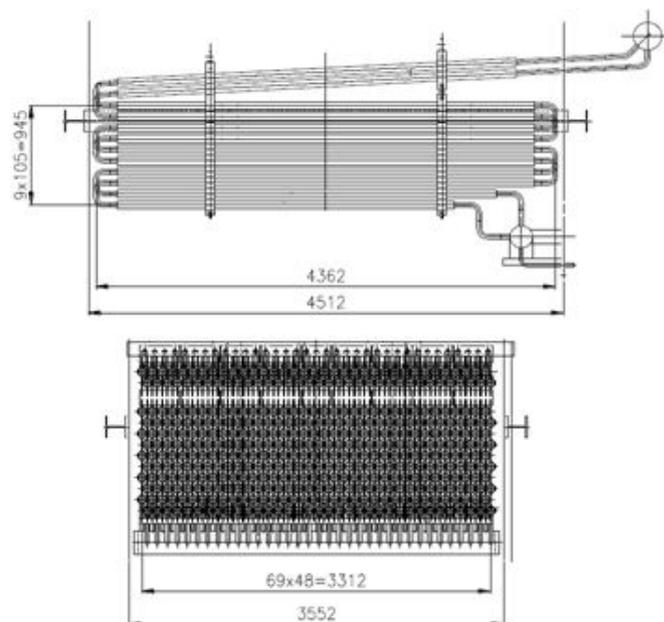


Fig. 1: Arranjo do evaporador original de projeto

2.2 Economizador

O economizador é um dispositivo que tem o objetivo de aumentar a eficiência da caldeira, aumentando seu rendimento global e diminuindo os custos operacionais ao longo do tempo. Segundo Ponte, Barbosa e Rufino (2010), em sistemas que envolvem o uso de caldeiras, parte dos subprodutos da combustão são ventilados e perdidos, representando perda de eficiência para a caldeira.

Economizadores funcionam como recuperadores de calor. Ao invés do calor da combustão dos subprodutos serem totalmente perdidos, ele é então aproveitado para pré-aquecer a água, de modo que menos calor é necessário para produzir o vapor de processo. Para essa função, o economizador é basicamente um trocador de calor que através do calor sensível dos gases de combustão saindo da caldeira, aquecem a água de alimentação. Conforme ilustra Panchal (2018), na Fig. 2 é apresentado e destacado em vermelho, o posicionamento de um economizador instalado em uma caldeira.

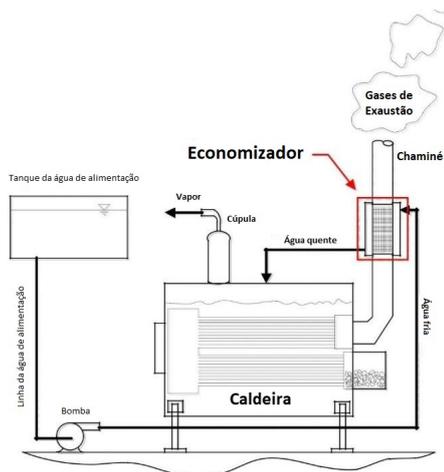


Fig. 2: Diagrama de uma caldeira com economizador.

Além disso, o uso de economizadores também estende a vida útil da caldeira. Quando a água de alimentação é previamente aquecida, o diferencial de temperatura é menor, diminuindo efeitos mecânicos nocivos referentes a dilatação térmica.

A caldeira analisada neste estudo de caso possui economizador de tubos com aletas espirais e arranjo triangular. O modelo e dimensões estão exibidos na Fig. 3.

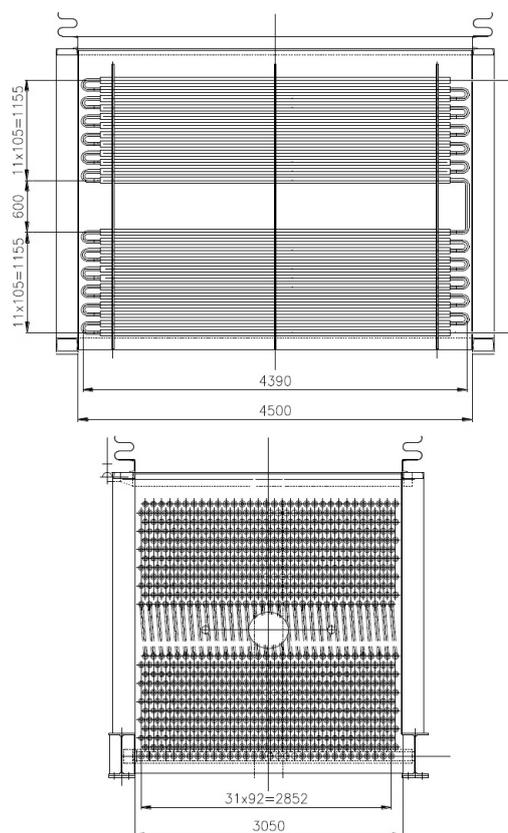


Fig. 3: Arranjo do economizador existente.

