

CRISTINA DOS SANTOS HORBACH

ESTUDO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO POR TUBOS ENTERRADOS

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Orientadores: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Porto Alegre
2010



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE SISTEMAS DE VENTILAÇÃO POR TUBOS ENTERRADOS

CRISTINA DOS SANTOS HORBACH

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS
PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
ENGENHEIRO(A) MECÂNICO(A)
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Walter Jesus Paucar Casas
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Pedro Mello
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Sergio Frey
UFRGS / DEMEC

Prof. Dr. Volnei Borges
UFRGS / DEMEC

Porto Alegre
2010

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Paulo Otto Beyer* pela credibilidade, apoio, tempo disponibilizado e, principalmente, pela experiência compartilhada nesse momento.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, por todas as oportunidades e conhecimentos disponibilizados.

A minha família e ao meu namorado pela paciência, amor e por todo apoio.

HORBACH, C. S. **Estudo de Sistemas de Ventilação por Tubos Enterrados**. 2010. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RESUMO

Conforto térmico em ambientes a partir de ventilação natural é tema de diversas pesquisas atuais. A consideração de sistemas de ventilação por meios passivos, como o caso de estudo deste trabalho, por meio de tubos enterrados, possui a vantagem de trabalhar com a temperatura aproximadamente constante do solo. Considerando um ambiente doméstico, o presente trabalho determinou a capacidade de ventilação através de dutos enterrados por onde o ar circula do exterior para o interior do ambiente. Avaliou-se o conforto térmico da edificação e se definiu uma configuração de tubos adequada para a estabilização da temperatura interna ao redor da temperatura de conforto para os usuários, protegendo o ambiente e promovendo o desenvolvimento energético sustentável.

PALAVRAS-CHAVE: Tubos enterrados, Ventilação, *EnergyPlus*, Conforto térmico.

HORBACH, C. S. **Design of Natural Gás Cogeneration Systems**. 2010. 15f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

ABSTRACT

Thermal comfort in environments from natural ventilation is the theme of several current research. The consideration of ventilation systems by passive means, such as the case study of this work, through EarthTubes, has the advantage of working with soil temperature approximately constant. Considering a domestic environment, this work determined the ventilation capacity through of burier pipes, where the air circulates from the outside to the inside of the environment. Was evaluated the thermal comfort of the building and set an appropriate configuration of tubes to stabilize the internal temperature around the comfort temperature for users while protecting the environment and promoting sustainable energy development.

KEYWORDS: EarthTubes, EnergyPlus, Ventilation, Thermal Comfort.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	2
2. DESENVOLVIMENTO	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1. <i>Conforto Térmico e Eficiência Energética</i>	3
3.2. <i>Tubos Enterrados– EarthTubes</i>	3
3.3. <i>Simulação Computacional</i>	4
3.3.1. <i>EnergyPlus</i>	4
3.3.2. <i>Metodologia seguida pelo EnergyPlus</i>	4
3.3.3. <i>EarthTubes</i>	4
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	7
4.1. <i>Climas</i>	7
4.2. <i>Descrição do modelo</i>	7
4.3. <i>Modelagem da Edificação</i>	9
4.3.1. <i>Materiais</i>	9
4.3.2. <i>Zonas Térmicas</i>	9
5. RESULTADOS E ANÁLISES	10
5.1. <i>Variação do diâmetro</i>	11
5.2. <i>Variação do comprimento</i>	12
5.3. <i>Variação da espessura</i>	13
5.4. <i>Variação da profundidade</i>	14
6. CONCLUSÕES	14
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	15
REFERÊNCIAS	15
APÊNDICE A – PROPRIEDADES DOS MATERIAIS	17
ANEXO A – INTERFACE ENERGYPLUS	18

1. INTRODUÇÃO

Neste trabalho será realizado um estudo de sistema de ventilação por Tubos Enterrados - *EarthTubes*.

Com a intenção de evidenciar a eficiência térmica do sistema, será apresentada a análise de ventilação residencial, a partir do *software EnergyPlus*. Pretende-se determinar a capacidade de ventilação através de Tubos Enterrados por onde o ar circula do exterior para o interior do ambiente. Avaliar o conforto térmico da edificação, fornecendo qualidade, protegendo o meio ambiente e promovendo o desenvolvimento energético sustentável.

Diante de clima tão variado, o conforto térmico em ambientes têm se tornado questão progressivamente discutida e avaliada por engenheiros e estudiosos do assunto. Tema rodeado por soluções sempre mais econômicas e sustentáveis, porém, a viabilidade da ventilação por *EarthTubes* inspira dúvidas sobre sua real eficácia. Por se tratar de troca térmica do ar presente em tubos enterrados com o solo cujas características variam de acordo conforme a região e em cada época do ano, este sistema exige análise específica para cada situação. Portanto, vem a necessidade do estudo do presente trabalho, que fará uma avaliação de tubos enterrados para ventilação na cidade Porto Alegre, RS.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste trabalho constitui-se na execução das etapas abaixo:

ETAPA 1. Revisão da literatura sobre os assuntos relacionados - Observações aos trabalhos já executados e análise dos resultados que obtiveram.

ETAPA 2. Introdução aos softwares - Para o desenvolvimento desta metodologia se utilizará os programas computacionais disponíveis gratuitamente na internet:

Google SketchUp (versão 7.1) - *Software* que permite ao usuário a criação de modelos em 3D. É de fácil aprendizado e usa o *OpenStudio* um *plugin* do *Energy Plus*.

EnergyPlus(versão 6.0) – *Software* para a modelagem da edificação, obtenção do fluxo de energia, simulando dados de temperatura

Open Studio (versão 1.0) - Trabalha em conjunto com o *SketchUp*: é um *plugin* que gera automaticamente a entrada para o *EnergyPlus* a partir da geração de superfícies no *SketchUp*.

ETAPA 3. Projeto da edificação - A partir do uso do *Google SketchUp* para o modelamento.

ETAPA 4. Definição das características da edificação - Definição no *software Energy Plus* das características dos principais materiais da edificação, bem como o número de pessoas, iluminação dos ambientes, aparelhos eletrônicos presentes na edificação, entre outras.

ETAPA 5. Definição das regiões climáticas - Escolha das cidades para as simulações em diferentes regiões climáticas.

ETAPA 6. Configuração do sistema de *EarthTubes* - Dimensionamento através do *Energy Plus*, baseando-se em configurações já existentes e propondo nova apresentação caso necessário.

ETAPA 7. Simulação - Cálculo do sistema com os *EarthTubes* em funcionamento.

ETAPA 8. Avaliação da eficiência energética - Apresentação dos resultados obtidos com o sistema implantado.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Conforto Térmico e Eficiência Energética

Conforto térmico pode ser definido como o estado mental que expressa a satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda. A não satisfação pode ser causada pela sensação de desconforto pelo calor ou pelo frio, quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor perdido para o ambiente, (LAMBERTS, 2002).

Segundo a Norma 15220 (ABNT, 2005), conforto térmico pode ser descrito como a “Satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente”. E desconforto em “Aquecimento ou resfriamento de uma parte do corpo gerando insatisfação do indivíduo.”

O ambiente, além das condições mentais individuais, é responsável pelo conforto térmico. Em edificações, os fatores que influenciam na modificação das condições de conforto são as paredes, altura do pé direito, piso e principalmente o material de cobertura, que recebe toda radiação solar incidente e é o maior responsável pelo microclima gerado dentro do edifício (GHELFI FILHO, 1991).

