

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SIMULAÇÃO VISANDO A VENTILAÇÃO DE RESIDÊNCIAS ATRAVÉS DE TUBOS
ENTERRADOS

por

Sergio Roberto Peres França

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.

Porto Alegre, novembro de 2011.

SIMULAÇÃO VISANDO A VENTILAÇÃO DE RESIDÊNCIAS ATRAVÉS DE TUBOS
ENTERRADOS

por

Sergio Roberto Peres França

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

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Volnei Borges

Prof. Dr. Flavio T. Van Der Laan

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 18 de novembro de 2011.

DEDICATÓRIA

A minha esposa Marcia, meus pais, irmãos, cunhadas e sobrinhos, pelo carinho, apoio, incentivo e paciência que tiveram comigo.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Beyer, pela orientação concedida, pelo incentivo, empenho, dedicação, paciência, fatores que contribuíram de forma substancial e incentivaram a produção deste trabalho;

A todos os colegas de curso, em especial Diohrge e Daniel, que ajudaram em muito, os quais se tornaram grandes amigos e com eles aprendi muito;

FRANÇA, S. R. P. Simulação visando a ventilação de residências através de tubos enterrados. 2011. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

Com a tendência atual para o emprego de tecnologias sustentáveis, ressurgiu o interesse na utilização do conceito do sistema de tubos enterrados, bastante difundido nas décadas de setenta e oitenta. O sistema utiliza o subsolo para o resfriamento e aquecimento de uma corrente de ar, contribuindo para reduzir a temperatura do ar que ingressa na residência durante o verão e aumentando durante o inverno. O presente trabalho tem por objetivo analisar, através da simulação computacional no programa *EnergyPlus*, se a ventilação proporcionada pelos tubos enterrados irá alterar significativamente a temperatura interna do ambiente de interesse. O resultado obtido mostra que, a combinação da ventilação direta com o sistema de tubos enterrados, para este estudo, teve maior eficiência quando sua aplicação foi direcionada para o resfriamento da residência.

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

FRANÇA, S. R. P. Simulação visando a ventilação de residências através de tubos enterrados. 2011. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

The current tendency about using sustainable technologies has made raise the interest of using the concept of buried pipes systems, widespread in the seventies and eighties. The system uses the underground for cooling and heating the air flow, helping to reduce the air temperature that enters in the residences during the summer and increasing during the winter. The aim of the present work is to analyze if the ventilation provided by buried pipes will significantly change the temperature using a computer simulation and the program *EnergyPlus*. The results show that the combination of direct ventilation with buried pipes systems is more effective when your application is directed for cooling the residence.

KEYWORDS: *EarthTube, EnergyPlus, Ventilation, Thermal Confort.*

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	2
4.1. Dados das Zonas Térmicas.....	3
5. METODOLOGIA.....	4
5.1. Tipos de Solos	4
5.2. Profundidade e Temperatura do Solo	5
5.3. Temperatura Operativa	5
5.4. Tipos de Materiais dos Tubos do Sistema <i>Earthtube</i>	6
5.5. Controles e Manutenção do Sistema <i>Earthtube</i>	7
5.6. <i>ZoneEarthtube</i> e <i>CalcSoilSurfTemp</i>	7
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
6.1. Ventilação da residência sem o sistema <i>Earthtube</i>	9
6.2. Ventilação da residência com o sistema <i>Earthtube</i>	11
7. CONCLUSÕES	14
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	15
APÊNDICE A – Resultados das simulações com tubos enterrados.....	16
APÊNDICE B – Gráficos Horas de desconforto do quarto dos filhos	19

1. INTRODUÇÃO

Devido as suas características biológicas, o homem produz calor como reação secundária dos seus processos metabólicos, tendo a necessidade de transferir o excesso ao meio que o rodeia. Para manter a temperatura interna normal (constante entre 36.5 e 37.5 °C), sem que precise desenvolver um mecanismo mais eficiente de dissipação de calor (suor), será necessário que o ambiente esteja numa faixa de temperaturas (e umidades) que são denominadas como conforto térmico. Inversamente, estando abaixo dessa faixa, precisará de um sistema de isolamento mais eficiente (roupas pesadas) para manter a temperatura interna dentro da faixa ideal.

Com relação ao citado anteriormente, no projeto de qualquer ambiente residencial, deve-se definir como manter as condições de conforto térmico para seus ocupantes de acordo com as atividades e o período de realização das mesmas. O projeto de climatização e ventilação deve considerar outros fatores, tais como a reposição de oxigênio e a exaustão de subprodutos das atividades exercidas no ambiente considerado.

Um sistema de climatização e ventilação, conhecido como *Earthtube*, é realizado com tubos enterrados. Este sistema, bastante pesquisado nos anos setenta e oitenta, não teve ampla aceitação devido às tecnologias que surgiram no período. Com a tendência atual para o emprego de tecnologias mais sustentáveis, ressurgiu o interesse na utilização do conceito *Earthtube*, pois há consumo de energia e, dependendo do local de captação, proporciona renovação do ar no ambiente de interesse.

2. OBJETIVOS

O trabalho tem o objetivo de analisar, através da simulação computacional, se a ventilação proporcionada pelos tubos enterrados irá alterar significativamente a temperatura interna do ambiente de interesse. Os pontos analisados são a localização climática (cidade de Porto Alegre), tipos de solos, profundidades em que serão alocados os tubos, os materiais, as espessuras, dimensões e a variação de vazão nestes tubos. Para isso, a simulação computacional será realizada no *software EnergyPlus 6*, largamente empregado em estudos de carga térmica e consumo energético de edificações.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A ventilação de um ambiente pode ser natural ou forçada (mecânica). Entende-se por natural, aquela em que não existe aporte de energia artificial para obter a renovação do ar. Usualmente, consegue-se a ventilação natural deixando aberturas no local (janelas e portas), que possibilitam trocas com o ambiente externo. Em geral, a ventilação natural é suficiente quando não existem outros focos de contaminação no ambiente, exceto a gerada pelas pessoas que estão nele. O principal inconveniente da ventilação natural é a dificuldade de regulação, já que a taxa de renovação em cada instante depende das superfícies das aberturas que estão em comunicação com o ambiente externo e das condições climáticas (ASHRAE, 2009).

Na ventilação forçada, é possível regular a taxa de ventilação com facilidade de acordo os controles adotados, porém há consumo de energia elétrica. Em ambientes internos de edifícios, onde não há comunicação direta com o ambiente externo, a ventilação só pode ser efetuada através da passagem de ar com ventiladores (ASHRAE, 2009).

Frota e Schiffer, 1988, definem que ventilação é a renovação ou a reposição de ar sujo (ou contaminado) por ar limpo, portanto pode-se afirmar que um sistema de climatização com recirculação de 100% do ar não pode ser considerado um sistema de ventilação.

Conforme descrito no manual *Input Output Reference, EnergyPlus*, 2010, o sistema de ventilação conhecido como *Earthtube*, é composto por um tubo de metal (ou de outro material com condutividade adequada), com um comprimento estipulado de acordo com os ambientes que trocarão calor. Este tubo é enterrado no solo, uma de suas extremidades fica acoplada ao equipamento de captação e a outra fica acoplada ao ambiente a ser climatizado. No processo de resfriamento, o ar captado perde calor para o solo através das paredes da tubulação e, ao entrar no ambiente, faz com que a temperatura do mesmo seja reduzida. O processo de aquecimento se dá de forma similar, sendo que ar frio captado externamente absorve calor do solo e, ao entrar no ambiente, faz com que a temperatura aumente.

Vale salientar que, durante o dia, o solo é aquecido pela radiação solar e, durante a noite, cede energia para a atmosfera, atuando como estabilizador térmico. Contudo, o solo comporta-se como um reservatório com grande inércia térmica (PEREIRA et alli, 2002), pois a temperatura varia exponencialmente com a profundidade. Assim, a amplitude térmica é amortecida exponencialmente com os valores da profundidade (SCHÖFFEL & MENDEZ, 2005). O comportamento com as estações do ano é análogo.

Um programa frequentemente utilizado em simulações de troca térmica em construções é o *EnergyPlus*, o mesmo, foi idealizado e desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos com o objetivo de calcular e otimizar o consumo energético em edifícios (LAMBERTS et alli, 2010).

Com o *EnergyPlus* é possível realizar simulações de uma determinada construção para diferentes climas, conforme a necessidade do usuário e a existência de dados climáticos da região de interesse. Para a proposta deste trabalho, este programa fornecerá os valores de temperatura interna média do ambiente, temperatura operativa bem como as temperaturas superficiais e o fluxo de calor nos elementos da construção (paredes, teto, forro, chão,...). Também serão fornecidos valores para a quantidade de calor recebido ou perdido, o consumo energético e a quantidade de ar trocado (LAMBERTS et alli, 2010).

