

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

EFICIÊNCIA NO USO DE TUBOS ENTERRADOS PARA VENTILAÇÃO DE RESIDÊNCIAS

por

Eduardo Schulz

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, junho de 2011



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

EFICIÊNCIA NO USO DE TUBOS ENTERRADOS PARA VENTILAÇÃO DE RESIDÊNCIAS
por

Eduardo Schulz

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. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Bodmann

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 17 de junho de 2011.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Roberto e Carla, pela educação, apoio e incentivo.

Aos meus irmãos, André e Marcos, pela amizade e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, pela atenção, tempo e conhecimento transmitido.

Aos meus colegas, Haas, Carioca, Ninja e Tiago, pela ajuda e diversão durante a faculdade.

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.

RESUMO

O uso de tubos enterrados para ventilação de residências possui resultados vantajosos quando instalados corretamente. Diversos parâmetros afetam seu funcionamento, desde o tipo de solo até o comprimento dos tubos, e cada um foi investigado individualmente no presente trabalho através de simulações computacionais no programa *EnergyPlus*. Uma residência foi usada como base para analisar os efeitos da variação dos parâmetros envolvidos na instalação desse sistema. Os resultados mostraram como a temperatura interna da residência é amortecida devido às temperaturas mais constantes do solo. Seu uso para aquecimento apresentou resultados positivos, e em estações quentes os tubos enterrados podem ajudar a amenizar picos de temperatura.

PALAVRAS-CHAVE: Ventilação, Tubos Enterrados, *EnergyPlus*.

SCHULZ, E. **Efficiency in the use of Buried Pipes to Ventilation of Residences**. 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.

ABSTRACT

The use of buried pipes for ventilation of residences has advantageous results when installed correctly. Several parameters affect its operation since the type of soil up to the length of the tubes, and each one was individually investigated in present work through computational simulations in the EnergyPlus program. A residence was used as a basis for analyzing the effects of variation of parameters involved in the installation of this system. The results showed how the internal temperature of residence is dampened due to constant soil temperatures. Its use for heating has positive results and for hot seasons the buried pipes can help alleviate peak temperatures.

KEYWORDS: Ventilation, Buried Pipes, EnergyPlus.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
2.1. VENTILAÇÃO	1
2.2. TUBOS ENTERRADOS.....	1
2.3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL	2
2.3.1 Metodologia Utilizada pelo <i>EnergyPlus</i>.....	2
2.3.2 Tubos Enterrados no <i>EnergyPlus</i>.....	2
3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	4
3.1. RESIDÊNCIA MODELO	4
3.2. CLIMA.....	6
3.3. MÉTODOS DE VENTILAÇÃO	6
4. ANÁLISES E RESULTADOS	6
4.1. TEMPERATURA DO SOLO.....	6
4.2. TIPO DE SOLO.....	7
4.3. COMPRIMENTO DO TUBO	8
4.4. ESPESSURA DO TUBO	8
4.5. RAIO DO TUBO	9
4.6. MATERIAL DO TUBO.....	10
4.7. SIMULAÇÃO DA RESIDÊNCIA	10
4.7.1 Residência Base x Tubos Enterrados	11
5. CONCLUSÕES.....	13
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE A	16

1. INTRODUÇÃO

A ventilação passiva busca métodos de climatizar um ambiente sem o uso de outras fontes ou condicionadores de ar. Um dos meios de se ventilar um ambiente de forma passiva é através de tubos enterrados, que funcionam basicamente como um trocador de calor natural. Longos canos são enterrados a certas profundidades no solo, e ao fazer o ar exterior mais quente passar no interior dos tubos, proporciona-se uma transferência do calor do ar para o solo, esse a uma temperatura mais baixa. Ao entrar no ambiente, o ar terá perdido parte do seu calor e ajudará na ventilação. O mesmo caminho é feito em estações frias, onde o solo é que transfere seu calor para o ar mais frio.

O uso de tubos enterrados já está bastante difundido na América do Norte e em alguns países da Europa, onde estudos práticos já foram realizados, coleta de dados para pesquisas, fabricantes se especializando e até incentivos fiscais para quem busca meios mais sustentáveis. Porém, seu uso no Brasil ainda é raro e pouco conhecido. Sabe-se que o solo possui uma temperatura defasada em relação ao ar, podendo estar mais frio em dias quentes e mais aquecido em dias frios. Utilizando-se desse conhecimento, vários foram os estudos realizados para investigar o uso de tubos enterrados para ventilação de interiores. Horbach, 2010, apresentou caminhos, juntamente com outros autores, para simular uma melhoria na eficiência desse sistema.

O presente trabalho dará continuidade a esses conhecimentos através de simulações computacionais utilizando o programa *EnergyPlus*, ferramenta muito útil, vastamente usada no mundo inteiro para analisar a climatização de ambientes.

Um dos objetivos aqui propostos é verificar, através de simulações, quais parâmetros do sistema de ventilação por tubos enterrados exercem maior ganho - ou nem tanto - para a eficiência dessa configuração. Através dos resultados de temperatura interna em uma residência simulada em Porto Alegre, espera-se dar continuidade a trabalhos anteriores, colaborando para futuras simulações ou mesmo em aplicações de tubos enterrados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. VENTILAÇÃO

Ventilação é a introdução intencional de ar exterior em uma edificação, ela é subdividida em ventilação natural e mecânica. Ventilação natural é o fluxo de ar através de janelas abertas, portas, grades e outros modos planejados de penetração de ar, e é orientado por diferença de pressão produzida de forma natural e/ou artificial. Ventilação mecânica (ou forçada) é o movimento intencional do ar para dentro ou fora de uma edificação usando ventiladores e entradas e saídas de ar (ASHRAE, 2009).

