

Gerenciamento Ótimo da Energia no Horário de Ponta: - O Uso de Bombas de Calor com e sem Coletores Solares e de Energia Residual de Equipamentos Elétricos Domésticos

J. C.A. Figueiredo, CEMIG, M. Fortes, Consciente Ltda., UNA e A. C. de Souza, Consciente Ltda., SELETRO Ltda.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de um estudo experimental e prático sobre o uso de bombas de calor, acopladas ou não a coletores solares planos, e de geladeiras e freezers para a geração de água quente em residências e condomínios residenciais. Realizaram-se mais de cem experimentos e aplicaram-se as tecnologias em residências e condomínios residenciais. Geladeiras e freezers comerciais para uso residencial foram adaptadas de forma a permitir o uso da energia térmica disponível nos seus condensadores. Testes reais mostraram que os sistemas de Bombas de Calor apresentam COPs da ordem de 3, e, quando acopladas a Coletores Solares, COPs da ordem de, no mínimo, 4. Geladeiras ou freezers residenciais permitem economias significativas, e podem funcionar acopladas a bombas de calor, em casos de altos consumos de água quente. Os sistemas estudados, além de economicamente viáveis, eliminam totalmente o uso de energia para aquecimento de água no horário de ponta.

PALAVRAS-CHAVE

Eficiência energética, Aquecimento de água, Coletor solar, Geladeiras e Freezers.

I. INTRODUÇÃO

Refrigeradores, condicionadores de ar e bombas de calor são equipamentos essencialmente idênticos, operando sob os mesmos princípios físicos, com finalidades práticas diferentes. Uma unidade de refrigeração é qualquer equipamento ou conjunto de equipamentos cuja finalidade é resfriar o ar (condicionadores de ar), alimentos (geladeiras e freezers ou grandes unidades de refrigeração), água (gelo), substâncias químicas, de petróleo e petroquímicas, etc. Em outras palavras, uma unidade de refrigeração ou refrigerador é aqui definida como qualquer equipamento de compressão de gás refrigerante ou sistema que utiliza

Agradecimentos a apoio financeiro devem ser feitos aqui.

Exemplo: Es-te trabalho foi apoiado parcialmente pela Fundação de Inovação Tecnológica-ca.

J. C. A. de Figueiredo trabalha na Companhia Energética de Minas Gerais (e-mail: ayres@cemig.com.br).

M. Fortes trabalha na Consciente Ltda, e Diretor de Pós-Graduação e Pesquisa no Centro Universitário de Ciências Gerenciais - UNA.

A. C. de Souza trabalha na Consciente Ltda, e na Seletro - Serviços Eletrotécnicos Ind. Com. Ltda.

Por motivo de modificação de ponto de operação, não se identifica o fabricante.

compressores, evaporadores, condensadores e fios capilares (ou válvulas). Em toda unidade de refrigeração existe um evaporador, em que calor é retirado de uma fonte fria, e condensador, em que calor é rejeitado.

Extremamente parecidas com refrigeradores, mas com ponto de operação diferente, bombas de calor são equipamentos de compressão de gás, em que o calor gerado no condensador é aproveitado para o aquecimento. Existem condicionadores de ar que aquecem o ar no inverno; funcionam, então, como bombas de calor. No verão, estes condicionadores resfriam o ar, funcionando como típicos condicionadores (resfriadores) de ar.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho, define-se a Eficiência Térmica de uma bomba de calor pelo chamado coeficiente de performance ou COP da bomba de calor, expresso por:

$$COP = \frac{\text{Variação de entalpia do fluido aquecido}}{\text{Energia elétrica aplicada}} = \frac{Q}{EE}$$

A. Metodologia e sistema experimental de Bombas de Calor

1) Reservatórios e condensadores usados nos testes experimentais

Os reservatórios de água quente foram construídos em fibra de vidro, de volume líquido aproximado de 480 litros (Fig. 1); o isolamento térmico foi efetuado por meio de uma camada de poliuretano expandida. Instalaram-se condensadores no interior dos reservatórios.



FIGURA 1 - O reservatório de água quente e medidores de temperatura e pressão – versão experimental.

