

GEOTERMIA: PROPOSTA DE UM MODELO ANALÍTICO DE CÁLCULO

Rafael Silva Brandão (1)

(1) PhD, Professor do Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Artes Aplicadas, rbrandao@ufsj.edu.br
Universidade Federal de São João del-Rei, Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Artes Aplicadas,
Avenida Visconde do Rio Preto, s/nº (Rodovia BR 494, km 02), Colônia do Bengo, São João Del Rei - MG,
36301-360, Tel.: (32) 3373 6937

RESUMO

O solo tem importante papel nas trocas térmicas na cidade e nos edifícios. Sua grande capacidade térmica confere uma maior estabilidade ao seu perfil de temperaturas, principalmente nas camadas mais profundas. Esta característica pode ser utilizada para amenizar variações da temperatura interna dos ambientes, por meio do insuflamento de fluidos através de tubulações enterradas que ajudem a aquecer ou resfriar os ambientes. Este artigo apresenta uma proposta para um modelo analítico de cálculo para estes sistemas, denominados geotérmicos. Objetiva-se organizar de modo consistente os processos para sua análise, dimensionamento e projeto, bem como demonstrar sua utilização em um estudo de caso hipotético. Utiliza-se aqui um método dedutivo, baseado na sistematização e aplicação de equações gerais de transferência de calor, para atingir os objetivos propostos. O trabalho apresenta tanto os processos para caracterização térmica do perfil de solo a diferentes profundidades, quanto as ferramentas de cálculo para dois tipos de sistemas geotérmicos: tubulares simples e aletados. Os resultados obtidos apontam para a eficácia e eficiência destes sistemas, que permitem proporcionar conforto ao ambiente construído com um baixo custo financeiro e energético.

Palavras-chave: desempenho térmico, temperatura do solo, sistemas geotérmicos.

ABSTRACT

The soil plays an important part in the thermal exchange that happens in buildings and cities. Its large thermal capacity provides higher temperature profiles stability, especially in deeper layers. This characteristic may be used to reduce internal temperature variations in the built environment, by insufflating fluids through buried pipes, which will help in the heating or cooling of rooms. This paper presents an analytical model for calculating these systems, denominated geothermal ones. The goal is to elaborate a consistent process for assessing, sizing and designing them. To this end, it is used a deductive method, based on the systematization and application of general heat transfer equations. The model includes process for both, determination of ground temperature profiles and calculation tools for two types of geothermal systems: conventional and finned. Results point to the efficacy and efficiency of these systems, which allow for environmental thermal comfort at low financial and energetic costs.

Keywords: thermal performance, ground and soil temperature, geothermal systems.

1. INTRODUÇÃO

As trocas de calor com o solo têm um relevante papel na ambiência térmica urbana e dos edifícios (BRANDÃO, 2009). Sua alta capacidade térmica proporciona uma estabilidade de temperaturas, principalmente nas camadas mais profundas, o que permite a utilização de dutos enterrados para o resfriamento ou aquecimento de ambientes – os chamados sistemas geotérmicos. Em locais de grande variação de temperatura diária ou sazonal, este efeito de inércia térmica tem grande potencial para o condicionamento eficiente do ambiente construído. Embora existam trabalhos internacionais que discutam a utilização dos sistemas geotérmicos e bombas de calor (PERERS, 2005; PURDY & MORRISON, 2003; DOSSI et al, 2003), ainda há uma lacuna na literatura brasileira sobre análise do potencial deste tipo de sistema para o nosso clima, bem como uma ausência de sistematização de processos de cálculo e dimensionamento. Os trabalhos encontrados (SANTOS, FREIRE, MENDES, 2003a; SANTOS, MENDES, FREIRE, 2003b) limitam-se a analisar os perfis de temperatura no solo. Neste sentido, este trabalho busca introduzir a discussão da eficiência destes sistemas, proporcionando ferramentas de análise e dimensionamento.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é apresentar uma sistematização para um modelo analítico de cálculo de sistemas de geotermia, bem como sua aplicação a um estudo de caso hipotético do qual possam ser extraídas considerações gerais sobre esta estratégia.

3. MÉTODO

Este trabalho utiliza um método dedutivo, baseado na sistematização e aplicação de equações gerais de transferência de calor na análise, dimensionamento e projeto de sistemas geotérmicos. O método se divide em duas partes: caracterização térmica do perfil de solo a diferentes profundidades e sistematização do cálculo analítico de sistemas geotérmicos.

3.1. Caracterização do solo

3.1.1. Método simplificado

Oke (1987) apresenta uma equação que relaciona a variação na temperatura do solo com as propriedades térmicas do mesmo.

$$\Delta T_z = \Delta T_0 \cdot \exp \left[\frac{-z}{(\pi \cdot \kappa \cdot P)^{0,5}} \right] \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

ΔT_z é a variação da temperatura na profundidade z [°C];

ΔT_0 é a variação da temperatura superficial [°C];

z é a profundidade para qual se deseja calcular a variação de temperatura [m];

κ é a difusividade térmica do solo em [m²/s] e;

P é o período de interesse [s].