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Para a simulação de ventilação de residências através de tubos enterrados, é proposta uma residência para uma família com quatro pessoas, sendo dois adultos e duas crianças, composta por uma sala, uma cozinha, um corredor e dois quartos. O projeto, desenvolvido no *Google Sketchup 8*, desconsidera a influência de elementos externos (muros, árvores, outras edificações,...) e utiliza soluções arquitetônicas conhecidas para ganhos no conforto térmico.

Inicialmente, utiliza-se o *plugin OpenStudio* para definir as zonas térmicas, sendo uma para cada ambiente da residência. Em seguida, na construção individual de cada peça, define-se a orientação, as dimensões e o número de aberturas (janelas e portas). Finalizado o conjunto de ambientes que compõem a edificação (figura 4.1), definem-se as condições de contorno em cada zona.

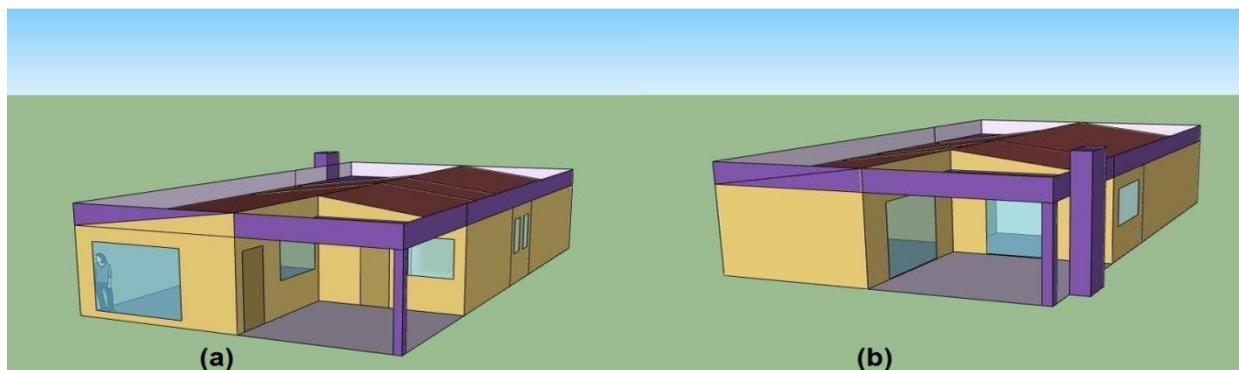


Figura 4.1: Visualização das orientações sul (a) e norte (b) da residência no *Google Sketchup 8*

As peças escolhidas para a análise são uma sala com 36 m², uma cozinha com 16 m², um quarto com 22 m² e o outro com 13,5 m²; destacadas e distribuídas conforme a planta baixa da residência (figura 4.2). As outras áreas internas serão consideradas na simulação do conjunto, contudo os resultados individuais serão desprezados devido ao curto período em que serão utilizadas.

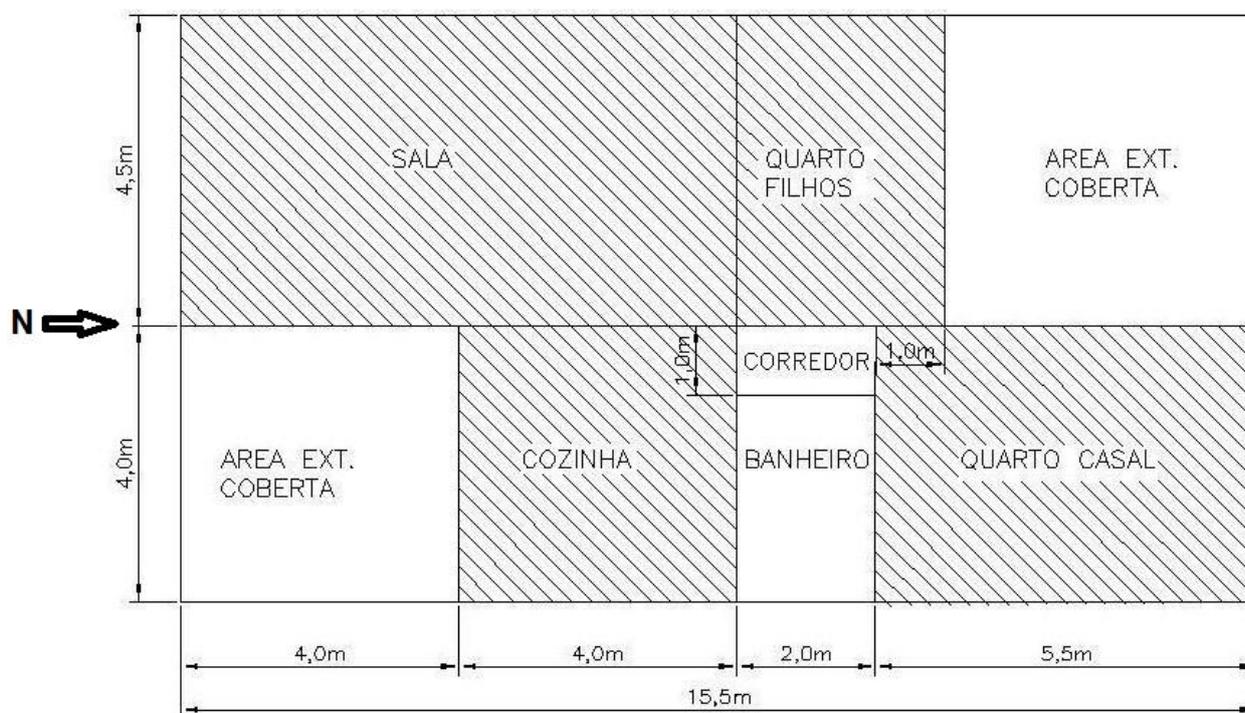


Figura 4.2: Planta baixa

4.1. Dados das Zonas Térmicas

Conforme descrito no manual *Input Output Reference, EnergyPlus, 2010*, os padrões construtivos de cada ambiente ou zona térmica (Tabela 4.1) são elaborados a partir das bibliotecas do próprio programa, onde encontram-se as propriedades para cada elemento da construção (paredes internas e externas, portas, janelas, piso, forro e telhado), tais como: revestimentos, cores (escura, média ou clara), materiais e espessuras.

Tabela 4.1: Padrão construtivo da residência

	Camada Externa	Espessura [mm]	Camada Intermediária	Espessura [mm]	Camada Interna	Espessura [mm]
Telhado	Telha	20	Ar	-	Concreto	100
Piso Interno	Concreto	100	-	-	-	-
Forro	Concreto	100	-	-	-	-
Piso Externo	Terra	300	Concreto	200	-	-
Parede Externa	Reboco	20	Tijolo	100	Reboco	20
Parede Interna	Reboco	20	Tijolo	100	Reboco	20
Porta	Madeira	50	-	-	-	-
Janela	Vidro	3	-	-	-	-

Cada zona térmica possui características arquitetônicas e de ocupação diferentes das demais, conforme pode ser constatado na Tabela 4.2, visto que este detalhamento será considerado na simulação. Cabe salientar que o item vazão de projeto é obtido através do produto entre o volume e o número estipulado de trocas do ar (duas, cinco ou dez) a cada hora. Em seguida, transforma-se a unidade (m³/h para L/s).

Tabela 4.2: Detalhes das Zonas

Zona	Volume [m ³]	Área [m ²]	Janela [m ²]	Equipamentos [W]	Iluminação [W/m ²]	Ocupação [pessoas]	Vazão de projeto 2 / 5 / 10 trocas [L/s]
Sala	90	36	6,73	500	9	4	50 / 125 / 250
Cozinha	40	16	1,32	900	9	4	22 / 55,6 / 111
Quarto Casal	55	22	5,2	300	9	2	30,6 / 76,4 / 153
Quarto Filhos	33,75	13,5	6,36	300	9	2	18,75 / 46,88 / 93,75

5. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da análise computacional da ventilação de residências através de tubos enterrados, é necessário definir os parâmetros iniciais requeridos pelo programa *EnergyPlus*.

5.1. Tipos de Solos

O sistema *Earthtube* requer a realização de um mapa geológico do terreno, pois é necessário obter dados sobre as formações da superfície, características e disposição do substrato rochoso. Também é preciso obter maiores informações sobre as condições do solo até 4 metros de profundidade, características e posição do nível do lençol freático. Obtendo os valores da condutividade e da difusividade térmica do solo, será possível estimar as temperaturas no solo (ao longo do ano) com base nas temperaturas ambientes daquela região.

