

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 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.

O uso de bombas de calor para aquecimento de água em residências, condomínios residenciais tem aumentado grandemente, desde a década de 90, nos EUA [1-3] e na Europa [4,5]. Mais especialmente, bombas de calor têm sido usadas na indústria de alimentos e processamento de grãos [6-10]. Muitos estudos sobre simulação de bombas de calor também encontram-se na literatura [11-15].

Um primeiro trabalho relativo ao uso de geladeiras e freezers como sistemas que podem ser utilizados para gerar água quente foi apresentado pela CEMIG [16-18].

Entretanto, não se encontram disponíveis, quer na literatura mundial, quer na literatura brasileira, dados reais, práticos e direcionados ao projeto de uso de geladeiras e freezers, bombas de calor e bombas de calor acopladas a coletores solares para o aquecimento de água. O objetivo deste trabalho é a apresentação de resultados testes experimentais de laboratório e reais, práticos, de utilização destes equipamentos.

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

Agradecimentos a apoio financeiro devem ser feitos aqui. Exemplo: Este trabalho foi apoiado parcialmente pela Fundação de Inovação Tecnológica.

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

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.

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



Figura 2. O reservatório de água quente e medidores de temperatura e 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. Um desenvolvimento interessante foi a utilização de aletas ao redor dos compressores, com a finalidade de otimização térmica. Outros pontos foram a regulação controlada do fluxo de fluido pelas aletas, de forma a manter em ponto adequado a operação do compressor.



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.

No caso de geladeiras e freezers, efetuava-se o carregamento de gás até o ponto em que as pressões de alta (à entrada do fio capilar) e de baixa (à entrada do compressor) igualavam-se aos seus valores típicos (que levam a temperaturas de aproximadamente -20°C no evaporador). No caso de se usar o fluido refrigerante R12, a pressão de projeto do lado de alta foi ajustada para 1379 kPa e no lado de baixa, 586 kPa. Ao se utilizar o refrigerante R134A, a pressão de projeto no lado de alta foi de 1510 kPa e no lado de baixa, 600 kPa. Estes valores podem variar, de acordo com as quedas de pressão devidas aos diferentes comprimentos e diâmetros de tubos, válvulas, etc. Os critérios básicos foram, portanto, as temperaturas do freezer e do congelador da geladeira.

Os critérios para dimensionamento de tubulações, perdas de carga e capacidades de refrigeração seguem as normas estipuladas pela ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) (1998)¹. Assim, as tubulações de cobre do sistema entre o evaporador e o compressor de geladeiras e freezers foram aumentadas de $\frac{1}{4}$ pol. para $\frac{5}{16}$ pol.

Os sistemas experimentais foram instrumentados de forma a se efetuarem medidas de eficiência e de potências elétricas e térmicas. Os equipamentos de medição de pressão foram colocados tanto à entrada do compressor quanto à sua saída e medidores de temperatura da água foram instalados no interior do reservatório, no seu topo, no ponto médio e no fundo do reservatório (sempre dentro da água). Medições externas de temperatura ambiente da água e do ar permitiram avaliar as perdas térmicas. Abaixo se explicitam os instrumentos e as técnicas de medição de parâmetros das bombas de calor, das geladeiras e dos freezers:

As pressões manométricas de alta e de baixa (ou seja, nos lados de alta e de baixa pressão) foram efetuadas por meio

¹ ASHRAE. Refrigeration Handbook. Chapter 2. ASHRAE, Atlanta, Ga, 1998.

de manômetros de gás de precisão de leitura de $\pm 0,05$ psi. As temperaturas no interior do congelador da geladeira e no interior do freezer foram feitas por meio de termômetros de mercúrio ($\pm 0,25$ °C), termômetros de expansão de gás ($\pm 0,25$ °C) e termômetros digitais ($\pm 0,1$ °C). Controles de temperatura foram efetuados por meio de controlador-indicadores on-off ($\pm 0,1$ °C); os termostatos tinham precisão de $0,5$ °C.

