

ESTUDO DE DIFERENTES ARQUITETURAS PARA SISTEMAS DE TRIGERAÇÃO COM APLICAÇÃO  
EM UM CASO DE CENTRO COMERCIAL

Vinícius Monnerat do Egito Coelho - vinicius\_egito@globo.com

José Alberto Reis Parise – parise@puc-rio.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, www.mec.puc-rio.br

S1 - Sistemas de ar condicionado e aquecimento

**Resumo.** *No presente trabalho é realizada análise comparativa entre diferentes arquiteturas de projetos de trigerção (produção simultânea de refrigeração, aquecimento e eletricidade). Foi desenvolvido um modelo termodinâmico básico levando em conta as características gerais de cada componente do sistema e a variação das demandas energéticas (frio, calor, eletricidade). O uso da trigerção visa a redução do consumo de combustível primário mediante o aproveitamento do calor rejeitado pelo motor térmico. Um estudo de caso é apresentado a partir de demandas reais de um centro comercial em Hong Kong, com dados disponíveis na literatura. Nele são estudadas três arquiteturas de sistemas de trigerção, com acompanhamento à eletricidade e à refrigeração, que se diferenciam, basicamente, pelo tipo de chiller existente: de absorção ou de compressão de vapor, e em sistemas derivados destes. Ao final do estudo, será confirmada a eficácia dos sistemas de trigerção em se reduzir o consumo de combustível primário.*

**Palavras-chave:** trigerção, cogeração, demandas

## 1. INTRODUÇÃO

Trigerção, ou CCHP (da expressão, em inglês, "Combined Cooling Heating and Power"), diz respeito à produção simultânea de eletricidade, aquecimento e refrigeração. Origina-se na geração térmica de energia elétrica, a partir de um motor térmico, o qual pode ser uma turbina a gás ou um motor a combustão interna, queimando qualquer tipo de combustível, como, por exemplo, gás natural, gasolina, óleo diesel, biodiesel, biogás, etanol, entre outros. Um sistema é dito de cogeração se o calor de rejeito do motor térmico (exaustão ou arrefecimento, se existente) for recuperado para atender, total ou parcialmente, a outra demanda energética, que pode ser de aquecimento ou de refrigeração (esta última, por meio de algum ciclo de refrigeração acionado termicamente). Quando são três as demandas energéticas, isto é, eletricidade, aquecimento e refrigeração, tem-se um sistema de trigerção. A utilização do calor de rejeito confere, inegavelmente, uma vantagem energética a sistemas de trigerção, quando comparados a sistemas convencionais. A literatura sobre sistemas de trigerção é vasta, podendo-se citar três recentes revisões sobre o assunto por Al-Sulaiman *et al.* (2011), Mago *et al.* (2009) e Wu e Wang (2006).

O presente trabalho estudará três diferentes configurações de sistemas de trigerção, comparando-as a um sistema convencional, sem recuperação de calor de rejeito. O estudo terá como premissa o atendimento integral às três demandas energéticas (eletricidade, refrigeração e aquecimento), a partir de um único combustível primário. Um caso, disponível na literatura, será estudado: um complexo comercial em Hong Kong.

## 2. ARQUITETURAS BÁSICAS PARA SISTEMAS DE TRIGERAÇÃO E BALANÇOS DE ENERGIA

As arquiteturas abaixo descritas diferem entre si pelo modo como o calor de rejeito é aproveitado e como o efeito refrigerante é obtido (ciclo de compressão de vapor, acionado eletricamente, ciclo de absorção, acionado termicamente, ou a combinação dos dois). O sistema sem co-geração é incluído, para efeito de comparação. Têm-se como premissas para o presente estudo: (i) o atendimento integral às três demandas; (ii) a dependência integral do sistema a uma única fonte de combustível, não se cogitando a possibilidade de conexão a uma rede elétrica externa; (iii) não há termoacumulação, de fluido quente ou refrigerado; (iv) a recuperação de calor de rejeito ocorre a níveis de temperatura adequados.