A condutividade térmica do solo é o indicador limitante mais importante que deve ser considerado no projeto. Essa propriedade será utilizada para determinar o dimensionamento do sistema e, por este motivo, recomenda-se a utilização dos valores mais próximos das reais condições do solo que receberá o *Earthtube*.

Na tabela 5.1, traduzida e adaptada do manual *ASHRAE, 2007*, pode ser observada a densidade, a condutividade e a difusividade térmica para cada tipo de solo. Cabe destacar que os solos úmidos são preferíveis aos solos secos, visto que possuem maior condutividade térmica. Contudo, é necessário ponderar que umidade em excesso poderá não ser conveniente se o material dos tubos utilizados estiver sujeitos a corrosão. Também se recomenda evitar a instalação do sistema em terrenos arenosos secos ou turfosos (onde há excesso de matéria orgânica), visto que estes tipos de solo possuem condutividade muito baixa.

Tabela 5.1 - Propriedades Térmicas de Solos selecionados, Rochas e Rejuntas/Aterros

	Densidade seca [kg/m ³]	Condutividade [W/m. K]	Difusividade [x 10 ⁻⁷ m ² /s]
Tipos Solos			
Terra pesada, 15% água.	1925	1,4 a 1,9	4,86 a 7,06
Terra pesada, 5% água.	1925	1,0 a 1,4	5,44 a 7,06
Terra leve, 15% água.	1285	0,7 a 1,0	6,36 a 5,44
Terra leve, 5% água.	1285	0,5 a 0,9	6,48 a 6,48
Areia pesada, 15% água.	1925	2,8 a 3,8	9,72 a 12,73
Areia pesada, 5% água.	1925	2,1 a 2,3	10,76 a 16,20
Areia leve, 15% água.	1285	1,0 a 2,1	5,44 a 10,71
Areia leve, 5% água.	1285	0,9 a 1,9	6,33 a 11,38
Rochas			
Granito	2650	2,3 a 3,7	9,72 a 15,05
Calcário	2400 a 2800	2,4 a 3,8	9,72 a 15,05
Arenito	2570 a 2730	2,1 a 3,5	75,20 a 12,73

Vale observar que o programa *Energyplus* limita os solos em quatro tipos, conforme Tabela 5.2, traduzida e adaptada do manual da *ASHRAE*,1991. Com isso, optou-se pelo solo pesado e saturado (*heavy and saturated*) que oferece uma maior condutividade e difusividade térmica.

Tabela 5.2. Condutividade e difusividade térmica do solo para diversas condições

Solos	Condutividade [W/m°C]	Difusividade [m²/s]
Solo pesado, saturado.	2,42	9,04
Solo pesado, molhado.	1,30	6,45
Solo pesado, seco.	0,865	5,16
Solo leve, seco.	0,346	2,80

5.2. Profundidade e Temperatura do Solo

No gráfico da figura 5.1, observa-se que a variação da temperatura média anual do solo é menor quanto maior a profundidade, portanto o rendimento do sistema será maior no solo mais profundo visto que este sofrerá menor interferência da temperatura externa. No sistema *Earthtube*, devem ser consideradas profundidades compreendidas entre 2 metros e 4 metros, pois é o intervalo que geralmente apresenta melhor relação entre custo e benefício.

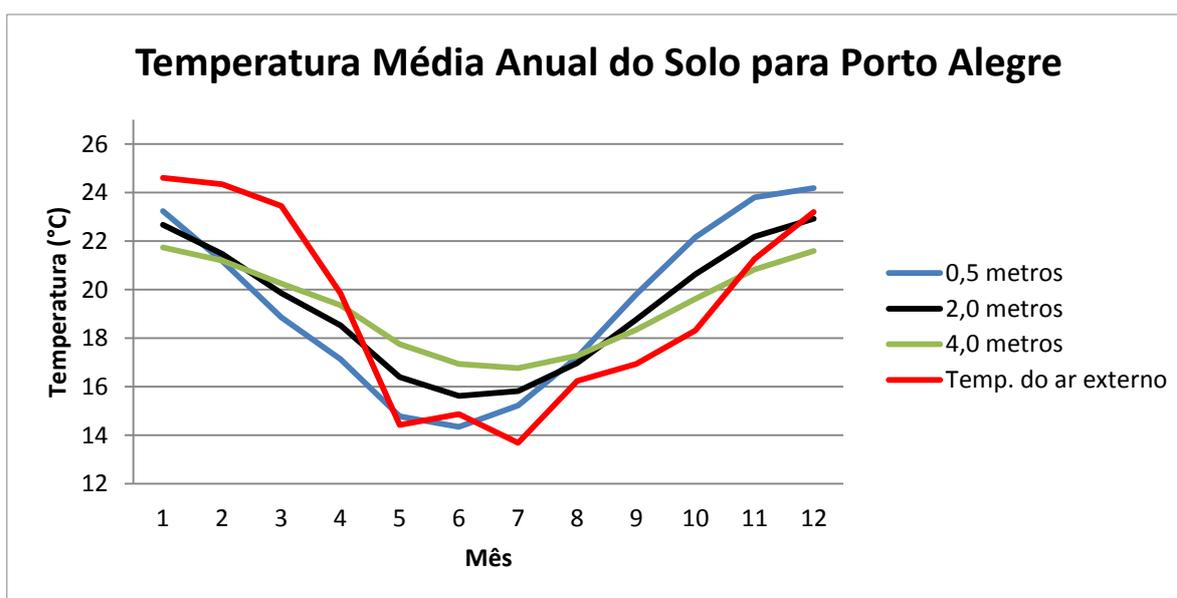


Figura 5.1: Temperatura média anual do solo nas profundidades de 0,5m, 2,0m e 4,0m.

5.3. Temperatura Operativa

Conforme descrito na *ANSI/ASHRAE 55*, 2004, observa-se que uma zona de conforto pode ser determinada para valores dados de temperatura do ar e superfícies internas, velocidade do ar, umidade, taxa metabólica e isolamento da roupa. A zona de conforto é definida em termos de um intervalo de temperaturas operativas que resulta da combinação da temperatura do ar e a temperatura média radiante que o indivíduo considera termicamente aceitável. Pode-se utilizar para definir os limites de temperatura da zona de conforto o gráfico da Figura 5.2, utilizada para diversas aplicações típicas. Outro método usa um *software* baseado em um modelo de balanço de térmico para determinar a zona de conforto para uma ampla gama de aplicações. Os resultados de ambos os métodos são consistentes podendo ser utilizado qualquer um.

Para o presente trabalho será aplicado o gráfico da figura 5.2, onde é possível definir a faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes internos naturalmente condicionados. Esses ambientes são os espaços onde as condições térmicas do mesmo são reguladas principalmente pelos ocupantes através da abertura e fechamento de janelas (ANSI/ASHRAE 55, 2004).

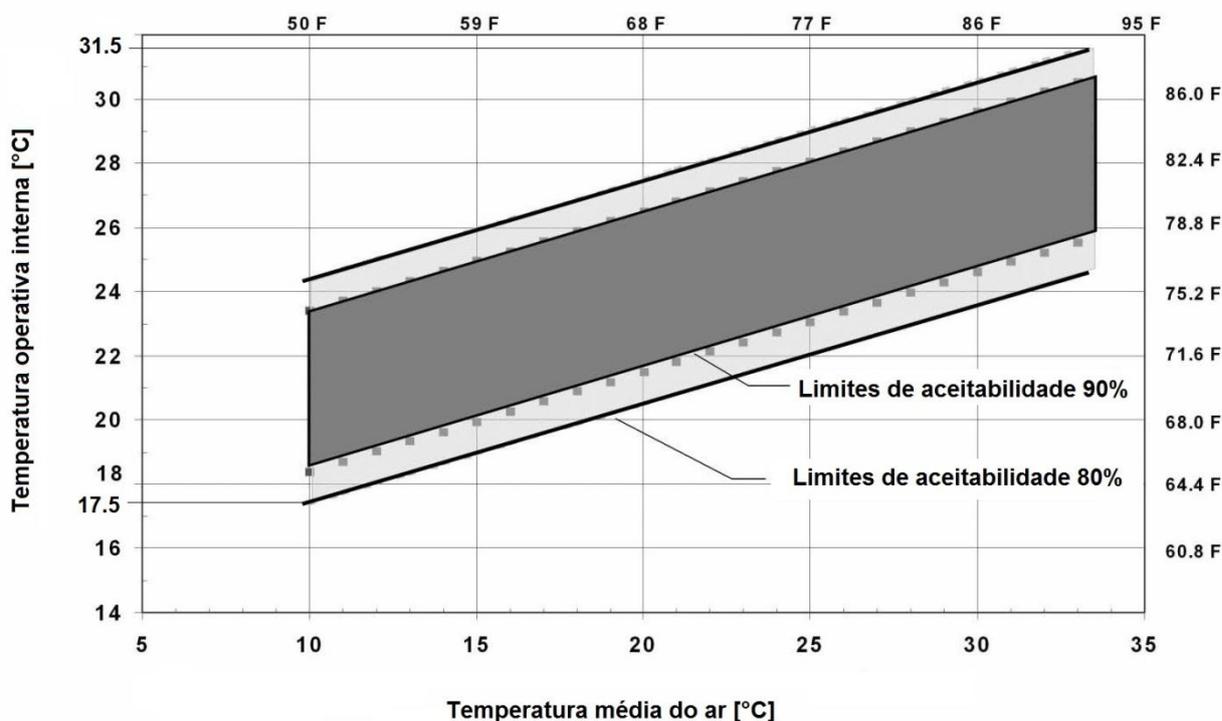


Figura 5.2: Faixa de temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionado.

