



6 a 8 de outubro de 2010 - Canela RS

ENTAC 2010

XIII Encontro Nacional de Tecnologia
do Ambiente Construído

DIMENSIONAMENTO DE SISTEMA GEOTÉRMICO PARA CLIMATIZAÇÃO DE RESIDÊNCIAS EM CURITIBA

Débora Rosa Barbosa da Silva (1); Alfredo Iarozinski Neto (2);

(1) Departamento de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil – e-mail:
debora.rosabs@gmail.com

(2) Departamento de Construção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil – e-mail:
iarozinski@utfpr.edu.br

RESUMO

A geotermia é utilizada há muitos anos com a finalidade de gerar energia através de captações profundas no solo. Porém uma nova tecnologia já difundida em outros países, mas pouco aproveitada no Brasil, utiliza a energia geotérmica para climatizar ambientes através de trocas de calor do solo com o ar ou com a água em captações rasas. Esse trabalho teve como objetivo dimensionar um sistema que utiliza a energia geotérmica para climatizar uma residência em Curitiba através da diferença de temperatura entre o solo e o ar em captações rasas. Esse tema foi escolhido devido à necessidade em tornar a sociedade humana mais sustentável, uma vez que o sistema dimensionado funciona de maneira limpa e eficiente. A partir de uma coleta de dados foi possível obter o valor médio da temperatura do solo a um metro de profundidade e, utilizando conceitos de transferência de calor e adotando-se valores para parâmetros do solo, do ar e da tubulação utilizada, encontrou-se o comprimento necessário de tubulação para haver troca de calor do ar com o solo de maneira eficiente. Os resultados apresentaram-se satisfatórios no sentido de contribuir com a divulgação e incentivo da utilização da energia geotérmica.

Palavras-chave: energia geotérmica; climatização de ambientes; transferência de calor.

1 INTRODUÇÃO

Os abusos cometidos pelos seres humanos durante centenas de anos estão agora apresentando sintomas que expressam a emergência de mudanças conceituais. É necessário, portanto, sugerir alternativas para alcançar a sustentabilidade do planeta, ou seja, alcançar um ponto ótimo de desenvolvimento da geração atual sem comprometer o desenvolvimento das gerações futuras, havendo um equilíbrio entre demanda e oferta dos recursos naturais, também objetivando uma sociedade justa e ética (SILVA, 2005). Com base nessa necessidade em tornar a sociedade humana cada vez mais sustentável, e observando a deficiência do mercado da construção civil nesse aspecto, esse trabalho propõe um sistema já utilizado em países desenvolvidos, porém pouco difundido no Brasil. Trata-se do aproveitamento da temperatura do solo para aquecer ou esfriar o ar, com a finalidade de proporcionar conforto térmico em edificações amenizando ou eliminando a utilização de aparelhos de ar-condicionado e aquecedores. Assim, o objetivo desse artigo é de apresentar o dimensionamento de um sistema que capta o ar externo à edificação e, através de tubulações enterradas no solo, esse ar é aquecido ou esfriado dependendo da diferença de temperatura entre o ambiente externo e o solo. Em seguida o ar é direcionado para o interior da edificação proporcionando renovação do ar, conforto térmico e economia de energia, a qual seria gasta com aparelhos de climatização.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Geotermia e Gradiente de Temperatura Geotérmico

Segundo Pereira e Neves (2009), Geotermia é a área do conhecimento que desenvolve metodologias para exploração do calor interno da Terra. A temperatura da massa da Terra é mais baixa na superfície e mais elevada no seu núcleo, com gradiente variável devido à heterogeneidade da crosta terrestre. Há locais onde o gradiente térmico é na ordem de $40^{\circ}\text{C}/\text{km}$. A condutividade térmica do solo, ou seja, sua capacidade de transmitir calor depende da proporção volumétrica entre seus componentes sólidos, líquidos e gasosos presentes, assim como do tamanho e arranjo das suas partículas e da superfície de contato entre as suas fases sólidas e líquidas (JURY; GARDNER; GARDNER, 1991). Alterações na temperatura da superfície alteram principalmente a temperatura das camadas superiores do solo. Variações rápidas na temperatura da superfície não alteram tanto a temperatura de solos profundos quanto variações longas na temperatura superficial (JURY; GARDNER; GARDNER, 1991). Dentro do solo, as variações térmicas apresentam amplitudes que diminuem com a profundidade, além de apresentarem um atraso na propagação do calor.