### 2.1 Sistema sem cogeração

O sistema sem cogeração, isto é, sem a recuperação dos calores de rejeito (expressos em termos de taxa) na exaustão,  $\dot{Q}_{ex}$ , e no arrefecimento,  $\dot{Q}_{ec}$ , é apresentado na Fig. 1. Energia elétrica é produzida no gerador, com eficiência  $\eta_{ge}$ , acionado pelo motor térmico com eficiência térmica  $\alpha_{es}$ . A energia elétrica produzida se divide entre a demanda elétrica,  $\dot{E}_{lo}$  - o gerador acompanha a demanda de energia elétrica, e o consumo pelo "chiller" de compressão de vapor,  $(\dot{Q}_{co}/COP_{vc})$ , com coeficiente de desempenho  $COP_{vc}$  e que acompanha a demanda de refrigeração,  $\dot{Q}_{co}$ . A

demanda de aquecimento,  $\dot{Q}_{ht}$ , é atendida por um aquecedor ("boiler") que consome o combustível primário com uma eficiência  $\eta_{bo}$ .

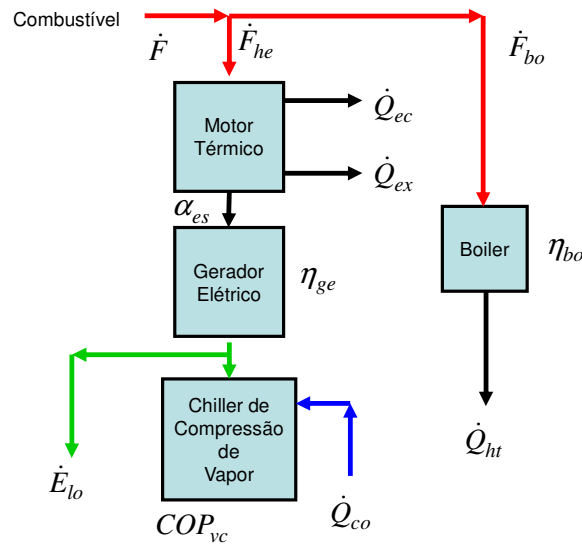


Figura 1. Sistema sem cogeração.

O consumo de combustível, em termos de taxa de energia,  $\dot{F}_I$ , é igual à soma dos consumos do motor térmico,  $\dot{F}_{he}$ , e do sistema de aquecimento,  $\dot{F}_{bo}$ :

$$\dot{F}_I = \dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo} = \left[ \left( \dot{E}_{lo} + \frac{\dot{Q}_{co}}{COP_{vc}} \right) \frac{1}{\eta_{ge} \alpha_{es}} \right] + \frac{\dot{Q}_{ht}}{\eta_{bo}} \quad (1)$$

## 2.2 Trigeração com chiller de compressão de vapor

Nesta configuração, já estudada por Parise *et al.* (2011), o calor de rejeito é todo direcionado para atender à demanda de aquecimento, com o "boiler" atuando no caso de o calor de rejeito recuperado (exaustão e arrefecimento do motor térmico e condensador do chiller) não ser suficiente para atender à demanda de aquecimento. Os calores de rejeito do motor térmico, via exaustão e arrefecimento (se existente) são calculados a partir do balanço energético do motor, que fornece as frações de energia direcionadas a estes fins,  $\alpha_{ex}$  e  $\alpha_{ec}$ , e das efetividades térmicas dos sistemas recuperadores de calor,  $\epsilon_{ex}$  e  $\epsilon_{ec}$ . O consumo do motor térmico,  $\dot{F}_{he}$ , mantém-se inalterado em relação ao sistema sem cogeração. Por outro lado, reduz-se a queima de combustível no sistema de aquecimento,  $\dot{F}_{bo}$ . Se a demanda de aquecimento for menor que o calor recuperado esta taxa de consumo se torna nula.

O consumo total de combustível é, portanto:

$$\dot{F}_{II} = \dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo} = \left[ \left( \dot{E}_{lo} + \frac{\dot{Q}_{co}}{COP_{vc}} \right) \frac{1}{\eta_{ge} \alpha_{es}} \right] + \max \left\{ 0, \frac{\dot{Q}_{ht}}{\eta_{bo}} - \left[ \dot{F}_{he} (\alpha_{ec} \epsilon_{ec} + \alpha_{ex} \epsilon_{ex}) + \dot{Q}_{co} \left( 1 + \frac{1}{COP_{vc}} \right) \right] \right\} \quad (2)$$

## 2.3 Trigeração com chiller de absorção

A demanda de refrigeração, na configuração da Fig. 3, é atendida exclusivamente por um chiller de absorção, com coeficiente de desempenho  $COP_{ab}$  e acionado termicamente pelo calor de rejeito do motor térmico. Se este for insuficiente para acionar o chiller na potência frigorífica desejada, queima-se combustível diretamente no chiller de absorção, complementando a energia térmica necessária.