A ventilação auxilia na renovação de oxigênio, remoção de possíveis odores, e, até certo ponto, na amenização da temperatura em regiões de clima quente e úmido (Frota e Schiffer, 1988).

2.2. TUBOS ENTERRADOS

Um tubo enterrado é um longo cano subterrâneo de metal ou plástico no qual o ar passa no seu interior. Durante a temporada de refrigeração, na medida em que o ar passa dentro do tubo, ele perde seu calor para o solo e entra na edificação como ar resfriado. Similarmente, em temporada de aquecimento, na medida em que o ar passa dentro do tubo, o ar frio recebe calor do solo e entra no ambiente como ar aquecido (*Manual EnergyPlus*, 2010).

Esse sistema tem por configuração básica uma entrada de ar, com filtro, em um ponto do pátio e as saídas nos ambientes selecionados da casa para receberem ventilação. Ventiladores localizados nas saídas são usados para forçar o ar nos tubos enterrados. As saídas podem ser fechadas caso o usuário desejar.

Hollmuller et al., 2006, estudaram o potencial de resfriamento utilizando tubos enterrados em clima brasileiro, assim como Musskopf, 2006, mostrou o uso de tubos enterrados para ventilação natural no Protótipo Ventura localizado em Viamão. Ambos os estudos concluíram que o uso de tubos enterrados possui inúmeros parâmetros de funcionamento que devem ser tratados com cuidado em uma instalação desse sistema.

2.3. FERRAMENTA COMPUTACIONAL

O estudo da melhoria de eficiência para uso de tubos enterrados em ventilação de residências é avaliado usando um programa de simulação computacional. Esse programa trabalha com dados de entrada fornecidos pelo usuário e fornece dados de saída na forma de valores simulados. Os programas utilizados foram: *Google SketchUp*, que possibilita criar modelos em três dimensões de ambientes, *OpenStudio*, que opera juntamente ao *Google SketchUp* e fornece dados de entrada para o *EnergyPlus*, que, por sua vez, é um programa que simula a carga térmica e faz análises energéticas de um prédio. Ele é responsável por fazer a simulação computacional pretendida.

Lee e Strand, 2006, utilizaram-se do programa *EnergyPlus* para simular ventilação por tubos enterrados e validar o método numérico empregado pelo programa ao comparar com estudos teóricos e experimentais previamente realizados, além de verificar os parâmetros do uso de tubos enterrados. Concluíram que o programa pode ser utilizado para prever o desempenho térmico do sistema de tubos enterrados.

2.3.1 Metodologia Utilizada pelo *EnergyPlus*

De acordo com o Manual do *Energyplus*, 2010, o programa assume as seguintes hipóteses para o balanço de energia: temperatura uniforme das superfícies, radiação de onda curta e onda longa uniformes, troca de radiação entre as superfícies, condução no interior do elemento e temperatura uniforme nas zonas térmicas. As três etapas do procedimento do balanço de energia feito pelo programa são calculadas na ordem: superfícies externas, superfícies internas e o ambiente de ar interno de cada zona.

2.3.2 Tubos Enterrados no *EnergyPlus*

Conforme o Manual do *EnergyPlus*, 2010, o programa modela tubos enterrados através de um complexo sistema de troca de calor no solo para estabelecer a temperatura na profundidade do tubo. São usados como dados de entrada para esse procedimento: raio do tubo, espessura do tubo, comprimento do tubo, distância entre a parte externa do tubo e o solo não perturbado, a condutividade térmica do tubo, a velocidade do ar dentro do tubo, a profundidade do centro do tubo, a densidade do solo, calor específico do solo, a condutividade térmica do solo, o coeficiente de absorvidade do solo e a taxa da fração de evaporação do solo.

Nem todos esses dados precisam ser entrados pelo usuário, já que o programa usa o arquivo de dados climáticos da cidade usada na simulação para obtê-los. No presente estudo, esses valores foram retirados do sítio eletrônico do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE), ligado à Universidade Federal de Santa Catarina.

Outros valores são inseridos utilizando um programa auxiliar encontrado dentro do próprio *EnergyPlus* chamado *CalcSoilSurfTemp*. Como valores de entrada, esse programa utiliza os dados climáticos anuais da cidade cujo solo será avaliado, esses dados também são coletados no arquivo climático da cidade onde ocorre a simulação. Ao iniciar esse programa, deve-se definir em que tipo de solo o tubo será enterrado e qual o tipo de sua cobertura. As possíveis escolhas dadas pelo programa são:

- a) Condições do solo: pesado e saturado, pesado e úmido, pesado e seco, leve e seco.

- b) Condições da superfície 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.

De acordo com a tabela 2.1, adaptada, que possui valores recomendados pelo Manual da ASHRAE de 1991, o programa estima a difusividade térmica do solo α_s , em [m²/s], e a sua condutividade k_s , em [W/m°C], usados na simulação.

Tabela 2.1: Valores da condutividade e difusividade térmica do solo para diversas condições

Condição do solo	k_s (W/m°C)	$\alpha_s \times 10^{-7}$ (m ² /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

A saída dos dados fornecidos resulta em três valores: temperatura média anual da superfície do solo T_m , [°C], amplitude da temperatura da superfície do solo A_s , [°C], tempo em que o solo atinge a sua menor temperatura anual t_o , em dias, partindo do início do ano.