Esta equação pressupõe o conhecimento da variação da temperatura superficial, que é função do acúmulo de calor no substrato, gerando uma questão de referência circular. No entanto, ela pode ser útil para determinar a condição de estabilidade térmica do solo.

Aplicando-se a relação inversa, é possível determinar a profundidade na qual a variação da temperatura do solo corresponde a uma determinada porcentagem da variação da temperatura superficial.

$$z = -\ln \left(\frac{\Delta T_z}{\Delta T_0} \right) \cdot (\pi \cdot \kappa \cdot P)^{0,5} \quad \text{Equação 2}$$

As propriedades dos materiais urbanos em relação ao armazenamento de calor são descritas como função da sua difusividade térmica (κ). Esta variável mede a capacidade do material de conduzir calor em relação à sua capacidade de armazená-lo (INCROPERA & DEWITT, 2003). Ela pode ser entendida como uma medida da velocidade com que o material transmite variações na sua temperatura e é dada por:

$$\kappa = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$$

Equação 3

Onde:

k é a condutividade térmica do material [W/(m °C)];

ρ é a densidade específica do material [kg/m³] e

c_p é o calor específico do material [J/ (kg °C)].

As propriedades térmicas para os materiais mais comuns nas áreas construídas podem ser encontradas na Tabela 1.

Tabela 1– Propriedades térmicas dos materiais urbanos mais comuns. Os dados dos diferentes tipos de solo foram obtidos de Oke (1987). Os demais materiais foram retirados de Incropera & DeWitt (2003).

Tipos de solo		Densidade kg/m ³	Calor específico J/(kg K)	Condutibilidade térmica W/(m K)	Difusividade térmica x 10 ⁻⁶ m ² /s
Solo arenoso	Seco	1600	800	0,30	0,23
	Saturado	2000	1480	2,20	0,74
Solo argiloso	Seco	1600	890	0,25	0,18
	Saturado	2000	1550	1,58	0,51
Asfalto		2115	920	0,06	0,03
Concreto		2300	880	1,40	0,69
Tijolo		2645	960	1,00	0,39
Granito		2630	775	2,79	1,37
Mármore		2680	830	2,80	1,26
Água		1000	4180	0,57	0,14

A Tabela 2 apresenta os resultados desta avaliação para diversos tipos de solo, considerando-se um período P de 24 horas (86400 segundos). Os cálculos foram efetuados a partir da Equação 1.

Tabela 2– Profundidades de estabilidade diária da temperatura do solo em metros

$\Delta T_z / \Delta T_0$ (%)	Solo arenoso		Solo argiloso		Asfalto	Concreto	Tijolo	Granito
	Seco	Saturado	Seco	Saturado				
100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
50,00	0,17	0,31	0,15	0,26	0,06	0,30	0,23	0,42
25,00	0,35	0,62	0,30	0,52	0,13	0,60	0,23	0,85
12,50	0,52	0,93	0,45	0,77	0,19	0,90	0,68	1,27
06,25	0,70	1,25	0,61	1,02	0,26	1,20	0,91	1,69
03,13	0,87	1,56	0,76	1,29	0,32	1,50	1,13	2,11
1,00	1,16	2,07	1,01	1,71	0,43	2,00	1,51	2,81
00,10	1,75	3,11	1,51	2,58	0,64	3,00	2,27	4,23
00,01	2,27	4,05	1,97	3,35	0,84	3,90	2,95	5,49

Observa-se que é possível utilizar os valores da sétima linha como referência quando se quiser verificar a profundidade de estabilidade diária da onda térmica.

A cerca de 2,00 m de profundidade, as variações na temperatura do solo são da ordem de 1% da variação da temperatura superficial no pior caso, o solo arenoso saturado. Isso significa que uma variação de 50°C na temperatura superficial representaria uma variação de apenas 0,5°C na temperatura do solo àquela profundidade. Admitiu-se, portanto, que a 2,00m de profundidade a temperatura do solo apresenta valor constante. A princípio, o valor atribuído à temperatura nesta profundidade é a temperatura ar-sol média diária, mas os modelos de diferenças finitas apresentam maior precisão nesta determinação.

3.1.2. Método de diferenças finitas

Mills (1997) apresenta um modelo de transferência de calor em sólido baseado em diferenças finitas, aplicado tanto ao solo quando à superfície dos edifícios. O modelo utiliza a discretização implícita, em que as temperaturas de um ponto em um determinado instante dependem das temperaturas dos pontos vizinhos para o mesmo instante. A solução exige a utilização de métodos iterativos. Devido à dificuldade para se implementar deste tipo de procedimento em expressões, considerou-se a utilização do método explícito apresentado por Incropera & DeWitt (2003).