5.4. Tipos de Materiais dos Tubos do Sistema *Earthtube*

Do ponto de vista térmico, o tipo de material dos tubos não tem uma importância realmente expressiva, pois o verdadeiro fator limitador é a condutividade térmica do solo ao redor dos tubos. Para o sistema *Earthtube*, o material utilizado deverá ser resistente ao esmagamento quando for enterrado. Também tubos com perfis corrugados apresentam uma maior resistência estrutural, no entanto, criam uma elevada resistência ao fluxo e facilitam o surgimento de condensado. Para a análise em questão, serão comparados materiais usualmente empregados em serviços onde a resistência ao esmagamento seja necessária, tais como, aço carbono, plástico (PVC) e concreto protendido. No entanto, para a presente simulação foram selecionados tubos de aço carbono, por possuir a maior condutividade térmica entre os materiais previstos, tabela 5.3.

Tabela 5.3. Condutividade térmica dos materiais dos Tubos

Material	Condutividade [W/m. °C]
Aço carbono	45
Concreto	1,8
Plástico (PVC)	0,19

5.5. Controles e Manutenção do Sistema *Earthtube*

É indispensável que o sistema tenha um by-pass para quando a temperatura externa estiver na faixa de temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionado. Também é necessário um controle das aberturas da residência (janelas, portas...) para uma eficiência térmica adequada. Pensando nisso, os tubos enterrados devem ter um controle de abertura das extremidades externas e internas que seja simultâneo para facilitar a eficiência térmica.

O *Earthtube* tem que ser resistente a corrosão, a ruptura por esmagamento, facilitar a drenagem de acúmulo de condensado e ser dotado de filtros que retenham o ingresso de particulado na tubulação. Já os equipamentos de captação de ar poderão ser considerados uma manutenção de longo prazo, sendo que é estipulada usualmente uma vida útil 10 a 15 anos.

O risco de geração de condensado no interior da tubulação deve ser considerado como crítico, já que a existência de umidade não controlada pode causar o surgimento de fungos e odores desagradáveis. Com isso, o clima, a profundidade e a velocidade do fluxo têm uma forte incidência nos riscos de geração de um alto grau umidade e até surgimento de condensado no interior dos tubos.

Analisando os cuidados anteriores, a limpeza deverá ser feita em períodos de baixa umidade e temperaturas elevadas. Evidenciando dessa forma, as condições meteorológicas para favorecer uma boa secagem. Para isso, a utilização de água com soluções desinfetantes, ou de produtos específicos só é possível se existir um sistema de drenagem que permita a evacuação para evitar a acumulação de condensado.

5.6. *ZoneEarthtube* e *CalcSoilSurfTemp*

Conforme descrito no manual *Input Output Reference, EnergyPlus, 2010*, para modelar o sistema de tubos enterrados (*Earthtube*) o programa *EnergyPlus* assume as seguintes hipóteses:

- Fluxo de convecção no interior do tubo é hidrodinâmica e termicamente desenvolvido.
- A temperatura do solo ao redor do tubo é uniforme após uma determinada distância do centro do tubo.
- A temperatura da superfície do tubo é uniforme na direção axial.
- O solo ao redor do tubo tem uma condutividade térmica homogênea.
- O tubo tem 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 médio horário de todo o ano.
- O coeficiente de transferência de calor por convecção na superfície do solo, h_s , ($W/m^2°C$), é função da velocidade do vento u .

O *EnergyPlus* aplica a equação (5.1) para determinar a taxa de fluxo de ar no interior do sistema de tubos enterrados.

$$EARTH TUBE = (E_{design})(F_{schedule})[A + B|T_{zone} - T_{odb}| + C(WindSpd) + D(WindSpd^2)] \quad (5.1)$$

- E_{design} : vazão de ar projetada para o tubo em $[m^3/s]$.
- $F_{schedule}$: altera a taxa de fluxo de ar de acordo com a agenda utilizada para o sistema de *Earthtube*.
- A: constante adimensional térmica do solo que não se altera pelos efeitos ambientais.

- B : diferença entre as temperaturas de bulbo seco do ar do ambiente interno e do ar externo e tem por unidade [$^{\circ}\text{C}^{-1}$].
- O termo $|T_{zone} - T_{odb}|$: diferença entre a temperatura de ar da zona e da temperatura do ar externo e tem por unidade [$^{\circ}\text{C}$].
- C [s/m] e D [s^2/m^2]: constantes que modificam o efeito da velocidade do vento externo ($WindSpd$) e tem por unidade [m/s].

O *CalcSoilSurfTemp* é um programa junto ao *EnergyPlus*, o qual utiliza o arquivo de dados climáticos e dois parâmetros de entrada necessário para definir o tipo de solo onde será inserido o sistema de tubos enterrados. Esses dados são separados em dois grupos, conforme indicado na tabela 5.4. O programa gera os dados da amplitude de temperatura da superfície do solo, a temperatura média da superfície do solo e a constante de fase de temperatura da superfície do solo (tempo decorrido desde o início do ano até que a temperatura da superfície do solo alcance a temperatura mínima do ano).

Tabela 5.4: Tipos de solos e suas coberturas

Tipos de solo	Pesado e saturado
	Pesado e úmido
	Pesado e seco
	Leve e seco
Tipos de cobertura do solo	Descoberto e molhado
	Descoberto e úmido
	Descoberto e muito seco
	Descoberto e seco
	Coberto e molhado
	Coberto e úmido
	Coberto e muito seco
	Coberto e seco

Conforme o manual *Input Output Reference, EnergyPlus, 2010*, o *CalcSoilSurfTemp* faz os cálculos utilizando a equação (5.2):

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_s f b (1 - r_a)] \quad (5.2)$$

$$h_s = 5.7 + 3.8u \quad (5.3)$$

$$h_e = h_s (1 + 0.0168 a f) \quad (5.4)$$

$$h_r = h_s (1 + 0.0168 a r_a f). \quad (5.5)$$

Onde T_m é a temperatura média na superfície do solo, h_s é o coeficiente de convecção na superfície do solo (5.3), [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], h_e e h_r são coeficiente de convecção, [$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$], achados através das equações (5.4) e (5.4), T_{ma} é a temperatura média do ar, [$^{\circ}\text{C}$], ε é a emitância hemisférica da superfície da terra (0.93~0.96), ΔR é a constante de radiação, [W/m^2], β é o coeficiente de absorção do solo, S_m a radiação solar média, [W/m^2], f é a fração da taxa de evaporação, b é uma constante, r_a é umidade relativa, $a = 103[\text{P}_a/^{\circ}\text{C}]$.

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\theta_l}}{h_e + \delta k_s} \right\| \quad (5.6)$$

$$t_0 = t_{0a} + \frac{\phi_s}{w}. \quad (5.7)$$

Onde A_s (5.6) é a constante de face da superfície do solo, T_{va} é a amplitude da temperatura do ar, [°C], Sv é a amplitude da radiação solar, [W/m²], ϕ_I é o ângulo de fase entre a insolação e a temperatura, [rad], ks é a condutividade térmica do solo, [W/m°C], t_{0a} (5.7) é a constante de fase do ar, w é a frequência angular anual, [rad/s] e ϕ_s é o ângulo de fase da diferença de temperatura do ar é da superfície do solo, [rad].