O *EnergyPlus* calcula esses valores utilizando-se do arquivo de dados climáticos da cidade a ser simulada e das seguintes equações:

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0,0168 h_s f b (1 - r_a)] \quad (2.1)$$

$$A_s = \left\| \frac{h_r T_{va} - \beta S_v e^{i\phi_l}}{(h_e + \delta k_s)} \right\| \quad (2.2)$$

$$t_o = t_{oa} + \frac{\phi_s}{w} \quad (2.3)$$

$$h_e = h_s (1 + 0,0168 a f) \quad (2.4)$$

$$h_r = h_s (1 + 0,0168 a r_a f) \quad (2.5)$$

Para encontrar esses parâmetros, onde h_e e h_r , [W/m²°C], são coeficientes de convecção achados através das equações (2.4) e (2.5), h_s é o coeficiente de convecção na superfície do solo, [W/m²°C], T_{ma} é a temperatura média do ar, [°C], ε é a emitância esférica da superfície do solo, ΔR é a constante de radiação, [W/m²], β é o coeficiente de absorção do solo, S_m a radiação solar média, [W/m²], f é a fração da taxa de evaporação, b é uma constante, r_a é a umidade relativa, T_{va} é a amplitude da temperatura do ar, [°C], S_v a amplitude da radiação solar, [W/m²], ϕ_l o ângulo de fase entre a insolação e a temperatura, [rad], k_s é a condutividade térmica do solo, [W/m°C], t_{oa} 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 e da superfície do solo, [rad].

Com os três valores T_m , A_s e t_o calculados, eles precisam ser colocados manualmente como dados de entrada do objeto *ZoneEarthTubes*. Esse objeto define as entradas de dados feitas pelo usuário, bem como algumas constantes modificadoras. Além dos dados descritos acima, o usuário deve fornecer ainda: o nome da zona que receberá a ventilação dos tubos, a agenda de funcionamento dos tubos, a vazão de projeto, o tipo de tubo enterrado, a pressão usada pelo ventilador [N/m²], 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 [m] e a condição do solo.

O *EnergyPlus* utiliza a equação:

$$ETFR = (E_d)(F_s)[A + B|T_z - T_{odb}| + C(Ws) + D(Ws^2)] \quad (2.6)$$

Para determinar a taxa de fluxo de ar dentro do tubo enterrado $ETFR$ em $[m^3/s]$, onde E_d representa a vazão de ar projetada para o tubo em $[m^3/s]$, F_s modifica a taxa de fluxo de ar de acordo com a agenda utilizada para os tubos enterrados, A é uma constante adimensional em todas as condições e que não se altera pelos efeitos ambientais. B é uma constante modificadora da diferença de temperatura da zona e a temperatura de bulbo seco externa e tem por unidade $[^{\circ}C^{-1}]$. O termo $|T_z - T_{odb}|$ indica a diferença de temperatura em $[^{\circ}C]$ da zona e a de bulbo seco externa. C $[s/m]$ e D $[s^2/m^2]$ são constantes que modificam a vazão alterando a velocidade do vento externo (Ws) em $[m/s]$.

Hipóteses assumidas pelo programa ao modelar os tubos enterrados:

- Fluxo de convecção dentro do tubo é hidrodinâmico e termicamente desenvolvido.
- Temperatura do solo é uniforme nas redondezas do tubo após uma distância particular do centro do tubo, assim, a temperatura da superfície do tubo é uniforme na distância de um raio do tubo a partir do centro do mesmo.
- O perfil de temperatura nas proximidades do tubo não é alterado pela presença do tubo, assim a temperatura da superfície do tubo é uniforme na direção axial.
- O solo tem condutividade térmica homogênea nas proximidades do tubo.
- O tubo tem seção transversal uniforme na direção axial.

3. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Para analisar a eficiência dos tubos enterrados, foi proposta uma residência modelo, de arquitetura simples e facilmente achada nas cidades brasileiras. Essa residência foi construída virtualmente (figura 3.1) usando o programa *Google SketchUp*, onde se podem definir as dimensões da planta baixa, a altura do pé direito e o número de portas e janelas externas. Usando o *OpenStudio*, foi possível definir as zonas térmicas e suas condições de contorno para serem usadas nos cálculos do *EnergyPlus*.



Figura 3.1: Residência construída no *Google SketchUp*

3.1. RESIDÊNCIA MODELO

Nesse item são listadas e apresentadas as características da residência modelo proposta, sua planta baixa, medidas dos cômodos analisados e dados de entrada no *EnergyPlus* referentes aos materiais, espessura das paredes, forro e piso.

Na figura 3.2 é mostrada a planta baixa da residência com algumas medidas e os nomes usados para definir cada zona na simulação.