A literatura cita como um bom plano na busca ao conforto térmico o uso de ventilação por tubos enterrados, *EarthTubes*.

3.2. Tubos Enterrados – *EarthTubes*

Um *EarthTube* é um tubo longo e subterrâneo de metal ou polímero através do qual circula ar. Durante o processo de resfriamento, o ar passa através do tubo, cede parte de seu calor para o solo e entra no ambiente como ar mais frio. Da mesma forma, durante o processo de aquecimento, o ar passa através do *EarthTube* e recebe uma parcela de calor do solo, entrando no ambiente como ar mais quente. (Manual *EnergyPlus*, 2009)

De acordo com a literatura, os tubos enterrados podem assumir diferentes configurações sobre a terra. Pode-se perceber na Figura 1, a adoção de um modelo horizontal para a realização de *EarthTubes* instalados no *Aldo Leopold Legacy Center* em Toronto, Canadá.



Figura1: *EarthTubes* sendo instalados no *Aldo Leopold Legacy Center* em Toronto, Canadá (fonte: <http://www.treehugger.com/files/2008/04/earth-tubes.php>, visita em 20/09/2010)

MUSSKOPF (2006), em estudo sobre as variáveis interferentes na troca térmica dos *EarthTubes*, concluiu como principais agentes: o clima, o solo - com as características de profundidade, cobertura e umidade, e da geometria e configuração dos *EarthTubes* adotados.

Estas variáveis podem ser exploradas pelas fórmulas utilizadas pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos em seu *Software EnergyPlus* para modelar entre outras, as formas fluxo de energia em tubos enterrados.

3.3. Simulação Computacional

Para a obtenção dos resultados usou-se neste trabalho os *softwares*: gratuitos e de distribuição via internet: *Google SketchUp* (versão 7.1), *EnergyPlus*(versão 6.0), *Open Studio* (versão 1.0).

Google Sketchup, versão 7.1, cria modelos em 3D, e é utilizado junto com o *OpenStudio*, *plugin* que foi desenvolvido pelo NationalRenewable Energy Laboratory para Departmentof Energy dos EUA com a intenção de possibilitar o uso do modelo diretamente na simulação energética com o *EnergyPlus*.

3.3.1 *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* é um programa de simulação fornecido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos para modelar edificações, aquecimento e climatização de ambientes, iluminação, ventilação e outras formas fluxo de energia. Nele é realizada a entrada de dados, como por exemplo, as propriedades dos materiais, elementos construtivos, tipo de vidros, portas, cores externas, número de pessoas que irão frequentar as dependências, localização e o tipo de ar-condicionado que será utilizado para refrigeração e aquecimento.

A partir de dados de descrição da construção, de um arquivo climático e de outros parâmetros fornecidos pelo usuário, o *software* calcula as cargas térmicas de resfriamento e aquecimento necessárias para o controle térmico do ambiente, bem como as temperaturas superficiais das paredes da edificação em estudo.

O *EnergyPlus* utiliza um arquivo climático da região da edificação, com dados horários de temperatura, umidade relativa, ventos e radiação solar. E utiliza outro arquivo com extensão *.idf* com as características dos materiais.

Os arquivos de parâmetros para a simulação e o arquivo de resultados são criados no formato *.csv* e podem ser lidos como texto ou na planilha eletrônica Microsoft Excel para facilitar a plotagem de gráficos dos resultados.

3.3.2. Metodologia seguida pelo *EnergyPlus*

Para o cálculo do balanço de energia, são assumidas pelo programa: temperatura uniforme das superfícies, radiação de onda curta e longa uniforme, troca de radiação entre as superfícies, condução no interior do elemento e temperaturas uniformes para cada uma das zonas térmicas.

Conforme o Manual do *EnergyPlus* (2009), o balanço de energia no *EnergyPlus* é dado em três etapas, uma que diz respeito as superfícies externas, a segunda às internas e a terceira ao volume de ar de cada zona, conforme as equações detalhadas no Manual.

3.3.3. ZoneEarthtube

A equação básica utilizada para calcular a taxa de fluxo de ar do *EarthTube* em *EnergyPlus* é:

$$EarthTubeFlowRate = (E_{design})(F_{schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpeed) + D(WindSpeed^2)] \quad (1)$$

Onde o primeiro termo, (E_{design}), representa a vazão de ar dentro do tubo em $[m^3/s]$, $F_{schedule}$ é o nome da agenda de tarefas que modifica a vazão no tubo. A é a constante térmica do solo, adimensional, B é a diferença de temperatura entre as temperaturas de bulbo seco do ar interior e exterior, dado em $[C^{\circ-1}]$. $|T_{zone} - T_{odb}|$ é a diferença de temperatura ($^{\circ}C$) entre as temperaturas do ar de bulbo seco interior e exterior, abaixo do qual o *EarthTube* é desligado. Por exemplo, se o usuário especifica um delta de $2^{\circ}C$, o *EarthTube* ficará disponível se a diferença de temperatura entre a temperatura interior e exterior, for de pelo menos $2^{\circ}C$. Garantindo que se a diferença de temperatura entre o exterior e interior for muito pequena, não haverá ventilação, pois subentende-se que para uma boa troca térmica é necessário uma significativa diferença de temperatura. C é a velocidade do vento que está atuando fora do edifício $[m/s]$. $WindSpeed$ é a velocidade do ar no tubo, $[m/s]$. D é o quadrado da velocidade do vento que está atuando fora do edifício. As unidades para esse parâmetro são $[s^2/m^2]$.

Além do arquivo de dados climáticos também é necessária entrada dos dados de temperatura média da superfície do solo, a amplitude de temperatura da superfície do solo e a constante de fase de temperatura da superfície do solo, que é o tempo decorrido desde o início do ano até que a temperatura da superfície do solo alcance a temperatura mínima do ano. Esses campos devem ser calculados antecipadamente por meio de um programa autônomo separado (*CalcSoilSurfTemp*) e inseridos no *EnergyPlus*. O *CalcSoilSurfTemp* é um programa simples e requer apenas dois campos de entrada: um arquivo com as condições do solo e outro contendo as condições da superfície dos solos em função das condições climáticas. O programa calcula a difusividade térmica e condutividade térmica do solo ao redor do tubo e o coeficiente de absorção e a taxa de evaporação na superfície do solo e baseia seus cálculos nas informações fornecidas no campo *SoilCondition* - condições do solo. Isso determina a difusividade e condutividade térmica do solo envolvente, relacionados com a quantidade de calor transferido do solo para o ar que passa ao longo do *EarthTube*.

Ao iniciar a modelagem, se fornece os requisitos de entrada para o Tubo: raio (m), espessura (m), comprimento (m), profundidade do tubo, condutividade térmica (W/mC), velocidade do ar dentro do tubo (m/s), a profundidade do centro radial do tubo abaixo do solo (m). E também as informações do solo: Densidade (kg/m^3), calor específico ($J/kg^{\circ}C$), condutividade térmica ($W/m^{\circ}C$), coeficiente de absorção e fração da taxa de evaporação.