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. Constatou-se a existência de um processo de estratificação de temperaturas; houve, normalmente uma diferença de 1 a $2,5$ °C entre as temperaturas observadas perto do topo do reservatório (região mais quente) e perto do fundo (região mais fria). Entretanto, por motivos de maior segurança (confiabilidade) dos dados finais, utilizaram-se, neste trabalho, somente as temperaturas no fundo do reservatório, que geram as menores eficiências térmicas. Mais especificamente, os equipamentos de medição-controle de temperatura e medição de umidade relativa tinham a especificação mostrada no Quadro 1.

QUADRO 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 nos Quadros 2 e 3; os dados foram fornecidos pelo fabricante.

QUADRO 2. DADOS DA GELADEIRA - FROST FREE – 2 PORTAS – 430

Modelo	BRG43ABANA	Tensão	127 V
Série	SD0677230	Frequência	60 HZ
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
Consumo nominal da Geladeira = 64 kWh/mês = 2,13 kWh/dia					

QUADRO 3. DADOS DO FREEZER – CONGELADOR VERTICAL AUTOMÁTICO

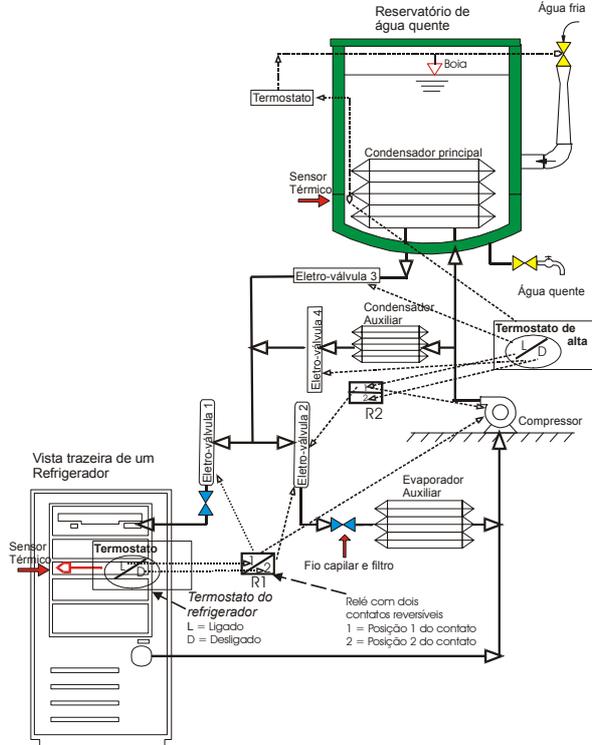
Modelo	BVG27ABANA	Tensão	127 V		
Série	JE0473581	Frequência	60 HZ		
Fluido	R-12 – 125g	Corrente	2.5 A		
Cap. Congelamento 24 horas	15.0 kg	Potência	174 W		
Pot. Res.	500 W	Tipo de produto	Congelador		
Temp. do congelador	-18 °C	Tempo max. de conservação sem energia	19h		
Pressões de Projeto			Volume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

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 evapo-



radador auxiliar, um condensador auxiliar, duas eletro-válvulas, respectivamente designadas por eletro-válvulas 1 e 2 e dois relés de contatos reversíveis. Neste caso,

