

ANALYSIS OF TEMPERATURES FOR GEOTHERMAL HEAT PUMPS APPLICATION IN PARANÁ

ANÁLISE DE TEMPERATURAS GEOTÉRMICAS PARA APLICAÇÃO DE BOMBAS DE CALOR NO PARANÁ

Alexandre F. Santos - paidakantsy@hotmail.com

Faculdade Profissional - FAPRO

Heraldo J. L. de Souza - heraldosouza1@gmail.com

Faculdade Profissional - FAPRO

Mauricio P. Cantão - mpcanto@gmail.com

Universidade Federal do Paraná

Pedro D. Gaspar - dinis@ubi.pt

Universidade da Beira Interior

Abstract

Geothermal heat pumps are broadly used in developed countries but scarcely in Brazil, in part because there is a lack of Brazilian soil temperature data. The aims of this work are: to show soil temperature measurements and to compare geothermal heat pumps system performance with conventional air conditioning systems. Geothermal temperature measurement results are shown for ten Paraná State cities, representing different soil and climate conditions. The measurements were made yearlong with calibrated equipment and digital data acquisition system in different measuring stations. Geothermal and ambient temperature data were used for coefficient of performance (COP) simulation, by means of working fluid pressure-enthalpy diagram based software for vapor-compression cycle. It was verified that geothermal temperature measured between Jan/13 to Oct/13 varied from 16 to 24 °C, while ambient temperature has varied between 2 and 35 °C. Average COP values for conventional system were 3.7 (cooling) and 5.0 kW/kW (heating), corresponding to 5.9 and 7.9 kW/kW for geothermal system. Hence it was verified an average efficiency gain of 59% with geothermal system utilization in comparison with conventional system.

Resumo

Bombas de calor geotérmicas são muito utilizadas em países desenvolvidos, porém, são pouco utilizadas no Brasil, em parte porque faltam medidas de temperatura do solo brasileiro. Os objetivos deste trabalho são: apresentar medidas de temperatura geotérmica e comparar o desempenho do sistema geotérmico e do sistema convencional de ar condicionado. Apresentam-se resultados da medição de temperatura geotérmica em dez cidades paranaenses, representativas dos diferentes solos e climas. As medições foram realizadas ao longo de um ano, com equipamentos aferidos e sistemas digitais de aquisição de dados nas diferentes estações de medição instaladas. Os dados de temperatura geotérmica e ambiente foram utilizados para simulação do coeficiente de performance (COP), por meio de software de dimensionamento de sistemas em ciclo de refrigeração por compressão de vapor, baseado no diagrama de pressão-entalpia do fluido de trabalho. Verificou-se que a temperatura geotérmica medida entre janeiro e outubro de 2013 variou de 16 a 24 °C, enquanto a temperatura ambiente variou entre 2 e 35 °C. Valores médios de COP para o sistema convencional foram de 3,7 (refrigeração) e 5,0 kW/kW (aquecimento), correspondente a 5,9 e 7,9 para o sistema BCG, o que significa ganho em eficiência de 59% com o uso do sistema geotérmico.

Keywords

Geothermal Heat Pumps. Cooling. Geothermal Map.

Palavras-chave

Bombas de Calor Geotérmicas. Refrigeração. Mapa Geotérmico.

Análise de temperaturas geotérmicas para aplicação de bombas de calor no Paraná (Brasil)

1. Introdução

A palavra “geotérmica” segundo Egg & Howard (2011), vem do grego *geo* (terra) e *thermos* (calor). Portanto, geotérmico significa usar o calor da terra. Existem diferentes aplicações de tecnologia geotérmica. Uma delas é a geração de eletricidade, tipicamente realizada em enormes sistemas de geração nos quais água é introduzida no solo de regiões geotérmicas de alta temperatura, gerando vapor para acionamento de turbinas e geração de eletricidade. Instalações deste tipo existem apenas em locais com alta atividade geotérmica, alguns países asiáticos e europeus. Nas Filipinas, por exemplo, a energia geotérmica responde por 8.900 MW e representa 25% da eletricidade gerada (Egg & Howard, 2011). Outra forma de utilizar a energia geotérmica consiste no aproveitamento da temperatura a valor constante abaixo da superfície da terra em bombas de calor geotérmicas (BCG). A fonte geotérmica de calor favorece o aumento da eficiência energética, podendo ser empregada em sistemas de refrigeração de edificações urbanas, com uma economia de energia elétrica variando entre 70% e 140% no inverno, na comparação com bombas de calor a ar (USDOE, 2013).