Hipóteses assumidas pelo programa:

- Fluxo de convecção no interior do tubo é hidrodinâmica e termicamente desenvolvido.
- A temperatura do solo nas imediações do tubo é uniforme após uma determinada distância do centro do tubo.
- A temperatura da superfície do *EarthTube* é uniforme na direção axial.
- O solo ao redor do *EarthTube* tem uma condutividade térmica homogênea.
- O tubo tem área de seção transversal uniforme na direção axial.
- Velocidade do vento (m/s), u , é o valor médio anual. Isso é calculado a partir de dados meteorológicos do *EnergyPlus* por uma média de valores de velocidade de vento individuais de todo o ano.
- O coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo, h_s , ($W/m^2^{\circ}C$), é função da velocidade do vento u .

Segundo o Manual *EnergyPlus*, 2009, são entradas calculadas e obtidas pelo programa *CalcSoilSurfTemp*: T_m , A_s , e t_0 , pelas equações:

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f (1 - r_a)] \quad (2)$$

Onde: T_m = a temperatura média na superfície do solo, h_s é o coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), h_e e h_r , com $a= 103$ [$Pa/^\circ C$], f = fração da taxa de evaporação, T_{ma} = Temperatura média do ar ($^\circ C$), ε = emitância hemisférica da superfície da terra (0,93~0,96), ΔR = constante de radiação (W/m^2), β = coeficiente de absorção, S_m = média de radiação solar (W/m^2), r_a = umidade relativa. h_s , h_e e h_r podem ser determinados pelas seguintes equações:

$$h_s = 5.7 + 3.8u \quad (3)$$

$$h_e = h_s (1 + 0.0168af) \quad (4)$$

$$h_r = h_s (1 + 0.0168ar_{af}) \quad (5)$$

Com $a= 103$ [$Pa/^\circ C$], f = fração da taxa de evaporação, T_{ma} = Temperatura média do ar ($^\circ C$), ε = emitância hemisférica da superfície da terra (0,93~0,96), ΔR = constante de radiação (W/m^2), β = coeficiente de absorção, S_m = média de radiação solar (W/m^2), r_a = umidade relativa.

$$As = \left\| \frac{hrT_{va} - \beta S_v e^{i\theta_l}}{h_e + \delta k_s} \right\| \quad (6)$$

Com As = constante de fase da superfície do solo (s),

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\Phi_s}{w} \quad (7)$$

Com t_0 = diferença de ângulo de fase entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície do solo (rad), t_{0a} = a constante de fase do ar (s), que é o período desde o início do ano, que a temperatura do ar leva para atingir o valor mínimo, w = frequência angular anual, é igual a 1.992×10^{-7} rad/s, Φ_s = a constante de fase do solo (s), pode ser avaliada como segue:

$$\Phi_s = -Arg \left[\frac{hrT_{va} - \beta S_v e^{i\theta_l}}{h_e + \delta k_s} \right] \quad (8)$$

Os símbolos $\| \|$ e Arg denotam o módulo e o argumento de um número complexo, respectivamente. Para calcular As e Φ_s , o número complexo em questão é reorganizado e calculado pelo programa.

Finalmente, a transferência de calor entre o solo e o ar dentro do *EarthTube* é igual a quantidade das perdas de calor produto do fluxo de ar ao longo do *EarthTube* (Jacovides e Mihalakakou, 1995).

$$U_t [T_a(y) - T_{z,t}] dy = -m_a C_a [dT_a(y)] \quad (9)$$

Com U_t = coeficiente de transferência de calor global de todo o sistema de *EarthTubes* ($W/C \cdot m$), $T_a(y)$ é a temperatura do ar da tubulação ($^\circ C$), y é a distância desde a entrada até a saída do *EarthTube* e m_a é o fluxo de massa do ar do ambiente através do *EarthTube* (kg/s). C_a é o calor específico do ar ($J/kg \cdot ^\circ C$) e R_t é a resistência térmica total entre o *EarthTube* de ar e do solo (mC/W).

Condição inicial da temperatura do ar de admissão é igual à temperatura do ar do ambiente. A temperatura do ar na saída finalmente é resolvida pela equação de transferência de calor acima.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

4.1. Climas

Para a cidade de Porto Alegre – RS, se tem a Latitude de $-30,0^\circ$, Longitude $-51,18^\circ$, Fuso horário -3h, e Elevação 3 m. Com variações de temperatura anuais entre $37,2^\circ\text{C}$ de máxima e $0,2^\circ\text{C}$ de mínima.

Na Tabela 1 são descritas as informações contidas no arquivo .idf de Porto Alegre, onde se pode verificar as variações de temperatura do solo. A Figura 2 mostra esses resultados para as profundidades de 0,5m, 2m e 4m, conforme a legenda de cores indicada.

Tabela 1: Variação da temperatura ($^\circ\text{C}$) do solo às profundidades de 0,5 m, 2 m e 4 m

PERIODO	PROFUNDIDADE(m)			PERIODO	PROFUNDIDADE(m)		
	0,5	2	4		0,5	2	4
Jan	22,8	21,7	20,9	jul	18,7	19,8	20,5
Fev	23,9	22,8	21,8	ago	17,5	18,6	19,6
Mar	24,2	23,3	22,3	set	17,2	18,1	19,0
Abr	23,9	23,3	22,5	out	17,8	18,2	18,9
Mai	22,2	22,4	22,1	nov	19,2	19,0	19,3
Jun	20,4	21,1	21,48	dez	21,0	20,3	20,0

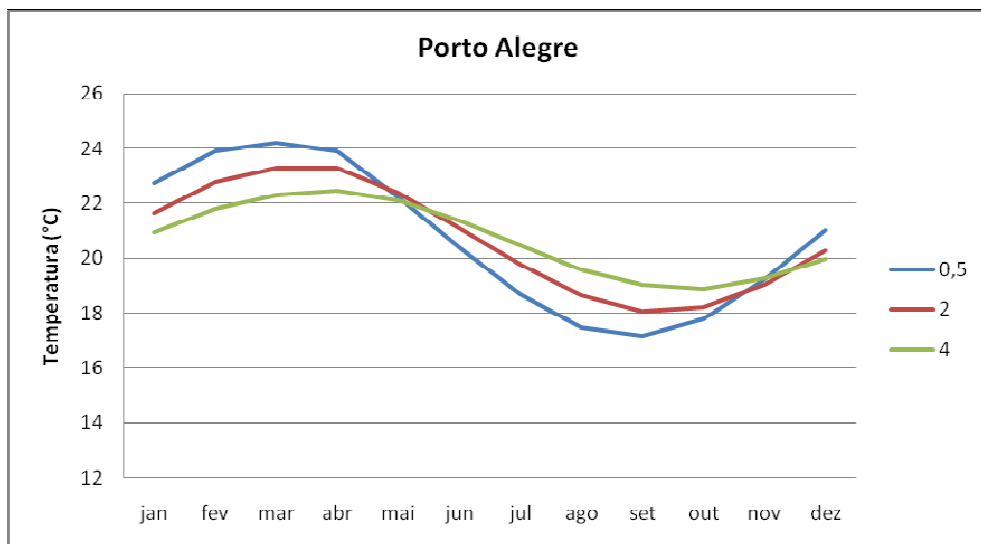


Figura 2: Variação da temperatura do solo para a cidade de Porto Alegre às profundidades de 0,5 m, 2 m e 4 m

4.2. Descrição do Modelo

O modelo construído pretende aproximar-se das construções civis residenciais comumente encontradas nas regiões de climas escolhidos para a simulação.