- O **termostato do refrigerador (ou condicionador de ar)**, quando ligado (L), atuará sobre o relé R1, colocando-o na posição (contato) 1 e ligando, conseqüentemente, a eletro-válvula 1 e o compressor, permitindo o resfriamento do refrigerador. Quando o termostato do refrigerador estiver desligado (D), o contato de R1 será mantido na posição 2, abrindo a eletro-válvula 2, permitindo o funcionamento do evaporador auxiliar.
- Quando o **termostato de alta** estiver ligado (L), ou seja, quando a temperatura do reservatório estiver **abaixo** do valor máximo de projeto, a eletro-válvula 3 ficará aberta permitindo o funcionamento regular do sistema, com controle total pelo termostato do refrigerador; o relé de contato estará na posição 1, permitindo o funcionamento do evaporador auxiliar e do compressor que funcionará para permitir o aquecimento da água do reservatório. Quando a temperatura estiver alta (acima do valor de projeto), o termostato de alta estará desligado, permitindo o funcionamento do condensador auxiliar; o evaporador auxiliar e o compressor serão desligados; entretanto, o compressor pode ser acionado pelo termostato (relé) do refrigerador; neste caso, o circuito constituir-se-á essencialmente do refrigerador, compressor, condensador auxiliar e fio capilar (+filtro).

4) 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 técnicas²:

- **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 aqueci-

mento 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.

Tipicamente, há cinco ou menos pessoas e dois chuveiros numa casa residencial. Assim, supôs-se que as 17 casas da Cidade dos Meninos equivalem a 28 casas convencionais.

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.

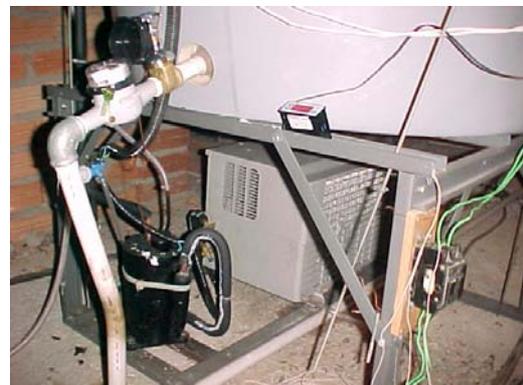


Figura 6. Detalhes do sistema de aquecimento, instalado



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

² Por motivo de modificação de ponto de operação, não se identifica o fabricante.



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.*

O quadro 4 mostra os tipos de equipamentos utilizados.

QUADRO 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	Condomínio	26	289

calor			
Bombas de calor com coletor solar	Residências	10	50
Bombas de calor com 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 (Quadros 2 a 6). Os valores refletem valores médios anuais. A energia obtida é maior durante o verão (quando a geladeira e freezer funcionam por mais tempo durante o dia e a umidade relativa é maior).

O Quadro 8 sumariza a energia gratuita passível de serem obtidas de geladeiras e freezers de volumes úteis iguais ou superiores a 500 litros e 260 litros, respectivamente. Os valores obtidos refletem dados de 2 anos (unidades residenciais 1 e 2) e 1 ano (unidade residencial 3).

QUADRO 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

O Quadro 9 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.

O custo do equipamento e o tempo de retorno podem variar sensivelmente com um aumento de produção de componentes e número de unidades instaladas, além de uma política de beneficiamento de usuários que façam economia energética em horários de pico de demanda.

A quantidade de água quente fornecida é limitada. Assim, em caso de residências com maior consumo de água, sugere-se o uso de bombas de calor acopladas ao sistema proposto.

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.

Abaixo (Fig. 14) 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).

QUADRO 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	Economia mensal e tempo de retorno
		(kwh/mês)	(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 anos		

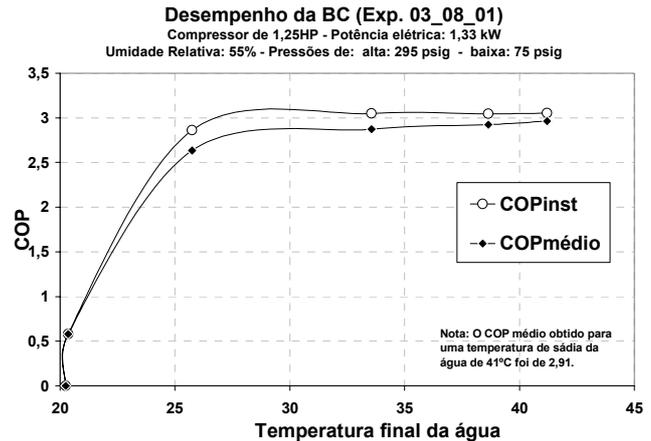


Figura 11. Resultado típico de testes experimentais para determinação do ponto ótimo de funcionamento de bombas de calor