2.2 Sistemas Geotérmicos

A geotermia pode ser aproveitada para aquecer e arrefecer através de sistemas passivos ou ativos (COSTA, 2008). Sistemas geotérmicos passivos são os sistemas que não utilizam equipamentos para aproveitar a energia do solo, fazendo-o de maneira natural sem consumir energia elétrica ou equivalente. Os sistemas passivos, por sua vez, podem ser diretos ou indiretos (COSTA, 2008). Nos sistemas geotérmicos passivos diretos a transferência de calor ocorre através do contato direto da edificação com o solo, como no pavimento térreo ou nos subsolos, quando existentes. Nos sistemas geotérmicos passivos indiretos a transferência de calor é feita através de tubulações enterradas no solo nas quais circula ar, o qual será injetado na edificação. A troca de calor ocorre primeiramente entre o solo e a tubulação e então entre a tubulação e o fluido, proporcionando-lhe uma temperatura amena. O ar circula nas tubulações através da convecção natural, efeito causado pelo vento e pelas diferenças de pressão entre os gradientes de temperatura no interior da edificação. O ar aquecido possui densidade mais baixa que o ar frio, elevando-se e escalonando o ar no sentido vertical. É preciso que haja um caminho através de aberturas em diferentes níveis da edificação para ocorrer essa corrente.

Nos sistemas geotérmicos ativos a transferência de calor também é feita através de tubulações enterradas no solo, como no sistema passivo indireto, porém contam com o auxílio de equipamentos como ventiladores, exaustores e bombas de calor. A bomba de calor é uma máquina que transfere calor de um ambiente quente para um ambiente frio (BRAIN, 2009). Água com anticongelante ou líquido refrigerante percorre as tubulações enterradas no solo, ocorrendo troca de calor. Em seguida esse calor é coletado pela bomba de calor e transferido para o fim desejado, seja para ventilação dos ambientes com ar em temperatura amena, seja para aquecimento da água utilizada em chuveiros e lavatórios, seja para aquecer piscinas, seja para aquecer os pisos dos pavimentos ou mesmo para resfriá-los em dias quentes. A tubulação enterrada para captar o calor do solo pode ser disposta horizontalmente ou verticalmente.

O sistema de captação horizontal é composto por tubos dispostos horizontalmente pelo terreno, enterrados numa profundidade entre sessenta centímetros e 1,20 metros. Os tubos são normalmente de polietileno ou cobre revestido de PVC, distanciados de quarenta a sessenta centímetros uns dos outros e com comprimento que pode chegar a centenas de metros. A rede fica localizada na parte externa da construção e estima-se que a área ocupada pelos tubos seja igual a 1,5 a 3,5 vezes a área da edificação a ser aquecida ou arrefecida (CAUE ARIÈGE, 2009).

3 PROPOSTA METODOLÓGICA

Uma vez apresentados os sistemas geotérmicos já utilizados, propõe-se um sistema geotérmico simples para dimensionamento. Para tanto, é desenvolvido um memorial de cálculo para implantação do sistema baseado em dados meteorológicos de Curitiba. Demonstra-se a oscilação da temperatura do solo e indica-se sua temperatura média através de um experimento efetuado com o auxílio de sensores. Após a coleta dos dados obtidos com o experimento, são feitos os cálculos para dimensionamento do sistema com base em fundamentos físicos sobre transferência de calor através da condução e da convecção, e sobre perda de carga na tubulação. Após dimensionar o comprimento da tubulação, é feita uma comparação entre materiais diferentes utilizados na tubulação, observando a influência do coeficiente de condutividade térmica do material dos tubos no comprimento da tubulação. Esta informação é importante para avaliar a viabilidade econômica do sistema.

3.1 Escolha do Sistema Geotérmico

Para escolha do sistema geotérmico a ser dimensionado analisou-se os sistemas existentes apresentados, tendo como objetivo o desenvolvimento de um esquema simples e com materiais existentes no mercado. Também foi levada em consideração a energia elétrica que seria gasta com o sistema. Manteve-se em mente a utilização do ar para troca de calor com o solo. A primeira opção foi desenvolver um sistema geotérmico passivo com captação horizontal, transferindo calor do ar para o solo em dias quentes e conduzindo o ar pela tubulação através da convecção natural. Porém esse sistema apresentaria dificuldades quanto ao escalonamento do ar pela tubulação, portanto seria necessário utilizar algum equipamento para puxar o ar através da tubulação. Observou-se que, para a vazão de ar necessária para ventilar a edificação, conforme trocas de ar recomendadas na literatura, a potência do equipamento não precisaria ser muito alta, consumindo pouca energia elétrica. Foi utilizado, então, um microventilador, instalado no interior da edificação e podendo ser acionado quando desejado, puxando o ar da tubulação enterrada a um metro de profundidade e insuflando-o para o interior do edifício.