Para o trabalho, considerou-se uma arquitetura constituída por nove ambientes, sendo que somente cinco ambientes serão climatizados. Na Figura 3, a distribuição dos ambientes do modelo gerado, com as áreas ventiladas em destaque. E na Figura 4 mostra-se o ambiente a ser analisado em formato .skp.

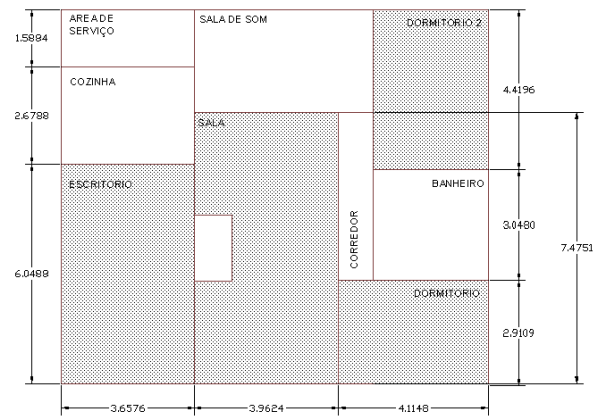


Figura 3: Distribuição dos ambientes



Figura 4. Projeto da edificação em *Google SketchUp*.

Com a intenção de utilizar a inércia do solo e aproveitar o calor armazenado durante o dia utilizando-o em períodos menos quentes, escolheu-se uma rotina para funcionamento dos *EarthTubes* que beneficiasse a troca térmica e uma melhor utilização dessa energia. Baseando-se nas temperaturas externas para um dia típico de projeto em Porto Alegre e na variação das temperaturas anuais do solo, Figura 2, de acordo com as estações do ano, gerou-se o esquema de funcionamento conforme a Tabela 2. Assumindo períodos de estações do ano diferenciadas para o solo, devido à grande inércia térmica do solo.

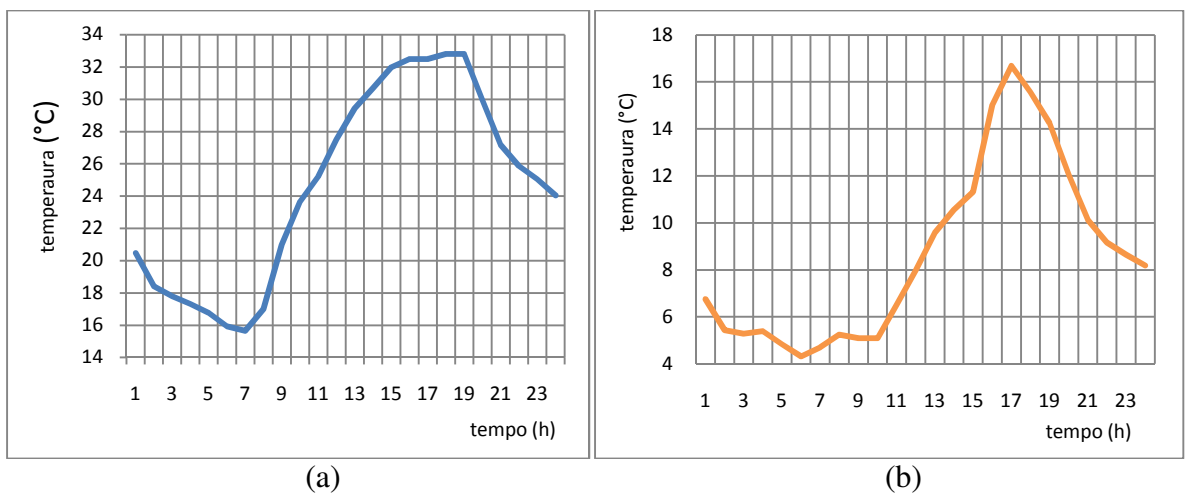


Figura 3. Variação de Temperatura para o dia 5 de janeiro (a), e dia 6 de julho (b)

Tabela 2: Rotina de funcionamento do *EarthTube*

intervalo		trocas/hora	estações no solo	intervalo		trocas/hora	estações no solo
1/jan - 15/jan	0:00h - 10:00h	3	primavera'	30/abr - 31/jul	00:00h - 10:00h	0,05	outono'
	10:00h - 14:00h	1			10:00h - 12:00h	0,1	
31/out - 31/dez	14:00h - 16:00h	0,5			12:00h - 17:00h	1	
	16:00h - 22:00h	4			17:00h - 22:00h	0,05	
	22:00h - 24:00h	5			22:00h - 24:00h	0,05	
15/jan - 30/abr	0:00h - 10:00h	3	verão'	31/jul - 31/out	00:00h - 10:00h	0,05	inverno'
	10:00h - 14:00h	1			10:00h - 12:00h	0,1	
	14:00h - 16:00h	0,5			12:00h - 17:00h	1	
	16:00h - 22:00h	4			17:00h - 22:00h	0,05	
	22:00h - 24:00h	5			22:00h - 24:00h	0,05	

4.3. Modelagem da Edificação

Constituído de uma superfície de 121m² com distribuição em nove ambientes dentre eles cinco zonas térmicas: um escritório 22,2 m², dois dormitórios – 11,7m² e 14 m², sala 29,6 m² e sala de som 14m². Segue abaixo, uma descrição da construção.

- *Exterior Wall*: reboco - 25mm, tijolo - 8 furos circulares – 100mm, argamassa - 25mm;
- *Interior Wall*: argamassa – 25mm, tijolo - 8 furos circulares – 100mm, argamassa – 25mm;
- *Exterior Roof*: telha de barro – 10mm, espaço de ar, lã de vidro – 25mm, forro de madeira – 10mm;
- *Interior Ceiling*: lã de vidro – 20mm, forro madeira – 10mm;
- *Exterior Window*: vidro 3mm;
- *Exterior Door*: madeira – 30mm;
- *Interior Door*: madeira – 30mm;
- Piso de sótão: lã de vidro – 20mm, forro madeira – 10mm;
- *Exterior Floor*: solo – 375mm, fundação – 100mm, argamassa – 25mm;
- *Interior Floor*: piso madeira - 10mm.

4.3.1. Materiais

O *EnergyPlus* exige a informação das propriedades físicas dos materiais constituintes da edificação simulada. Essas propriedades foram obtidas da biblioteca de materiais disponível no *software*, e também a partir da Norma Brasileira NBR15220-2. As principais características térmicas e construtivas estão expostas no Apêndice A.

4.3.2. Zona Térmica

De acordo com o Manual do *EnergyPlus*, define como um volume de ar a uma temperatura uniforme [*EnergyPlus*,2009], assim as zonas térmica serão independentes. Neste trabalho a edificação foi dividida em zonas térmicas possibilitando identificar setores que demandarão mais ou menos energia.

Na Figura 4 mostra-se o modelo gerado em .idf e na Tabela 3 um detalhamento das zonas ventiladas.

