

COMPARAÇÃO EXPERIMENTAL ENTRE O EVAPORADOR SOLAR E CONVENCIONAL DE UMA BOMBA DE CALOR APOIANDO UM COLETOR SOLAR

Oscar R. Sandoval R – ingpino@ufmg.br

Raul M. dos Santos – raul-ms@ufmg.br

Matheus P. Porto – matheusporto@ufmg.br

Antônio A. T. Maia – aamaia@demec.ufmg.br

Ricardo N.N Koury – koury@demec.ufmg.br

Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica

Resumo. Com o aumento da procura por energias renováveis, o uso da energia solar vem sendo amplamente estudado. O Brasil é um país privilegiado, considerando os altos índices de radiação solar presentes em quase todo o território nacional. No entanto, há dias em que existe um déficit na energia solar, seja por ter-se o dia nublado ou com chuva, e é por isto que coletores solares precisam de uma fonte de apoio para contribuir no aquecimento da água até a temperatura desejada. Neste trabalho faz-se a comparação experimental de uma bomba de calor operada com R-134a, como dispositivo de apoio a um coletor solar para aquecimento de água na cidade de Belo Horizonte – MG. A bomba de calor possui duas configurações: na primeira, o evaporador usado é do tipo convencional e, na segunda, é do tipo solar. Nos resultados obtidos foi observado que mesmo sem condição de radiação nenhuma, utilizando o evaporador solar o tempo gasto para aquecer a água foi 13% inferior ao tempo necessário para aquecer a água à mesma temperatura (45°C) utilizando o evaporador convencional. Também a configuração de evaporador solar possui melhor coeficiente de performance.

Palavras-chave: aquecimento de água, bomba de calor, coletor solar, evaporador solar, radiação solar.

1. INTRODUÇÃO

Devido ao rápido aumento dos preços do petróleo e de gás natural e as restrições mundiais que têm sido adotadas em relação a seu impacto sobre o aquecimento global, fontes alternativas de energia estão recebendo maior atenção nesta área. Entre as fontes alternativas de energia, a energia solar é considerado barato, prontamente disponível e não-contaminante (Fernández-Seara, J. et al. 2012).

O uso da energia elétrica de forma racional é indispensável para ter-se um avanço na sustentabilidade de recursos naturais. Segundo a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), entre as 17 e 22 horas (chamado horário de pico), as linhas de transmissão e as redes de distribuição ficam sobrecarregadas devido ao grande número de aparelhos que são ligados ao mesmo tempo neste período (Cemig, 2013). O chuveiro elétrico é um dos principais culpados por este excesso no consumo residencial. Devido a este fato, a energia solar é uma opção atrativa de fonte alternativa, reduzindo o consumo de energia elétrica convencional.

Apesar do enorme potencial de aproveitamento de energia solar no Brasil, devido ao seu alto nível de insolação, apenas 0,4% das residências utiliza o aquecedor solar (Procel, 2007). Os sistemas de aquecimento solar trariam benefícios para o sistema distribuição de energia, pois contribuiriam para reduzir o consumo de energia elétrica de forma expressiva e também contribuiriam para reduzir a carga no sistema de fornecimento nos horários de pico (24% de toda a energia consumida nas residências brasileiras) (Procel, 2013).

Uma dificuldade na utilização da energia solar é que a radiação incidente na placa coletora é intermitente e sazonal e, com isso, faz-se necessário acoplar uma fonte de apoio nesses sistemas para que, em situações de baixa radiação, a água ainda possa ser aquecida e utilizada em temperatura de conforto humano.

Neste trabalho é apresentado um estudo experimental de uma bomba de calor (BDC) como dispositivo de apoio a um coletor solar, elevando a temperatura desde 35°C até 45°C, comparando um evaporador convencional e um evaporador solar.

2. PERFIL DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA RESIDENCIAL

De acordo com o relatório do Procel na avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil no ano 2007, 22% da energia produzida no país é utilizada para suprir a demanda doméstica. Dentro da residência do consumidor, essa energia é distribuída conforme mostrado na Fig. 1.

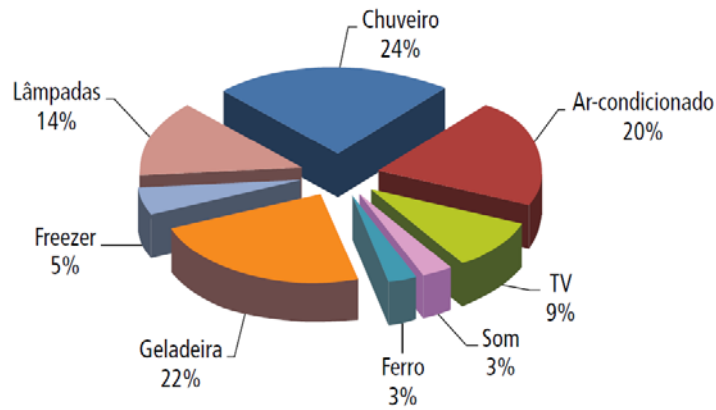


Figura 1 - Participação dos eletrodomésticos no consumo de eletricidade das residências brasileiras referente à 2005 (Eletrobrás; Procel, 2007).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no 2013, o consumo médio da energia na região sudeste nos anos 2004 a outubro de 2013 foi 207.295.378 MWh distribuído entre os setores residencial, industrial, comercial e outros (rural, serviço público e iluminação pública). O setor residencial, o qual é o foco deste trabalho, contribuiu com uma média de 47.294.621 MWh. Os dados são atualizados pela Superintendência de Estudos Econômicos e Energéticos (SEE), e da Diretoria de Estudos Econômico-Energéticos e Ambientais (DEA). A Fig. 2 ilustra a redução que poderia ser obtida (5,28%), caso a energia utilizada pelo chuveiro fosse retirada da demanda residencial no Brasil.