No método explícito, as temperaturas de um ponto são função das temperaturas deste ponto e dos pontos vizinhos no momento anterior. Dadas as condições iniciais no momento $t = 0$ s, o comportamento de cada nó é calculado para cada intervalo de Δt [s]. O sólido é dividido em pontos discretos separados pela distância Δx [m]. A posição do ponto é representada pelo índice subscrito m . O momento no tempo é definido pelo índice sobrescrito p . A forma explícita da equação de diferenças finitas unidimensional para temperatura T [°C] é dada por:

$$T_m^{p+1} = Fo \cdot (T_{m+1}^p + T_{m-1}^p) + (1 - Fo) \cdot T_m^p \quad \text{Equação 4}$$

Onde Fo [-] é a forma das diferenças finitas do número de Fourier, dada por:

$$Fo = \frac{\kappa \cdot \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

κ é a difusividade térmica do solo [m^2/s].

Uma característica do método explícito é que a sua estabilidade está condicionada aos valores de Δt e Δx . A escolha de intervalos de tempo muito grandes leva a oscilações numéricas fisicamente impossíveis. Como critério de estabilidade, o coeficiente que multiplica a temperatura do ponto no instante anterior (T_m^p) deve ser sempre maior ou igual a zero. Deste modo, para um nó interno com condução unidimensional:

$$(1 - 2Fo) \geq 0$$

$$Fo \leq \frac{1}{2} \quad \text{Equação 6}$$

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa}$$

Para pontos superficiais, expostos a trocas convectivas, assume-se que a distância ao segundo ponto é metade da distância dos pontos internos. Deduzindo-se a equação a partir do balanço de energia, tem-se:

$$T_0^{p+1} = 2 \cdot Fo \cdot (T_1^p + Bi \cdot T_\infty^p) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_0^p \quad \text{Equação 7}$$

Onde Bi [-] é a forma das diferenças finitas do número de Biot, dada por:

$$Bi = \frac{h \cdot \Delta x}{k} \quad \text{Equação 8}$$

Onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em $W/(m^2 K)$ e k é a condutibilidade térmica do sólido [$W/(m K)$]. Novamente deve-se aplicar o critério de estabilidade, utilizando o menor valor de Δt obtido.

$$(1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \geq 0$$

$$Fo (1 + Bi) \leq \frac{1}{2} \quad \text{Equação 9}$$

No caso de exposição à convecção e a uma fonte de calor de intensidade q [W/m^2].

$$T_0^{p+1} = 2 \cdot Fo \cdot \left(T_1^p + Bi \cdot T_\infty^p + \frac{q \cdot \Delta x}{k} \right) + (1 - 2 \cdot Fo - 2 \cdot Bi \cdot Fo) \cdot T_0^p \quad \text{Equação 10}$$

A determinação do intervalo de tempo segue os mesmos critérios da equação anterior. No caso da interface entre dois materiais diferentes (cujas partes são identificadas pelo subscrito A e B), a equação deduzida a partir do balanço de energia.

$$T_{AB}^{p+1} = \frac{4 \cdot Fo_A \cdot Fo_B}{Fo_A \cdot k_B \cdot \Delta x_A + Fo_B \cdot k_A \cdot \Delta x_B} \cdot (k_A \cdot \Delta x_B \cdot T_A^p + k_B \cdot \Delta x_A \cdot T_B^p) + \left[1 - \frac{4 \cdot Fo_A \cdot Fo_B \cdot (k_A \cdot \Delta x_B + k_B \cdot \Delta x_A)}{Fo_A \cdot k_B \cdot \Delta x_A + Fo_B \cdot k_A \cdot \Delta x_B} \right] \cdot T_{AB}^p \quad \text{Equação 11}$$

O solo é dividido em 5 camadas, sendo que a primeira camada apresenta metade da espessura das demais. O valor de Δx é determinado pela espessura total do solo (e_s), definida como a profundidade de estabilidade diária da temperatura. Conforme discutido anteriormente, o valor inicial adotado para esta variável é de 2 m.

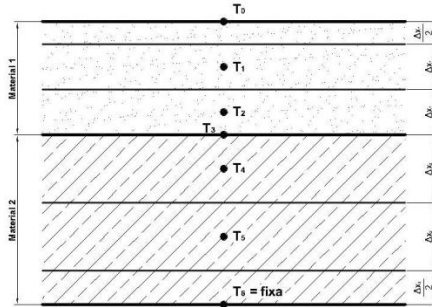


Figura 1 – Esquema de distribuição de temperaturas no solo

Os valores de T_0 são determinados com base na Equação 10. As temperaturas nos pontos interiores aos sólidos (T_1, T_2, T_4, T_5) são calculadas utilizando-se a Equação 4. A temperatura T_6 no solo é mantida constante. A temperatura de interface do solo, T_3 , é calculada utilizando-se a Equação 11.