As bombas de calor são dispositivos de operação simples e bom desempenho térmico, características que apontam para um grande potencial no mercado de condicionamento de ar ambiente.

O Brasil não apresenta as mesmas condições climáticas dos países onde as bombas de calor geotérmicas são mais utilizadas, o que levanta a dúvida sobre a viabilidade técnica do sistema BCG. Para que as bombas de calor geotérmicas conquistem uma cota de mercado relevante no mercado brasileiro é preciso avaliar o potencial térmico do solo em diferentes localidades, de modo a garantir que as bombas de calor apresentem desempenho satisfatório em grande número de aplicações. Convém ressaltar que atualmente no Brasil faltam informações relativas aos sistemas geotérmicos superficiais, devido à ausência de sistemas instalados e de dados sobre o potencial geotérmico específico para a aplicação em bombas de calor, para isso será estudado com precisão na medição da temperatura do solo. A partir da avaliação do potencial geotérmico de superfície numa área significativa será possível avaliar a viabilidade da tecnologia BCG em âmbito regional e nacional.

Este trabalho de índole experimental foi desenvolvido no Estado do Paraná (Brasil). A avaliação do potencial geotérmico de superfície foi feita por meio da medição de temperaturas do solo a 2 m abaixo da superfície, profundidade de operação do sistema em circuito fechado (*closed loop system*) conforme exposto na Fig. 1, que é o mais utilizado para BCG.

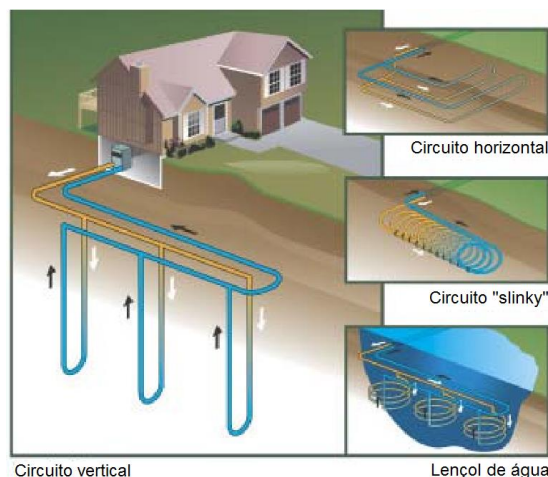


Figura 1 - Bomba de calor geotérmica em circuito fechado e banho térmico de solo e lago.

A instalação de bombas de calor geotérmicas proporciona redução no consumo de energia, confirmando oportunidades para o surgimento de fábricas do produto no Brasil. A comercialização do produto no mercado interno pode favorecer a criação de um novo nicho de mercado no Brasil.

2. Materiais e Métodos

A seleção das cidades para instalação das estações foi baseada na representatividade dos diferentes solos do Paraná. Os locais de instalação nas diferentes cidades foram escolhidos segundo a facilidade de medição das temperaturas na profundidade de 2 m, determinada basicamente pelo acesso ao local e pela capacidade de realização dos furos. Nestes locais, foram instaladas as estações de temperatura, conforme apresentado na Fig. 2. A seleção do local para instalar as estações priorizou áreas com marquises cobertas para proteger os controladores de sol e chuva, sendo que este fato não interfere nos resultados obtidos.

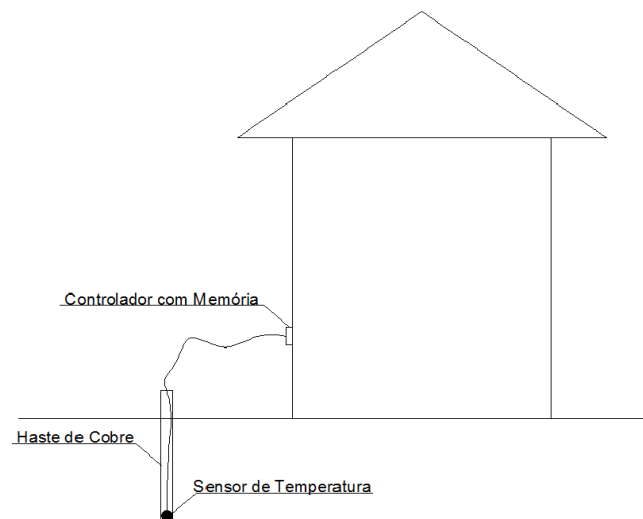


Figura 2 - Modelo de estação de análise de temperatura.