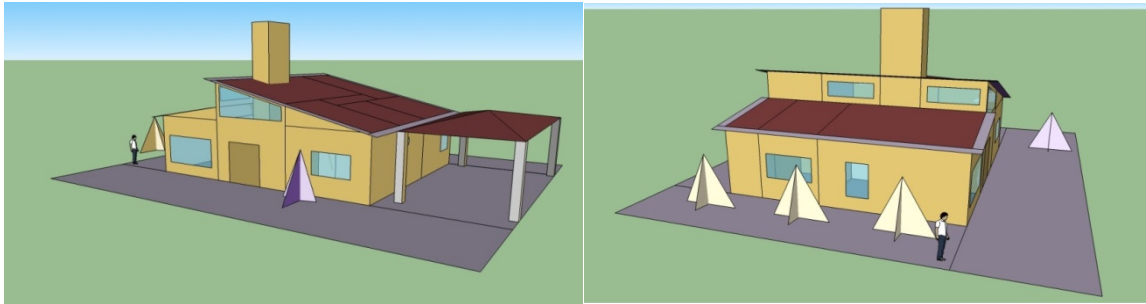


Figura 4. Projeto da edificação em *Open Studio*, em .idf.

Tabela 3: Descrição das Zonas Geradas

ZONA	AREA [m ²]	PAREDES INTERNAS [m ²]	PAREDES EXTERNAS [m ²]	AREA DE JANELAS [m ²]	VOLUME [m ³]	VAZÃO [L/s]	ILUMINAÇÃO [W/m ²]	EQUIP. [W]	OCUPAÇÃO	m ² /PESSOA	INFILTRAÇÃO
Escritório	22,12	26,89	25	5,67	69,9	19,4	10	150	1	22,12	5
Sala	29,62	70,67	17,75	7,07	138,3	38,4	10		4	7,405	5
Dormitório	11,72	20,22	19,94	2,06	37,0	10,3	10		2	5,86	5
Dormitório 2	14	22,3	21,34	2,64	44,2	12,3	10		2	7	5

5. RESULTADOS E ANÁLISES

A partir dos resultados apresentados pelo *EnergyPlus*, a plotagem de gráficos possibilita uma melhor análise das variáveis. Optou-se por avaliar os resultados de temperatura do solo *versus* profundidade, e dos parâmetros diâmetro, comprimento e espessura do tubo, todos em função da temperatura interna no ambiente, com intenção de avaliar o conforto térmico nos ambientes ventilados.

Segundo a curva obtida para a temperatura do solo, percebe-se que a temperatura não varia de forma significativa a certa profundidade do solo. As variações de temperatura ao longo do ano no subsolo são pequenas a profundidades de apenas alguns metros. Além dos dados da Figura 2 usou-se também para a simulação, a curva da temperatura de Porto Alegre (Figura 5).

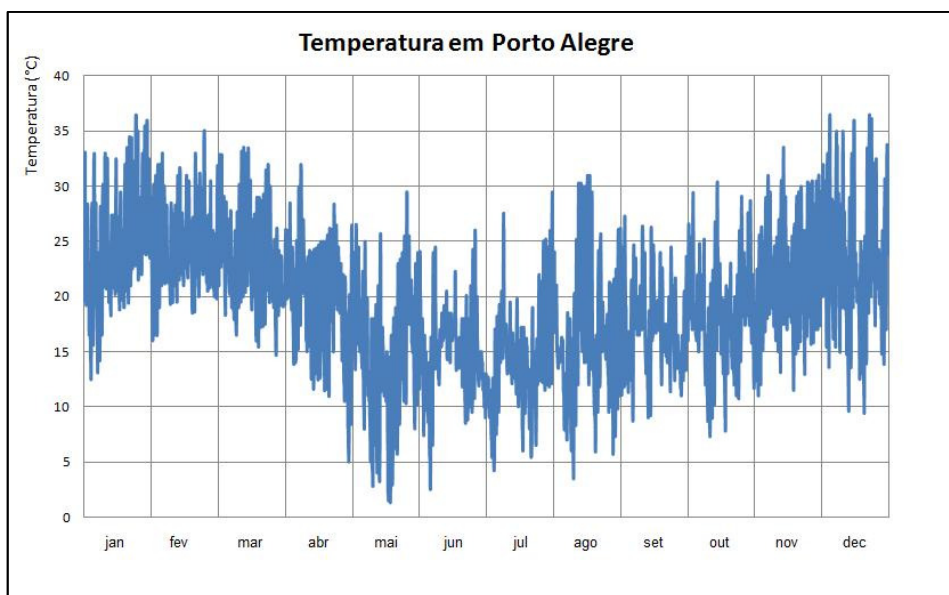


Figura 5: Variação da temperatura anual para a cidade de Porto Alegre

Para a simulação adotou-se os parâmetros de entrada dos *EarthTubes* com tubo de metal, conforme a Figura 6. Foram consideradas como variáveis neste conjunto de entradas os parâmetros: condutividade térmica, diâmetro, espessura, comprimento e profundidade do tubo.

Field	Units	Obj1	Obj2	Obj3	Obj4
Zone Name		escritorio	sala	dormitorio	dormitorio 2
Schedule Name		ventila-earth-tube	ventila-earth-tube	ventila-earth-tube	ventila-earth-tube
Design Flow Rate	m3/s	0,0194	0,0384	0,0102	0,0122
Minimum Zone Temperature when Cooling	C	15	15	15	15
Maximum Zone Temperature when Heating	C	25	25	25	25
Delta Temperature	deltaC	2	2	2	2
Earthtube Type		Intake	Intake	Intake	Intake
Fan Pressure Rise	Pa	200	200	200	200
Fan Total Efficiency		0,63	0,63	0,63	0,63
Pipe Radius	m	0,25	0,25	0,25	0,25
Pipe Thickness	m	0,05	0,05	0,05	0,05
Pipe Length	m	15	15	15	15
Pipe Thermal Conductivity	W/m-K	47,7	47,7	47,7	47,7
Pipe Depth Under Ground Surface	m	2	2	2	2
Soil Condition		HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp	HeavyAndDamp
Average Soil Surface Temperature	C	21,4	21,4	21,4	21,4
Amplitude of Soil Surface Temperature	C	7,44	7,44	7,44	7,44
Phase Constant of Soil Surface Temperature	days	114	114	114	114
Constant Term Flow Coefficient		0,6	0,6	0,6	0,6
Temperature Term Flow Coefficient		0	0	0	0
Velocity Term Flow Coefficient		0	0	0	0
Velocity Squared Term Flow Coefficient		0	0	0	0

Figura 6: Variáveis exigidas pelo *EnergyPlus* para simulação dos *EarthTubes*

5.1. Variação do diâmetro

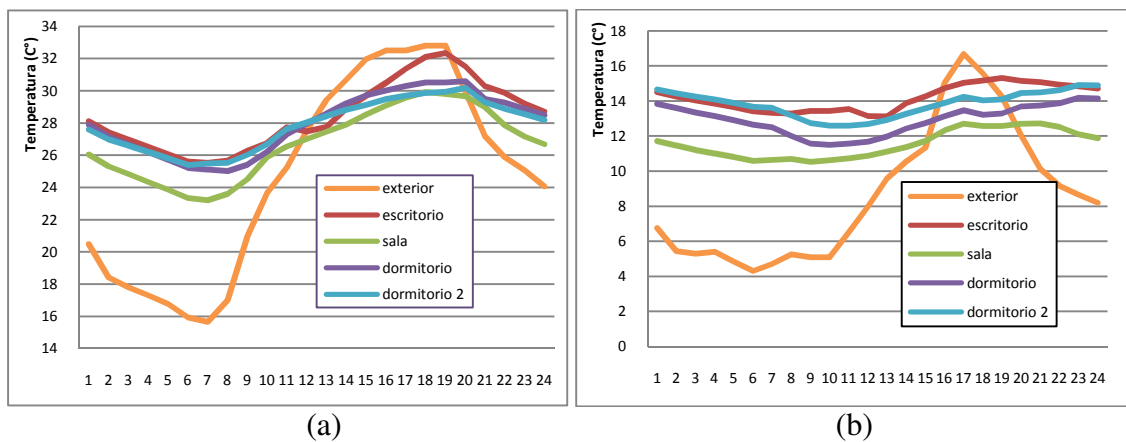


Figura 7. Temperatura dos ambientes utilizando tubo com diâmetro de 0,5m, para o dia 5 de janeiro (a), e temperatura para o dia 6 de julho (b)