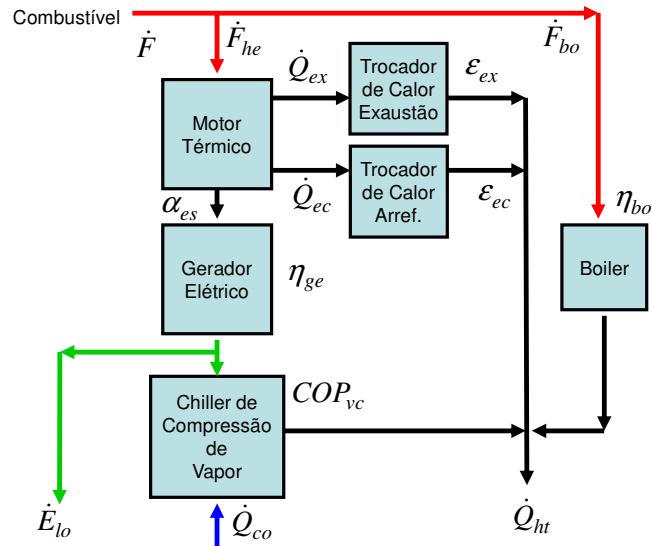


Figura 2. Trigeração com chiller de compressão de vapor.

Têm-se três possíveis fontes de consumo de combustível: (i)  $\dot{F}_{ab}$  : combustível adicional queimado no chiller de absorção, quando a demanda de refrigeração,  $\dot{Q}_{co}$ , supera sua capacidade máxima, operando somente com o calor de rejeito, Eq. (3); (ii)  $\dot{F}_{he}$  : combustível queimado no motor térmico; e (iii)  $\dot{F}_{bo}$  : combustível queimado pelo sistema de aquecimento (quando o calor de rejeito do sistema de arrefecimento do motor não for suficiente para atender à demanda de energia térmica para o aquecimento, Eq. (15)).

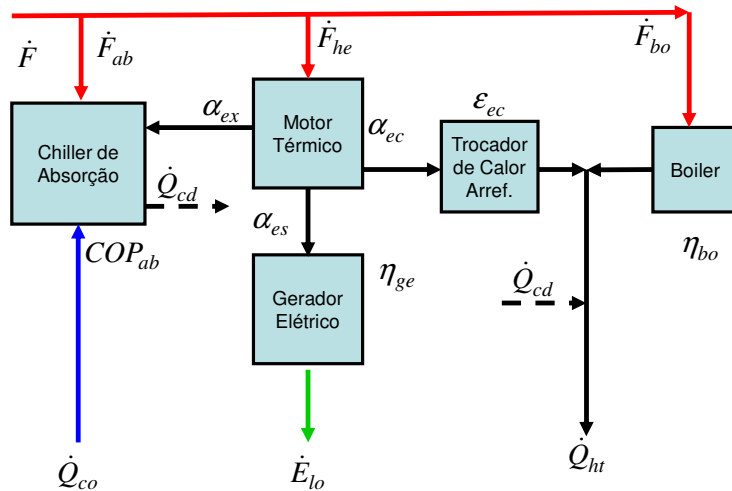


Figura 3. Trigeração com chiller de absorção.

$$\dot{F}_{III} = \dot{F}_{ab} + \dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo} \quad (3)$$

onde

$$\dot{F}_{ab} = \max \left\{ 0; \frac{\dot{Q}_{co}}{COP_{ab}} - \dot{F}_{he} (\alpha_{ex} \epsilon_{ex}) \right\} \quad (4)$$

$$\dot{F}_{he} = \frac{\dot{E}_{lo}}{\eta_{ge} \alpha_{es}} \quad (5)$$

$$\dot{F}_{bo} = \max \left\{ 0; \frac{\dot{Q}_{ht}}{\eta_{bo}} - \left[ \dot{F}_{he} (\alpha_{ec} \varepsilon_{ec}) + \dot{Q}_{co} \left( 1 + \frac{1}{COP_{ab}} \right) \right] \right\} \quad (6)$$