O intervalo de tempo é determinado a partir da recomendação que os numeradores que multiplicam a temperatura do próprio ponto no instante anterior sejam menores que zero. Deste modo:

$$\Delta t \leq \frac{(\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa} \quad \text{Para Equação 4}$$

$$\Delta t \leq \frac{(1 - Bi) \cdot (\Delta x)^2}{2 \cdot \kappa} \quad \text{Para a Equação 7 e Equação 10}$$

$$\Delta t \leq \frac{(k_A \cdot \Delta x_A + k_B \cdot \Delta x_B)^2}{4 \cdot k_A \cdot k_B \cdot (\Delta x_A)^2 \cdot (\Delta x_B)^2 \cdot (k_A + k_B)} \quad \text{Para a Equação 11}$$

O intervalo de tempo utilizado é o menor valor dentre os resultados destas equações.

3.2. Cálculo de tubulação para geotermia

Os modelos para dimensionamento dos dutos também são baseados em uma combinação de equações de transferência de calor propostas por Incropera & DeWitt (2003). O primeiro passo é o cálculo do volume de ar necessário para proporcionar uma determinada temperatura em um ambiente. Este volume é dado por:

$$\phi_{ar} = \frac{Q}{c_{p(ar)} \cdot \rho_{ar} \cdot (T_c - T_{gs})} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

ϕ_{ar} é o fluxo de ar que o sistema de geotermia deve proporcionar de modo a manter uma determinada temperatura de conforto [m^3/s]

Q é a carga térmica do ambiente (ganhos por condução, convecção, ocupação e radiação solar) [W]

ρ_{ar} é a densidade do ar [$1,161 \text{ kg}/m^3$];

$c_{p(ar)}$ é o calor específico do ar [$1010 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$];

T_c é a temperatura de conforto a ser mantida [$^\circ\text{C}$];

T_{gs} é a temperatura de saída do ar do sistema de geotermia [$^\circ\text{C}$].

A carga térmica (Q) pode ser calculada usando modelos de balanço térmico (FROTA & SCHIFFER, 2007). A temperatura de conforto a ser mantida (T_c) deve ser referenciada em índices e normas de conforto térmico (ISO, 1994; ASHRAE, 2013; ABNT, 2008). A temperatura de saída do ar do sistema de geotermia é um dos parâmetros a ser testado pelo projetista: quanto menor for T_{gs} menor será o volume de ar necessário para alterar a temperatura ambiente, mas maior tenderá a ser o sistema de geotermia para atingir aquela temperatura. A temperatura de entrada do ar no sistema de geotermia (T_{ge}) também pode ser definida neste momento. Esta temperatura deve ser calculada a partir da análise climática do local em questão. Caso se obtenha um arquivo detalhado, sugere-se a utilização de uma temperatura de referência de frequência de ocorrência anual entre as 5% e 1% mais altas. Caso sejam usadas as normais climatológicas, recomenda-se o uso da temperatura de projeto proposta por Alucci (1992), como média da temperatura máxima absoluta (T_{maxabs}) [$^\circ\text{C}$] e da temperatura média das máximas (T_{max}) [$^\circ\text{C}$] do mês mais quente.

$$T_{ge} = \frac{T_{maxabs} + T_{max}}{2} \quad \text{Equação 13}$$

Calculada a vazão, é possível determinar a seção necessária para os dutos de geotermia, dividindo-se o fluxo pela área das seções e calculando a velocidade do ar nas tubulações. Por questões acústicas, devem ser utilizadas velocidades entre 6 e 8 m/s, evitando-se valores maiores do que 10 m/s. A área pode ser dividida em um maior número de dutos, com a vantagem clara de que a área de contato entre o ar e a parede dos dutos aumenta quanto maior for a quantidade destes. Novamente, cabe ao projetista testar os valores possíveis, considerando o custo-benefício de cada solução.

Definido o diâmetro de cada duto e a velocidade do ar em seu interior, procede-se ao cálculo dos números adimensionais do escoamento: número de Reynolds (Re), que dá a razão entre as forças de inércia e viscosas de um fluido e define o tipo de regime do escoamento: laminar ou turbulento; o número de Prandtl (Pr), que é a razão entre as difusividades de momento (ν_{ar}) e térmica (κ_{ar}), e o número de Nusselt (Nu), que consiste no gradiente adimensional de temperatura e oferece uma medida da transferência de calor por convecção ocorrida na superfície.

O número de Reynolds é função de um comprimento característico (L) [m] que no caso dos dutos de geotermia é o diâmetro da seção:

$$Re_L = \frac{\rho_{ar} \cdot u_{ar} \cdot L}{\mu_{ar}} \quad \text{Equação 14}$$

Onde u_{ar} é a velocidade do ar no duto [m/s] e μ_{ar} é a viscosidade do ar [$2,08 \times 10^{-5}$ N·s/m²]. Valores de Re acima de 2300 indicam início de fluxo turbulento e valores acima de 10^4 indicam turbulência plena. Fluxos turbulentos proporcionam trocas de calor mais intensas entre os fluidos e as paredes dos tubos.