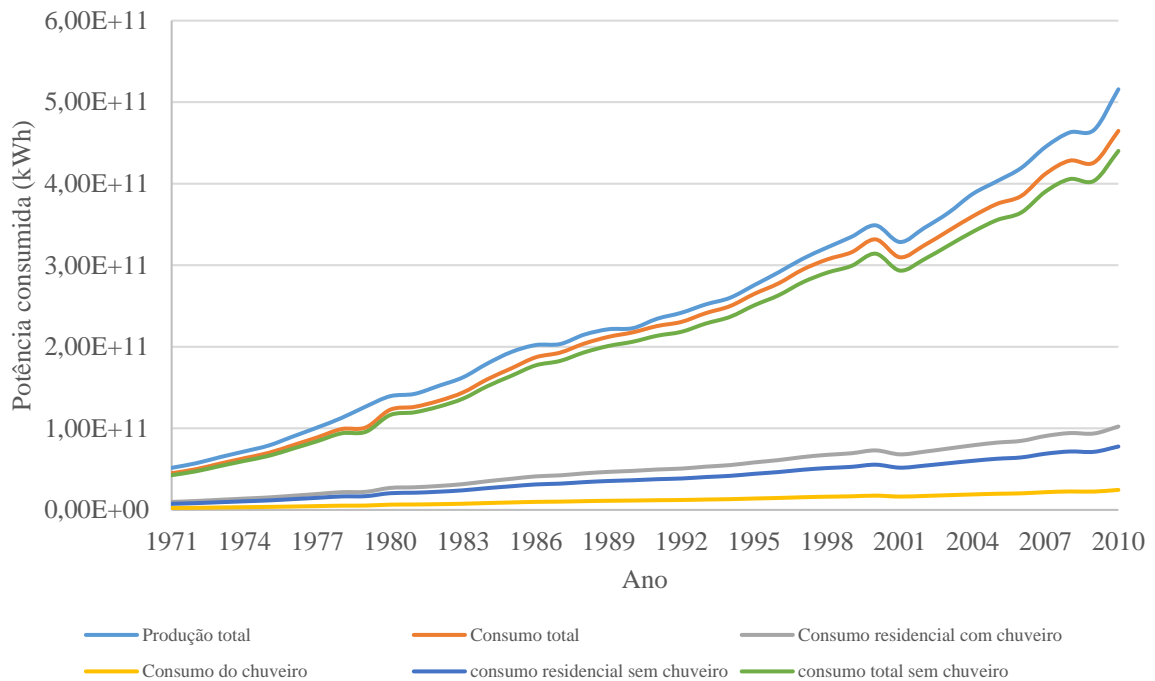


Figura 2 – Indicadores de desenvolvimento em energia elétrica do Brasil ano 1971 até 2010, consumo de energia elétrica subtraindo o uso de chuveiros elétricos (The World Bank, 2013).

3. RADIAÇÃO SOLAR NA REGIÃO DE MINAS GERAIS

O estado de Minas Gerais localizado na região sudeste do Brasil, apresenta uma elevada radiação solar média anual, como apresentado na Tab. 1. Para o caso de cidades do norte de Minas Gerais, as variações sazonais são menores, o que resulta em uma importante vantagem técnica e econômica para esta região. O Atlas Solarimétrico para Minas Gerais mostra que esta grandeza varia de 4,5 a 6,5 kWhm⁻².

Tabela 1 - Comparação dos dados de radiação solar média mensal para diversas localidades do Mundo e do Brasil.
Fonte: Atlas Solarimétrico de Minas Gerais, 2011.

LOCALIDADE	LATITUDE	H _h (mínimo) (kWhm ⁻²)	H _h (máximo) (kWhm ⁻²)	H _h (anual) (kWhm ⁻²)	H _h (max.) / H _h (min.)
Dongola – Sudão	19°10'	5,3 (Dez)	7,7 (Mai)	6,6	1,4
Dagget – EUA	34°52'	2,2 (Dez)	8,7 (Jun)	5,8	4,0
Belém – PA – Brasil	1°27'	3,9 (Fev)	5,5 (Ago)	4,9	1,4
Florianópolis – PI – Brasil	6°46'	4,7 (Fev)	6,2 (Set)	5,5	1,3
Petrolina – PE – Brasil	9°23'	4,5 (Jun)	6,3 (Out)	5,5	1,4
Bom Jesus da Lapa – BA – Brasil	13°15'	4,4 (Jun)	5,9 (Out)	5,5	1,3
Cuiabá – MT – Brasil	15°33'	4,1 (Jun)	5,6 (Out)	5,0	1,4
Montalvânia – MG – Brasil	14°25'	5,1 (Abr)	7,1 (Jan)	6,1	1,4
Espinosa – MG – Brasil	14°55'	4,8 (Jun)	6,9 (Jan)	5,8	1,4
Mocimbuinho – MG – Brasil	15°03'	4,9 (Jun)	6,8 (Fev)	5,8	1,4
São Romão – MG – Brasil	16°22'	5,0 (Jun)	6,8 (Fev)	5,9	1,4
Belo Horizonte – MG – Brasil	19°53'	4,1 (Jun)	5,5 (Fev)	5,0	1,4
Porto Alegre – RS – Brasil	30°1'	2,3 (Jun)	6,1 (Dez)	4,2	2,7