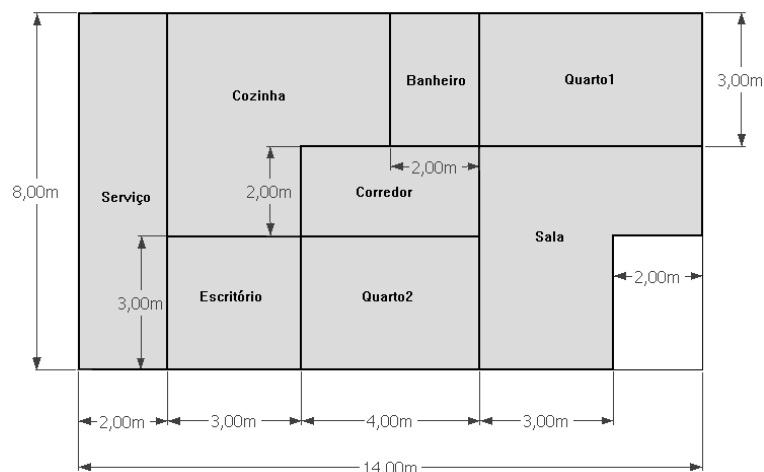


Figura 3.2: Planta baixa da residência

Na tabela 3.1 são mostradas algumas dimensões e detalhamentos das zonas térmicas, que nesse caso são iguais às dimensões dos cômodos da residência. As potências de iluminação e equipamentos estão configuradas de acordo com a NBR 16401-1:2008. A vazão de ar exterior foi calculada com duas trocas do volume do ambiente por hora.

Tabela 3.1: Dados das zonas térmicas

Zona	Área [m ²]	Volume [m ³]	Área de Janelas [m ²]	Iluminação [W/m ²]	Equipamentos [W]	Ocupação [pessoas]	Vazão de Projeto [L/s]
Sala	19,00	49,40	2,85	9,00	210	4	27,44
Quarto 1	15,00	39,00	2,85	9,00	150	2	21,66
Quarto 2	12,00	31,20	1,43	9,00	150	2	17,33
Corredor	8,00	20,80	0,00	9,00			
Cozinha	21,00	15,60	2,37	9,00	780		
Banheiro	6,00	54,60	0,44	9,00			
Escritório	9,00	23,40	1,43	9,00	150	1	13,00
Serviço	16,00	41,60	2,22	9,00			
Sótão	112,00	93,33	0,00	0,00			

Com a residência acabada no *Google SketchUp*, é através de dados de entrada no *EnergyPlus* que são definidos os materiais, constituição e espessuras das paredes externas, paredes internas, janelas, forro e piso. Esses dados são mostrados na tabela 3.2, sendo a camada 1 a mais externa. Os materiais foram escolhidos baseados no banco de materiais da ASHRAE, incluso nos documentos do *EnergyPlus*.

Tabela 3.2: Camadas e espessuras das construções da residência

	Camada 1	Espessura	Camada 2	Espessura	Camada 3	Espessura
Parede Externa	Reboco	20 mm	Tijolo	110 mm	Reboco	20 mm
Parede Interna	Reboco	20 mm	Tijolo	110 mm	Reboco	20 mm
Piso Externo	Terra	400 mm	Concreto	100 mm		
Piso Interno	Madeira	13 mm				
Forro	Madeira	13 mm				
Telhado	Telha	15 mm	Espaço de ar		Madeira	3 mm
Janela	Vidro	3 mm				
Porta	Madeira	25 mm				

3.2. CLIMA

A cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, foi escolhida para a simulação por apresentar condições climáticas favoráveis, de acordo com Hollmuller et al., 2006. A temperatura anual possui uma variação anual conforme mostra a figura 3.3.

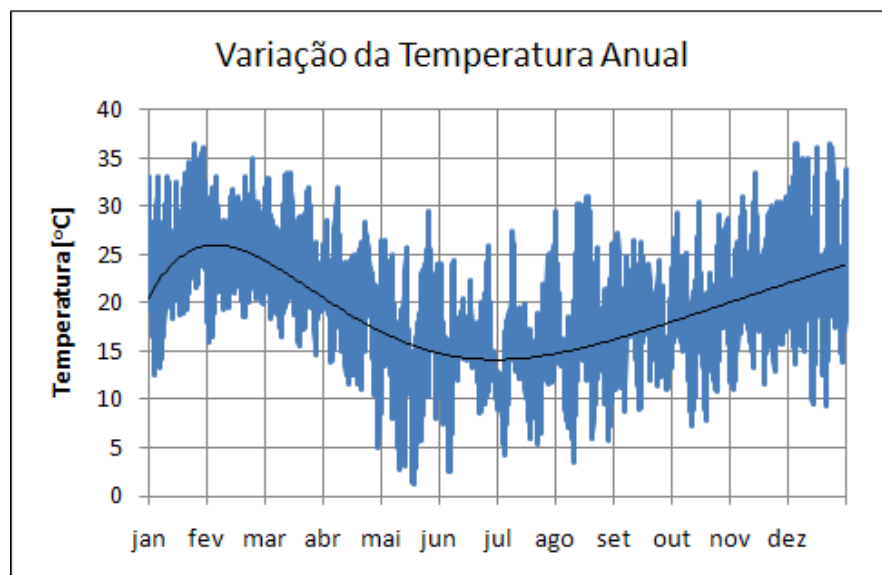


Figura 3.3: Variação da temperatura em Porto Alegre

3.3. MÉTODOS DE VENTILAÇÃO

Para garantir um meio de comparação com os tubos enterrados, é proposto que, quando não se está utilizando da ventilação dos tubos, ela se dê por ventilação forçada, garantindo sempre duas trocas de ar do volume da sala por hora. Assim, a comparação ficará somente baseada na passagem de ar pelos tubos enterrados, diminuindo as possíveis incertezas na comparação de outros parâmetros.

4. ANÁLISES E RESULTADOS

Para avaliar a melhor configuração de instalação dos tubos enterrados, fez-se um estudo individual de cada parâmetro envolvido. Esses estudos foram realizados simulando somente a variação do parâmetro desejado, mantendo-se os demais fixos.