FIGURA 2 - O reservatório de água quente e medidores de temperatura e

As Figuras 2 e 3 mostram fotos dos equipamentos experimentais, com detalhes de equipamentos de medida.



pressão – Versão experimental e prática (excluindo visor)

2) Metodologia Experimental

Mais de 100 experimentos foram efetivados visando o estabelecimento de pontos de operação de compressores, diâmetros de tubulação, controles e especificação de fios capilares..

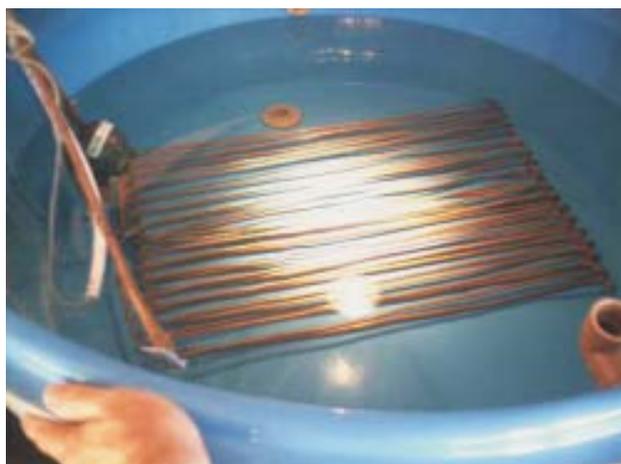


FIGURA 3 - O condensador no interior do reservatório de água quente.

A quantidade de gás usada foi determinada por meio de medidas sucessivas da pressão durante o carregamento de gás; simultaneamente, mediram-se, também, a temperatura da água no reservatório (de água quente), o consumo energético, a temperatura da água de entrada, e a umidade relativa e temperatura do ar ambiente.

As temperaturas da água ambiente foram feitas deixando-se escorrer água durante 5 minutos, à sombra, preferencialmente dentro da residência e pela medição da temperatura do reservatório normal de água fria da residência, condomínio ou local de teste.

A temperatura do meio ambiente foi feita por meio de termômetro de mercúrio ($\pm 0,25$ °C), à sombra. Mediram-se as temperaturas da água na região superior, média e inferior do reservatório de água quente mostrada na Tabela 1.

tabela 1

Especificação dos indicadores - controladores de temperatura e de umidade relativa

Especificação	Faixa de Operação	
	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)
Indicador - Controlador	-9,9 a 99,9 com resolução de 0,1	10,0 a 99,9 com resolução de 0,1
Indicador	-50 a 75 com resolução de 0,1 entre -10 a 75 e 1 entre -50 e -10	Não se aplica

Os consumos elétricos foram feitos por meio de integradores de potência elétrica (± 1 W-h).

3) Metodologia para aproveitamento da energia térmica gratuita de Geladeiras e Freezers

Os dados pertinentes a uma das geladeiras e a um dos freezers usados nos experimentos são mostrados nas Tabelas 2 e 3; os dados foram fornecidos pelo fabricante.

TABELA 2

Dados da Geladeira - Frost Free – 2 Portas – 430

Modelo	BRG43ABANA	Tensão	127V
Série	SD0677230	Frequência	60HZ
Fluido	R134a-105 g	Corrente	2.5 A
Cap. Congelamento 24 horas	4.0 kg	Potência	150 W
Pot. Res.	250 W	Tipo de produto	Refrigerador
Pressões de Projeto		Volume total	423 l
Alta pressão / 1510 kPa / Baixa pressão 600 kPa		Volume freezer	85 l
<i>Consumo nominal da Geladeira = 64 kWh/mês = 2,13 kWh/dia</i>			

TABELA 3

Dados do Freezer – Congelador Vertical / Automático

Modelo	BVG27ABANA	Tensão	127V
Série	JE0473581	Frequência	60HZ
Fluido	R-12 – 125g	Corrente	2.5 A
Cap. Congelamento 24 horas	15.0 kg	Potência	174 W
Pot. Res.	500 W	Tipo de prod.	Congelador
Temp. do congelador	-18 °C	Tempo max. de conservação sem energia	19h
Pressões de Projeto		Volume total	264 l
Alta pressão / 1510 kPa / Baixa pressão 600 kPa		Volume freezer	230 l
<i>Consumo nominal do Freezer = 76 kWh/mês = 2,53 kWh/dia</i>			

Sabendo-se que os valores de consumo dependem da carga térmica variável do freezer, optou-se por utilizar os dados de consumo do fabricante como sendo médias confiáveis.