3.2 Considerações Iniciais de Transferência de Calor

Uma primeira aproximação do sistema a ser dimensionado pode ser feita com o sistema da Figura 1, no qual há um fluido escoando através de um tubo e um fluido escoando ao redor do tubo (INCROPERA; DEWITT, 1981).

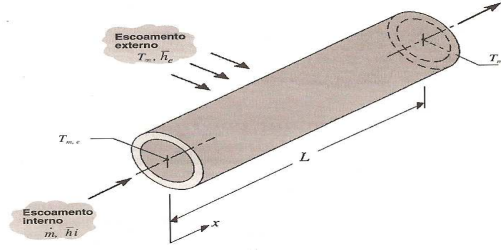


FIGURA 1 - Tubulação com um fluido escoando no seu interior e outro fluido escoando ao seu redor.
Fonte: Incropera; Dewitt (1981).

Para esse caso, tem-se que:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} = \frac{T_{\infty} - T_{m,s}}{T_{\infty} - T_{m,e}} = \exp\left(-\frac{\bar{U}A}{\dot{m}c_p}\right) \quad (1)$$

Sendo ΔT_s a variação da temperatura de saída, ΔT_e a variação da temperatura de entrada, T_{∞} a temperatura externa, $T_{m,s}$ a temperatura média de saída, $T_{m,e}$ a temperatura média de entrada, $\bar{U}$ o coeficiente global de transferência de calor, A a área da superfície de contato, $\dot{m}$ a vazão mássica do fluido escoando no interior da tubulação e c_p o calor específico do fluido escoando no interior da tubulação.

O conceito de resistência térmica é inserido nesse momento para auxiliar na resolução do problema. A resistência térmica é análoga à resistência elétrica e representa uma difusão de calor (INCROPERA; DEWITT, 1981). Tem-se que o coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área é igual ao inverso do somatório das resistências térmicas. Então:

$$\frac{\Delta T_s}{\Delta T_e} = \frac{T_{\infty} - T_{m,s}}{T_{\infty} - T_{m,e}} = \exp\left(-\frac{1}{\dot{m}c_p \sum R_t}\right) \quad (2)$$

A resistência térmica convectiva $R_{t,conv}$ é igual ao inverso do coeficiente de transferência de calor h multiplicado pela área da parede perpendicular à direção de transferência de calor A (INCROPERA; DEWITT, 1981). Nesse caso, como a parede é cilíndrica, a área é igual ao perímetro P multiplicado pelo comprimento da tubulação L :

$$R_{t,conv} = \frac{1}{hA} = \frac{1}{hPL} = \frac{1}{h2\pi rL} = \frac{1}{h\pi DL} \quad (3)$$

Aproximando o sistema da Figura 1 à situação real, tem-se que no ambiente externo à tubulação não há um fluido escoando e sim um sólido transferindo calor através da condução (solo). Na situação real os efeitos multidimensionais devem ser considerados, uma vez que a tubulação está enterrada a pouca profundidade, onde é possível sofrer influência da temperatura da superfície do solo. Tem-se que a resistência térmica por condução $R_{t,cond,(2D)}$ considerando os efeitos multidimensionais em casos de cilindro horizontal de comprimento L enterrado em um meio semi-infinito é igual a:

$$R_{t,cond(2D)} = \frac{\ln(4z/D_e)}{2\pi Lk} \quad (4)$$

Sendo z a profundidade da tubulação enterrada e k a condutividade térmica do material. Há ainda mais uma variável que deve ser considerada no cálculo da resistência térmica total: a resistência térmica da

parede da tubulação. Para condução radial em parede cilíndrica, a resistência térmica $R_{t,cond,tub}$ tem a seguinte forma:

$$R_{t,cond,tub} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \quad (5)$$

Sendo r_2 o raio externo da tubulação e r_1 o raio interno da tubulação. Substituindo esses valores, tem-se que:

$$\sum R_t = R_{t,ar} + R_{t,solo} + R_{t,tub} = \frac{1}{h_{ar}\pi D_i L} + \frac{\ln(4z/D_e)}{2\pi Lk_{solo}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi Lk_{tub}} \quad (6)$$