4.1. TEMPERATURA DO SOLO

A temperatura do solo varia conforme a profundidade, isso pode ser visto no gráfico da figura 4.1, que foi montado tendo como base o arquivo de dados climáticos de Porto Alegre. É possível notar pelo gráfico que a temperatura em profundidades menores, como a 0,5 metro, é mais afetada pela temperatura externa, enquanto que, na profundidade de 4 metros, o solo tem uma variação menor ao longo do ano.

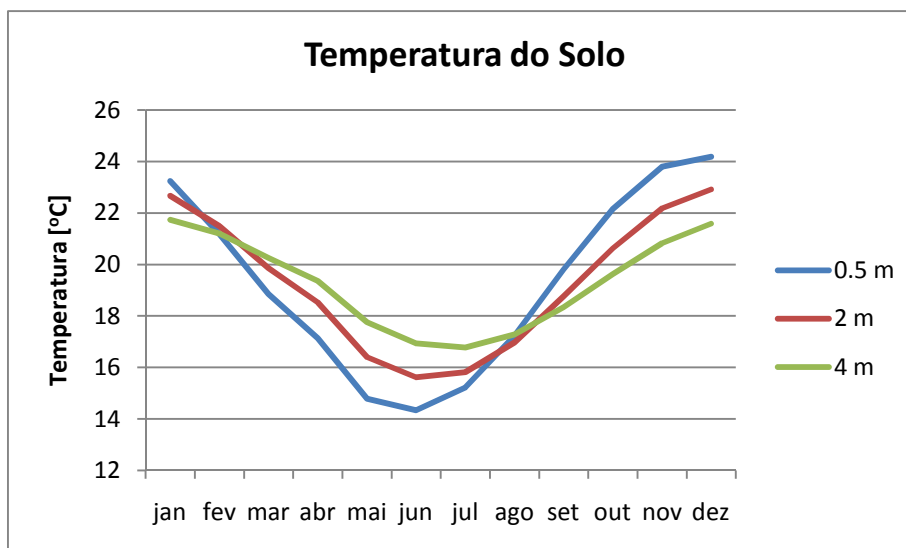


Figura 4.1: Temperatura do solo para diferentes profundidades

4.2. TIPO DE SOLO

O Tipo de solo onde os tubos serão enterrados é muito importante na análise de uma possível instalação desse sistema. Se a residência estiver num local inadequado o uso dos tubos para ventilação pode não ser recomendado. A condutividade térmica do solo e a sua densidade podem ser verificadas na tabela 4.1, traduzida e adaptada do manual da ASHRAE, 2007. É preferível um solo com condutividade térmica alta, como um solo rochoso, mas enterrar os tubos nesse tipo de solo pode se tornar caro e tomar muito tempo da obra.

Tabela 4.1: Propriedades térmicas do solo

Propriedades Térmicas de Solos Selecionados, Rochas, e Rejuntes/Reaterros			
	Densidade seca, kg/m ³	Condutividade, W/(m·K)	Difusividade, x 10 ⁻⁷ m ² /s
Solos			
Terra pesada, 15% água	1925	1.4 a 1.9	4.86 a 7.06
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
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
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
5% água	1285	0.9 a 1.9	6.36 a 11.38
Rochas			
Granito	2650	2.3 a 3.7	9.72 a 15.04
Calcário	2400 a 2800	2.4 a 3.8	9.72 a 15.04
Arenito	2570 a 2730	2.1 a 3.5	75.23 a 12.73

4.3. COMPRIMENTO DO TUBO

O comprimento do tubo influencia na área de troca de calor entre a superfície do tubo e o ar exterior. Os gráficos apresentados nas figuras 4.2 e 4.3 mostram como a temperatura na saída do tubo enterrado varia de acordo com o seu comprimento, em metros. Essa análise foi realizada com base em duas semanas significativas, uma no verão e outra no inverno. Essas simulações foram feitas com os tubos enterrados a 1 metro de profundidade e com diâmetro fixo de 0,5 metro para todos os comprimentos testados.