A medição de temperatura foi efectuada por meio de um termopar *Full Gauge Controls* inserido e fixado num tubo de PVC com diâmetro de 9,5 mm. Segundo o fabricante, este sensor destina-se ao controlo de temperatura de sistemas de refrigeração, em conjunto com controladores eletrónicos também fabricados pela empresa. Na Fig. 3 são mostrados o sensor e a montagem do mesmo no solo.



Figura 3 - Sensor (à esquerda) e montagem em tubo inserido no solo.

A profundidade foi definida a partir do trabalho de Egg & Howard (2011), que mediram a variação de temperatura geotérmica nos Estados Unidos da América (EUA) (média de todo o país) de acordo com a profundidade e a estação do ano. Segundo os autores, o ponto mais próximo da superfície e onde as temperaturas do solo no verão e no inverno são praticamente iguais, situa-se cerca de dois metros abaixo do nível da superfície.

Foram realizadas quatro leituras diárias fazendo uso de um sistema SITRAD da *Full Gauge Controls* com interface série RS-485 e um computador. Os gráficos foram construídos com quatro leituras em diferentes momentos do dia:

- 02h00 (madrugada, temperatura externa mais baixa);
- 08h00 (período matutino; influência da radiação a leste);
- 12h00 (temperatura externa mais alta);
- 16h00 (pico de irradiação a oeste).

A memória do dispositivo foi suficiente para armazenar os 4 valores diários durante um ano.

3. Avaliação do Desempenho Térmico

Os resultados adquiridos nas estações de medição foram usados para calcular o coeficiente de performance (COP - *Coefficient Of Performance*) de uma bomba de calor virtual reversível operando com o solo como fonte de calor. Para o cálculo do COP foi utilizado o software desenvolvido pela empresa Bitzer (Bitzer, 2012). O cálculo baseia-se no diagrama pressão-entalpia do fluido refrigerante (DPEFR). Neste estudo usou-se o fluido R-410A. Um diagrama P-h contendo o ciclo de refrigeração por compressão de vapor é apresentado na Fig. 4. O COP foi calculado a partir dos valores da alta pressão (condensação) e da baixa pressão (evaporação), dos valores de sobreaquecimento do fluido refrigerante na saída do evaporador (etapa 2-2' na Fig. 4) e de subarrefecimento na saída do condensador (etapa 3'-3). O software da Bitzer usa o mesmo princípio de cálculo, porém, possivelmente os valores são determinados a partir de dados tabelados representando o DPEFR.

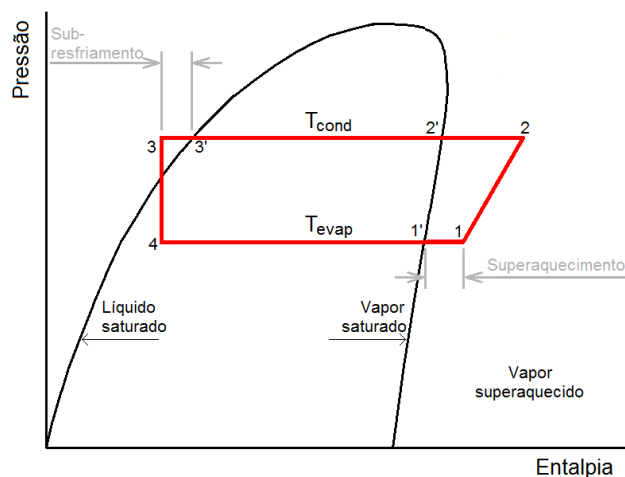


Figura4 - Diagrama de Pressão-Entalpia de um fluido refrigerante.

Os dados de entrada do software são: temperaturas de evaporação T_{evap} (no inverno) e de condensação T_{cond} (no verão), estimadas a partir dos valores de temperaturas externas, T_{EXT} , e geotérmicas, T_{GEO} . Também foi necessário inserir o tipo de compressor e o fluido refrigerante, bem como os valores de sobreaquecimento e de subarrefecimento do fluido.

A diferença de temperatura (*approach*), ΔT , foi determinada em função da característica do sistema e a partir de valores adotados em projetos reais de sistemas de ar condicionado. Em Foz do Iguaçu, por exemplo, foi instalado um sistema a água com torre de arrefecimento com temperatura de condensação de 35 °C e temperatura de entrada da água de 29 °C (Santos,

2011), ou seja, $\Delta T = 6 \text{ }^\circ\text{C}$. Por outro lado, os valores utilizados em projeto de refrigeração a ar de Curitiba consistiram numa temperatura de condensação de $42 \text{ }^\circ\text{C}$ e temperatura externa de $31 \text{ }^\circ\text{C}$ (Santos, 2010), resultando em $\Delta T = 11 \text{ }^\circ\text{C}$. Portanto, os valores de ΔT usados no software Bitzer foram de $11 \text{ }^\circ\text{C}$ para a bomba de calor convencional e $6 \text{ }^\circ\text{C}$ para a bomba geotérmica.