3.3 Determinação das Variáveis

A intenção do cálculo é determinar o comprimento da tubulação L necessário para efetuar as trocas de calor com eficiência. Dessa forma, as outras variáveis da equação devem ser determinadas ou adotadas, conforme itens a seguir. O cálculo será feito para duas situações distintas: uma na qual a temperatura do ar está mais quente que a temperatura do solo (verão), e outra na qual ocorre o inverso (inverno). Assim, o comprimento adotado será o mais longo dos dois, garantindo que a transferência de calor seja efetuada com sucesso em ambos os casos. A temperatura poderá ser corrigida pela variação do fluxo de ar dentro dos tubos de captação.

3.3.1 Temperatura do Solo

A variável T_∞ refere-se à temperatura externa. No sistema proposto, essa temperatura é equivalente à temperatura do solo. Uma vez que adotou-se enterrar a tubulação à profundidade de um metro, foi realizada uma experiência para obter a temperatura do solo a essa profundidade. A experiência consistiu em cavar um orifício no solo de um metro de profundidade, instalar um sensor na sua base, preencher o buraco novamente com terra e regularmente coletar dados do sensor. A frequência de coleta foi de três vezes por dia: pela manhã, à tarde e à noite. Para comparação com a temperatura externa também foi coletada a temperatura do ar com outro sensor do mesmo tipo, nos mesmos horários. A coleta teve duração de um mês, de 02 de outubro a 31 de outubro, sendo os sensores instalados no dia 1º de outubro. A escolha desse mês foi feita de acordo com a disponibilidade da coleta de dados durante a pesquisa. Os dois sensores consistem em um sistema feito com o componente eletrônico LM35, uma peça de aproximadamente 1,5 centímetros, a qual transmite com precisão a temperatura através da tensão elétrica captada. Um sistema de fios conectados a quatro pilhas e acionados por uma chave liga/desliga fornece a tensão elétrica em milivolt captada no solo, sendo transformada em temperatura através da seguinte relação: $10mV = 1^\circ C$.

Para instalação do sensor que mediu a temperatura do solo foi feito um orifício com um metro de profundidade, ficando apenas o sensor enterrado com os fios, pilhas e o restante do cabo para fora do orifício, possibilitando a medição com o multímetro. Garantiu-se que os dois sistemas estivessem marcando a mesma tensão elétrica num mesmo local e horário, para não haver discrepâncias entre as temperaturas medidas no solo e no ar. Os valores coletados geraram o gráfico da Figura 2 a seguir, o qual contém os valores das temperaturas do ar e do solo em função do tempo (30 dias, sendo cada pico um dia).

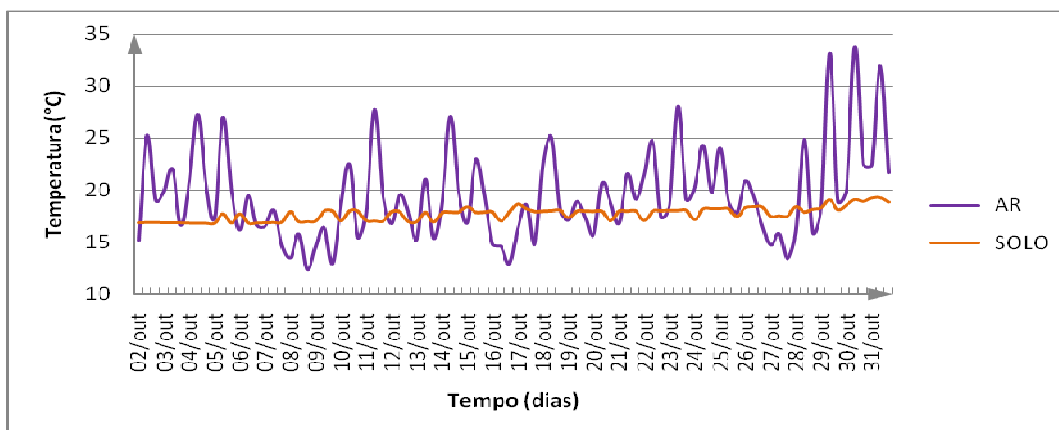


FIGURA 2 - Gráfico das amplitudes térmicas do ar e do solo.