Tanto a geladeira quanto o freezer não operam continuamente. Efetuaram-se testes experimentais com a geladeira e o freezer para se obterem as potências experimentais e poder-se avaliar a fração de tempo em que a geladeira ou o freezer fica em funcionamento. Assim, os dados mostraram que a geladeira funcionou intermitentemente somente durante 37,3% do dia, ou seja, durante um total de 8,9 horas. O freezer funcionou durante 57% do dia, ou seja, por um total de aproximadamente 14 horas. Estas frações servem como indicativos de períodos de funcionamento; os verdadeiros períodos de funcionamento dependem da carga térmica do refrigerador.

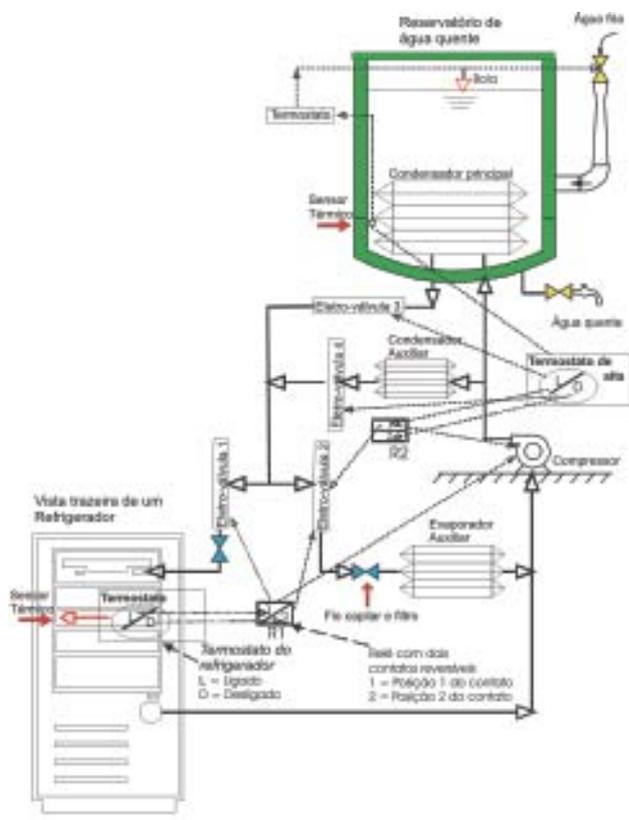


FIGURA 4 - Sistema completo de aquecimento de água usando o compressor de um refrigerador ou condicionador de ar

O sistema mostrado na Fig. 4 mostra que foram acrescentados ao esquema básico de geladeira e freezers um evaporador auxiliar, um condensador auxiliar, duas eletro-válvulas, respectivamente designadas por eletro-válvulas 1 e 2 e dois relés de contatos reversíveis.

Metodologia usada na instalação prática de Bombas de Calor

Vários compressores, de diversas marcas, foram testados. Os compressores usados em testes residenciais e de condomínios tinham as seguintes características técnicas¹:

- **Compressores:** Modelo de 1HP (4,7 A - 956 W)
- **Condensadores:** 9000 Btu's

5) Instalação de bombas de calor na Cidade dos Meninos

Instalaram-se sistemas de bombas de calor para aquecimento de água em substituição a chuveiros elétricos na Cidade dos Meninos de S. Vicente de Paula, em Ribeirão das Neves, na Grande BH. As instalações foram feitas em 17 casas. Em cada casa moram 17 pessoas (16 meninos e uma mãe) e há sete chuveiros. Os sistemas instalados deveriam satisfazer a todas as exigências de água para banhos, com controle de horário de funcionamento das bombas de calor e deveriam funcionar fora do horário de ponta e em horário diurno.

As Figuras 6 a 13 mostram detalhes dos sistemas de bombas de calor instalados na cidade dos meninos.