O diâmetro da seção (D_g) [m] é calculado diretamente no caso de dutos tubulares, mas deve ser calculado o diâmetro hidráulico no caso de dutos de seção retangular, conforme a equação a seguir:

$$D_g = \frac{2 \cdot A_g}{(H_g + W_g)} \quad \text{Equação 15}$$

Onde A_g é a área da seção do duto [m²] e H_g e W_g são, respectivamente, a altura e a largura da seção retangular [m].

O número de Prandtl é calculado pela equação:

$$Pr = \frac{\nu_{ar}}{\kappa_{ar}} = \frac{c_{p(ar)} \cdot \mu_{ar}}{k_{ar}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde k_{ar} é a condutibilidade térmica do ar [0,03 W/(m·°C)] e as demais variáveis apresentadas anteriormente.

O número de Nusselt mede a variação instantânea na temperatura do fluido em função do seu contato com a superfície. Interessa aqui saber seu valor médio ao longo do duto, que é função dos números de Reynolds e Prandtl.

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{h} \cdot L}{\lambda_{ar}} = f(Re_L, Pr) \quad \text{Equação 17}$$

O valor de Nusselt permite o cálculo do coeficiente médio de convecção (\bar{h}) [W/(m² °C)], que determina a troca de calor entre a parede do duto e o fluido ao longo do seu comprimento. Para regimes laminares ($Re \leq 2300$), o valor de Nu segue a regra:

$$\overline{Nu} = \begin{cases} 3,66 \text{ para } T_{sup} \text{ constante} \\ 4,36 \text{ para } q_0 \text{ constante} \end{cases} \quad \text{Equação 18}$$

Na qual T_{sup} é a temperatura da superfície que troca com o fluido e q_0 é o calor emitido pela superfície. Para regimes turbulentos nas seguintes condições – $Re_D \geq 10^4$; $0,7 \leq Pr \leq 160$ e a razão $C_g/D_g \geq 10$ – o valor de Nusselt segue a equação abaixo:

$$\overline{Nu} = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^n, \text{ onde } \begin{cases} n = 0,4 \text{ para aquecimento} \\ n = 0,3 \text{ para resfriamento} \end{cases} \quad \text{Equação 19}$$

Em climas tropicais, na maior parte do tempo, o duto geotérmico deverá resfriar o ar interior. No entanto, pode haver situações em que o sistema será utilizado para aquecer o ambiente, já que o solo também amortece as variações de temperaturas baixas.

Realizados os cálculos preliminares, devem-se definir a forma, disposição e composição dos dutos, que configuram as trocas internas. Neste trabalho, serão apresentados dois tipos de situação: dutos tubulares simples e dutos aletados.

3.2.1. Cálculo de dutos tubulares simples

Inicia-se o cálculo determinando o calor necessário para atingir a temperatura desejada (q_g) [W]. Segue-se o mesmo princípio da Equação 12, arranjando-se os termos para se obter a energia necessária para o resfriamento do ar no duto:

$$q_g = \phi_g \cdot c_{p(ar)} \cdot \rho_{ar} \cdot (T_{ge} - T_{gs}) \quad \text{Equação 20}$$

Estabelecida a diferença de temperatura desejada entre a entrada e a saída do duto de geotermia, deve-se calcular a média logarítmica da diferença de temperatura dentro do tubo (ΔT_{lm}) [°C]. Trata-se de uma média logarítmica porque a equação da transferência de calor integrada pelo comprimento do tubo tem forma exponencial.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(\Delta T_e - \Delta T_s)}{\ln(\Delta T_e / \Delta T_s)}, \text{ onde } \begin{cases} \Delta T_e = T_{ge} - T_{sup} \\ \Delta T_s = T_{gs} - T_{sup} \end{cases} \quad \text{Equação 21}$$

A temperatura da superfície do tubo (T_{sup}) [°C], neste caso, é admitida constante e equivalente à temperatura do solo naquela profundidade. Neste caso considera-se que o volume de ar resfriado não é suficiente para alterar a temperatura do solo ao redor. Em casos de maior vazão ou de proximidade dos dutos em uma malha densa, pode ser necessário calcular este efeito de transferência por diferenças finitas, utilizando o mesmo modelo apresentado no item 3.1.2.

O coeficiente de convecção médio (\bar{h}) [W/(m² °C)] é calculado também a partir do rearranjo da Equação 17.

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu} \cdot k_{ar}}{D_g} \quad \text{Equação 22}$$

Considerando D_g o diâmetro do duto, em m, o comprimento final do duto (C_g) [m], deve considerar o coeficiente médio de troca de calor, a média logarítmica da diferença de temperatura dentro do tubo, o calor necessário e o perímetro da seção do duto. Para uma seção circular tem-se:

$$C_g = \frac{q_g}{\bar{h} \cdot \pi \cdot D \cdot \Delta T_{lm}} \quad \text{Equação 23}$$

3.2.2. Cálculo de dutos aletados

A existência de aletas aumenta significativamente a superfície de contato entre o fluido e o duto, potencializando as trocas de calor. O processo de cálculo segue os mesmos passos iniciais utilizados para dutos tubulares, mas o resultado final não é o comprimento do duto (C_g) e sim a temperatura de saída (T_{gs}). Isso acontece porque o comprimento é necessário a várias etapas do cálculo e é contra produtivo tentar isolá-lo como variável. Assim, o ajuste é feito de forma iterativa, recalculando o tamanho do duto de modo a aproximar a temperatura de saída da desejada.