Com o gráfico da Figura 2 é possível perceber que a oscilação da temperatura do ar é muito maior que a oscilação da temperatura do solo. As temperaturas médias, máximas, mínimas e suas amplitudes podem ser conferidas na Tabela 1. Portanto o valor a ser utilizado no cálculo será o valor médio das temperaturas coletadas do solo, tanto para o verão quanto para o inverno. Sendo assim, temos que: $T_{\infty, \text{verão}} = T_{\infty, \text{inverno}} = 17,71^{\circ}\text{C}$.

Tabela 1 – Amplitudes térmicas

	AR	SOLO
Temperatura Máxima	33,80°C	19,28°C
Temperatura Mínima	12,29°C	16,80°C
Temperatura Média	19,39°C	17,71°C
Amplitude Máxima	14,41°C	01,57°C

3.3.2 Temperatura do Ar de Entrada

O cálculo será baseado nas temperaturas relativas à cidade de Curitiba. De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, a temperatura máxima no período de 1961 a 1990 está em torno de 27°C em fevereiro e a mínima fica em torno de 8°C em julho. Esses valores são uma média das temperaturas máximas e mínimas no período de 1961 e 1990, porém sabe-se que há dias nos quais a temperatura alcança valores acima de 27°C. Portanto o valor da temperatura de entrada no verão será adotado em 30°C e a mínima será 8°C. Então: $T_{m,e,\text{verão}} = 30^{\circ}\text{C}$; $T_{m,e,\text{inverno}} = 8^{\circ}\text{C}$.

3.3.3 Temperatura do Ar de Saída

De acordo com Munoz (1980), a temperatura recomendada no verão é entre 26 e 27°C e no inverno entre 20 e 22°C. Apesar de o valor recomendado no verão ser em torno de 26°C, muitas pessoas preferem que a temperatura do ar esteja mais fria, então será considerada uma temperatura de 20°C. No inverno não é possível atender ao recomendável, pois a temperatura do solo estará abaixo de 20°C. Portanto, será considerada uma temperatura de saída próxima à temperatura do solo, igual a 16°C. Ou seja: $T_{m,s,\text{verão}} = 20^{\circ}\text{C}$; $T_{m,s,\text{inverno}} = 16^{\circ}\text{C}$.

3.3.4 Propriedades da Tubulação

A tubulação deverá ser boa condutora de calor e também resistente à corrosão. Dessa forma, adotou-se uma tubulação de cobre. A condutividade térmica do cobre a 300K (aproximadamente 27°C) é igual a

401W/m.K. Para adotar o diâmetro da tubulação, foi considerado que a velocidade do ar na saída da tubulação não pode ser maior do que 3,8m/s, de acordo com as velocidades recomendadas para bocas de insuflamento de ares-condicionados (COSTA, 1974). Uma vez que $V=Q/A$, quanto maior o diâmetro menor a velocidade, adotou-se uma tubulação com diâmetro externo de 104mm e espessura de 1,2mm (bitola comercial). A verificação da velocidade será feita no item 3.3.7. Portanto: $D_e = 0,104\text{m}$; $D_i = 0,104 - 0,0012 = 0,1028\text{m}$ e $k_{tub} = 401\text{W/m.K}$.

3.3.5 Propriedades do Solo

A condutividade térmica do solo depende da sua composição, granulometria e umidade. Será utilizado o valor médio da condutividade térmica do solo a 300K, sendo equivalente a 0,52W/m.K (INCROPERA; DEWITT, 1981). Portanto: $k_{solo} = 0,52\text{W/m.K}$.

3.3.6 Vazão Mássica

A vazão mássica $\dot{m}$ é equivalente à densidade do fluido ρ multiplicado pela vazão volumétrica $\dot{Q}$:

$$\dot{m} = \rho \times \dot{Q} \quad (7)$$

A vazão volumétrica é o volume de ar que passará na tubulação por unidade de tempo e pode ser relacionada com a quantidade de ar necessária à ventilação do ambiente. De acordo com (COSTA, 1974), a vazão volumétrica mínima de ar para uma residência é igual a 17m³/h.pessoa. Para o cálculo proposto, considerou-se uma residência onde habitam quatro pessoas, demandando uma vazão volumétrica de ar $\dot{Q}$ igual a 0,01888m³/s.