As cartas da radiação solar global média mostram que em Minas Gerais a radiação solar varia entre 3 e 7,5 kWhm⁻² dia, com um período de mínimo no trimestre maio-junho-julho, em que as estações solarimétricas registram uma intensidade na faixa de 3 a 4 kWhm⁻² dia (Cemig, 2011). Existem períodos de baixa radiação como é apresentado na Fig. 3, os meses com esta radiação típica são o mês de Maio, Junho e Julho, onde o sistema de coletor solar deverá precisar de uma fonte de apoio para poder cumprir o seu objetivo de forma adequada.

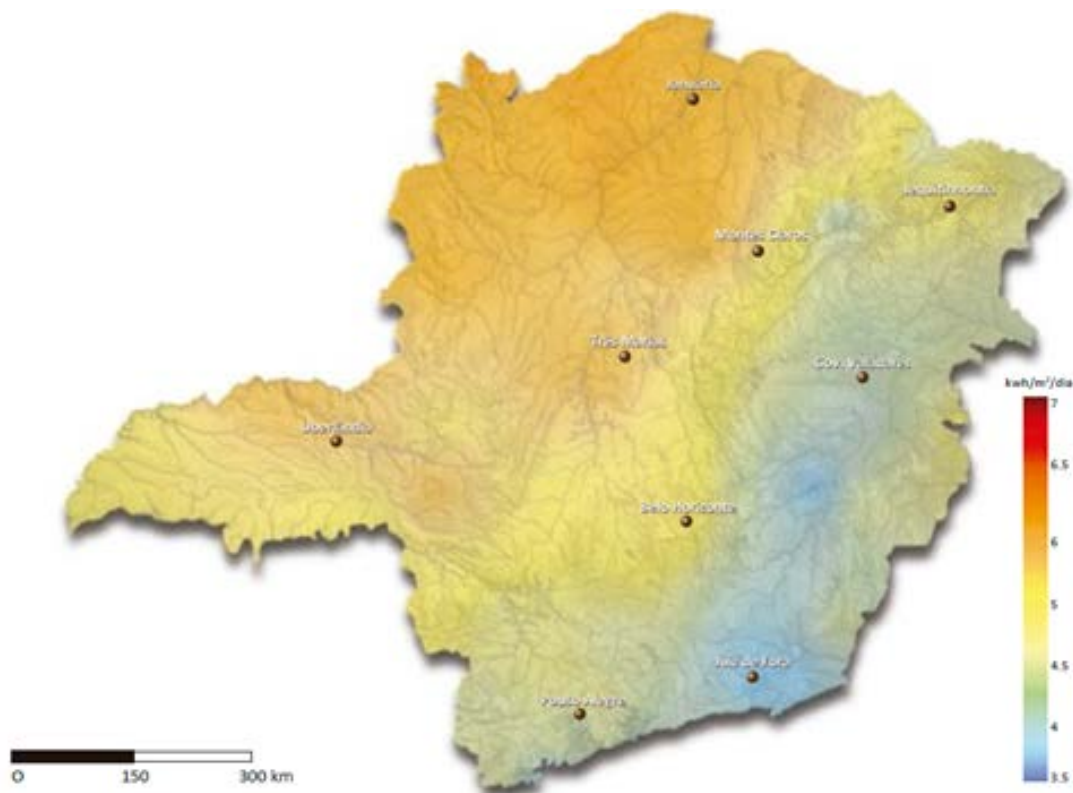


Figura 3 - Radiação Solar Média Diária Mensal do mês de Maio. Fonte: Atlas Solarimétrico de Minas Gerais 2011.

4. SISTEMA DE APOIO: BOMBA DE CALOR E COMPONENTES

Este estudo foi feito considerando o consumo de água quente, utilizada para o banho em uma família de quatro pessoas. A capacidade calculada do tanque de armazenamento foi de 200 litros.

4.1 Estrutura do equipamento – BDC.

A BDC foi desenvolvida por uma empresa com grande experiência na fabricação deste tipo de dispositivo de aquecimento solar na cidade de Belo Horizonte, MG, e os testes experimentais foram realizados no laboratório do Grupo de Refrigeração e Aquecimento (GREA) da UFMG. Na Fig. 4 é apresentada uma representação esquemática da BDC, e a Fig. 5 mostra uma fotografia do protótipo utilizado.