3.1 Temperaturas externas

As temperaturas do ar externo nas estações de medição foram obtidas da norma NBR 16401-1/08 (ABNT, 2008) ou por medição. Para as estações de Curitiba, Foz do Iguaçu e Londrina utilizaram-se os dados de projeto da norma mencionada. Para as cidades distantes até 150 km usaram-se os mesmos valores das cidades tabeladas: Maringá (Londrina), Pinhais (Curitiba) e Cascavel (Foz do Iguaçu). Para as restantes estações, os dados foram obtidos das medições da temperatura externa de inverno, realizadas em campo usando o procedimento normalizado (média das 35 horas mais quentes ou mais frias do ano). Os dados de projeto da norma NBR 16401-1/08 e os valores médios medidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Temperatura externa máxima de verão e mínima de inverno.

LOCAL DE MEDIÇÃO	$T_{\text{verão}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{inverno}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Cascavel	35,10	3,40
Curitiba	30,90	2,40
Foz do Iguaçu	35,10	3,40
Guaratuba	33,00	7,50
Ipanema	33,00	7,50
Londrina	33,90	7,20
Maringá	33,90	7,20
Pinhais	30,90	2,40
Ponta Grossa	32,00	2,10
Toledo	34,90	2,40

3.2 Temperaturas geotérmicas

Verificou-se para todas as estações de medição que a temperatura geotérmica oscilou até $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ num único dia, $0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ numa semana e entre 4 e $7 \text{ }^\circ\text{C}$ ao longo do ano, o que comprova a estabilidade térmica do solo a 2 m de profundidade. Os valores de verão e inverno foram obtidos da média das 25 horas mais quentes e mais frias, respectivamente, conforme procedimento da norma NBR 16401-1/08. Na Tabela 2 são apresentados os valores de temperatura geotérmica obtidas para o verão e para o inverno nas diferentes estações paranaenses.

Tabela 2 - Valores das temperaturas geotérmicas de verão e inverno.

LOCAL DE MEDIÇÃO	$T_{\text{verão}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$T_{\text{inverno}} \text{ (}^\circ\text{C)}$
Cascavel	22,90	16,00
Curitiba	22,10	18,10
Foz do Iguaçu	23,00	17,70
Guaratuba	22,90	18,20
Ipanema	23,00	18,30
Londrina	24,00	16,20
Maringá	23,00	17,90
Pinhais	20,90	17,00
Ponta Grossa	21,10	18,00
Toledo	23,00	17,70

3.3 Resumos das medições de temperatura

Na Fig. 5 apresenta-se um resumo de todas as temperaturas determinadas nas estações de medida, nas cidades onde foram instaladas as estações de medição.

Os valores médios obtidos foram de $33,27 \text{ }^\circ\text{C}$ (externa/verão), $22,59 \text{ }^\circ\text{C}$ (geotérmica/verão), $4,55 \text{ }^\circ\text{C}$ (externa/inverno) e $17,51 \text{ }^\circ\text{C}$ (geotérmica/inverno). Verifica-se que a diferença entre

as médias das temperaturas externas (EXT) e geotérmicas (GEO) é de 10,68 °C no verão e de 12,96 °C no inverno. As diferenças entre as médias de verão e de inverno são de 28,72 °C para a temperatura externa e de 5,08 °C para as temperaturas geotérmicas. Verifica-se que as temperaturas geotérmicas têm menor variação e são menos extremas que as temperaturas externas. No entanto, não se verifica nenhuma tendência clara de variação com a localização, exceto na temperatura externa de inverno, mais alta nas cidades do Litoral e do Norte do Paraná e menores nas restantes, conforme Tab. 3.