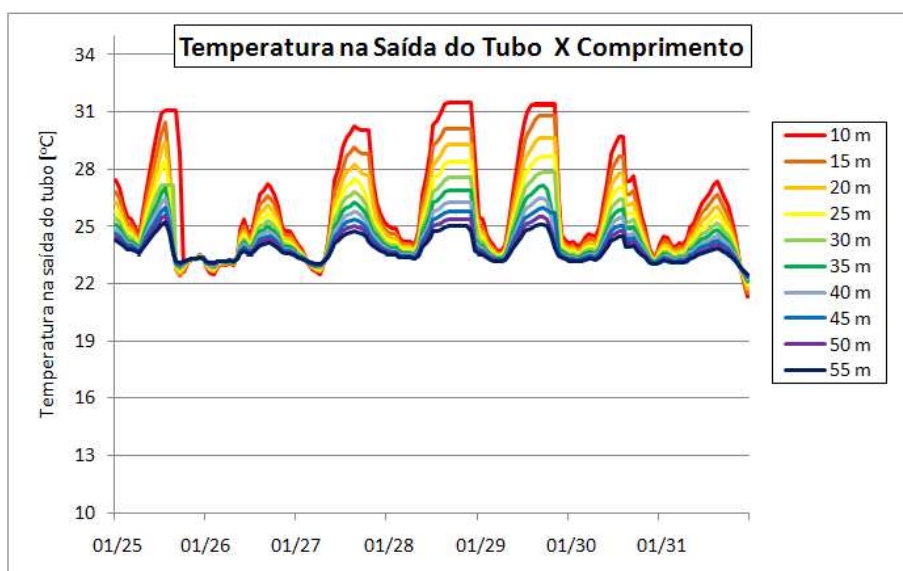


Figura 4.2: Variação do comprimento para uma semana de verão

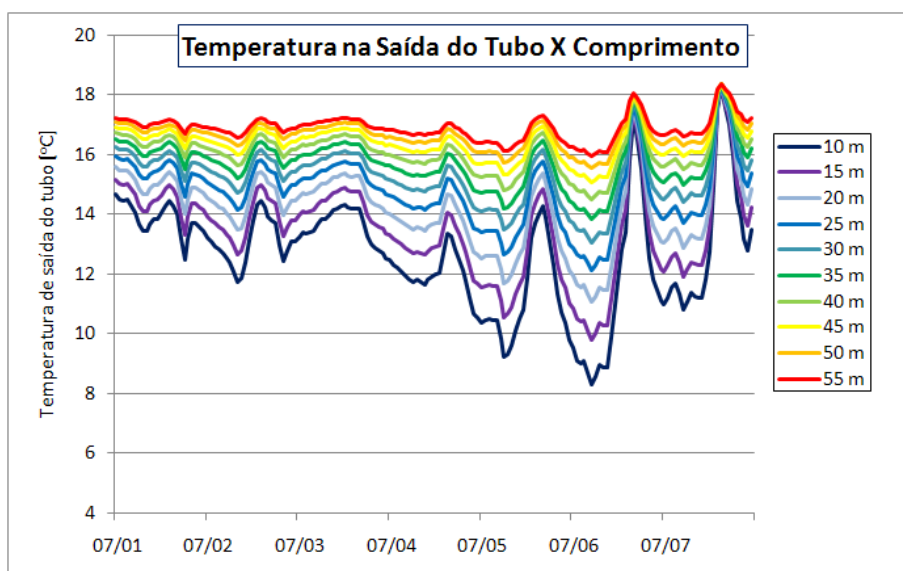


Figura 4.3: Variação do comprimento para uma semana de inverno

4.4. ESPESSURA DO TUBO

A espessura da parede do tubo deve ter valor tal que não prejudique a transferência de calor do solo para o ar no interior do tubo, mas que também tenha função de resistência mecânica. Fez-se uma variação entre quatro valores de espessura e essa análise é

apresentada na figura 4.4, um gráfico que mostra as temperaturas na saída do tubo para cada valor de espessura, em metros. Uma semana de julho foi escolhida para verificar essa simulação, que obteve resultados parecidos com os achados por Horbach, 2010. O material do tubo usado em todos os testes é o aço.

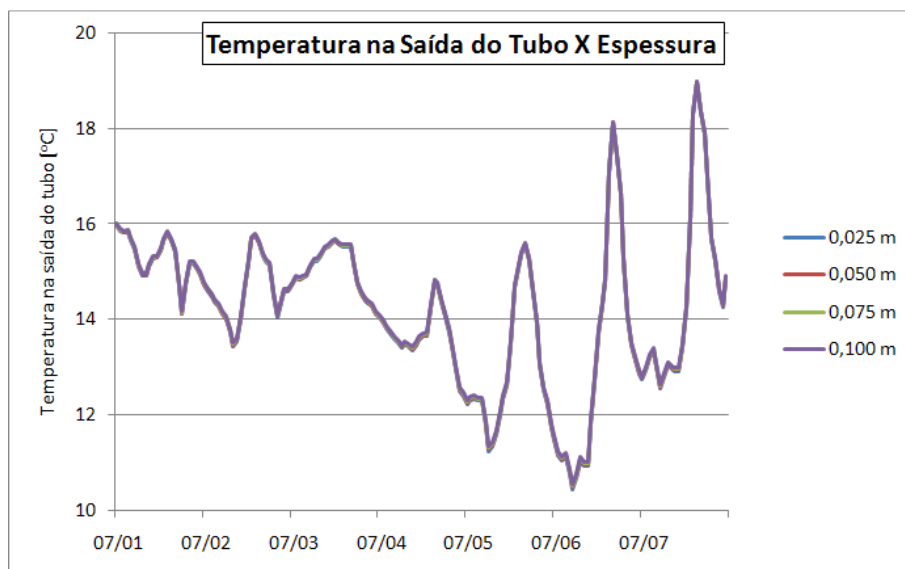


Figura 4.4: Variação da espessura do tubo em uma semana de inverno

4.5. RAI DO TUBO

A figura 4.5 ilustra a variação da temperatura para diferentes medidas do raio do tubo, em metros. O aumento do raio ocasiona um baixo coeficiente de convecção no interior do tubo, causando um aumento da temperatura de saída, mesmo resultado adquirido por Lee e Strand, 2006. Para cada raio testado nessa simulação, foi calculada a velocidade do ar no interior dos tubos, usando sempre a mesma vazão de projeto. Os valores encontrados estão entre parênteses embaixo de cada raio na legenda. A escolha do diâmetro a ser utilizado influencia não só na capacidade de troca térmica do ar com o solo, mas também na capacidade do ventilador em proporcionar a diferença de pressão necessária para o escoamento.