Com T_m , A_s e t_0 obtidos, devem ser inseridos no *ZoneEarthTube* junto com o nome da zona que será analisada, a vazão de projeto, o tipo de tubo enterrado, a pressão usada pelo ventilador, [Pa], a eficiência do ventilador, o raio do tubo, [m], a espessura do tubo, [m], o comprimento do tubo, [m], a condutividade térmica do tubo, [W/m°C], a profundidade do tubo a partir de sua linha de centro, [m], e as condições do solo conforme a tabela 5.4.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Finalizada a simulação, são apresentados os resultados obtidos no *EnergyPlus*. Vale salientar que, foram fixados os parâmetros: tipo solo, profundidade e material para reduzir o número de simulações e por limitações geradas pelo programa.

Escolheu-se avaliar os resultados de temperatura operativa, variando vazão (número de trocas do volume de um ambiente por hora), comprimento e diâmetro. O objetivo é aplicar o gráfico da figura 5.2, onde é possível definir a faixa de temperatura operativa aceitável para ambientes internos naturalmente condicionados e avaliar as horas de desconforto geradas pelo frio e pelo calor.

6.1. Ventilação da residência sem o sistema *Earthtube*

A ventilação direta foi otimizada para ter um melhor rendimento durante as estações de inverno e verão. As trocas máximas ocorrerão durante o período da noite no verão e no período do dia durante o inverno. Com isso, diminui o risco de aquecer a casa no verão ou de resfriar no inverno.

Na tabela 6.1 são apresentados os resultados da simulação sem o sistema de tubos enterrados. As análises foram realizadas para duas, cinco e dez trocas do volume do ambiente por hora. Os dados finais obtidos são em base às temperaturas operativas de cada ambiente interno simulado. A tabela fornece os somatórios das horas de desconforto pelo frio e os somatórios das horas de desconforto pelo calor, ou seja, a quantidades de horas no ano em que a temperatura fica fora da faixa de temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionado.

Tabela 6.1 Simulação - Somente ventilação direta

	Trocas	SALA		COZINHA		QUARTO DOS FILHOS		QUARTO DO CASAL	
		HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	HORAS FRIAS	HORAS QUENTES
Simulação 01	2 TROCAS	1719	554	1470	619	1687	609	1804	463
Simulação 02	5 TROCAS	1785	368	1573	381	1723	428	1846	330
Simulação 03	10 TROCAS	1867	265	1664	253	1782	301	1887	243
		TOTAL DE HORAS		TOTAL DE HORAS		TOTAL DE HORAS		TOTAL DE HORAS	
Simulação 01	2 TROCAS	2273		2089		2296		2267	
Simulação 02	5 TROCAS	2152		1954		2151		2176	
Simulação 03	10 TROCAS	2132		1917		2083		2130	

Pode-se observar nos gráficos das figuras 6.1, 6.2 e 6.3 o comportamento das horas de desconforto geradas pelo frio e pelo calor para ventilação direta para a sala, cozinha e quarto de casal. Foi considerado um período de um ano, considerando dez trocas de volume do ambiente interno por hora.

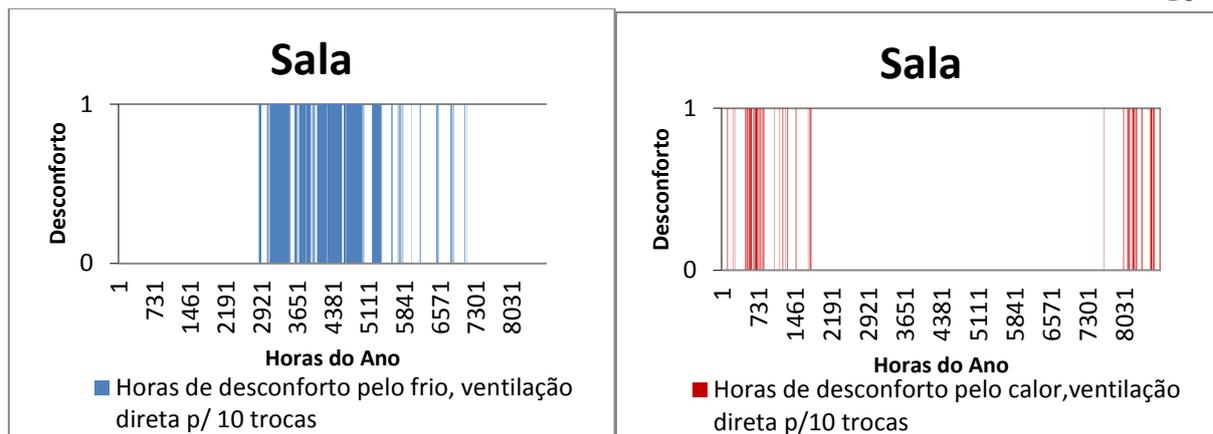


Figura 6.1: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, somente ventilação direta para a sala.

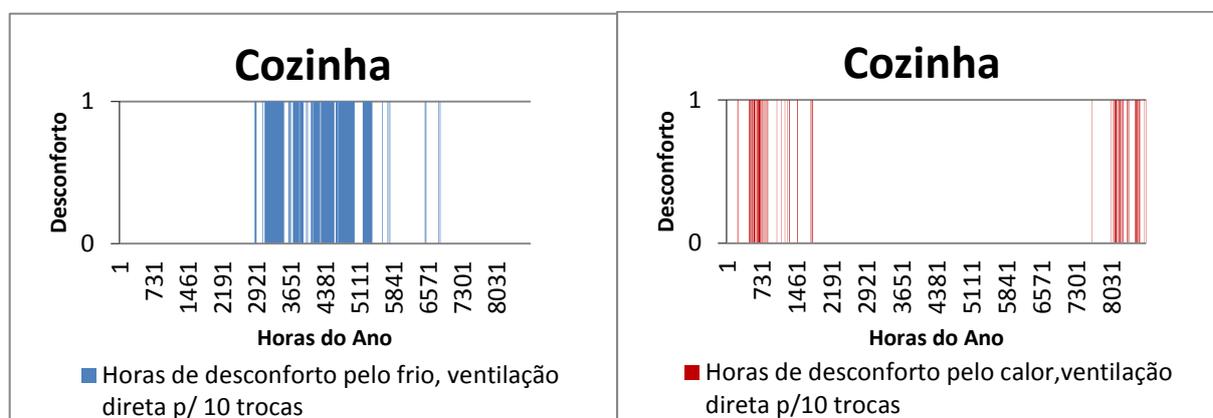


Figura 6.2: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, somente ventilação direta para a cozinha.

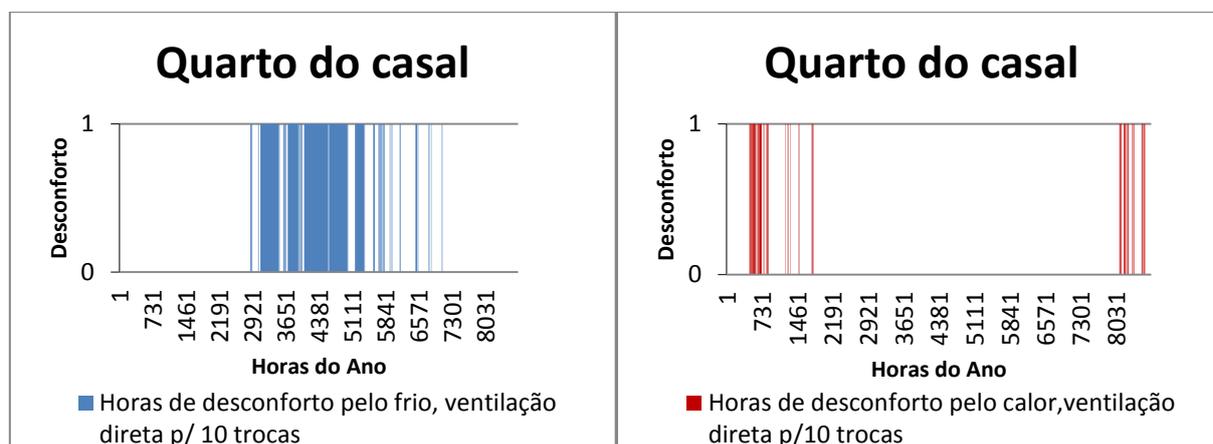


Figura 6.3: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, somente ventilação direta para o quarto do casal.

Analisando-se a tabela 6.1 e os gráficos das figuras 6.1, 6.2 e 6.3, observa-se que existe maior desconforto gerado pelo frio nos ambientes internos analisados, evidenciado pelas quantidades de horas frias frente às horas quentes. É possível observar a diminuição de total de horas de desconforto fazendo variar o número de trocas do volume do ambiente por hora. Os gráficos do comportamento das horas de desconforto do quarto dos filhos com ventilação direta encontra-se no apêndice B.