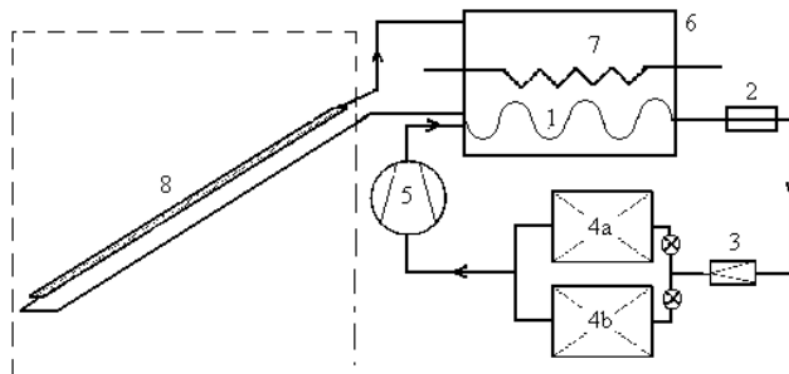


Figura 4 – Desenho esquemático da montagem do protótipo; 1. Condensador, 2. Filtro secador, 3. Válvula termostática, 4a. Evaporador convencional, 4b. Evaporador solar, 5. Compressor, 6. Tanque de armazenamento, 7. Resistência elétrica, 8. Coletor solar. Fonte: Vinicius de Melo Reis, R., 2012.

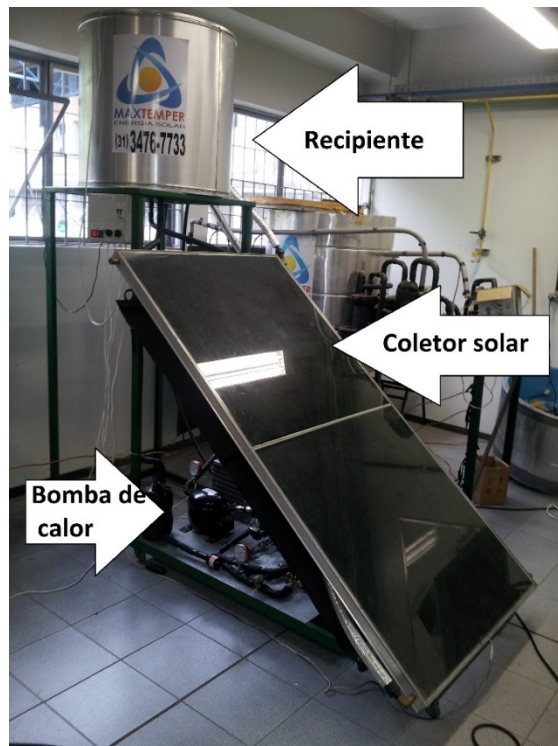


Figura 5 – Protótipo da BDC no Laboratório do GREA.

4.2 Metodologia e resultados experimentais.

O sistema de apoio é composto pelos componentes descritos na Tab. 2.

Tabela 2 – Componentes do sistema de apoio BDC.

TIPO	MARCA	ESPECIFICAÇÕES
Compressor	Embraco	FFU 100HAK, 214 W, 110-220 V e 50-60 Hz para o fluido refrigerante R-134a
Filtro secador	Danfoss	DML052
Válvula de expansão	Danfoss	Ten 2 orifício NR0X
Válvulas manuais	Danfoss	
Evaporador de ar	ELGIN	½ HP modelo CDE-2777
Electro-ventilador	ELGIN	20mHP modelo MM-20B de 110-220 V e 60 Hz com 1550 rpm
Evaporador solar	Tubo de cobre	3/8 de polegada e comprimento de 16 metros
Condensador	Tubo de cobre	Diâmetro externo de 8 mm e 4,5 m de comprimento

Foram realizados três ensaios:

1. BDC + evaporador solar, sem nenhum tipo de radiação solar direta;
2. BDC + evaporador convencional;
3. BDC + evaporador solar, com radiação solar incidente direta.

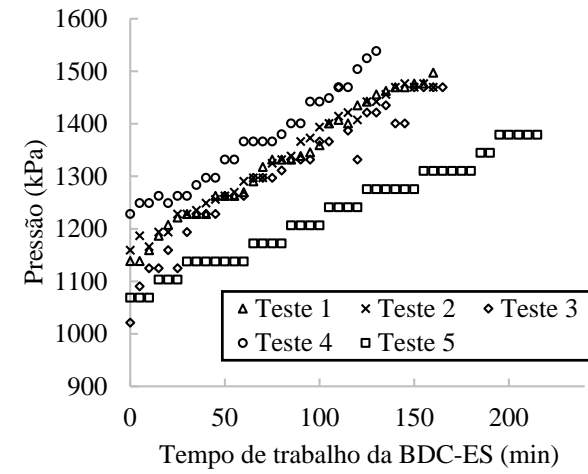
Durante a preparação do experimento, o tanque da bomba de calor foi preenchido com 200 litros de água. A máquina foi ligada e o controlador com termostato foi programado para desligar quando a temperatura chegasse a 45°C. Os valores de temperatura foram adquiridos a cada cinco minutos mediante uma placa de aquisição de dados (NI USB-9162), usando o software LabVIEW. O valor do COP real do equipamento foi determinado usando um wattímetro e a seguinte correlação:

$$COP = \frac{m_a C_{p_a} (T_{s_a} - T_{e_a})}{P_e} \quad (1)$$

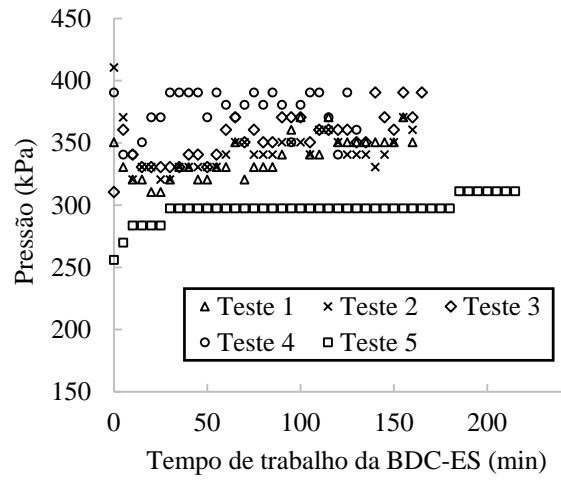
Onde P_e é a medição feita usando o wattímetro, m_a a massa d'água para ser aquecida, C_{p_a} é o calor específico da água, T_{s_a} e T_{e_a} são a temperatura de entrada da água e a temperatura de saída, respectivamente.

BDC com evaporador solar sem radiação solar direta (ES). Os resultados obtidos para o caso 1 são apresentados na Fig. 6. Uma das principais questões deste primeiro teste foi determinar experimentalmente o coeficiente de performance de BDC (COP teórico e real) com a configuração de evaporador solar (ES). Foram realizados um total de cinco testes. Na Fig. 6e. e 6f. é possível observar a degradação COP ao longo do tempo.

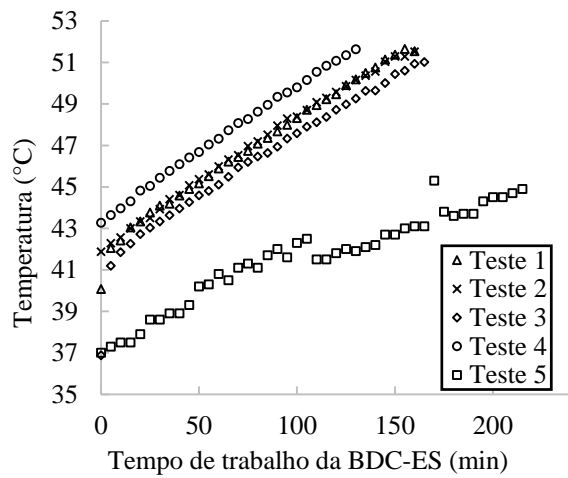
A degradação COP ocorre devido ao aquecimento da água no tanque de armazenamento, isto é, a diferença entre a pressão de alta em relação à pressão de baixa aumenta, este aumento da pressão pode ser detalhado na Fig. 6c. por consequência, aumenta o trabalho de compressão, diminuindo a eficiência do sistema. Como a radiação solar no evaporador foi controlada a ter um valor igual a zero, a variação da pressão de evaporação (Fig. 6d) é só consequência a variação da temperatura ambiente.



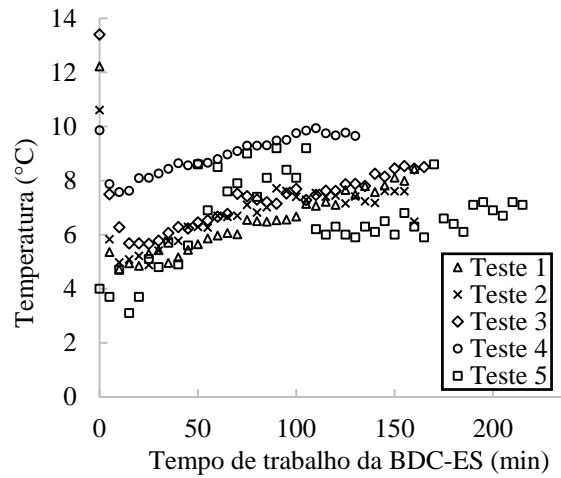
(a)



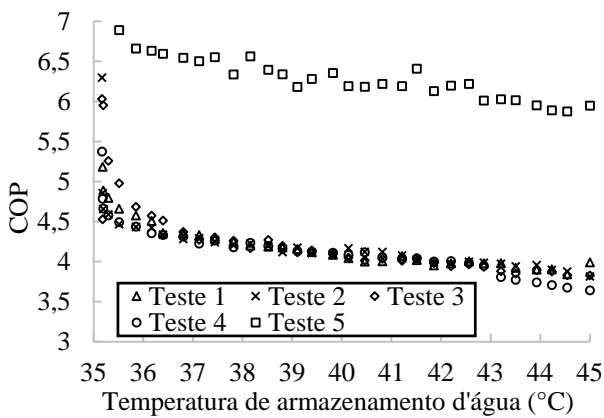
(b)



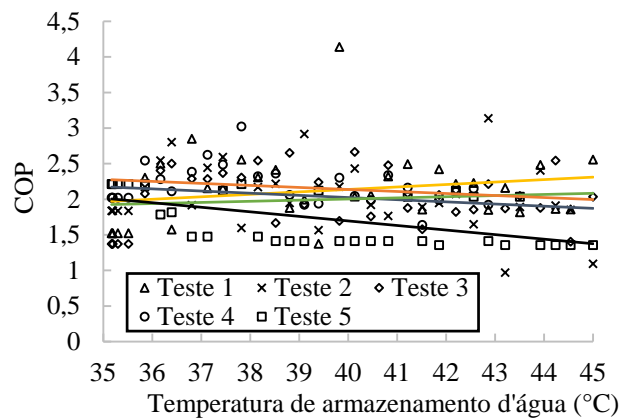
(c)