FIGURA 5 - Componentes principais do sistema de aquecimento, prontos para serem instalados.



FIGURA 6 - Detalhes do sistema de aquecimento, instalado

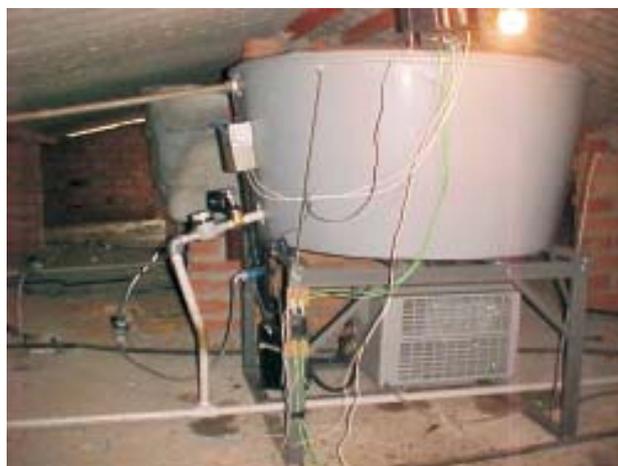


FIGURA 7 - Detalhes do sistema de aquecimento, instalado, e tubulações hidráulicas e de fluido refrigerante.



FIGURA 8 - Detalhes do monitoramento do sistema de aquecimento.



FIGURA 9 - Detalhes dos equipamentos em processo de preparo para montagem.



FIGURA 10 - Outra vista dos equipamentos em término de preparo para montagem.

6) Instalação de bombas de calor, bombas de calor e coletores solares e aproveitamento de energia útil de geladeiras e freezers em residências e condomínios.

A tabela 4 mostra os tipos de equipamentos utilizados.

TABELA 4
Especificação das unidades instaladas e testadas.

Tipo de equipamento	Tipo de unidade	Número de unidades	Total de usuários atendidos, por tipo de equipamento.
Geladeiras e freezers	Residências	03	15
Bombas de calor	Residência	01	05
Bombas de calor	Condomínio	26	289
Bombas de calor c/ coletor solar	Residências	10	50
Bombas de calor c/ coletor solar	Condomínio	02	50
Total		42	409

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A. Desempenho e análise econômica simples de sistemas que utilizam a energia gratuita de geladeiras e freezers

Os resultados de testes de 2 anos com um conjunto de geladeira e freezer, instalado uma das residências-teste, são descritos a seguir e atualizam dados previamente fornecidos à CEMIG, em outro projeto. Conforme já detalhado, adaptaram-se sistemas de aquecimento a partir da geladeira com compressor de 1/5HP e do freezer com compressor de 1/6HP. Após mais de 60 medições, envolvendo dias e meses, os

dados mostraram consumos médios de energia elétrica de 2,5 kWh /dia para a geladeira e 2,0 kWh /dia para o freezer. Sob condições de inverno (abril, maio e junho) e baixa umidade relativa (40%), os valores de consumo energético foram respectivamente iguais a 2,3 e 1,8 kWh/dia.

As geladeiras testadas podem, em média, fornecer, por dia, fora do pico de demanda, cerca de 294 litros de água, aquecida da temperatura de 21 até 40 °C. As energias térmicas produzidas são 108,4 e 87 kWh mês, respectivamente no caso de geladeiras e freezers (Tabelas 2 a 6).

TABELA 5
Energia gratuita de geladeiras e freezers.

Unidade residencial	Especificação dos compressores		Energia térmica obtida	Volume de água aquecida de 21 a 40 °C, por dia
	Geladeira	Freezer		
1	1/5 HP	1/6 HP	195 kWh-mês	294 litros
2	¼ HP	1/5 HP	218 kWh-mês	330 litros
3	¼ HP	2 x 1/5HP	240 kWh-mês	360 litros

A Tabela 6 mostra uma breve análise econômica de prazo de retorno do capital investido, em termos de valores presentes, sem correção temporal de valores. Considerando que a taxa de fornecimento de energia elétrica seja de R\$ 0,34 por kWh, que o custo do processo de adaptação de uma geladeira e um freezer seja de R\$ 2000,00 (se já existirem conexões hidráulicas, elétricas e tubulações de ar condicionado apropriadas), então o Quadro 9 mostra o tempo de retorno máximo para um sistema para geração das necessidades energéticas para chuveiros de uma residência com até oito banhos de 40 litros por dia é 2,5 anos.