Ao calcular a área da seção devem ser consideradas as reduções causadas pelas aletas.

$$A_g = 2N \cdot \frac{H_g}{2} \cdot C_g + (W_g - N \cdot e_m) \cdot C_g \quad \text{Equação 24}$$

Onde N é o número de aletas [-], e_m é espessura do metal [m] e as demais variáveis foram definidas anteriormente.

Em seguida são calculados os diâmetros hidráulicos dos canais individualmente, considerando a altura do canal e a distância entre as aletas. Também são calculados os valores de Re, Pr, Nu e \bar{h} , considerando cada canal individualmente, conforme equações já apresentadas.

A eficiência das aletas (η_f) [-] depende da condutibilidade térmica do material utilizado. O cálculo é feito pela equação seguinte:

$$\eta_f = \frac{\tanh[m \cdot H_g/2]}{m \cdot H_g/2}, \text{ onde}$$

$$m = \sqrt{\frac{2\bar{h} \cdot (e_m + C_g)}{k_m \cdot e_m \cdot C_g}}$$

Equação 25

Onde k_m é a condutibilidade térmica do metal [W/(m °C)] e os demais fatores já foram definidos. A eficiência global do conjunto (η_0) [-] é dada por:

$$\eta_0 = 1 - \frac{N \cdot H_g \cdot C_g}{(W_g - N \cdot e_m) \cdot C_g} \cdot (1 - \eta_f)$$

Equação 26

A resistência total (R_{tot}) [°C/W] é dada por:

$$R_{tot} = \frac{2}{\bar{h} \cdot \eta_0 \cdot (W_g - N \cdot e_m) \cdot C_g}$$

Equação 27

O que permite calcular a temperatura de saída duto de geotermia (T_{gs}) [°C]:

$$T_{gs} = T_{sup} - (T_{sup} - T_{ge}) \cdot \exp\left(-\frac{1}{(\phi_g \cdot \rho_{ar} \cdot c_{p(ar)} \cdot R_{tot})}\right)$$

Equação 28

4. ANÁLISE DE RESULTADOS DE APLICAÇÃO EM CASO HIPOTÉTICO

Para análise da aplicação dos modelos de cálculo apresentados, foi escolhido um modelo hipotético, características construtivas típicas da região, localizado na cidade de São João del-Rei, MG. A cidade está localizada na Zona Bioclimática 2 (ABNT, 2005), com clima ameno e variação diária e sazonal de temperatura significativa.

4.1. Temperatura do solo

O método de diferenças finitas (item 3.1.2.) foi sistematizado em uma planilha Excel, alimentada com os dados climáticos da cidade de São João del Rei. A planilha permite a incorporação arquivos EPW, realizando também análises de diagnóstico bioclimático, disponibilidade de luz natural, dentre outros. O cálculo de temperatura do solo é feito com dez nós e até dois materiais diferentes. São apresentados apenas os dados dos seis nós mais superficiais, estando o mais profundo a 3,00m de profundidade. Também foi criada uma macro específica que permite calcular apenas a temperatura do solo, caso o usuário deseje alterar a composição do solo ou considere necessária uma maior precisão na convergência da temperatura do solo.

Observou-se nas análises que uma camada superficial isolante (como asfalto, por exemplo) aumenta a temperatura superficial, prejudicando o conforto dos usuários do espaço externo, mas que aumenta também a estabilidade na temperatura do interior do solo, o que pode ser interessante no caso de instalação de resfriamento geotérmico.