2.3 Superaquecedor

O superaquecedor é formado por serpentinas, tubos lisos e aletados. Sua função é aumentar a temperatura do vapor saturado que sai da caldeira, mas sem aumentar sua pressão. Portanto, quando o vapor gerado circula pelo superaquecedor, o mesmo se encontra então superaquecido, que é apropriado para aplicações mecânicas, como por exemplo no acionamento de turbinas. O vapor com menos umidade é benéfico para a eficiência termodinâmica do sistema, uma vez que diminui a ocorrência de erosão das pás das turbinas.

Segundo Zhu e Ren (2012), os equipamentos de acionamento de vapor são projetados para operar com vapor superaquecido. No entanto, os superaquecedores também são utilizados em processos em que há aplicação direta do vapor gerado, aumentando a eficiência global do sistema.

2.4 Paredes d'água

As paredes d'água são tubos que revestem a fornalha, absorvendo o calor radiante da chama. Dessa forma, a água no interior dos tubos de troca térmica é vaporizada, aumentando a eficiência geral da caldeira.

Segundo Pang e Duan (2019), a disposição dos tubos ao redor da câmara de combustão para extrair o calor de combustível para gerar vapor é designada de circuito de parede de água. Estas podem ser dispostas em linha ou em escalonamento e tratam-se de tubos refrigerados pela própria água.

As paredes de água absorvem o calor de radiação e absorvem aproximadamente 50% do calor total produzido na câmara de combustão.

3. O ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi motivado pela queda de performance da caldeira no decorrer de uma campanha. Pelo projeto inicial, a campanha teria duração de seis meses, porém, na prática o período entre paradas para manutenção era de três meses.

Diante dessa condição, observou-se que havia um acúmulo de resíduos nos tubos aletados do economizador e do evaporador, o que reduz a troca térmica e gera um aumento da perda de carga no equipamento, impactando na eficiência do sistema. O material acumulado é proveniente dos gases gerados pela coqueria.

3.1 – Condição inicial

O economizador e o evaporador foram projetados com tubos aletados na forma de espiral, o que facilita o acúmulo de sujeira. Na Fig. 4 é apresentado o acúmulo de resíduos nos componentes, reduzindo a área disponível para troca térmica.



Fig. 4: Tubos aletados com incrustação.

Na Fig. 5 são apresentados os mesmos componentes após a realização de manutenção periódica. Nota-se uma melhora significativa. Entretanto, o formato em forma de espiral dificulta a perfeita limpeza, fazendo com que permaneçam resíduos entre as aletas dos tubos.



Fig. 5: Tubos aletados após a limpeza.

Além das perdas, mencionadas anteriormente, o acúmulo de resíduos gera outros problemas, como:

- Redução de produção de vapor e energia;
- Aumento do número de paradas para limpeza, acarretando na redução do período de uma campanha;
- Elevação da taxa de corrosão e desgaste dos tubos das caldeiras;
- Maior custo de manutenção;

3.2 – Modificação

Neste estudo de caso, a ideia para mitigar o problema de incrustação foi a substituição dos tubos aletados em forma de espiral por tubos aletados tipo H com arranjo linear, que tem propriedades vantajosas em relação ao acúmulo de resíduos. Vale ressaltar que não houve alteração no diâmetro e na espessura dos componentes modificados em relação aos valores de projeto. Na Fig. 6 é apresentado o novo formato instalado. Essas substituições foram realizadas no economizador e no evaporador da caldeira.



Fig. 6: Tubos aletados tipo H.

4. RESULTADOS TÉCNICOS

Para efeito de comparação entre as situações pré-modificação e pós-modificação, foram coletados dados dos medidores de geração de vapor e de temperatura de saída de gases da caldeira. Em maio de 2019 a caldeira passou a funcionar após a modificação ser feita e testes necessários serem realizados. E este estudo foi finalizado no início de dezembro do mesmo ano. Por isso, o período escolhido para análise foi a partir do mês de maio até o mês de novembro, comparando o desempenho no ano de 2018 (antes da modificação) com o desempenho em 2019.

Uma observação importante é que em 2018, no período considerado para análise, foram feitas duas paradas para limpeza dos tubos aletados. Já no ano de 2019 ainda não foi necessário interromper o funcionamento da caldeira para fazer limpeza, inclusive o período da campanha ultrapassou o tempo previsto inicialmente, que era de 6 meses.