A partir dessa informação, buscou-se no mercado um ventilador que possuísse como parâmetro uma vazão volumétrica aproximada da vazão recomendável. Foi adotado, então, um microventilador cuja vazão volumétrica é igual a 0,019m³/s (VESPER, 2009). Dessa forma, sendo a densidade do ar igual a 1,1614 kg/m³, tem-se através da Equação [7] que a vazão mássica $\dot{m}$ é igual a 0,0221kg/s.

3.3.7 Propriedades do Ar

O coeficiente de transferência de calor por convecção do ar h_{ar} depende da geometria da superfície de contato, da natureza do escoamento e de propriedades do fluido (INCROPERA; DEWITT, 1981). Considerando um escoamento completamente desenvolvido com T_∞ constante, tem-se que:

$$\bar{h} = \frac{Nu_D \times k}{D} \quad (8)$$

Sendo Nu_D o número de Nusselt, k a condutividade térmica do fluido e D o diâmetro da seção de escoamento. Antes de efetuar o cálculo do número de Nusselt, é necessário saber se o escoamento é laminar ou turbulento. Para isso, tem-se que o número de Reynolds Re_D crítico correspondente ao surgimento de turbulência é aproximadamente 2300 (INCROPERA; DEWITT, 1981) e pode ser encontrado pela seguinte equação:

$$Re_D = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (9)$$

Sendo ρ a densidade do fluido, L o comprimento característico descritivo da geometria do campo de escoamento, nesse caso será igual ao diâmetro interno, e μ a viscosidade do fluido. No caso proposto, μ é a viscosidade do ar, igual a $1,846 \cdot 10^{-5} \text{N.s/m}^2$. Uma vez que a velocidade do fluido V é igual à

vazão dividida pela área, tem-se que V é igual a 2,2892m/s. Substituindo os valores das variáveis na Equação [9], tem-se que Re_D é igual a 14.805,6329.

Percebe-se que 14.805,6329 está acima do valor do número de Reynolds crítico, portanto o escoamento é turbulento. Para esse caso, tem-se que:

$$Nu_D = \frac{(f/8)(Re_D - 1000)Pr}{1 + 12,7(f/8)^{1/2}(Pr^{2/3} - 1)} \quad (10)$$

O fator de atrito f pode ser encontrado através de gráficos na literatura. Considerou-se tubo liso e obteve-se $f=0,028$. O número de Prandtl Pr é uma propriedade do ar que varia com sua temperatura média e, para 300K, $Pr=0,707$. Substituindo-se os valores das variáveis na Equação [10], tem-se que Nu_D é igual 40,4314.

A condutividade térmica do ar k_{ar} a 300K é igual a 0,0263W/m.K. O diâmetro já foi determinado no item 3.3.4, sendo igual a 0,0343m. Substituindo-se na Equação [8], tem-se que $\bar{h}_{ar} = 10,3438W/m^2 \cdot K$. Outra propriedade do ar que será necessária para o cálculo no item subsequente é o calor específico c_p . A 300K, tem-se que: $c_p = 1,007$ kJ/kg.K

4 RESULTADOS

A partir dos parâmetros calculados anteriormente foi possível determinar as características essenciais de um sistema de climatização geotérmico voltado para as necessidades da região de Curitiba – PR. Estas características principais são a base para uma pré-avaliação da viabilidade da implantação deste tipo de sistema na referida região.

4.1 Determinação do Comprimento da Tubulação Necessária para o Sistema

Para uma tubulação de cobre e com todas as variáveis determinadas, tem-se na Equação [6] que:

$$\begin{aligned} \sum R_t = R_{t,ar} + R_{t,solo} + R_{t,tub} &= \frac{1}{h_{ar}\pi D_i L} + \frac{\ln(4z/D_e)}{2\pi L k_{solo}} + \frac{\ln(r_e/r_i)}{2\pi L k_{tub}} \\ &= \frac{0,2993}{L} + \frac{1,1170}{L} + \frac{4,6062 \cdot 10^{-6}}{L} = \frac{1,4163}{L} \end{aligned}$$

Substituindo na Equação [2] temos, para o verão:

$$\frac{17,71 - 20}{17,71 - 30} = \exp\left(-\frac{1}{0,0221 \cdot 1007 \cdot (1,4163/L_{verão})}\right) \Rightarrow L_{verão} = 52,96m$$