## 2.4 Trigeração combinada com chillers de absorção e de compressão de vapor

Nesta configuração, similarmente à anterior, o calor de rejeito da exaustão do motor térmico é recuperado para acionar um chiller de absorção. A diferença reside no fato de, na eventualidade de a demanda de refrigeração requerer capacidade frigorífica superior àquela obtida com o ciclo de absorção acionado pelo calor de rejeito, a queima suplementar de combustível no chiller de absorção é substituída pela operação de um chiller elétrico de compressão de vapor.

A demanda de refrigeração,  $\dot{Q}_{co}$ , divide-se, Fig. 4, entre o chiller de compressão de vapor,  $\dot{Q}_{co,cv}$ , e o chiller de absorção,  $\dot{Q}_{co,ab}$  (este último utilizando o calor de rejeito da exaustão do motor térmico, integral ou parcialmente, dependendo da demanda de refrigeração). O chiller de compressão de vapor somente entra em operação quando o chiller de absorção atingir sua capacidade máxima,  $\dot{Q}_{co,ab,max}$ , não queimando combustível adicional.

$$\dot{Q}_{co,ab,max} = \dot{F}_{he} \alpha_{ex} \varepsilon_{ex} \quad (7)$$

$$\dot{Q}_{co,ab} = \min(\dot{Q}_{co}; \dot{Q}_{co,ab,max}) \quad (8)$$

$$\dot{Q}_{co,cv} = \dot{Q}_{co} - \dot{Q}_{co,ab} \quad (9)$$

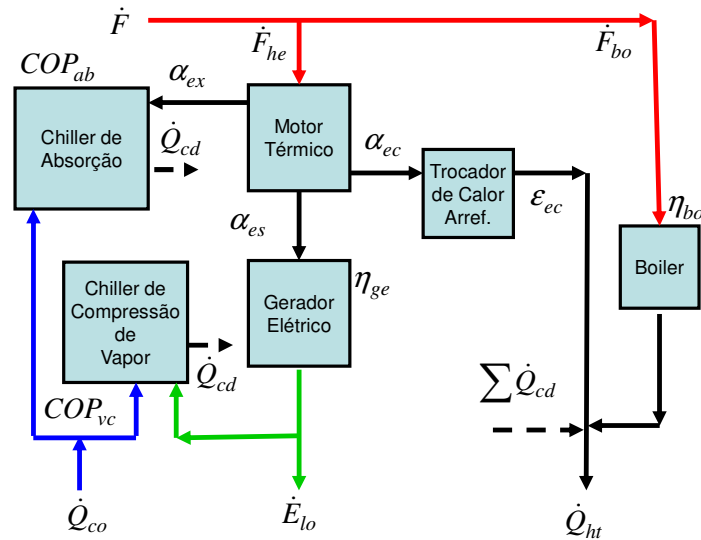


Figura 4. Trigeração com combinação de chillers de absorção e de compressão de vapor.

A demanda de aquecimento,  $\dot{Q}_{ht}$ , é atendida, em primeiro lugar, pelo calor de rejeito do fluido de arrefecimento do motor térmico,  $\dot{Q}_{ec}$ , seguido pelo calor rejeitado pelos condensadores de ambos os chillers,  $\sum \dot{Q}_{cd}$ . Somente se a demanda de aquecimento superar o calor total recuperado, entra em operação a caldeira suplementar, consumindo combustível primário, à taxa de  $\dot{Q}_{bo}$ .