4.1 – Geração de vapor

Na Fig. 7 é apresentado um comparativo entre a geração de vapor antes e depois da modificação. Nota-se que, em 2018 a caldeira apresentava valores médios mensais entre 31,06 t/h e 37,23 t/h. Já na condição atual, a produção fica na faixa de 37,57 t/h a 43,06 t/h. É importante observar que, com a modificação no evaporador e no economizador, os valores ficaram próximos ao valor de projeto. Na Tabela 1 é apresentada a média do período de análise para ambos os casos, comparando com o valor de projeto.

5. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

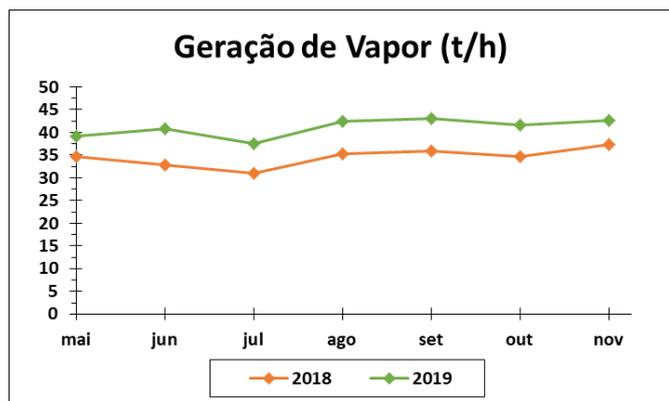


Fig. 7: Gráfico da geração de vapor da caldeira.

Tabela 1. Geração de vapor – valor médio

Medidas	Valor de Projeto	Antes da modificação	Após da modificação
Geração de Vapor (t/h)	45,60	34,52	41,03

4.2 – Temperatura de saída dos gases

Na Fig. 8 é apresentada a temperatura dos gases de saída da caldeira. Na condição pré-modificação, a temperatura oscilou entre os valores médios mensais 322,9 °C e 265,9 °C. Após a modificação, a temperatura ficou entre 165,7 °C e 223,6 °C. Fazendo a média desses meses, pode-se comparar com o valor de projeto. Na Tabela 2 são apresentados o valor de projeto da temperatura dos gases de saída da caldeira e as médias das condições pré-modificação e pós-modificação. Vale observar que, como Barma et al. (2017) apresentaram, valores mais baixos de temperatura dos gases de saída representam maior eficiência para a caldeira.

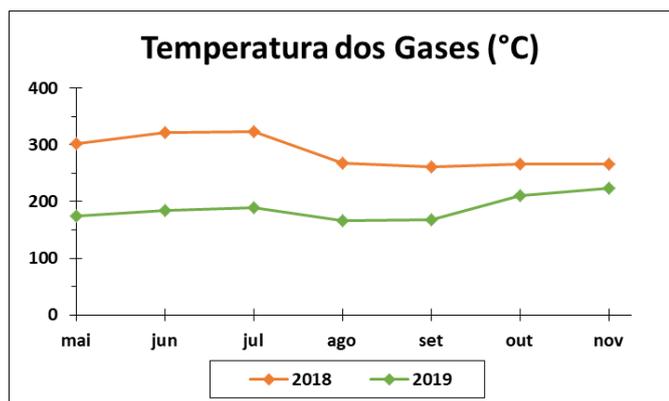


Fig. 8: Gráfico de temperatura de saída dos gases da caldeira.

Tabela 2. Temperatura de saída dos gases

Medidas	Valor de Projeto	Antes da modificação	Após da modificação
Temperatura (°C)	192,2	286,7	187,8

Conforme apresentado no tópico anterior deste trabalho, a modificação realizada na caldeira gerou aumento na performance do equipamento e, conseqüentemente, ganhos financeiros foram observados através da redução no número de limpezas e do aumento da geração de vapor.

Uma vez que não existem valores de geração de vapor da caldeira após a modificação em um período de um ano, os cálculos financeiros foram feitos considerando a média dos valores existentes e comparando-se com a média do mesmo período da situação anterior à substituição dos tubos aletados. Então, utilizando os valores médios de 34,52 t/h e 41,03 t/h, da Tabela 1, e os transformando para toneladas por ano, chegou-se aos valores médios de geração de vapor por ano de 302.395,2 t e 359.422,8 t. Isso resulta em um aumento de geração de vapor de 57.027,6 t/ano. A empresa forneceu o valor monetário para o vapor produzido, que foi de R\$ 77,27 por tonelada. Assim, calculando o produto do aumento de geração de vapor por esse valor, chega-se ao resultado de um ganho de R\$ 4.406.522,65 por ano. A empresa também forneceu dados do ganho com a redução da quantidade de limpezas dos tubos aletados e do custo da substituição desses componentes da caldeira. Com isso, foi possível calcular o *payback* dessa melhoria no equipamento, que resultou em 1,2 ano. Na Tabela 3 são apresentados os valores organizados. Vale observar também que a melhoria na performance da caldeira impacta positivamente na geração de energia elétrica.