6.2. Ventilação da residência com o sistema *Earthtube*

Conforme sugerido por Schulz, E. 2011, o sistema de ventilação por tubos enterrados foi otimizado para aproveitar as inércias térmicas (diárias e das estações) existentes no solo. Foi idealizado para que os tubos enterrados trabalhem em conjunto com a ventilação direta, conforme figura 6.4. No verão, os tubos enterrados funcionam no período do dia para resfriar o ar e no período da noite funcionará a ventilação direta. Já no inverno os tubos enterrados serão ligados no período do dia em conjunto com a ventilação direta para aquecer a residência, salientando que, a ventilação direta é desligada quando a temperatura do ar externo for inferior a 17,5°C, conforme gráfico da figura 5.2.

Na tabela 6.2 são observados os resultados da simulação da combinação do sistema de tubos enterrados e ventilação direta. Estas análises foram realizadas variando a vazão, comprimento e diâmetro dos tubos. Como foram usados tubos com medidas comerciais, a espessura ficou dependente do diâmetro dos mesmos.

Tabela 6.2: Resultados da sala.

	TROCAS	PROFUNDIDADE. [m ²]	COMPRI- MENTO. [m ²]	DIÂMETRO. [mm]	VAZÃO [L/s]	SALA		
						HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	Total
SIMULAÇÃO 01	2	4	15	52,48	50	1498	345	1843
SIMULAÇÃO 02				154,1		1526	360	1886
SIMULAÇÃO 03				303,3		1527	382	1909
SIMULAÇÃO 04			30	52,48		1524	317	1841
SIMULAÇÃO 05				154,1		1524	332	1856
SIMULAÇÃO 06				303,3		1525	351	1876
SIMULAÇÃO 07			45	52,48		1524	309	1833
SIMULAÇÃO 08				154,1		1524	319	1843
SIMULAÇÃO 09				303,3		1524	332	1856
SIMULAÇÃO 10	5	4	15	52,48	125	1578	150	1728
SIMULAÇÃO 11				154,1		1581	181	1762
SIMULAÇÃO 12				303,3		1583	203	1786
SIMULAÇÃO 13			30	52,48		1573	105	1678
SIMULAÇÃO 14				154,1		1577	130	1707
SIMULAÇÃO 15				303,3		1579	157	1736
SIMULAÇÃO 16			45	52,48		1571	97	1668
SIMULAÇÃO 17				154,1		1572	107	1679
SIMULAÇÃO 18				303,3		1577	129	1706
SIMULAÇÃO 19	10	4	15	52,48	250	1614	89	1703
SIMULAÇÃO 20				154,1		1612	115	1727
SIMULAÇÃO 21				303,3		1613	133	1746
SIMULAÇÃO 22			30	52,48		1611	47	1658
SIMULAÇÃO 23				154,1		1614	71	1685
SIMULAÇÃO 24				303,3		1614	85	1699
SIMULAÇÃO 25			45	52,48		1609	34	1643
SIMULAÇÃO 26				154,1		1610	45	1655
SIMULAÇÃO 27				303,3		1612	62	1674

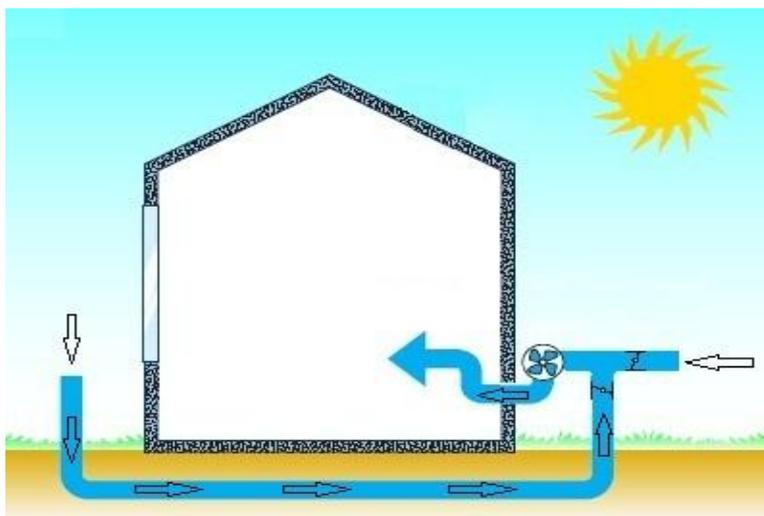


Figura 6.4: Sistema de Tubos Enterrados combinado com Ventilação direta

Os dados finais gerados são em base às temperaturas operativas de cada ambiente interno simulado. Análoga à tabela 6.1 são fornecidos os somatórios das horas de desconforto pelo frio e pelo calor respectivamente, ou seja, a quantidades de horas no ano em que a temperatura fica fora da faixa de temperatura operativa aceitável para espaços naturalmente condicionado.

Fazendo uma análise inicial da tabela 6.2 pode-se observar que um dos problemas com os ambientes internos é o grande número de horas de desconforto térmico pelo frio. A variação do diâmetro e do comprimento dos tubos tem pouca influência sobre o total de horas de desconforto. Observa-se que, o aumento da vazão faz as horas de desconforto pelo calor diminuir drasticamente.

Comparando as tabelas 6.1 e 6.2 verifica-se que o sistema de tubos enterrados ajuda a reduzir as horas de desconforto geradas pelo calor em aproximadamente 46% para uma vazão equivalente a duas trocas, em 74% para uma vazão equivalente a cinco trocas e em 87% para uma vazão equivalente a dez trocas.

Observando-se as simulações cinco e vinte e cinco da tabela 6.2, pode-se definir que, a aplicação de duas trocas do volume do ambiente por hora no inverno e dez trocas para o verão são as ideais para este estudo.

Os resultados das simulações dos demais ambientes internos comportam-se de forma semelhante ao ambiente da sala. As tabelas com os resultados da cozinha, do quarto do casal e do quarto dos filhos encontram-se no apêndice A.

Nas figuras 6.5, 6.6 e 6.7 verifica-se o comportamento das horas de desconforto pelo frio e pelo calor para a combinação do sistema de tubos enterrados e ventilação direta. Foi considerado um período de um ano, considerando uma vazão equivalente de dez trocas de volume do ambiente interno por hora, comprimento do tubo em 45m e diâmetro em 52,48mm.

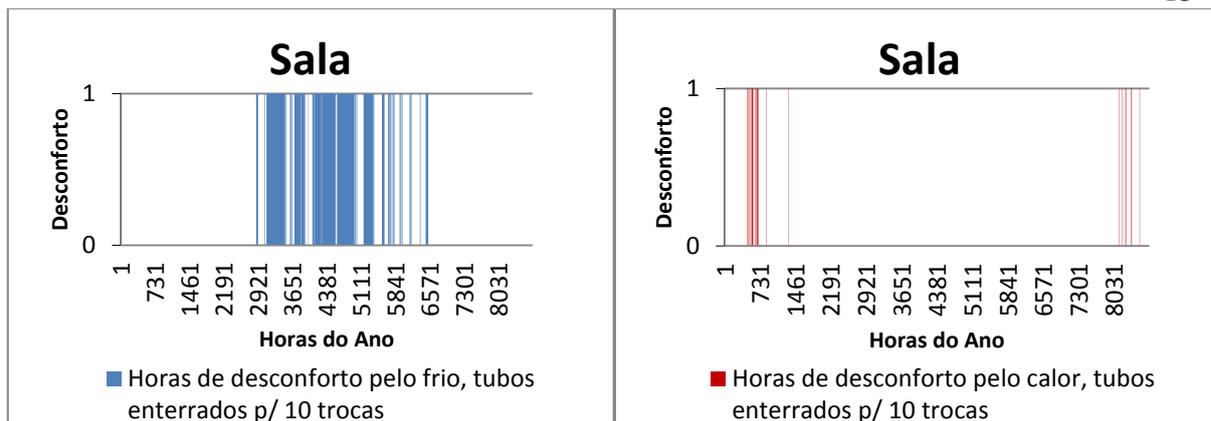


Figura 6.5: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, utilizando o sistema de tubos enterrados para a sala.