A Fig. 15 mostra o comportamento da bomba de calor usada com COP=3,1, quando usada sob diferentes condições de demanda. A figura mostra a capacidade de geração de água quente de uma bomba de calor, em função do tempo de operação, e comparação entre a energia térmica obtida com a energia elétrica consumida.

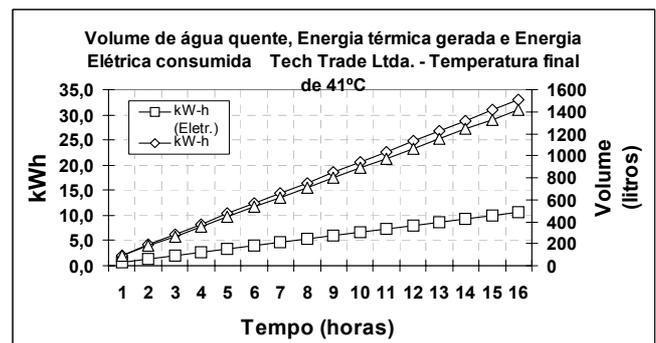


Figura 12. Capacidade de geração de água quente de uma bomba de calor com COP = 3,1.

O quadro 10 apresenta uma breve análise econômica de prazo de retorno do capital investido em bomba de calor, supondo um custo inicial de R\$ 2200,00, em termos de valores presentes, sem correção temporal de valores. O valor de R\$ 2200,00 foi tomado a partir da avaliação dos custos de todos os materiais e serviços usados na confecção das bombas de calor, acrescidos das taxas municipais e federais associadas. Os dados de análise econômica, aqui apresentados, não levam em consideração o valor temporal do investimento.

QUADRO 7. ANÁLISE ECONÔMICA DE UMA BOMBA DE CALOR, COM COP = 3,1

Dados :		COP = 3,1		ΔT = 20 °C		Tarifa = R\$ 0,34/kWh	
Volume aquecido (litros/dia)	Consumo mensal de energia elétrica, kWh	Economia Energética devido à BC, kWh	Economia mensal, R\$	Tempo de retorno do capital, meses			
100	69,77	47,26	16,07	136,91			
200	139,53	94,52	32,14	68,45			
300	209,30	141,79	48,21	45,64			
400	279,07	189,05	64,28	34,23			
500	348,84	236,31	80,35	27,38			

O Quadro 10 mostra que sistemas com Bombas de Calor tornam-se mais viáveis economicamente, quando o consumo de água quente é maior que 300 litros de água quente por dia. Supondo um consumo de 40 litros de água quente por banho, a viabilidade econômica está associada a oito (ou mais) banhos diários.

C. Desempenho de sistemas com bombas de calor com energia solar

Os resultados obtidos mostram que o melhor sistema para otimização energética é o uso acoplado de bombas de calor e coletores solares. Os dados mostram que sistemas que utilizam bombas de calor e coletores solares levam a COPs muito elevados, gerando eficiências energéticas da ordem de 90%. Este valor refere-se a uma média anual, sob condições meteorológicas de Belo Horizonte, em 2001 e parte de 2002.