E para o inverno:

$$\frac{17,71 - 16}{17,71 - 8} = \exp\left(-\frac{1}{0,0221 \cdot 1007 \cdot (1,4163/L_{inverno})}\right) \Rightarrow L_{inverno} = 54,74m$$

4.2 Perda de Carga na Tubulação

Uma vez definido o comprimento da tubulação do sistema geotérmico, é necessário conferir se a potência do microventilador será capaz de captar o ar externo e superar as perdas de carga no escoamento. Para o cálculo das perdas de carga, é preciso definir a geometria da tubulação enterrada. Será adotada uma geometria em espiral, conforme Figura 3. A tubulação terá 55 metros de comprimento na espiral (utilizado o maior valor calculado no item anterior, arredondado para cima)

Considerando o escoamento permanente (propriedades constantes com o tempo em cada ponto) e incompressível, tem-se a seguinte equação de energia que permite calcular a perda de carga mecânica causada pelo atrito (FOX et al., 2006):

Sendo p_1 e p_2 as pressões nos pontos 1 e 2, ρ a densidade do fluido, α_1 e α_2 os coeficientes de energia cinética nos pontos 1 e 2, $\bar{V}_1$ e $\bar{V}_2$ as velocidades médias nos pontos 1 e 2, g a aceleração da gravidade, z_1 e z_2 as alturas nos pontos 1 e 2 e h_{PT} a perda de energia total. Tem-se que a perda de energia total, nesse caso, é igual à perda de energia ao longo da tubulação h_p , somada com a energia perdida nos cotovelos $h_{p_{m,cotovelos}}$ e mais a perda de carga na entrada do tubo $h_{p_{m,entrada}}$ (FOX et al., 2006). Sendo assim, a perda de carga total é expressa por:

Para escoamento turbulento, sabe-se que:

$$h_{pm,entrada} = \frac{0,5 \cdot \bar{V}^2}{2} \quad (15)$$

Substituindo os valores das variáveis nas Equações [13], [14] e [15], tem-se que h_P é igual a $41,3933\text{m}^2/\text{s}^2$, $h_{Pm,cotovelos}$ é igual a $26,4118\text{m}^2/\text{s}^2$ (já considerando os 12 cotovelos da geometria proposta) e $h_{Pm,entrada}$ é igual a $1,3101\text{m}^2/\text{s}^2$. Substituindo na Equação [12] tem-se que a perda de energia total h_{PT} é igual a $69,1152\text{m}^2/\text{s}^2$.

Observando que os pontos 1 e 2 possuem a mesma velocidade, tem-se que $\bar{V}_1$ é igual a $\bar{V}_2$, portanto essas variáveis anulam-se na equação. O mesmo pode-se adotar nos valores das alturas z_1 e z_2 . Sendo assim, substituindo os valores das variáveis na Equação [12], tem-se que:

$$\left(\frac{p_1}{\rho}\right) - \left(\frac{p_2}{\rho}\right) = \frac{\Delta p}{\rho} = 69,1152$$

$$\Delta p = 69,1152 \times 1,1614 = 80,2704 \text{ N/m}^2$$

A potência necessária $\dot{W}_{necessária}$ para escoar o fluido por toda a tubulação é igual a (FOX et al., 2006):

$$\dot{W}_{necessária} = Q\Delta p = 0,019 \times 80,2704 = 1,5251 \text{ W} \quad (16)$$

A potência de entrada $\dot{W}_{entrada}$ deve ser maior do que a potência necessária $\dot{W}_{necessária}$. No caso, a potência de entrada é a potência do microventilador, igual a 14W (especificações do equipamento), maior do que a $\dot{W}_{necessária}$, o que comprova que a potência do microventilador supera a perda de carga na tubulação.

4.3 Comparação com outros materiais

A Tabela 2 a seguir apresenta uma relação com outros materiais para analisar a variação no comprimento da tubulação e possível utilização na implantação do sistema.

Tabela 2 - Comparação entre materiais diferentes

	Dext (mm)	Esp. (mm)	K (W/m.K)	L verão (m)	L inverno (m)
Aço Carbono	104	1,2	60,5	52,46	53,98
Alumínio	104	1,2	237	52,88	54,41
Cobre	104	1,2	401	52,96	54,74
Concreto	200	30	1,4	51,13	52,65
Ferro Galvanizado	104	1,2	80,2	51,71	53,19

Esta comparação é importante para avaliar a viabilidade técnica e econômica do sistema já que há uma diferença significativa de preços dos materiais.