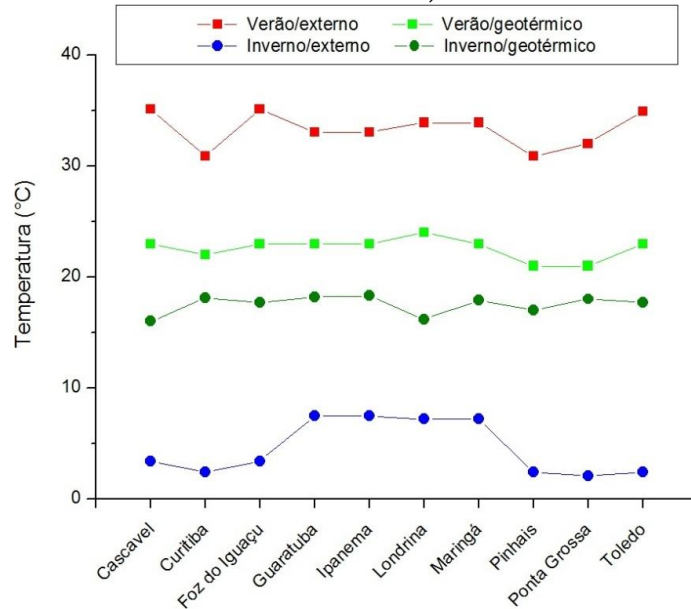


Figura 5 - Resumo das temperaturas externas e geotérmicas, determinadas nas diferentes estações de medida no verão e no inverno.

Tabela 3 - Dados de temperatura, COP e Ganho de Eficiência em todas as estações de medição do Paraná.

	$T_{\text{verão}} (^{\circ}\text{C})$			$T_{\text{inverno}} (^{\circ}\text{C})$			$\Delta T_{\text{medio}} (^{\circ}\text{C})$	$\text{COP}_{\text{verão}} (\text{kW/kW})$			$\text{COP}_{\text{inverno}} (\text{kW/kW})$			$\Delta\text{COP}_{\text{medio}}$	
	EXT	GEO	ΔT	EXT	GEO	ΔT		EXT	GEO	$\Delta\text{COP} (\%)$	EXT	GEO	$\Delta\text{COP} (\%)$	(%)	
Cascavel	35,10	22,90	12,20	3,40	16,00	12,60	12,40	3,51	5,87	67,24	4,82	7,64	58,51	62,87	
Curitiba	30,90	22,10	8,80	2,40	18,10	15,70	12,25	4,01	6,00	49,63	4,69	8,02	71,00	60,31	
Foz do Iguaçu	35,10	23,00	12,10	3,40	17,70	14,30	13,20	3,51	5,86	66,95	4,82	7,94	64,73	65,84	
Guaratuba	33,00	22,90	10,10	7,50	18,20	10,70	10,40	3,76	5,87	56,12	5,40	8,03	48,70	52,41	
Ipanema	33,00	23,00	10,00	7,50	18,30	10,80	10,40	3,76	5,86	55,85	5,40	8,06	49,26	52,56	
Londrina	33,90	24,00	9,90	7,20	16,20	9,00	9,45	3,65	5,69	55,89	5,35	7,67	43,36	49,63	
Maringá	33,90	23,00	10,90	7,20	17,90	10,70	10,80	3,65	5,86	60,55	5,35	7,99	49,35	54,95	
Pinhais	30,90	20,90	10,00	2,40	17,00	14,60	12,30	4,01	6,20	54,61	4,69	7,82	66,74	60,68	
Ponta Grossa	32,00	21,10	10,90	2,10	18,00	15,90	13,40	3,88	6,17	59,02	4,64	8,00	72,41	65,72	
Toledo	34,90	23,00	11,90	2,40	17,70	15,30	13,60	3,54	5,86	65,54	4,69	7,94	69,30	67,42	
MÉDIA	33,27	22,59	10,68	4,55	17,51	12,96	11,82	3,73	5,92	59,14	4,99	7,91	59,34	59,24	
Desvio Padrão	1,60	0,95	1,12	2,45	0,83	2,51	1,45	0,19	0,16	5,88	0,34	0,15	10,85	6,42	

No verão a diferença entre as temperaturas externa e geotérmica foi de 10,68 °C, enquanto no inverno esta diferença foi de 12,96 °C. A média do ganho de eficiência foi de 59,24% nos dois extremos de temperatura, mas com maior variação no inverno.

Os valores de COP para inverno e verão, obtidos a partir dos dados de temperatura externa e geotérmica, são apresentados na Fig. 6, para as estações em ordem alfabética. O ganho

médio em valor absoluto de ΔCOP foi de 2,2 kW/kW para o verão e 2,9 kW/kW para o inverno, nas dez estações paranaenses avaliadas.