B. Desempenho de sistemas com bombas de calor

Os COPs das bombas de calor, obtidos por meio de testes efetuados em cada uma das 17 casas, oscilaram entre 3,1 e 4,7. Como já mencionado, os COPs dependem da temperatura inicial e final da água, da umidade relativa e temperatura do ambiente, da pressão de alta e de baixa, e das características do fio capilar.

Na realidade, o sistema de bomba de calor consiste da bomba de calor propriamente dita, do reservatório e dos dutos. Assim, as medições aplicadas à residência e aos condomínios da Cidade dos Meninos mostraram que os sistemas de aquecimento usando as bombas de calor desenvolvidas, levaram a COPs médios de 3,1. Estes COPs correspondem a economias energéticas de 68%. COPs de bombas de calor foram superiores e levaram a eficiências energéticas entre 70% e 72%, ou seja, COPs entre 3,3 e 3,5. Os resultados refletem medidas efetuadas durante, no mínimo, 12 meses.

A seguir (Fig. 11) tem-se uma apresentação de dados típicos obtidos de análise experimental de bombas de calor.

Por COP instantâneo deve-se entender o COP medido usando os valores em um intervalo de tempo experimental (ou seja, valores em intervalos de tempo de aproximadamente 15 minutos). O COP médio reflete a média dos COPs durante todo o experimento (energia total fornecida à água/ energia elétrica total).

TABELA 6

Análise econômica sucinta envolvendo a energia gratuita disponível de geladeiras e freezers, com custo de energia igual a R\$ 0,34/kWh

Equipamento	COP térmico	Energia economizada (kwh/mês)	Economia mensal e tempo de retorno (R\$)
Congelador	264%	108,40	36,86
Freezer	Muito alto	87,00	29,58
Total		195,40	66,44

Custo aproximado para uma instalação simples:	R\$ 2.000,00	Nota: Este custo inclui o reservatório montado, equipamentos de controle e conexões a sistemas hidráulico e de refrigeração já prontos	
Prazo de retorno do capital investido	30,10	meses, ou	
	2,51		

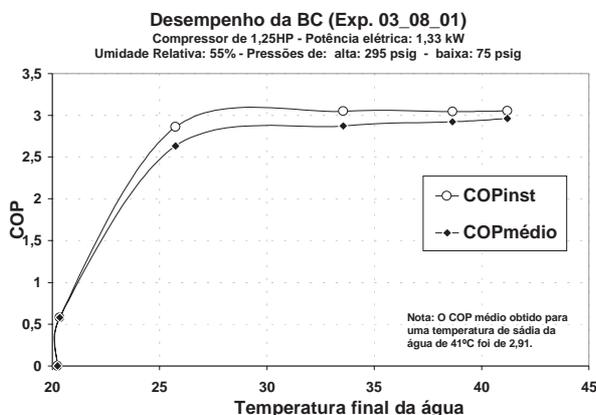


FIGURA 11 - Resultado típico de testes experimentais para determinação do ponto ótimo de funcionamento de bombas de calor

IV. CONCLUSÕES

Este relatório refere-se a um projeto que envolveu o estudo de utilização de geladeiras, freezers, bombas de calor e sistemas acoplados bombas de calor- coletor solar para geração de água quente para residências e condomínios residenciais. O estudo e instalações envolveram o equivalente a 40 residências. Em um dos condomínios (17 unidades com 17 usuários por unidade) instalaram-se bombas de calor para aquecimento de água; em outro condomínio (18 usuários), instalou-se um sistema de bomba de calor acoplado a um coletor solar com 4 m² de área de captação.