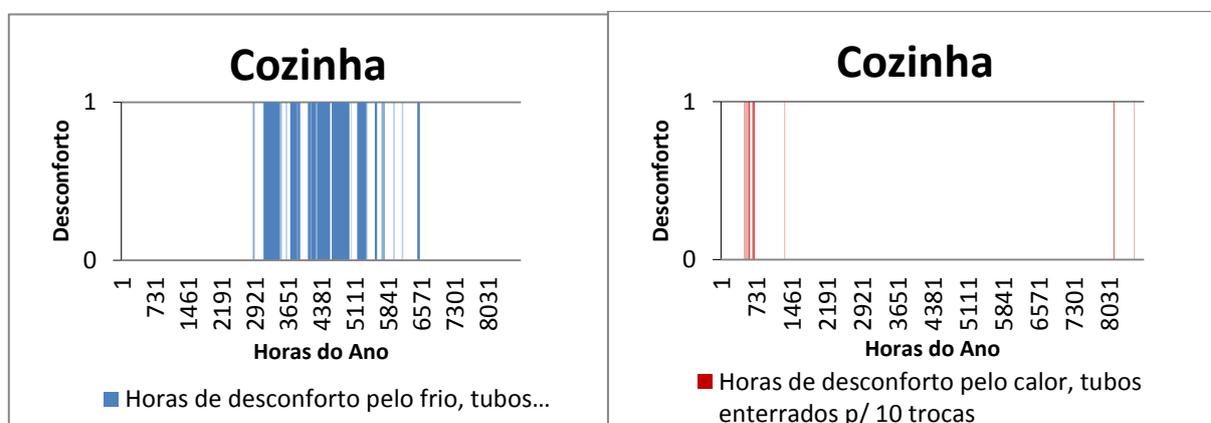


Figura 6.6: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, utilizando o sistema de tubos enterrados para a cozinha.

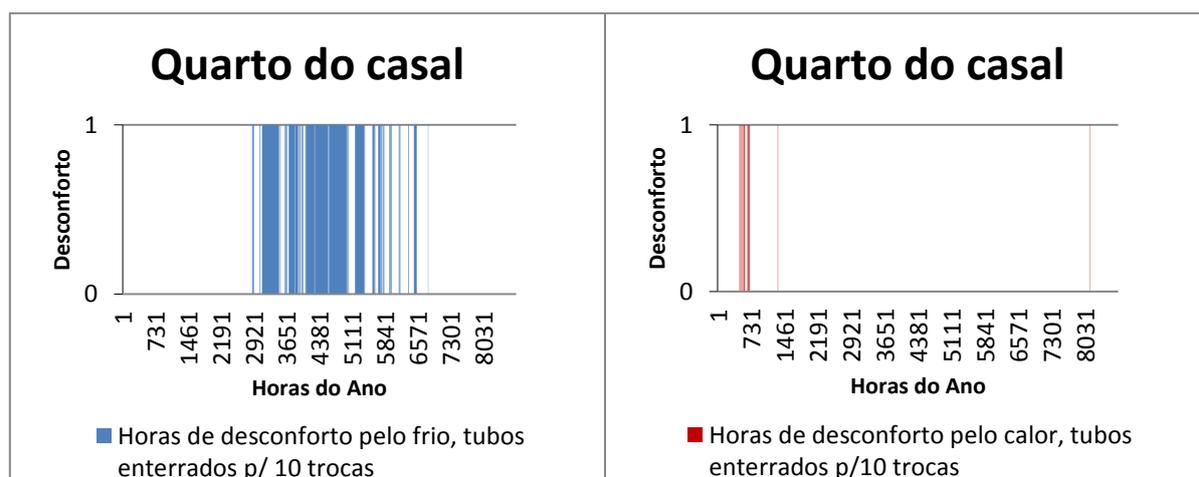


Figura 6.7: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, utilizando o sistema de tubos enterrados para o quarto do casal.

Comparando-se os gráficos da ventilação direta (figuras 6.1, 6.2 e 6.3) e os gráficos com a combinação de tubos enterrados e ventilação direta (figuras 6.5, 6.6 e 6.7), pode-se ver

facilmente a diminuição das horas de desconforto pelo calor. A redução das horas de desconforto pelo frio foi aproximadamente 9%, não sendo facilmente perceptível nos gráficos.

Os gráficos do comportamento das horas de desconforto do quarto dos filhos com a combinação do sistema de tubos enterrados e ventilação direta encontra-se no apêndice B.

7. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram um desempenho razoável na ventilação da residência com a utilização do sistema de tubos enterrados frente ao uso somente de ventilação direta. Para o melhor cenário existiu uma redução de 21% das horas totais de desconforto. Contudo, é possível utilizar este sistema associado com outros sistemas de climatização para obter economia no consumo de energia.

Obteve-se maior eficiência quando sua aplicação foi direcionada para o resfriamento da residência, pois o número de horas de desconforto pelo calor pode ser reduzido em até 87%, o que proporcionaria uma economia considerável de energia com outros sistemas de resfriamento.

Para reduzir o número de horas de desconforto geradas pelo frio, o sistema não apresentou resultados significativos, visto que no melhor dos cenários, houve redução de apenas 9%. Contudo, este resultado não representa com eficiência o ganho térmico da residência em temperaturas muito baixas, visto que este valor representa apenas as horas cuja temperatura passou a exceder 17,5°C (o limite inferior da faixa de temperatura operativa aceitável para o espaço naturalmente condicionado). Nas situações onde a temperatura externa é muito baixa, a temperatura do solo se mantém bastante constante próxima do limite supracitado, possibilitando que o sistema aqueça o ambiente não o suficiente para que este esteja de acordo com norma *ANSI/ASHRAE 55, 2004*, mas o suficiente para economia de energia com outros sistemas de aquecimento.

A implementação de um rotina controle poderia otimizar o funcionamento do sistema, pois alguns fatores sendo alterados (de acordo com a condição climática de um determinado período) podem proporcionar resultados mais convenientes.

Pensando em futuros trabalhos com sistemas de tubos enterrados, pode-se sugerir a simulação com tubos aletados, e/ou a otimização do ganho de calor por radiação nas janelas (situações que sugerem trocas de calor mais eficientes).

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE – American National Standards Institute/American Society Of Heating, Refrigerating And Air-Conditioning Engineers. **ANSI/ASHRAE 55-2004**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2004.

EnergyPlus. **Engineering Reference – The Reference to EnergyPlus Calculations**, Version 6.0, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2010.

EnergyPlus. **Input and Output Reference – The Encyclopedic Reference to EnergyPlus Input and Output**, Version 6.0, The Board of Trustees of the University of Illinois and the Regent of the University of California through the Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 2010

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico: Arquitetura, Urbanismo**. São Paulo: Nobel, 1988.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acessado em: 20 de setembro de 2011.

LAMBERTS, R.; Pereira, C. D.; Ghisi, E.; Batista, J. O. **Casa eficiente: Simulação Computacional do Desempenho Termo Energética** - Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010.

MUSSKOPF, D. B. **Estudos Exploratórios sobre Ventilação Natural por Tubos Enterrados**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2006.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. B.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia – Fundamentos e Aplicações Práticas**. Livraria e Editora Agropecuária, 2002. 478 p.

SCHULZ, E. **Eficiência no uso de Tubos Enterrados para Ventilação de Residências**. 2011. 19f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

SCHÖFFEL, E.R.; MENDES, M.E.G. **Influência da cobertura sobre o perfil vertical de temperatura do solo**. XIV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – Piracicaba. São Paulo, 2005.

APÊNDICE A – Resultados da combinação com tubos enterrados e ventilação direta.

Tabela A-1: Resultados da simulação para a cozinha.

	TROCAS	PROFUNDIDADE. [m ²]	COMPRI- MENTO. [m ²]	DIÂMETRO. [mm]	VAZÃO [L/s]	COZINHA		
						HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	TOTAL
SIMULAÇÃO 01	2	4	15	52,48	22	1265	380	1645
SIMULAÇÃO 02				154,1		1326	396	1722
SIMULAÇÃO 03				303,3		1328	429	1757
SIMULAÇÃO 04			30	52,48		1320	354	1674
SIMULAÇÃO 05				154,1		1322	362	1684
SIMULAÇÃO 06				303,3		1324	382	1706
SIMULAÇÃO 07			45	52,48		1320	353	1673
SIMULAÇÃO 08				154,1		1320	357	1677
SIMULAÇÃO 09				303,3		1322	366	1688
SIMULAÇÃO 10	5	4	15	52,48	55,6	1373	120	1493
SIMULAÇÃO 11				154,1		1374	152	1526
SIMULAÇÃO 12				303,3		1377	183	1560
SIMULAÇÃO 13			30	52,48		1373	95	1468
SIMULAÇÃO 14				154,1		1373	114	1487
SIMULAÇÃO 15				303,3		1374	130	1504
SIMULAÇÃO 16			45	52,48		1371	97	1468
SIMULAÇÃO 17				154,1		1373	98	1471
SIMULAÇÃO 18				303,3		1373	114	1487
SIMULAÇÃO 19	10	4	15	52,48	111	1432	54	1486
SIMULAÇÃO 20				154,1		1434	81	1515
SIMULAÇÃO 21				303,3		1435	102	1537
SIMULAÇÃO 22			30	52,48		1427	26	1453
SIMULAÇÃO 23				154,1		1431	37	1468
SIMULAÇÃO 24				303,3		1433	60	1493
SIMULAÇÃO 25			45	52,48		1424	18	1442
SIMULAÇÃO 26				154,1		1428	27	1455
SIMULAÇÃO 27				303,3		1430	35	1465

Tabela A-2: Resultados da simulação para o Quarto dos filhos.