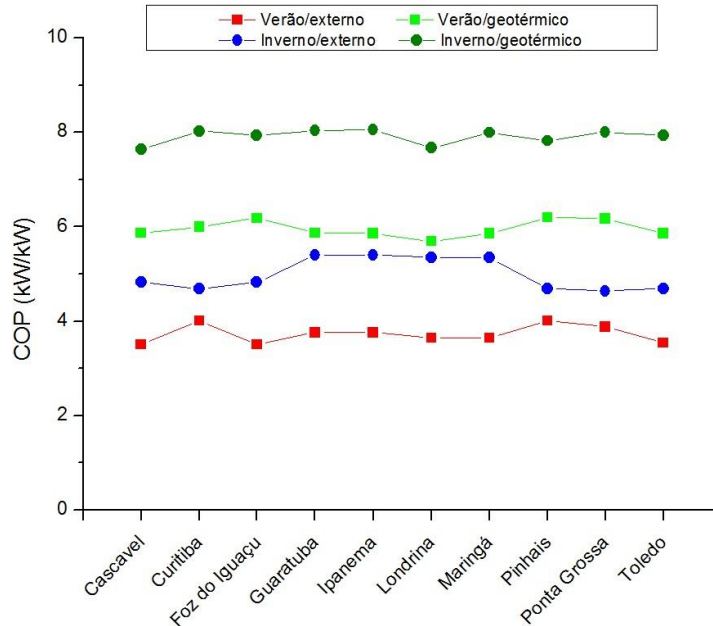


Figura 6 - Valores de COP para as estações de medição.

Na Fig. 7 são apresentados os valores de ganho de eficiência, calculados com os dados da Tabela 3.

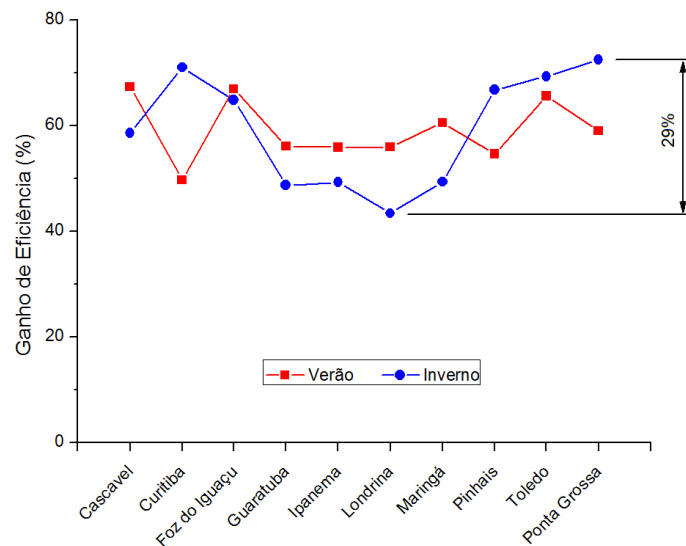


Figura 7 - Ganho de eficiência energética no verão e no inverno nas estações do Paraná, com a troca do sistema convencional pelo sistema geotérmico.

O ganho de eficiência (ΔCOP) no verão variou entre cerca de 49,63% (Curitiba) e 66,97% (Foz do Iguaçu), ao passo que para o inverno o ganho variou entre 43,36% (Londrina) e 72,41% (Ponta Grossa). Seis das dez estações apresentaram ganhos acima de 50% no inverno, enquanto no verão todas ficaram acima de 49%. Os valores médios de ganho foram 59% para o verão e para o inverno, sendo que em todas as estações de medição se verificou ganho de eficiência associado ao uso do sistema geotérmico. O ganho de eficiência verificado é próximo, porém, menor que a faixa preconizada pelo USDOE, entre 70% e 140% (USDOE,

2013). Esta faixa é esperada para as noites mais frias do inverno norte-americano, o que é coerente com a variação linear de ΔCOP com $\Delta T = T_{\text{GEO}} - T_{\text{EXT}}$ e com a menor temperatura externa nos estados mais frios dos EUA. Entretanto, a situação deve ser diferente no verão, pois as temperaturas observadas no Paraná são maiores que na maioria dos estados norte-americanos e espera-se que ΔT (e, portanto ΔCOP) também seja maior no Brasil.

4. Variação das Temperaturas Geotérmicas

Na Figura 8 são apresentados os valores das temperaturas geotérmicas nas dez estações de medida entre janeiro e outubro de 2013. A temperatura mínima foi de 16 °C, observada em Cascavel em agosto, e a máxima foi de 24 °C, em Londrina no mês de fevereiro.