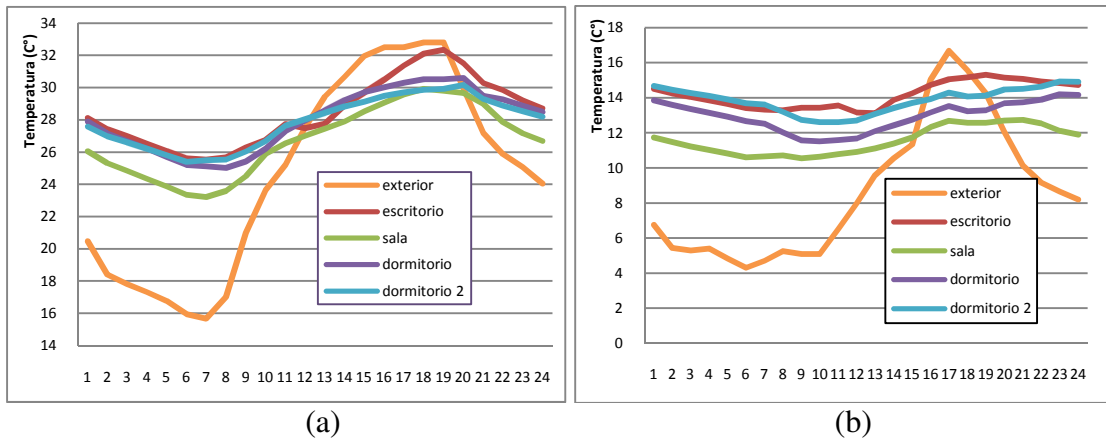


Figura 8. Temperatura dos ambientes utilizando tubo com diâmetro de: 1m, para o dia 5 de janeiro (a) e dia 7 de julho (b)

De acordo com o resultado obtido nas Figuras 7 e 8, com a diminuição do diâmetro do tubo, se reduz a capacidade de transferência de calor por convecção reduzindo a capacidade do sistema. No entanto, esta variação não fica acentuada para esta diferença na configuração de tubos.

5.2. Variação do comprimento

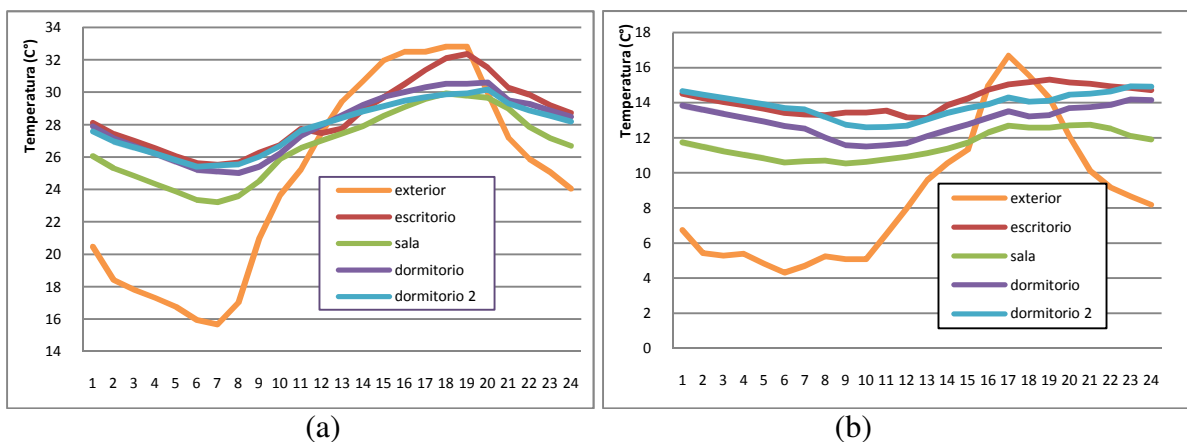


Figura 9. Temperatura dos ambientes utilizando tubo com comprimento de: 30m para o dia 5 de janeiro (a) e para o dia 7 de julho (b)

A figura 7, com tubos de 15 m de comprimento, e a figura 9 confirmam que o aumento no comprimento do *EarthTube* aumenta a área de contato com o solo, facilitando as trocas térmicas com o solo (SANTAMOURIS, 1996). Porém, as trocas térmicas entre o ar e o solo decrescem ao longo do duto, pois a diferença de temperatura do ar e o solo, ao longo do *EarthTube*, diminui (LOMBARDI, 2005). Segundo os resultados, notou-se uma variação de temperatura muito pequena, provavelmente devido à conclusão obtida por KABASHNIKOV (KABASHNIKOV, 2002), que afirma que a capacidade de trocar calor do solo aumenta com o aumento do *EarthTube* até um “ponto de saturação”, que depende da frequência de oscilações da temperatura e do volume de ar circulando no interior do duto. O “ponto de saturação” ocorreria quando a temperatura do ar se iguala à temperatura das paredes dos *EarthTubes*.

5.3. Variação da espessura

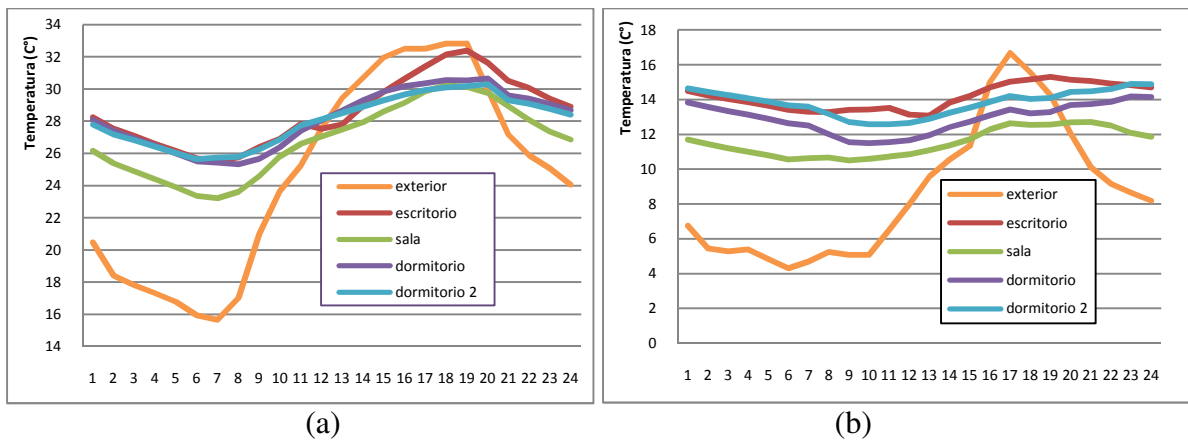


Figura 10: Temperatura dos ambientes utilizando tubo com espessura de: 0,05m para o dia 5 de janeiro (a) e para o dia 7 de julho (b)