(d)



(e)

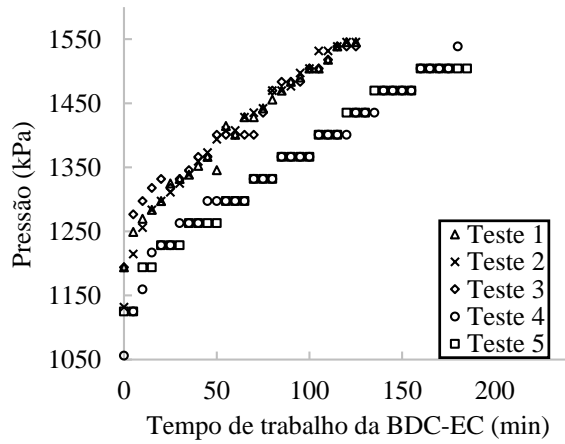


(f)

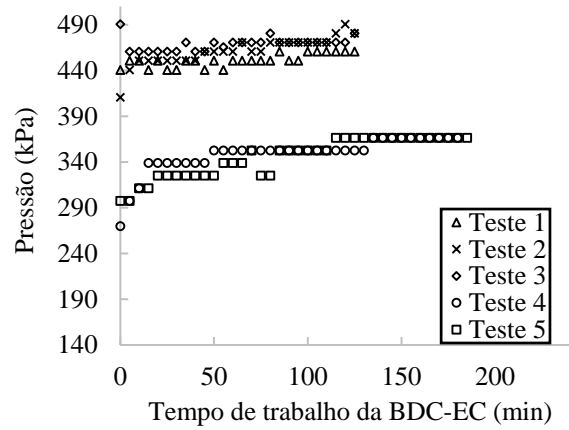
Figura 6 - Bomba de calor com evaporador solar sem radiação solar incidente direta; (a) pressão de condensação; (b) pressão de evaporação; (c) variação da temperatura de condensação; (d) variação da temperatura de evaporação; (e) COP teórico; (f) COP experimental.

BDC com evaporador convencional (EC)

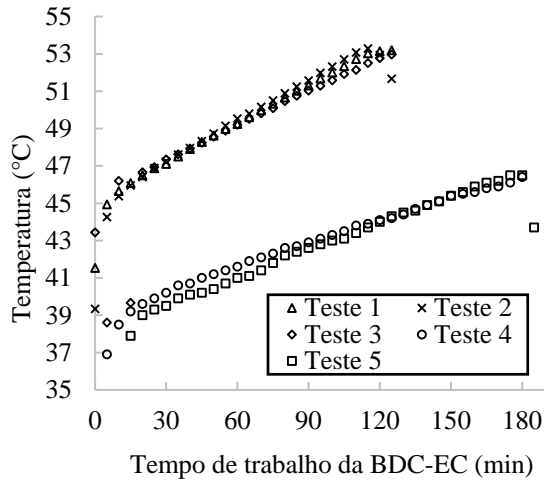
Os resultados obtidos pela avaliação da configuração 2 são apresentados pela Fig. 7.



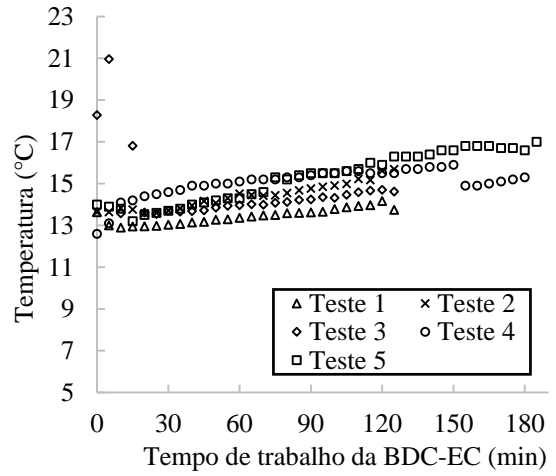
(a)



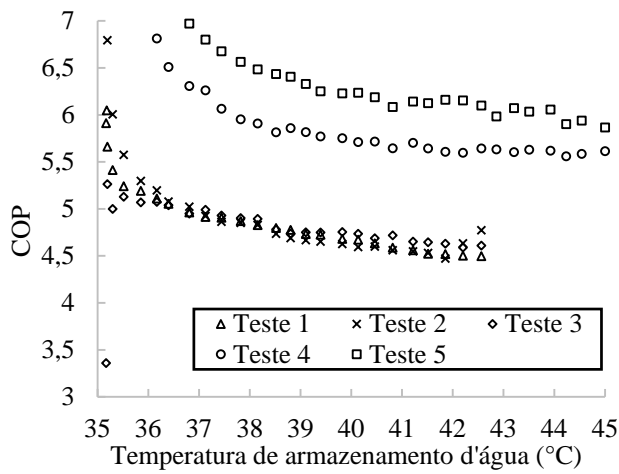
(b)