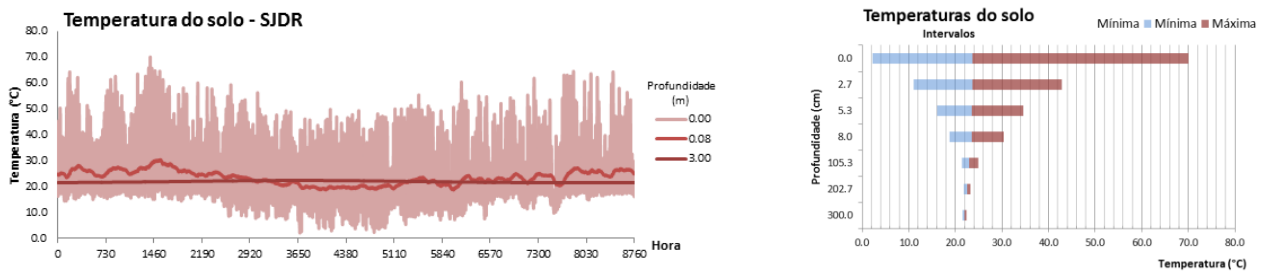


Figura 2 – Variação na temperatura do solo com a primeira camada de asfalto

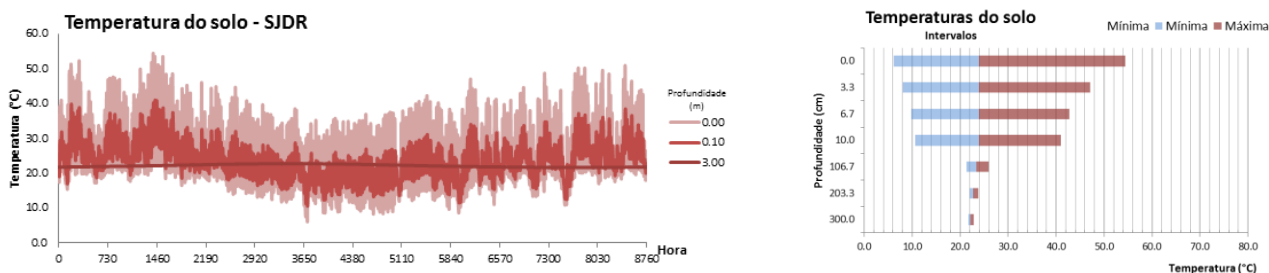
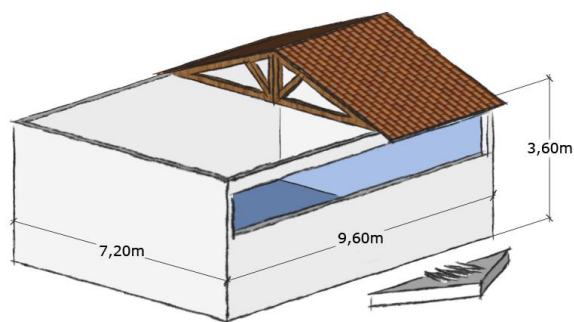


Figura 3 – Variação na temperatura do solo com a primeira camada de concreto

Pela comparação entre a Figura 2 e a Figura 3 fica clara a diferença na estabilização da temperatura, que só acontece no segundo caso em pontos mais profundos. Ainda assim, abaixo de 1,00 m de profundidade as diferenças da pavimentação deixam de ser significativas. Deste modo, podem ser consideradas como referenciais para a cidade de São João del Rei um valor de temperatura de solo de 22,8°C a dois metros de profundidade. A análise do mesmo arquivo permite verificar que a temperatura máxima ocorrida com um percentil de 99% é de 29,2°C.

4.2. Aplicação em estudo de caso

O procedimento foi testado em um espaço hipotético, baseado nas dimensões de uma sala de aula do edifício REUNI, na Universidade Federal em São João del Rei. Trata-se de uma sala de último pavimento, com 7,20 x 9,60 x 3,60 m, com ocupação de 30 alunos, com janelas na maior fachada, orientada em sentido Noroeste. Um esquema do estudo de caso e as características construtivas do espaço são apresentados na Figura 4.



Características:

$\alpha_{cob} = 0,70$
 $k_{cob} = 0,34 \text{ W/m}^2\text{°C}$
 $\alpha_{par} = 0,30$
 $k_{par} = 1,92 \text{ W/m}^2\text{°C}$
 $WWR_{par} = 0,35$
 $FS = 0,86$

Ocupação:

Pessoas = 30 x 90 W
 Equip. = 30 W/m²

Temp. de Conforto:

26°C

Figura 4 – Características do espaço hipotético de estudo e propriedades dos materiais

O processo de cálculo exposto nos itens 3.2.1 e 3.2.2 foi sistematizado em planilhas Excel que também auxiliam na determinação da carga térmica utilizando o método de Frota & Schiffer (2007) e dimensionam o sistema de geotermia necessário. A temperatura de conforto escolhida situa-se no limite superior da NBR 16401-2 (ABNT, 2008). Como existe um grande número de arranjos possíveis que atendem aos requisitos térmicos necessários, buscou-se estabelecer uma estratégia comparativa para determinação da melhor solução. A planilha testa então 80 arranjos para os dutos tubulares simples e 230 para os dutos aletados, calculando o material necessário, o custo total e retornando a solução mais econômica. Os custos dos dutos tubulares incluem o material (foram pesquisados os custos de dutos de concreto nas dimensões utilizadas) e 30% de acréscimo para a instalação. Os custos dos dutos aletados incluem o material (preço pelo quilo do metal necessário) e um custo extra de 2% por aleta, considerando os serviços de dobra, soldagem, montagem e instalação do conjunto.