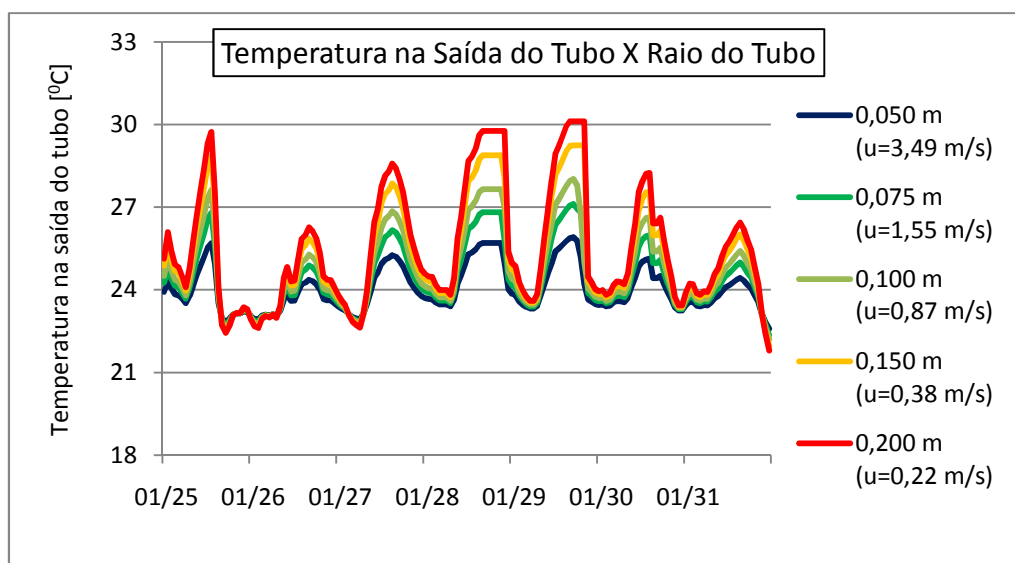


Figura 4.5: Variação do raio do tubo para uma semana de verão

Pode-se perceber pelo gráfico da figura 4.5 que o aumento do raio do tubo causa diminuição da transferência de calor do ar para o solo, pois o coeficiente de convecção do ar diminui.

4.6. MATERIAL DO TUBO

Três materiais diferentes, com coeficientes de condução térmica diferentes, foram analisados para uma semana de inverno. O material do tubo deve ser escolhido pensando mais nas propriedades mecânicas e no seu custo, pois as melhores escolhas do material levando-se em conta somente a condutividade térmica não proporcionariam durabilidade ou economia. Os materiais escolhidos foram: aço, concreto e plástico, cada um com condutividade térmica de 45,3 W/m°C, 1,8 W/m°C e 0,2 W/m°C respectivamente. Todos tubos simulados possuem a mesma espessura de 0,025 metro, com 0,075 metro de raio, e os resultados podem ser conferidos na figura 4.6.

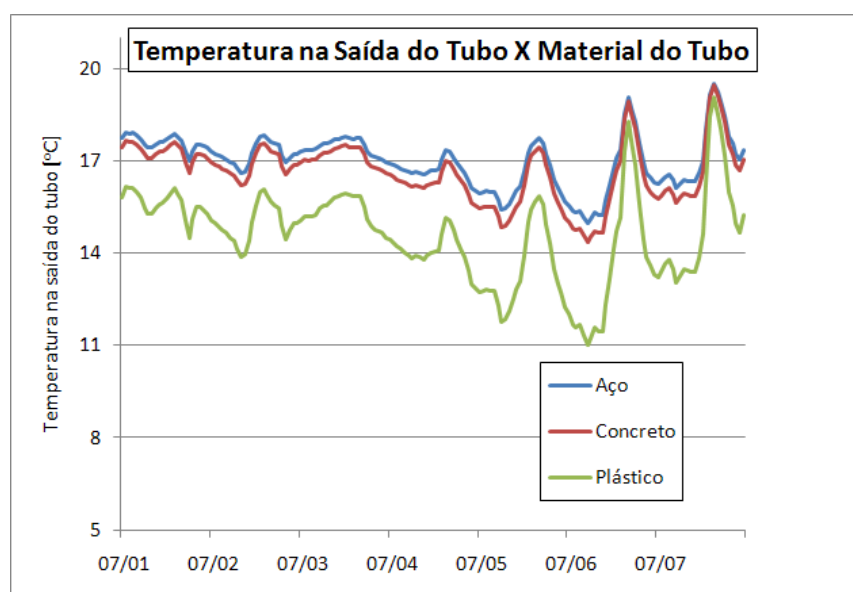


Figura 4.6: Tipos de materiais do tubo em uma semana de inverno

Pelo gráfico, é possível notar como, mesmo sendo a condutividade térmica do aço aproximadamente 25 vezes maior que a condutividade do concreto, isso não influencia tanto na temperatura de saída do tubo enterrado, o que permite ao usuário escolher o material pelo seu custo-benefício.

4.7. SIMULAÇÃO DA RESIDÊNCIA

Feita a análise dos parâmetros envolvidos numa instalação de um sistema de ventilação por tubos enterrados, parte-se para a aplicação dos resultados encontrados nos itens anteriores para investigar uma melhoria na eficiência desse sistema.

Quatro ambientes da residência foram escolhidos para receber a ventilação dos tubos enterrados: a sala, os dois quartos e o escritório. No restante da análise dos resultados encontrados serão mostradas somente as temperaturas referentes à sala, pois os métodos de avaliação se repetem para todos os cômodos. Alguns resultados encontrados para os demais ambientes podem ser conferidos no apêndice A.