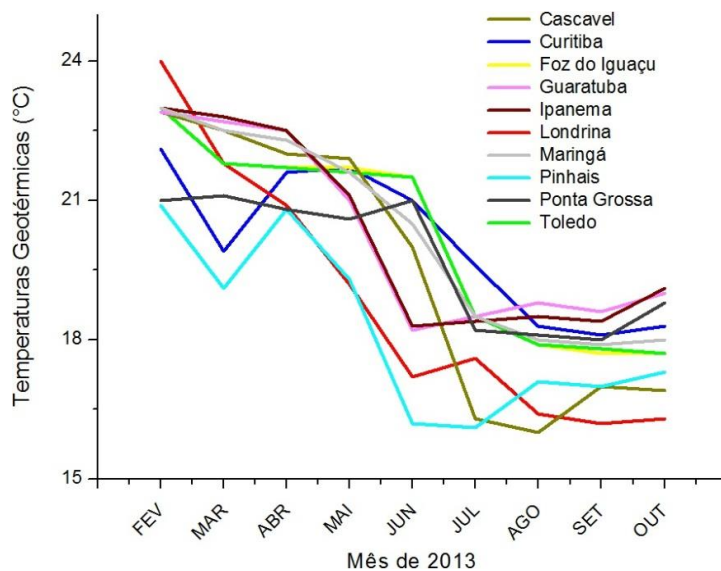


Figura 8 - Temperatura geotérmica entre fevereiro e outubro de 2013.

Os valores apresentados na Fig. 10 formam um conjunto de dados pequeno para o território do estado, mas indicam que é possível a determinação de valores médios de COP, se a medição se estender a um número bem maior de estações e se os dados de temperatura geotérmica forem analisados junto com os dados de temperatura externa média. O cálculo não foi feito devido ao pequeno número de estações instaladas e ao período de medida insuficiente para uma análise aprofundada. Tendo em vista, porém, o expressivo ganho de eficiência observado com os dados das estações de medição, é de se esperar que o estudo detalhado corrobore a viabilidade técnica das bombas de calor geotérmicas em todo o território do estado.

Os valores de ganho no verão, no inverno e a média de ambos foram analisados para as diferentes cidades em função das temperaturas geotérmicas e externas com o intuito de avaliar se a variação do ganho de COP segue alguma tendência. Em nenhum caso se verificou uma tendência, exceto quando o ganho de COP foi ordenado segundo a temperatura externa de inverno, conforme mostrado na Fig. 9. O ganho energético com o uso de sistemas BCG deve ser maior quanto mais baixa a temperatura externa de inverno, o que explica a diferença para o desempenho observado nos EUA, conforme dados do USDOE (2013).

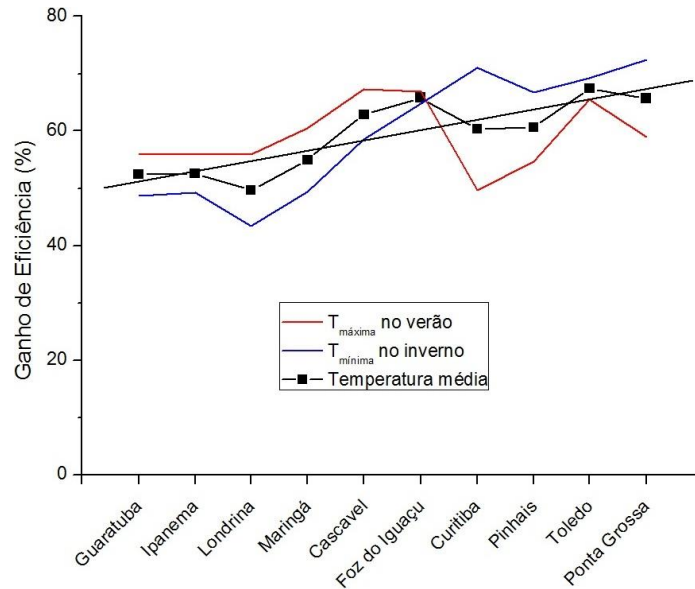


Figura 9 - Ganho de eficiência em função da temperatura externa de inverno (estações de medição em ordem decrescente de temperatura externa de inverno).

Embora tenha sido observada uma tendência de maior ganho com menores temperaturas externas de inverno, não é possível afirmar que há uma relação direta entre ΔCOP e T_{EXT} ou T_{GEO} . Porém, verificou-se que o ganho médio de eficiência varia linearmente com a diferença entre as temperaturas externas e geotérmicas (ΔT). Este comportamento é observado na Fig. 10.