O Quadro 11, abaixo, resume os dados obtidos. Deve-se notar que os menores valores de COP (residências número 1, 2, 4 e 6), referem-se a testes experimentais efetuados sem a presença de coletores solares; portanto, este é o menor COP possível, sob condições normais de operação. Interessantemente, mesmo sob condição de insolação, estas mesmas residências não tiveram o COP aumentado pois o consumo de água quente foi muito pequeno (inferior a 200 litros de água quente por dia). Assim, a bomba de calor funciona quase que só para reaquecer a água do reservatório, sob condição de alta temperatura (ou seja, de baixo COP instantâneo). Residências com consumo mais elevado de água quente levaram a COPs elevados. As residências de número 1 a 7 e 9 usaram, em média, coletores de 2 m² de área exposta. As residências de número 8 e 10 usaram coletores solares de 4 e 6 m² de área exposta, respectivamente.

A figura 16 mostra que existe uma correlação entre o consumo de água quente e a economia energética a se esperar de sistemas BC -coletor solar.

QUADRO 8. EFICIÊNCIAS ENERGÉTICAS DE SISTEMAS QUE EMPREGARAM BOMBA DE CALOR ASSOCIADA A COLETOR SOLAR

Número	COP	Economia de energia	COP	Economia de energia	Período de medições (meses)	Consumo de água quente (litros/dia)	Temperatura da água
1	3,1	68%	1	0%	1	43	40 °C
2	3,6	72%	1,8	44%	0,2	61	44 °C
3	7,6	87%	7,6	87%	0,6	112	43 °C
4	3	67%	3	67%	1	125	39 °C
5	4	75%	4	75%	1,5	136	41 °C
6	3,1	68%	2,8	64%	1,2	174	45 °C
7	4	75%	4	75%	1,5	202	39 °C
8	7,8	87%	7,8	87%	7,3	276	50 °C
9	4,9	80%	4,9	80%	5,6	328	47 °C
10	19,7	95%	19,7	95%	9,5	563	47 °C

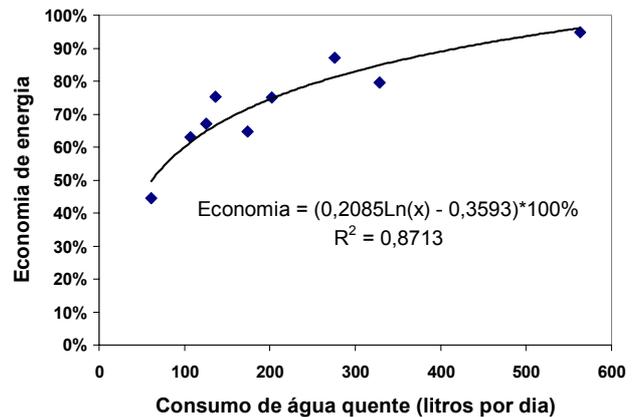


Figura 13. Efeito da taxa de consumo de água quente sobre a economia energética de sistemas de bomba de calor acoplada com coletor solar.

O Quadro 12 mostra que, mesmo com um custo mais elevado (R\$ 2300,00 versus R\$ 2000,00), sistemas que utilizam BC e coletores solares pagam-se no mesmo tempo que instalações mais simples de BC.

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.

As principais conclusões deste trabalho são:

- 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:
 - Custo aproximado de transformação de conjuntos de geladeira e freezer para a geração de água quente, incluindo a aquisição de dois compressores novos: R\$ 2000,00.
 - Tempo de retorno do capital investido: 2,5 anos.

- c. Energia térmica disponibilizada pelo sistema: 200 kWh.
- d. Água quente disponibilizada por dia (a 40 °C, partindo de água a 21°C): 300 l, aproximadamente.
- e. Vida útil do sistema: Os compressores operam no ponto de operação recomendado pelos fabricantes, espera-se, então, que a sua vida útil permaneça idêntica à de compressores usados em refrigeração e ar condicionado.

QUADRO 9. ANÁLISE ECONÔMICA DE UM SISTEMA COM BOMBA DE CALOR E COLETOR SOLAR, COM COP = 4 E CUSTO TOTAL DE R\$ 2300,00.