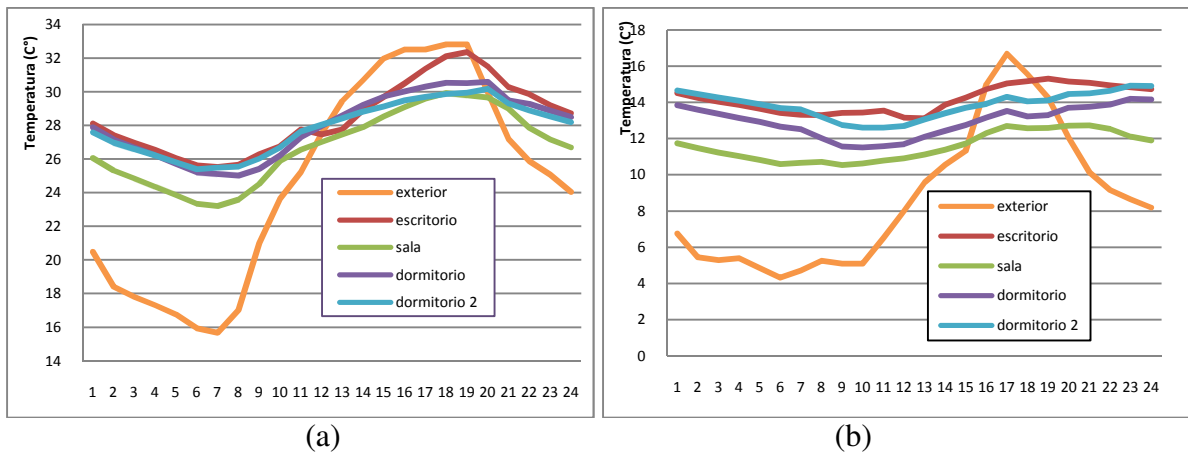


Figura 11: Temperatura dos ambientes utilizando tubo com espessura de: 0,1m para o dia 5 de janeiro (a) e para o dia 7 de julho (b)

Os resultados demonstram variação pouco acentuada para os parâmetros simulados, ambos apresentaram resultados próximos da temperatura de conforto dentro dos ambientes, o que possibilita ao usuário a escolha.

5.4. Variação da profundidade

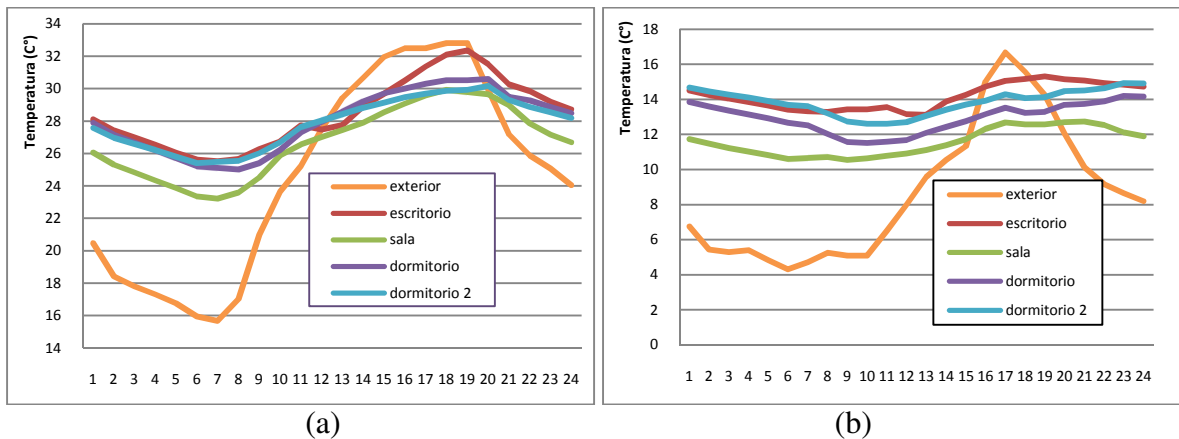


Figura 12. Temperatura dos ambientes utilizando tubosa uma profundidade de: 0,5m, para o dia 5 de janeiro (a) e para o dia 7 de julho (b)

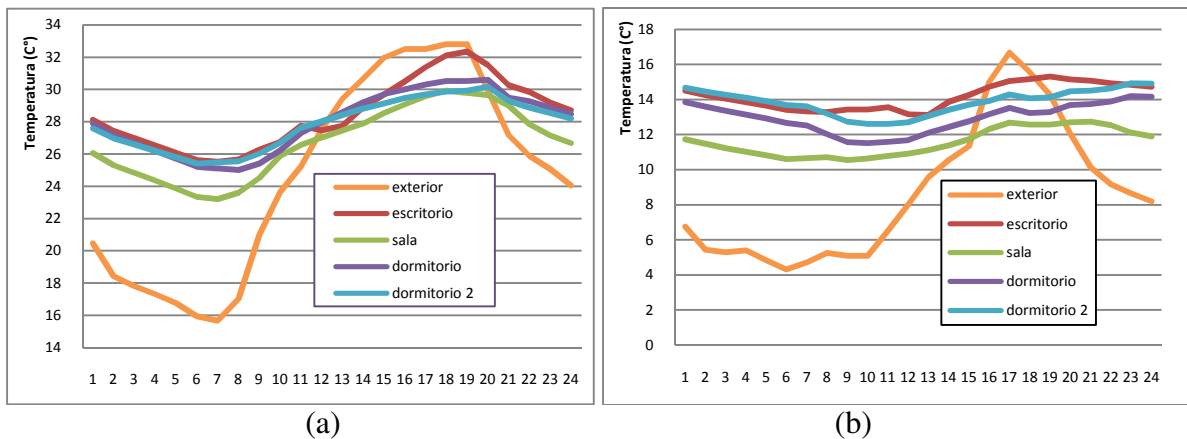


Figura 13. Temperatura dos ambientes utilizando tubosa uma profundidade de: 4m, para o dia 5 de janeiro (a) e para o dia 7 de julho (b)

Para as profundidades de 0,5, 2 e 4 m apresentadas nas Figuras 12, 7, 13 respectivamente se observou que a diferença de temperaturas obtida nos ambientes é praticamente a mesma para as três profundidades, só podendo ser observado a variação em dados numéricos na planilha Excel com análise do arquivo .csv, pois são da ordem de centésimos de grau. Portanto, nas condições adotadas para análise, a profundidade dos tubos foi quase irrelevante para que a condição de conforto nos ambientes fosse mantida.

8. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos, percebe-se que há vantagens com a instalação do sistema de ventilação por tubos enterrados quando comparadas as temperaturas dos ambientes com as temperaturas de conforto. Percebe-se também que existem parâmetros que levemente ajustados possibilitam uma melhoria em alguns casos significativa de ventilação e em outros não tão relevantes para o caso em avaliação. A variação dos parâmetros como o aumento do comprimento, diminuição da espessura e aumento do diâmetro serviram como ajustes para encontrar uma situação otimizada de ventilação, bem como a escolha da rotina de funcionamento do *EarthTube* – os *Schedules* que modificam significativamente o resultado final e devem ser analisados exaustivamente até a obtenção das melhores condições.