1. Geladeiras e Freezers: - Podem-se adaptar geladeiras e freezers para a geração econômica de energia térmica sob a forma de água quente para banhos em residências. Os seguintes dados médios informam sobre a viabilidade:

2. Bombas de calor: - Podem-se usar bombas de calor isoladas ou sistemas de ar condicionado, que também podem funcionar como bomba de calor para a geração econômica de energia térmica sob a forma de água quente para banhos em residências. Os seguintes dados médios informam sobre a viabilidade:

a. seja, uma cobertura energética de 100%.

3. Bombas de calor acopladas a coletores solares: - Podem-se usar bombas de calor acopladas a coletores solares para a geração econômica de energia térmica sob a forma de água quente para banhos em residências.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de Cláudio César Lima e Souza, recebidas durante os experimentos e a elaboração deste documento.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E Source, Inc., "Heat Pump Water Heaters: A Technology Assessment and Market Survey", E-Tech Update TU-94-9, Boulder, Colorado (20pp), December 1994
- [2] USDA (United States Department of Energy / Pacific Northwest National Laboratory), "Federal Technology Alerts: Residential Heat Pump Water Heaters", Disponível: http://www.pnl.gov/fta/3_res.htm, 1995
- [3] U.S. DOE "Energy Efficiency and Renewable Energy Clearinghouse Residential Heat Pump Water Heaters", Disponível: www.eren.doe.gov, 1995.
- [4] J. Bosma. "Heat pumps for energy efficiency and environmental progress", *Proceedings of the fourth international Energy Agency Heat Pump Conference*, Maastricht, The Netherlands, 26-29 april, 1993.
- [5] Nekså, P., Rekstad, H., Zakeri, G.R. and Schiefloe, P.A., "CO₂ - heat pump water heater: characteristics, system design and experimental result", *International Journal of Refrigeration*, Vol 21, No 3, pp. 172-179, 1998.
- [6] Alves-Filho, O., "Improvements of Heat Pump Dryers", *Agric. Equipment Technology Conf and American Society of Agricultural Engineers. Paper no. AETC 95102*. Chicago, Illinois. USA, 1995.
- [7] Alves-Filho, O., "Performance and Improvements in Heat Pump Dryers", *The Tenth International Drying Symposium*, Krakow. Poland, 1996.
- [8] Hodgett, D.L., "Efficient drying using heat pump", *Chemical Engineer*, Vol. 311, pp. 510-512, July/August, 1976.
- [9] Jolly, P., Jia, X., and Clements, S., "Heat pump assisted continuous drying, Part 1: Simulation model", *International Journal of Energy Research*, Vol. 14, pp. 757-770, 1990.
- [10] Jay S., Oliver T.N., "Energy Consumption for Industrial Drying Process in the United Kingdom", *Drying 94*, Vol. A, Proc 9th International Drying Symposium (IDS'94), Gold Coast, Austrália, pp. 683-690, 1994
- [11] Achariyaviriya, S., Sopanronnarit, S. and Terdyothin, A., "Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer", *Dring Technology*, Vol. 18, pp. 479-591, 2000
- [12] Baines, P.G., and Carrington, C.G., "Analysis of Rankine cycle heat pump dryers", *International Journal of Energy Research*, Vol. 12, pp. 495-510, 1988.
- [13] Fischer, S.K., and Rice, C.K., "A steady state computer design model for air-to-air heat pumps", Oak Ridge National Laboratory, USA, 1983
- [14] Green, R.H., and Roberts, L., "The effect of air-coil design on the performance of heat pumps and air conditioners", *ASHRAE Transactions*, Vol. 5, pp. 257-265, 1996
- [15] Mason, R.; Britnell, P.; Young, G.; Birchall, S.; Fitz-Payne, S. and Hesse, B., "The development and application of heat pump dryers to the Australian food industry". *Food Austrália*, Vol. 46, No. 7, pp. 319 - 322. 1998.
- [16] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, "Desenvolvimento de bombas de calor para aquecimento de água em residências e condomínios residenciais", Relatório Técnico , 45 p., Dezembro, 1988.
- [17] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, "Montagem de uma bomba de calor a ser utilizada na cozinha do Edifício Sede", Relatório Técnico, 12 p., Outubro, 1990;
- [18] CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, "Bomba de calor /refrigerador para a Fazenda Energética", Relatório Técnico, 15 p., Setembro, 1996.