	TROCAS	PROFUNDIDADE. [m ²]	COMPRI- MENTO. [m ²]	DIÂMETRO. [mm]	VAZÃO [L/s]	QUARTO DOS FILHOS		
						HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	TOTAL
SIMULAÇÃO 01	2	4	15	52,48	18,75	1479	380	1859
SIMULAÇÃO 02				154,1		1498	397	1895
SIMULAÇÃO 03				303,3		1499	418	1917
SIMULAÇÃO 04			30	52,48		1495	359	1854
SIMULAÇÃO 05				154,1		1496	367	1863
SIMULAÇÃO 06				303,3		1497	387	1884
SIMULAÇÃO 07			45	52,48		1494	359	1853
SIMULAÇÃO 08				154,1		1495	360	1855
SIMULAÇÃO 09				303,3		1496	372	1868
SIMULAÇÃO 10	5	4	15	52,48	46,88	1521	161	1682
SIMULAÇÃO 11				154,1		1523	197	1720
SIMULAÇÃO 12				303,3		1525	228	1753
SIMULAÇÃO 13			30	52,48		1520	133	1653
SIMULAÇÃO 14				154,1		1522	156	1678
SIMULAÇÃO 15				303,3		1522	183	1705
SIMULAÇÃO 16			45	52,48		1518	97	1615
SIMULAÇÃO 17				154,1		1519	134	1653
SIMULAÇÃO 18				303,3		1522	156	1678
SIMULAÇÃO 19	10	4	15	52,48	93,75	1555	71	1626
SIMULAÇÃO 20				154,1		1557	101	1658
SIMULAÇÃO 21				303,3		1557	128	1685
SIMULAÇÃO 22			30	52,48		1551	42	1593
SIMULAÇÃO 23				154,1		1553	55	1608
SIMULAÇÃO 24				303,3		1555	76	1631
SIMULAÇÃO 25			45	52,48		1549	33	1582
SIMULAÇÃO 26				154,1		1551	43	1594
SIMULAÇÃO 27				303,3		1553	52	1605

Tabela A-3: Resultados da simulação para o Quarto do casal.

	TROCAS	PROFUNDIDADE. [m ²]	COMPRI- MENTO. [m ²]	DIÂMETRO. [mm]	VAZÃO [L/s]	QUARTO DO CASAL		
						HORAS FRIAS	HORAS QUENTES	Total
SIMULAÇÃO 01	2	4	15	52,48	30,6	1608	265	1873
SIMULAÇÃO 02				154,1		1625	292	1917
SIMULAÇÃO 03				303,3		1625	310	1935
SIMULAÇÃO 04			30	52,48		1625	247	1872
SIMULAÇÃO 05				154,1		1625	258	1883
SIMULAÇÃO 06				303,3		1625	276	1901
SIMULAÇÃO 07			45	52,48		1624	246	1870
SIMULAÇÃO 08				154,1		1625	248	1873
SIMULAÇÃO 09				303,3		1625	262	1887
SIMULAÇÃO 10	5	4	15	52,48	76,4	1655	126	1781
SIMULAÇÃO 11				154,1		1657	158	1815
SIMULAÇÃO 12				303,3		1658	185	1843
SIMULAÇÃO 13			30	52,48		1655	95	1750
SIMULAÇÃO 14				154,1		1655	116	1771
SIMULAÇÃO 15				303,3		1656	136	1792
SIMULAÇÃO 16			45	52,48		1652	97	1749
SIMULAÇÃO 17				154,1		1653	97	1750
SIMULAÇÃO 18				303,3		1655	113	1768
SIMULAÇÃO 19	10	4	15	52,48	153	1679	69	1748
SIMULAÇÃO 20				154,1		1681	99	1780
SIMULAÇÃO 21				303,3		1682	121	1803
SIMULAÇÃO 22			30	52,48		1678	38	1716
SIMULAÇÃO 23				154,1		1679	50	1729
SIMULAÇÃO 24				303,3		1680	69	1749
SIMULAÇÃO 25			45	52,48		1677	27	1704
SIMULAÇÃO 26				154,1		1679	38	1717
SIMULAÇÃO 27				303,3		1679	47	1726

APÊNDICE B – Gráficos Horas de desconforto do quarto dos filhos

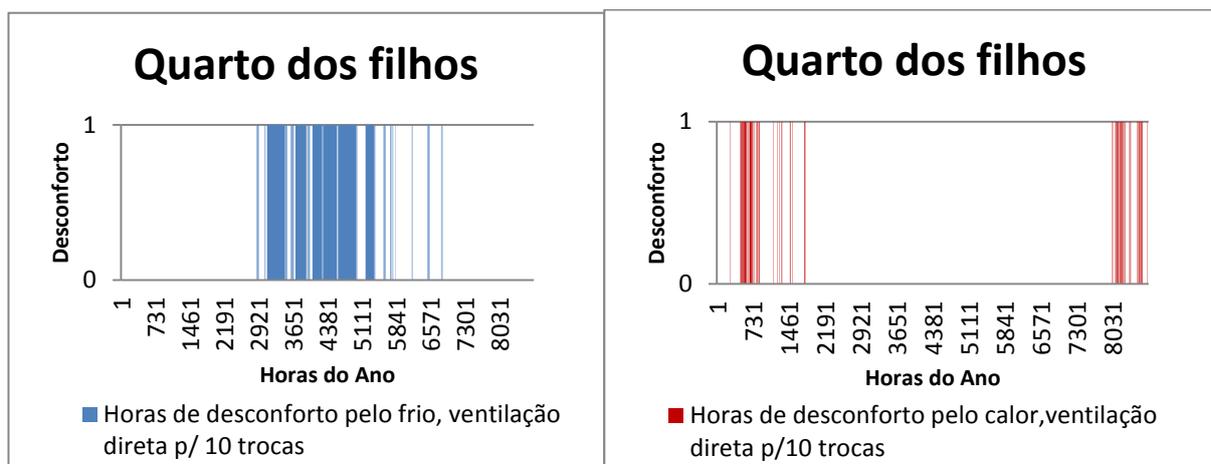


Figura B.1: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, ventilação direta p/ o quarto dos filhos.

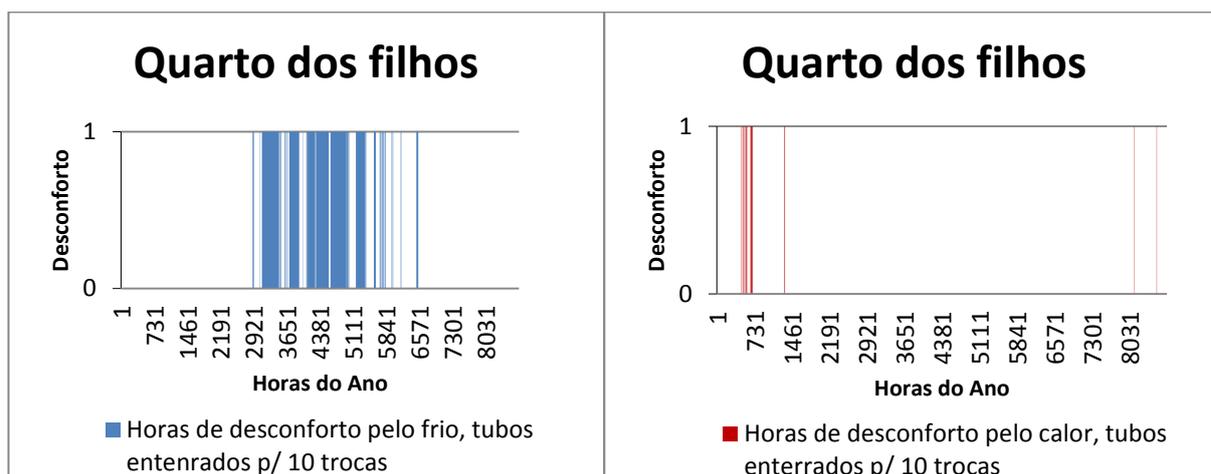


Figura B.2: Horas de desconforto pelo frio e pelo calor, tubos enterrados p/ o quarto dos filhos.