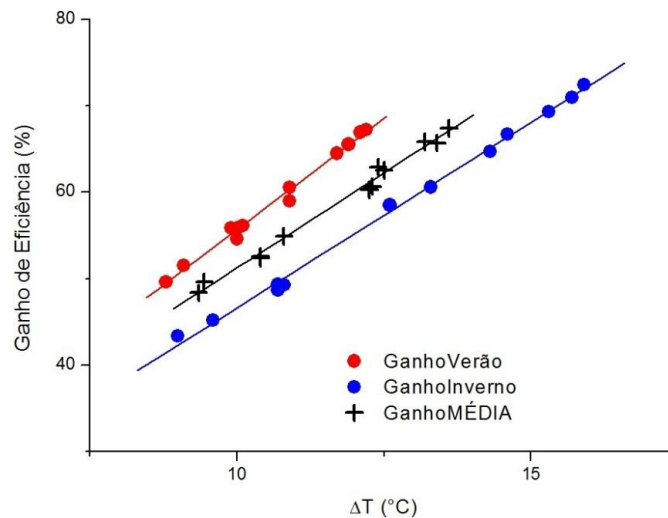


Figura 10 - Ganho de eficiência em função das diferenças entre temperaturas externas e geotérmicas.

Valores médios de ΔCOP são importantes para avaliação do sistema ao longo do ano. A diferença média de temperatura ΔT variou entre 9 e 14 °C, correspondente à faixa de ganho médio de eficiência entre 49% e 67%. Portanto, uma pequena variação de ΔT representa grande variação no ganho de eficiência.

5. Conclusões

A temperatura geotérmica do estado do Paraná é muito similar à temperatura geotérmica de outros locais de clima temperado como o estado da Flórida nos Estados Unidos.

As temperaturas geotérmicas no Paraná a 2 metros da superfície são viáveis em eficiência energética com ganhos de eficiência entre 20% a 45%. Estes valores encontram-se na faixa de valores dos ganhos de energia relatados pela USDOE (25% a 50%).

O propósito do estudo foi atingido, pois permitiu avaliar e confirmar o uso de uma tecnologia ecológica, empregando recursos naturais (a terra), de forma inteligente, diminuindo a necessidade de ampliação da matriz energética no Estado do Paraná no Brasil.

Agradecimentos

À empresa Full Gauge Controls pela cessão de dispositivos de medição e controle de temperatura e também pelo interesse no desenvolvimento da pesquisa.

À empresa Torno Climatização, que cedeu o espaço para instalação de sensores em Pinhais. Em particular, agradeço ao Eng. Mecânico Darlo Torno pelo desenvolvimento da ferramenta de perfuração do solo.

Aos funcionários da Escola Técnica Profissional, pela ajuda durante a elaboração desta dissertação.

Agradecimento aos professores do PRODETEC, que contribuíram para a formação do autor.

Referências

- [1] ABNT, *Instalações centrais de ar condicionado para conforto - parâmetros básicos de projeto*, NBR 16401-1/08, 2008.
- [2] Bitzer, Bitzer software versão 6.4.0, Programa computacional para cálculo de compressores, 2012. [disponível em www.bitzer.de/eng/productservice/software/3] [Acesso em 29 de outubro de 2014].
- [3] Egg, J.; Howard, B. C., *Geothermal HVAC*. MacGraw Hill, USA, 2011.
- [4] Santos, A. F., *Memorial descritivo do projeto de climatização do Espaço Krajcberg em Curitiba*, Relatório técnico, Curitiba: Escola Técnica Profissional, 2010.
- [5] Santos, A. F., *Memorial descritivo da reforma do sistema de ar condicionado do Fórum Tribunal de Justiça de Foz do Iguaçu*, Relatório técnico, Curitiba: Escola Técnica Profissional, 2011.
- [6] Santos, A. F., Cantão, M. P.: “Aplicabilidade de bombas de calor geotérmicas no Paraná”, *Revista ASBRAV*, julho/agosto (2013), pp. 22-24.
- [7] Santos, A. F., 2014, *Análise de temperaturas geotérmicas para aplicação de bombas de calor no Paraná*, Dissertação de Mestrado, PRODETEC, Institutos LACTEC, Curitiba, Paraná.
- [8] USDOE, *Geothermal Heat Pumps*, 2013. [disponível em <http://energy.gov/energysaver/articles/geothermal-heat-pumps>] [Acesso em 12 de março de 2015].