Dados :	COP = 4	$\Delta T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	Tarifa = R\$ 0,34/kWh	
Volume aquecido (litros/dia)	Consumo mensal de energia elétrica, kWh	Economia de Energética devido à BC, kWh	Economia mensal, R\$	Tempo de retorno do capital, meses
100	69,77	52,33	17,79	140,52
200	139,53	104,65	35,58	70,26
300	209,30	156,98	53,37	46,84
400	279,07	209,30	71,16	35,13
500	348,84	261,63	88,95	28,10

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. Custo aproximado de bombas de calor que utilizam compressores de 1 HP: R\$ 2000,00.
- b. O tempo de retorno do capital investido depende do consumo de água quente: Para consumos de 200, 300, 400 e 500 litros de água quente por dia (40 °C), os tempos de retorno de capital são, respectivamente, iguais a 5,7, 3,8, 2,9 e 2,3 anos.
- c. O COP médio do sistema de aquecimento foi de 3,1; o COP médio de testes chegou a 3,5. O COP médio depende principalmente de condições climáticas e do hábito de uso de água quente das residências. Quanto maior for uso de água quente por uma residência, maior será o COP.
- d. Energia térmica potencialmente disponibilizada pelo sistema: mais que 1400 litros de água quente por dia, ou 1500 kWh-dia ou 45 000 kWh-mês. Assim, um sistema, com um compressor de 1 HP, permite mais de 30 banhos por dia, com gasto de 40 litros por banho.
- e. Vida útil do sistema: Os compressores operam no ponto de operação recomendado pelos fabricantes, espera-se, então, que a sua vida útil permaneça idêntica à de com-

pressores usados em refrigeração e ar condicionado.

- f. O sistema de bomba de calor permite ter-se água quente durante todo ano, ou 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. Os seguintes dados médios informam sobre a viabilidade:

- a. Custo aproximado de bombas de calor que utilizam compressores de 1 HP: R\$ 2300,00.
- b. O tempo de retorno do capital investido depende do consumo de água quente: Supondo um COP de 4, para consumos de 200, 300, 400 e 500 litros de água quente por dia (40 °C), os tempos de retorno de capital são, respectivamente, iguais a 5,9, 3,9, 2,9 e 2,3 anos.
- c. O COP médio do sistema de aquecimento foi superior a 4; o COP médio de testes chegou a 19. O COP médio depende principalmente de condições climáticas e do hábito de uso de água quente das residências. Quanto maior for uso de água quente por uma residência, maior será o COP. Sistemas em residências com consumos superiores a 300 litros de água quente por dia podem ter COPs extremamente altos.
- d. Energia térmica potencialmente disponibilizada pelo sistema: mais que 1800 litros de água quente por dia, ou 1900 kWh-dia ou 57 000 kWh-mês. Assim, um sistema, com um compressor de 1 HP, permite quase 50 banhos por dia, com gasto de 40 litros por banho.
- e. Vida útil do sistema: Os compressores operam no ponto de operação recomendado pelos fabricantes, espera-se, então, que a sua vida útil permaneça idêntica à de compressores usados em refrigeração e ar condicionado.
- f. O sistema de bomba de calor permite ter-se água quente durante todo ano, ou seja, uma cobertura energética de 100%.

Um sistema típico de coletor solar plano permite uma economia energética anual de 70%, ou seja, permite que se consuma apenas 30% do que se consumiria usando energia elétrica. Entretanto, além dos incômodos devido às condições climáticas, há o problema de necessidade de aquecimento elétrico durante o período de ponta. O sistema bomba de calor / coletor solar permite economias energéticas da ordem de 90%, elimina a necessidade de uso de energia elétrica durante o horário de ponta, e não apresenta inconvenientes climatológicos. O custo de ambos os sistemas é aproximadamente o mesmo.

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] Neksa, P., Rekestad, 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., Sapanronnarit, S. and Terdyothin, A., "Mathematical model development and simulation of heat pump fruit dryer", *Drying 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.