$$\dot{Q}_{ht} = \dot{Q}_{ec} + \sum \dot{Q}_{cd} + \dot{Q}_{bo} \quad (10)$$

onde:

$$\dot{Q}_{ec,max} = \dot{F}_{he} \alpha_{ec} \varepsilon_{ec} \quad (11)$$

$$\dot{Q}_{ht,ec} = \min(\dot{Q}_{ht}; \dot{Q}_{ec,max}) \quad (12)$$

$$\sum \dot{Q}_{cd,max} = \dot{Q}_{co,ab} \left(1 + \frac{1}{COP_{ab}}\right) + \dot{Q}_{co,cv} \left(1 + \frac{1}{COP_{cv}}\right) \quad (13)$$

$$\sum \dot{Q}_{cd} = \max\left\{0; \min\left[\dot{Q}_{ht}; \left(\sum \dot{Q}_{cd,max} + \dot{Q}_{ht,ec,max}\right) - \dot{Q}_{ht,ec,max}\right]\right\} \quad (14)$$

$$\dot{Q}_{bo} = \dot{F}_{bo} \eta_{bo} \quad (13)$$

A taxa de energia primária consumida pelo motor térmico,  $\dot{F}_{he}$ , quando multiplicada pelas eficiências deste e do gerador elétrico,  $\alpha_{es}$  e  $\eta_{ge}$ , traduz-se em potência elétrica, distribuída entre a demanda de eletricidade,  $\dot{E}_{lo}$ , e o consumo elétrico do chiller de compressão de vapor,  $(\dot{Q}_{co,cv}/COP_{cv})$ .

$$\dot{F}_{he} = \frac{1}{\eta_{ge} \alpha_{es}} \left( \dot{E}_{lo} + \frac{\dot{Q}_{co,cv}}{COP_{cv}} \right) \quad (14)$$

O consumo total de energia primária para esta configuração,  $\dot{F}_{IV}$ , é:

$$\dot{F}_{IV} = \dot{F}_{he} + \dot{F}_{bo} \quad (15)$$

### 3. RESULTADOS

O modelo termodinâmico acima descrito foi aplicado a um caso para o qual os valores de demanda de frio, aquecimento e energia elétrica estavam disponíveis na literatura: um shopping center em Hong Kong (Lai *et al.*, 2010). A Tabela 1 mostra a variação dos valores das três demandas energéticas ao longo do ano, de acordo com Lai *et al.* (2010). Ressalte-se que a demanda elétrica,  $\dot{E}_{lo}$ , nos resultados aqui apresentados e nos modelos acima descritos, não inclui o consumo de energia elétrica para o acionamento de eventuais chillers de compressão de vapor. Este consumo é computado indiretamente a partir da demanda de refrigeração do sistema e dos coeficientes de rendimento dos chillers,  $(\dot{Q}_{co,cv}/COP_{cv})$ .

Observa-se, na Fig. 5, que o maior consumo, conforme esperado, foi aquele apresentado pelo sistema sem recuperação de calor. Dentre os sistemas de trigeração, o que utiliza exclusivamente chiller de compressão de vapor apresentou o maior consumo, visto que, conforme já afirmado neste trabalho, privilegia o atendimento da demanda de aquecimento, para ela direcionando todos os recursos empregados na recuperação de calor de rejeito. Como resultado, há um excesso de calor de rejeito não utilizado, o qual poderia estar acionando um chiller de absorção, com coeficiente de desempenho menor que o do chiller de compressão de vapor (aproximadamente, 0.8 x 3), porém não representando qualquer aumento no consumo de combustível. A Fig. 6 apresenta a redução relativa no consumo de combustível primário das três arquiteturas de trigeração estudadas, em relação ao caso sem cogeração. A redução no consumo de combustível primário oscilou entre 5% e 10%, aproximadamente, para a trigeração com chiller de compressão de vapor. Uma redução situada entre 20% e 30%, aproximadamente, foi encontrada para as duas arquiteturas que prevêem o uso do ciclo de refrigeração por absorção (absorção somente ou combinado com o compressão de vapor). Observa-se que, no período de verão (dados tomados no Hemisfério Norte - Lai *et al.*, 2010), a demanda por refrigeração é grande o suficiente para tornar a capacidade do chiller de absorção, acionado pelo calor de rejeito do motor térmico, insuficiente. O atendimento do excesso da demanda de frio mostrou-se mais eficiente com o chiller de compressão de vapor, se comparado com a opção da queima suplementar de combustível primário no chiller de absorção (com COP menor).