Este trabalho, dentro de seus limites, definiu uma situação satisfatória de uso dos tubos enterrados para ventilação em Porto Alegre. Chegando às conclusões de que a situação de conforto mais facilmente obtida para os ambientes analisados é a de tubos enterrados à 0,5 m, com diâmetro médio de 0,1 m, comprimento 15 m e espessura indiferente de 0,05 m ou 0,1 m.

Do estudo se conclui também que as quase infinitas combinações de variáveis para tubos enterrados, abrem espaço para o desenvolvimento de simulações com resultados próximos de um sistema de ventilação perfeito. O que foi feito com este trabalho é uma amostra das tantas configurações que o sistema pode assumir e de quais resultados se pode obter.

Sugestões para trabalhos futuros

O trabalho apresentou resultados satisfatórios, mas a técnica de avaliar outras possibilidades não pode ser descartada. Pensando em trabalhos que ainda poderão ser executados no entorno do assunto, foram elaboradas as sugestões:

- Simular tubos com outras condutâncias térmicas, mais eficientes para a troca de calor;
- Baseando-se na conclusão de que o tubo troca calor com o solo até o momento em que a temperatura de sua superfície fique próxima da temperatura do solo, analisar comprimentos menores para os tubos.
- Propor nova rotina – *Schedule*, para uma otimização dos horários de utilização da ventilação;
- Avaliar a Viabilidade econômica X o desempenho do sistema;

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: Resumos. Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: referências bibliográficas. Rio de Janeiro, 2002.

REFERÊNCIAS

<http://www.treehugger.com/files/2008/04/earth-tubes.php> - visita em 20/09/2010.

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. – ASHRAE: Handbook of Fundamentals. New York, USA. 2001.

ENERGYPLUS Manual, version 6.0.: **The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California**, 2009.

GHELFI FILHO; SILVA; I.J.O.; MOURA, D.J; CONSIGLIERO, F.R. **Índice de conforto térmico e da CTR para diferentes materiais de cobertura em três estações do ano.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 20., 1991, Londrina, p.94-110.

JACOVIDES, C.; MIHALAKAKOU, G.; SANTAMOURIS, M.; LEWIS, J. **On the Ground Temperatures Profiles for Passive Cooling Application in Buildings.** In.: Solar Energy, vol. 51, n. 3, p. 167-175, 1996.

KABASHNIKOV, V.; DANILEVSKII, L.; NEKRASOV, V.; VITYAZ, I. Analytical and Numerical Investigation of the Characteristics of a Soil Heat Exchanger for Ventilation System. In: **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2002.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A. P. **Conforto Térmico e Estresse Térmico**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), 2002.

LOMBARDI, H. **Simulação Numérica da Transferência Simultânea de Energia e Umidade através do Solo em um Sistema Trocador-Armazenador de Calor**, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, UFRGS, 2005.

SANTAMOURIS, M.; MIHALAKAKOUS, G.; BALARAS, C.; ARGIRIOU. **Use of Buried Pipes for Energy Conservation in Cooling of Agricultural Greenhouses**. In: *Solar Energy*, Vol. 55, n. 2, p. 111-124, 1995.

MUSSKOPF, D.B.; **Estudos Exploratórios Sobre Ventilação Natural Por Tubos Enterrados**, Dissertação de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PPGEC/UFRGS, 2006.

APÊNDICES

Apêndice A: Propriedades Térmicas dos Materiais, obtidos a partir da Norma NBR15220-2

MATERIAL	PROPRIEDADES
reboco - 25mm	Roughness: Smooth, Thickness: 0.025 m, Conductivity: 1.15 W/m.K , Density: 2100 kg/m ³ , Specific Heat: 1000 J/kg.K, Thermal Absorptance(ϵ): 0,9, Solar Absorptance(α): 0,5, Visible Absorptance: 0,5
tijolo - 8 furocirculares – 100mm	Roughness: Rough, Thickness: 0,1 m, Conductivity: 0,9 W/m.K Density: 1103 kg/m ³ , Specific Heat: 920 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,7, Solar Absorptance(α): 0,8 Visible Absorptance: 0,76
madeira– 30mm	Roughness: MediumSmooth, Thickness: 0,03 m, Conductivity: 0,12 W/m.K, Density: 350 kg/m ³ , Specific Heat: 2300 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,9, Solar Absorptance(α): 0,78 Visible Absorptance: 0,78
telha de barro– 10mm	Roughness: Rough, Thickness: 0.01 m, Conductivity: 1,05 W/m.K, Density: 2000 kg/m ³ , Specific Heat: 920 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,9, Solar Absorptance(α): 0,8 Visible Absorptance: 0,7
piso madeira - 10mm	Roughness: MediumSmooth, Thickness: 0.01 m, Conductivity: 0,14 W/m.K, Density: 600 kg/m ³ , Specific Heat: 2300 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,90, Solar Absorptance(α): 0,70 Visible Absorptance: 0,65
piso de cerâmica- 10mm	Roughness: Smooth, Thickness: 0,01 m, Conductivity: 0,9 W/m.K, Density: 1600 kg/m ³ , Specific Heat: 920 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,70, Solar Absorptance(α): 0,30 Visible Absorptance: 0,20
fundação– 100mm	Roughness: VeryRough, Thickness: 0,1 m, Conductivity: 1,75 W/m.K, Density: 2400 kg/m ³ , Specific Heat: 1000 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,90, Solar Absorptance(α): 0,80 Visible Absorptance: 0,70
solo – 375mm	Roughness: Rough, Thickness: 0,375 m, Conductivity: 0,87 W/m.K, Density: 1361 kg/m ³ , Specific Heat: 837,3 J/kg.K Thermal Absorptance(ϵ): 0,90, Solar Absorptance(α): 0,80 Visible Absorptance: 0,70
forro madeira – 10mm	Roughness: MediumSmooth, Thickness: 0,01 m, Conductivity: 0,14 W/m.K, Density: 600 kg/m ³ , Specific Heat: 2300 J/kg.K, Thermal Absorptance(ϵ): 0,80, Solar Absorptance(α): 0,30 Visible Absorptance: 0,30
lã de vidro – 25mm	Roughness: VeryRough, Thickness: 0,025 m, Conductivity: 0,05 W/m.K, Density: 50 kg/m ³ , Specific Heat: 700 J/kg.K, Thermal Absorptance(ϵ): 0,40, Solar Absorptance(α): 0,20 Visible Absorptance: 0,20
argamassa – 25mm	Roughness: VeryRough, Thickness: 0,025 m, Conductivity: 1,15 W/m.K, Density: 2000 kg/m ³ , Specific Heat: 1000 J/kg.K, Thermal Absorptance(ϵ): 0,90, Solar Absorptance(α): 0,50 Visible Absorptance: 0,50
Clear – 3mm	Thickness: 0,003 m, Solar Transmittance at Normal Incidence: 0,837, Front Side Solar Reflectance at Normal Incidence: 0,075 Back Side Solar Reflectance at Normal Incidence: 0,075, Visible Transmittance at Normal Incidence: 0,898, Front Side Visible Reflectance at Normal Incidence: 0,081, Back Side Visible Reflectance at Normal Incidence: 0,081, Infrared Transmittance at Normal Incidence: 0, Front Side Infrared Hemispherical Emissivity: 0,84, Back Side Infrared Hemispherical Emissivity: 0,84, Conductivity : 0,9 w/m.K

ANEXOS

ANEXO A: Interface *EnergyPlus*