Buscando evitar configurações absurdas ou inexequíveis, foram estabelecidos alguns limites para os arranjos testados: velocidade máxima permitida no duto de 7 m/s; diâmetro máximo do duto tubular de 1,00 m; altura máxima dos dutos aletados de 60 cm; distância mínima entre as aletas de 1,5 cm; área máxima de ocupação do sistema (considerando o espaço do duto mais uma vez sua largura para cada lado como espaço de troca de calor) de 10 x 30 m (lote típico).

Para este arranjo, foram recomendadas as construções de dutos tubulares com as seguintes características:

- 20 dutos de 20 cm de diâmetro, com 31 m de comprimento cada, ao custo total de R\$ 23.147,80
- 33 dutos de 10 x 20 cm, com 5 aletas na maior dimensão, com comprimento de 18 m cada, ao custo total de R\$ 26.774,21

Na Tabela 3 são apresentados os resultados de arranjos alternativos, que demonstram o grande número de possibilidades de solução, indicando uma tendência clara de aumento nos custos para os maiores diâmetros.

Tabela 3– Resultados de arranjos alternativos

Tipo	Nº de dutos	Seção (cm)	Nº de aletas	Comprimento (m)	T _{saída} (°C)	Custo (R\$)
Simples	10	Ø 30	-	48,8	24,0	18.934,40
Simples	5	Ø40	-	70,6	24,0	24.427,60
Aletado	13	20x25	10	21	23,9	66.585,60
Aletado	11	30x20	20	15	23,6	98.070,91
Aletado	6	40x30	20	24	23,8	148.172,54
Aletado	6	50x25	25	21	23,8	157.392,00

Observa-se que em geral os sistemas de dutos simples apresentam uma execução mais fácil e menos complexa, mas normalmente apresentam comprimentos maiores e um número maior de dutos. Os sistemas aletados tendem a ser mais econômicos em termos de espaço, apesar da complexidade na confecção.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo deixa claro o potencial de utilização da estabilidade de temperatura do solo como estratégia para a promoção de conforto, com redução da dependência de sistemas ativos e do consumo energético das edificações. O método apresentado, deduzido a partir de equações de transferência de calor, indica uma estratégia sistematizada para dimensionamento dos sistemas geotérmicos e as planilhas elaboradas permitem uma avaliação comparativa rápida entre alternativas e uma opção consciente pelo sistema a ser adotado. O sistema apresenta ainda um custo relativamente baixo, mas demanda uma área significativa para instalação. Devem ser considerados impactos na qualidade do ar, já que os sistemas analisados não contemplam filtragem e desumidificação. Pretende-se futuramente expandir este estudo para permitir o cálculo de sistemas que contem com outros fluidos além do ar (principalmente a água líquida, como ferramenta de transporte e armazenamento de calor). Também se espera realizar estudos empíricos que comprovem os resultados analíticos obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401-2:** Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários – Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. **NBR 15220-3:** Desempenho térmico de edificações – Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- ALUCCI, Márcia Peinado. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica:** procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projetos de edificações, 1992, 225 f.. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Estruturas Ambientais Urbanas) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE 55:** Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta, 2013.
- BRANDÃO, Rafael Silva. **As interações espaciais urbanas e o clima;** incorporação de análises térmicas e energéticas no planejamento urbano. 2009. 350 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- DOSSI, F. Currò et al. A pilot project for a low energy building equipped with thermal slabs, heat pump and ground heat storage. In: **BUILDING SIMULATION**, 8, 2003, Eindhoven. **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA, 2003. p. 275-282.
- FROTA, Anésia, SCHIFFER, Sueli. **Manual de conforto térmico.** 8a ed. São Paulo: Nobel, 2007, 243p.
- INCROPERA, Frank P.; DEWITT, David P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION. **ISO 7730:** Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort. Genève: ISO, 1994.
- MILLS, G. An urban canopy-layer climate model. **Theoretical and Applied Climatology**, 57, p. 229-244, 1997
- OKE, T.R. **Boundary Layer Climates.** 2 ed. London: Methuen, 1987.
- PERERS, Bengt. Combination of solar collectors and ground-source heat pump for small buildings. 2005 In: **SOLAR WORLD CONGRESS**, 2005, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ISES, 2005.
- PURDY, Julia; MORRISON, Andrew. Ground-source heat pump simulation within a whole-building analysis. In: **BUILDING SIMULATION**, 8, 2003, Eindhoven. **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA, 2003. p. 1077-1084.
- SANTOS, Gerson H.; FREIRE, Roberto Zanetti; MENDES, Nathan. The solum program for predicting temperature profiles in soils: usability aspects and sensitivity analyses of time step and grid refinement. In: **CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE**, 20, 2003, Santiago. **Proceedings...** Santiago: PLEA, 2003a.
- SANTOS, Gerson H.; MENDES, Nathan; FREIRE, Roberto Zanetti. Determinação de perfis de temperatura e umidade para o solo tipo aluvião-arenoso para as cidades de Belém e Brasília. In: **ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, 7, CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3, 2003, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ANTAC, 2003b, p. 1122-1128.