### 4. CONCLUSÃO

Três configurações básicas de sistemas de trigeração foram estudadas. Os principais componentes foram caracterizados por parâmetros globais e um modelo termodinâmico básico foi desenvolvido. Os resultados, obtidos com o modelo para um complexo comercial real, em HongKong, mostram a inequívoca redução do consumo de energia primária quando o calor de rejeito do motor térmico é recuperado. O estudo também mostra a importância de se

considerar, no próprio modelo de avaliação, as demandas energéticas (refrigeração, aquecimento e potência elétrica), pois a relação entre estas e a capacidade do sistema determinará a melhor configuração para o sistema de trigerção (por exemplo, entre as Figs. 2, 3 e 4). Foram estudados dois usos para o calor de rejeito do motor térmico: diretamente para o sistema de aquecimento ou para acionar um ciclo de refrigeração por absorção. Este último, absorção, mostrou-se vantajoso no caso estudado, onde a demanda por refrigeração era superior à demanda por aquecimento (centro comercial no verão).

Tabela 1. Demanda de energia elétrica, refrigeração e aquecimento em um shopping center (Lai *et al.*, 2010).

Month	Energy Demands		
	$\dot{E}_{lo}$ (kW)	$\dot{Q}_{ht}$ (kW)	$\dot{Q}_{co}$ (kW)
Jan	2441.74	1135.66	832.17
Feb	2258.34	1162.90	757.70
Mar	2098.12	1052.35	1059.99
Apr	2345.19	908.79	1452.53
May	1961.39	630.68	2213.00
Jun	1937.63	475.48	2637.36
Jul	2384.24	446.44	2716.77
Aug	2418.70	439.19	2736.58
Sep	2395.87	473.97	2641.48
Oct	1953.99	646.46	2169.84
Nov	1926.51	922.91	1413.92
Dec	2461.96	965.34	1297.91

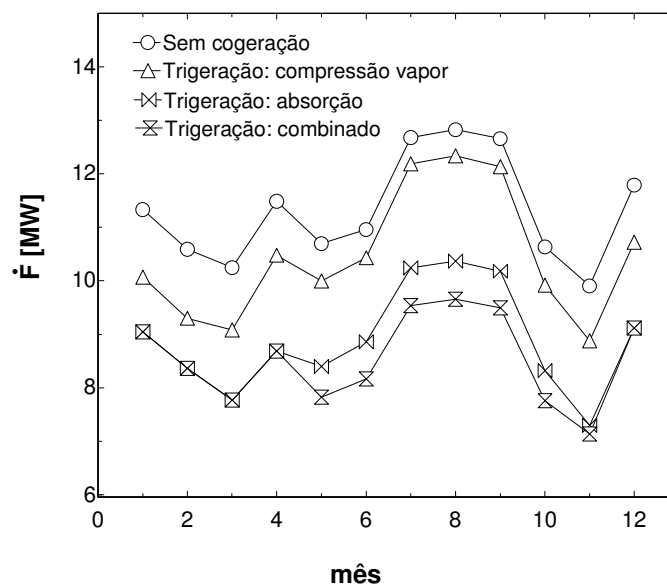


Figura 5. Comparação do consumo de energia primária para três configurações de trigerção e para sistema sem cogeração. Cálculos efetuados a partir da Tabela 1 (Lai *et al.*, 2010). Dados característicos do sistema:  $\alpha_{ec} = 0.3$  ;  $\alpha_{ex} = 0.3$  ;  $\alpha_{es} = 0.3$  ;  $\epsilon_{ec} = 0.75$  ;  $\epsilon_{ex} = 0.75$  ;  $\eta_{ge} = 0.9$  ;  $\eta_{bo} = 0.9$  ;  $COP_{vc} = 3$  and  $COP_{ab} = 0.8$ .