5 CONCLUSÕES

A partir dos valores calculados, observa-se que o tipo de material da tubulação não influencia significativamente no comprimento da tubulação. Isso acontece porque a espessura da tubulação é pequena, além do cálculo apresentar baixa variação de temperatura. Dessa forma, foram apresentadas outras opções à tubulação de cobre, o que pode tornar o sistema mais viável economicamente. Porém é necessário ter em mente que o cobre é menos corrosivo do que os outros materiais. Considerando que a tubulação ficará enterrada, possivelmente sob uma construção, reparações futuras para resolver problemas devido à corrosão não são viáveis. Seria interessante fazer um pequeno orifício a cada curva da tubulação devido ao ponto de orvalho para escoar possíveis líquidos condensados nos tubos. Faz-se necessário colocar um filtro na entrada da tubulação, para evitar a passagem de resíduos para o interior da edificação. Também é importante cobrir a entrada do ar para que não entre água de chuva nos tubos, permitido somente a passagem do ar.

O microventilador apresentou resultados satisfatórios quanto a sua potência, pois mostrou-se capaz de atender às demandas do sistema. Além do seu bom desempenho com o escoamento do ar, o equipamento mostrou-se econômico. Se o equipamento ficar ligado dez horas por dia consumirá 4,20kWh por mês, gastando o equivalente a R\$4,42. Com o mesmo período de utilização seria gasto, em média, R\$15,98 com um ventilador, R\$133,17 com um aparelho de ar-condicionado e R\$239,71 com um aquecedor (COPEL, 2009).

A dificuldade em encontrar informações sobre o dimensionamento de sistemas geotérmicos no Brasil torna esse trabalho uma pequena contribuição no sentido de divulgar e estimular o uso desta tecnologia. Entretanto, os resultados devem ser encarados como resultados preliminares da possibilidade do uso da energia geotérmica em sistemas de climatização residenciais no Brasil. Além disso, estes resultados são um incentivo para um aprofundamento dos estudos e do desenvolvimento de alternativas de climatização baseadas na geotermia.

6 REFERÊNCIAS

- BRAIN, Marshall. **Como funciona o ar condicionado**. Disponível em: <<http://casa.hsw.uol.com.br/ar-condicionado.htm>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- CAUE ARIÈGE (França). **La géothermie et l'Aérothermie**. Disponível em: <<http://www.caueariego.org/energies-renouvelables/geothermie.htm>>. Acesso em: 10 out. 2009.
- COPEL. **Simulador de Consumo de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/simulador/>>. Acesso em: 17 nov. 2009.
- COSTA, Ennio Cruz da. **Física Aplicada à Construção: Conforto Térmico**. 4ª ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1974. 259 p.
- COSTA, Fernando Alfredo Veiga. **Aproveitamento Passivo de Energias e Geotermia**. 2008. 95 f. Monografia (Licenciatura) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Fernando Pessoa, Porto, 2008.
- FOX, R. W.; McDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. **Introdução á mecânica dos fluidos**. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798 p.
- INCROPERA, Frank; DEWITT, David. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. 4ªed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos E Científicos Editora S.A., 1981. 494 p.
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/>> Acesso em: 05 nov. 2009.
- JURY, William A.; GARDNER, Wilford R.; GARDNER, Walter H.. **Soil Physics**. 5ª ed. New York: Wiley, 1991. 328 p.
- MUNOZ, José Fernandez-Amigó. **Climatização: Cálculo e Equipamentos**. Lisboa: CETOP, 1980. 265p.
- PEREIRA, Alcides José Sousa Castilho; NEVES, Luís José Proença Figueiredo. **Geotermia: Energia para um futuro sustentável**. Departamento de Ciências da Terra. Faculdade de Ciências e Tecnologias. Universidade de Coimbra. Disponível em: <http://www.dct.uc.pt/Geotermia/GEOTERMIA_DCT_FCTUC_SF.pdf>. Acesso em: 02 nov. 2009.
- SILVA, Jaqueline Maria da. **Sustentabilidade em uma Estrutura de Sistemas Integrados**. 2005. 85 f. Dissertação (Mestre) - Laboratório Nacional de Computação Científica, Petrópolis, 2005.
- VESPER. **Microventiladores AC**. Disponível em: <<http://www.vesper.ind.br/microventilador/index.htm>>. Acesso em: 25 out. 2009.