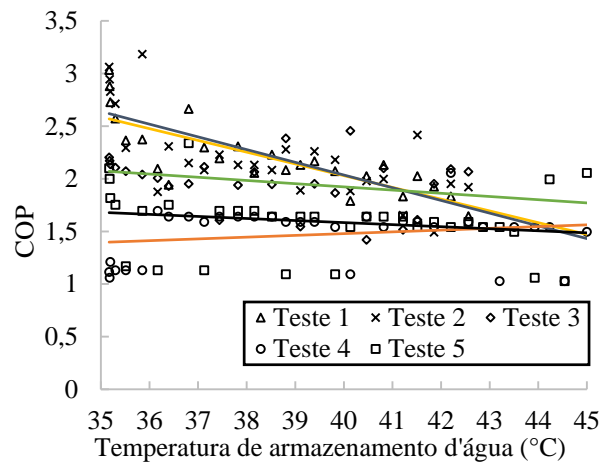
(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 7 - Bomba de calor com evaporador convencional; (a) pressão de condensação; (b) pressão de evaporação; (c) variação da temperatura de condensação; (d) variação da temperatura de evaporação; (e) COP teórico; (f) COP experimental.

Foram realizados ao igual à primeira configuração um total de cinco testes. Na Fig. 7a. é possível observar o aumento da pressão de condensação segundo aumenta a temperatura de armazenamento, este fato ocorre pela configuração do condensador, já que ele é submergido no tanque de armazenamento. A Fig. 7b mostra-se as pequenas mudanças devido a variação da temperatura ambiente. A degradação COP ao longo do tempo na configuração de EC é apresentada na Fig. 7e e na Fig. 7f. e ao igual do que na primeira configuração ocorre devido ao aquecimento da água no tanque de armazenamento que aumenta a diferença entre a pressão de alta em relação à pressão de baixa aumenta.

Os diferentes valores de COP que foram determinados nos testes são representados na Tab. 3.

Tabela 3 - Comparação dos dados de coeficiente de performance global.

Número de teste	Configuração 1	Configuração 2
	ES	EC
1	2,04	1,97
2	2,05	1,96
3	1,95	1,94
4	2,32	1,50
5	1,72	1,51
Média	2,02	1,78

Os coeficientes de performance da Tab. 3 são médias das Fig. 6 e 7. Pode-se observar que a configuração mais viável é utilizando o evaporador solar. O maior COP alcançado utilizando esta configuração foi de 2,32.

BDC com evaporador solar e radiação solar incidente – ESI. Este teste foi realizado pela manhã do dia 05 de dezembro de 2013, quando foi obtida uma leitura de radiação horizontal incidente no evaporador de 880 Wm^{-2} . Devido às poucas nuvens, a variação na radiação foi desprezível. O resultado mais significativo está ilustrado na Fig. 8. Foi observada grande variação na temperatura de evaporação devido ao aumento da troca de calor pela incidência da radiação solar.

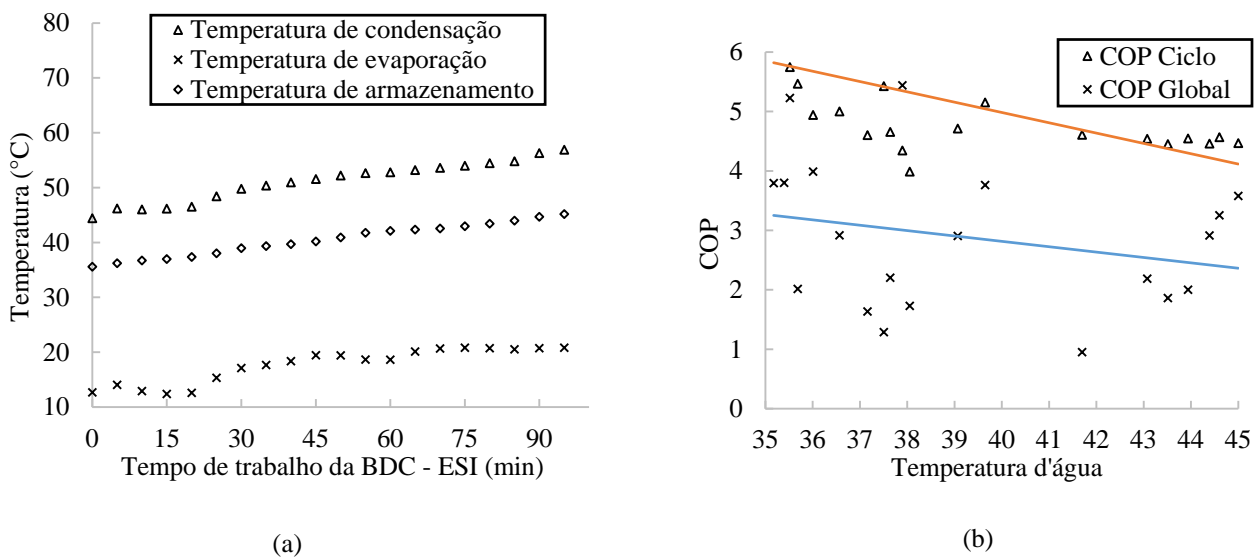


Figura 8 - Bomba de calor com evaporador solar com radiação direta; (a) Variação das temperaturas de trabalho; (b) Evolução do COP.