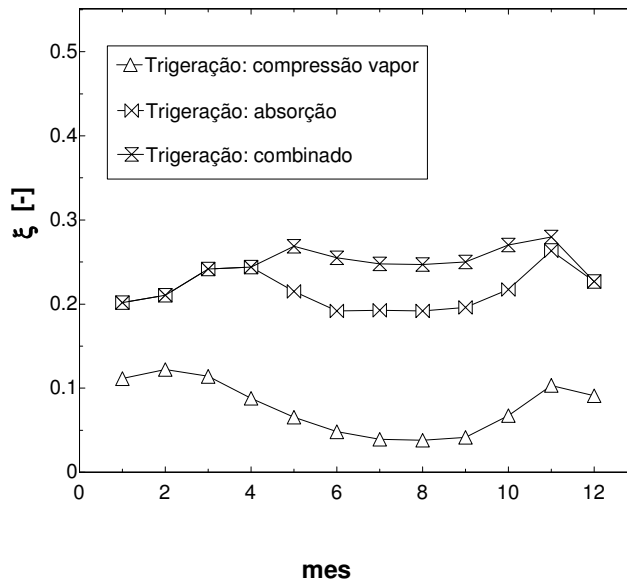


Figura 6. Comparação da redução relativa no consumo de energia primária,  $\xi = \left[ \frac{(\dot{F}_I - \dot{F})}{\dot{F}_I} \right]$  entre três configurações de trigeração e o sistema sem cogeração. Cálculos efetuados a partir da Tabela 1 (Lai *et al.*, 2010). Dados característicos do sistema:  $\alpha_{ec} = 0.3$  ;  $\alpha_{ex} = 0.3$  ;  $\alpha_{es} = 0.3$  ;  $\epsilon_{ec} = 0.75$  ;  $\epsilon_{ex} = 0.75$  ;  $\eta_{ge} = 0.9$  ;  $\eta_{bo} = 0.9$  ;  $COP_{vc} = 3$  and  $COP_{ab} = 0.8$ .

Cumprir lembrar que o presente trabalho não levou em consideração fatores importantes na maioria das possíveis aplicações para sistemas de trigeração: conexão a uma rede pública de energia elétrica, a existência de tarifas diferenciadas, função da hora do dia ou época do ano, disponibilidade de mais de um combustível primário e termoacumulação (a baixas ou altas temperaturas), entre outros.

Finalmente, à maior eficiência energética do conceito de trigeração, opõem-se: (i) a maior complexidade no controle e operação dos sistemas de suprimento de eletricidade, frio e aquecimento; e (ii) um maior investimento inicial, visto que uma certa redundância dos sistemas convencionais far-se-á necessária, função de garantia de operação e previsão de serviços de manutenção.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPERJ, CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

## 5. REFERÊNCIAS

- Al-Sulaiman, F. A. , Hamdullahpur, F. , Dincer, I., Trigeneration: A comprehensive review based on prime movers, International Journal of Energy Research, Volume 35, Issue 3, pages 233–258, 10 March 2011.
- Lai, S.M., Hui, C.W., Integration of trigeneration system and thermal storage under demand uncertainties, Applied Energy 87 (9) (2010) pp.2868-2880.
- Mago . P.J., Chamra, L.M., Hueffed, A., A review on energy, economical, and environmental benefits of the use of CHP systems for small commercial buildings for the North American climate, International Journal of Energy Research, Volume 33, Issue 14, pages 1252–1265, November 2009.
- Parise, J.A.R., Martínez, L.C.C., Marques, R.P., Mena, J.B., Vargas, J.V.C., A study of the thermodynamic performance and CO2 emissions of a vapour compression bio-trigeneration system, Applied Thermal Engineering 31 (2011) pp.1411-1420.
- Wu, D.W., Wang, R.Z., Combined cooling, heating and power: A review, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 32, Issues 5–6, September–November 2006, Pages 459–495.

### ANALYSIS OF THREE DIFFERENT CONFIGURATIONS FOR TRIGENERATION SYSTEMS WITH A CASE STUDY OF A COMMERCIAL COMPLEX

**Abstract.** Trigeneration is the simultaneous production of electricity, heating and refrigeration powers, taking advantage of heat recovery from the heat engine. In the present work, three different arrangements of trigeneration sys-

*tems are studied and compared with a no-heat recovery scheme. A basic thermodynamic model was developed taking into account system components characteristics and the three energy demands. The model was applied to a case study, involving a commercial complex, with cooling, heating and electricity power demands varying along the year. Differences between the three studied configurations were due to: (i) the way waste heat is recovered by the trigeneration system (directly to the heating system or to produce refrigeration effect from a heat driven refrigeration cycle) and (ii) on the refrigerant cycle used (absorption, vapour compression or a combination of the two).*

**Key words:** trigeneration, cogeneration, demands