Tabela 3. Avaliação Econômica

Descrição	Após a Modificação
Produção da caldeira (kt/ano)	359
Aumento da produção (kt/ano)	57,03
Ganho com Geração de Vapor (R\$/ano)	4.406.708,10
Ganho com redução no número de limpezas (R\$/ano)	50.000,00
Custo de substituição dos tubos aletados (R\$)	5.420.000,00
<i>Payback</i> (anos)	1,2

6. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentada uma forma de se obter uma considerável melhoria em um sistema de cogeração modificando a forma construtiva de componentes da caldeira de recuperação de calor, neste caso os tubos aletados do economizador e do evaporador, sem alterar a quantidade de combustível nem adicionar um novo equipamento ao sistema. Para o estudo em questão, pode-se perceber a vantagem de se utilizar os tubos aletados tipo H para mitigar o problema de incrustação, aumentando a performance da caldeira, devido à

melhora na troca térmica entre o gás de combustão e a água no interior dos tubos.

Como o vapor gerado é utilizado na alimentação de uma turbina para conversão de energia elétrica, a redução das perdas no desempenho da caldeira resulta em um ganho na conversão de energia elétrica, que consequentemente reduz a quantidade de energia elétrica requerida da rede externa. Ressalta-se que, as demais características da caldeira foram mantidas, o projeto de modificação do economizador e do evaporador buscaram manter as especificações de projeto, como capacidade de geração de vapor, temperatura em diferentes pontos, dentre outros requisitos.

Esse trabalho não tem como objetivo ser um guia para melhora de performance em caldeiras, sendo apenas uma avaliação de um caso específico, portanto, cada caso deverá ser analisado individualmente. Os resultados foram obtidos atuando na mitigação do problema de incrustação, portanto, pode-se avaliar outras formas de mitigar esse problema.

REFERÊNCIAS

- Barbieri, P.E. (2001). Análise Dinâmica de Evaporadores de Serpentina com Tubos Aletados. UNESP, São Paulo.
- Barma, M.C., Saidur, R., Rahman, S.M.A., Allouhi, A., Akash, B.A., and Sait, S.M. (2017). A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 79, 970-983.
- Chen, H., Wang, Y., Zhao, Q., Ma, H., Li, Y., and Chen, Z. (2014). Experimental Investigation of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of H-type Finned Tube Banks. *Energies*, volume 7, 7094-7104.
- Jia, X., Tso, C. P., Jolly, P. e Wong, Y. W. (1999). “Distributed Steady and Dynamic of Dry Expansion Evaporator”, *International Journal of Refrigeration*, vol. 22, pp. 126-136.
- Jin, Y., Tang, G.H., He, Y.L., and Tao, W.Q. (2013). Parametric study and field synergy principle analysis of H-type finned tube bank with 10 rows. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, volume 60, 241-251.
- Macintyre, A.J. (2011). *Equipamentos industriais e de processo*. LTC, Rio de Janeiro.
- Ministério do Trabalho e Emprego do Brasil. (2017) *Norma Regulamentadora 13 – NR 13*, item 13.1.1.
- Panchal, A. (2018). “Heat Transfer and Flow Characteristics of spiral Fin and Tube Heat Exchanger”. Pandit Deen Dayal Petroleum University, India.
- Pang, L., Duan, L. (2019). “Thermal Stress and Cyclic Stress Analysis of a Vertical Water-Cooled Wall at a Utility Boiler under Flexible Operation”. *Energies*. 12. 1170. 10.3390/en12061170.
- Ponte, R. S., Barbosa M. A., Rufino M. G. (2010). “Eficiência Energética em Caldeiras”. *Energia 2030: Desafios para uma nova Matriz Energética*, São Paulo.
- Raj, N.T., Iniyan, S., and Goic, R. (2011), A review of renewable energy-based cogeneration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 15, 3640-3648.
- Wattelet, J. P. (1994). “Heat Transfer Flow Regimes of Refrigerants in a Horizontal-Tube Evaporator”. University of Illinois, Urbana-Champaign.
- Zhu, R., Ren, J. (2012). “Numerical Analysis of Stress and Temperature Coupled Field for Boiler Superheater in Thermal Power Plant”. *Applied Mechanics and Materials*, 241–244, 2139–2143.