Para esta configuração foi realizado somente um teste já que observou-se que o inventário de fluido refrigerante estava inadequado para o nível de radiação incidente, uma vez que o grau de superaquecimento ficou muito elevado ($\Delta T_{sa}=15$ a 20°C), indicando a necessidade de um estudo de inventário e de um melhor controle da válvula de expansão.

Outra hipótese está relacionada ao projeto do evaporador solar: um evaporador menor diminuiria os custos, e o superaquecimento diminuiria. Como consequência, observou-se que o COP, mesmo trabalhando nessas temperaturas e pressões altas foi de 2,8. Segundo Xiande Fang et al., 2003, a influência da radiação solar sobre o comportamento térmico dos sistemas de bomba de calor é considerável. O coeficiente de transferência de calor por radiação solar pode ser 36,2% maior que sem ela.

5. CONCLUSÕES.

Foi possível concluir através deste trabalho que o tempo médio consumido para aquecimento de água, sem nenhuma condição de radiação, foi de 220 minutos, para a condição de projeto número 1 (BDC com evaporador solar, sem radiação incidente), e, 190 minutos para a configuração 2 (evaporador convencional com ventilação forçada). As duas configurações atingiram a temperatura requerida de 45°C. Além disso, a configuração de evaporador solar teve COP médio de 2,02, por isto, é a configuração mais eficiente. Isto significa que o funcionamento do evaporador solar apresentado consome menos energia elétrica do que o evaporador convencional, a média do consumo utilizando o mesmo compressor é 300 Wh para a configuração 1 e 350 Wh para a configuração 2.

Uma vez conhecido que o consumo de energia do compressor depende fortemente das pressões de entrada e de saída, qualquer método de otimização em estas pressões irá poupar energia elétrica no compressor. Fazer as temperaturas de condensação e evaporação mais juntas (Li Y.W. et al. 2007) determinará melhoras no consumo de energia elétrica por parte do compressor. Recomenda-se usar o evaporador solar quando a radiação solar e a temperatura ambiente sejam as maiores possíveis para obter maior eficiência no sistema. Por tanto, sugere-se que o período de execução deve ser definido perto do meio-dia.

No estudo do impacto da radiação direta no evaporador solar determinou que para este uso, os equipamentos terão uma diminuição em tamanho e custos de fabricação.

Agradecimentos

Os autores deste trabalho agradecem o apoio da empresa Maxtemper (www.maxtemper.com.br) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sem o qual esta pesquisa não teria sido possível.

REFERÊNCIAS

- Cemig., 2011. Atlas Solarimétrico de Minas Gerais. Aneel, Cemig e Governo de Minas.
- Cemig., 2013. Uso racional de energia. Dicas de energia.
- Eletrobrás; Procel., 2013. Relatório de resultados do Procel 2013 - ano base 2012. Rio de Janeiro.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE., 2013. Consumo mensal de energia elétrica por classe (regiões e subsistemas) – 2004-2013.
- Fang, X. et al. 2003. A study of the influence of solar radiation on the thermal performance of evaporators of heat pump systems. Applied Thermal Engineering.
- Fernández-Seara, J. et al. 2012. Experimental analysis of a direct expansion solar assisted heat pump with integral storage tank for domestic water heating under zero solar radiation conditions. Energy Conversion and Management.
- Li Y.W. et al. 2007. Experimental performance analysis on a direct-expansion solar-assisted heat pump water heater. Applied Thermal Engineering.
- Procel., 2007. Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil – Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso – Ano Base 2005 – Classe Residencial. Relatório Brasil.
- The World Bank, 2013. Indicadores de desenvolvimento mundial país O Brasil. Site web consultado o dia 24/12/2013. Site: <http://www.worldbank.org/>
- Vinicius De Melo Reis, R., 2012. Análise experimental comparativa entre uma bomba de calor e uma resistência elétrica como dispositivo de apoio de energia para um aquecedor solar de água. Tese de doutorado. DEMEC, UFMG. Belo Horizonte.

EXPERIMENTAL COMPARISON BETWEEN THE CONVENTIONAL AND SOLAR EVAPORATOR OF A HEAT PUMP SUPPORTED BY A SOLAR COLLECTOR

Abstract. *Currently, the use of solar energy has been widely studied, in accordance with the increase in the demand for renewable energy.*

Brazil is a privileged country, taking into account the high levels of solar radiation present in almost all the national territory. However, there are days when there is a deficit in the solar energy, either by having the day cloudy or rainy, and that is why the solar collectors need a source of support to contribute to heat the water to the desired temperature. In this work, we perform the experimental comparison of a heat pump operating with R - 134a as a support device to a solar collector to heat the water in the city of Belo Horizonte - MG. The heat pump has two configurations: in the first one, the used evaporator is conventional, and in the second one, is solar-type. On the results obtained it was noted that even without any condition of radiation, using the solar evaporator the time spent to heat the water was 13% less than the time needed to heat the water at the same temperature (45 °C) using the conventional evaporator. Beside this, the configuration of the solar evaporator has better performance coefficient.

Key words: *heat pump, solar collector, solar evaporator, solar radiation, water heaters.*