Analisando o gráfico de temperaturas do ar anuais, foi escolhida uma semana mais significativa para cada estação do ano para verificar o uso de tubos enterrados em diferentes condições. Essas quatro semanas são detalhadas na tabela 4.2.

Tabela 4.2: Temperaturas do ar exterior para semanas em cada estação

	Período	Temperatura média [°C]	Temperatura máxima [°C]	Temperatura mínima [°C]
Verão	25/1 a 31/1	27	36	20
Outono	1/4 a 7/4	20,5	28,5	13,9
Inverno	1/7 a 7/7	10,4	18,2	4,2
Primavera	1/11 a 7/11	19,5	31	11

De modo a avaliar a eficiência dos tubos enterrados, optou-se por iniciar a análise da residência sendo ventilada somente de forma forçada, com duas trocas de ar para o volume de cada zona por hora. Ambos os métodos de ventilação usam ventiladores projetados para operar com 200 Pascal de diferença de pressão. Esses resultados de temperatura interna da zona servirão de base para comparar com as temperaturas obtidas com o uso dos tubos.

4.7.1 Residência Base x Tubos Enterrados

A seguir são apresentados gráficos de temperaturas internas para a sala nas quatro semanas selecionadas anteriormente. Para melhor comparação, a residência base sempre seguirá na cor vermelha, a temperatura de saída dos tubos em azul claro, a temperatura do ar externo em azul forte, a temperatura do ambiente interno ventilado com os tubos em verde e a temperatura da interface solo/tubo em laranja.

As figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 mostram uma simulação com o sistema baseado nos melhores resultados, obtidos com a variação dos parâmetros. São eles: profundidade, 4 metros; tipo de solo, pesado e saturado; comprimento do tubo, 55 metros; espessura, 0,075 metro; raio, 0,05 metro e material, aço.

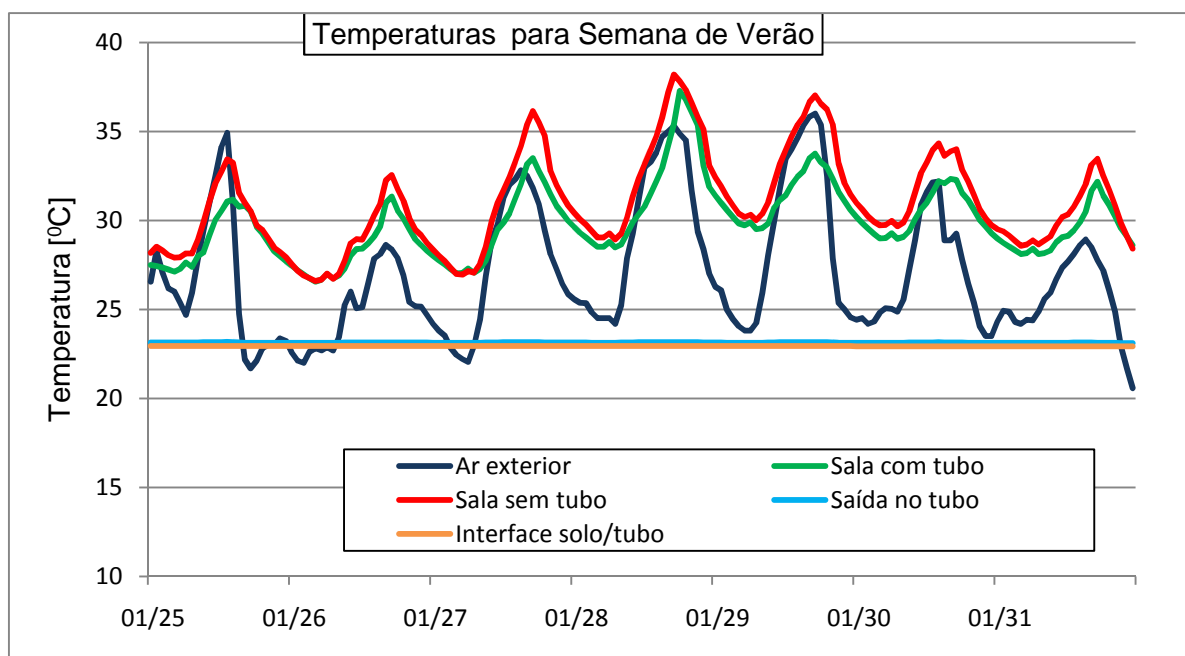


Figura 4.7: Temperaturas simuladas para uma semana de verão

Os picos de temperatura do ar exterior ocorrem geralmente no meio da tarde, e quando esse ar é jogado para dentro da casa pela ventilação normal, ou sem os tubos, a temperatura interna sobe consideravelmente. É possível notar, no gráfico da figura 4.7, que a temperatura interna da sala ventilada pelo tubo é levemente menor do que a temperatura sem o tubo,

mostrando melhores resultados nas temperaturas de pico diárias, já que o ar captado está a uma temperatura mais baixa do que a do ar externo.

Neste caso, a temperatura na saída do tubo, em azul claro, segue a temperatura da interface do solo com a superfície externa do tubo. Porém, simulações com comprimentos menores de tubo, com os demais parâmetros iguais, mostraram que a temperatura na saída do tubo não segue a tendência de se igualar à temperatura da superfície do tubo com o solo. Isso acontece devido ao comprimento do tubo permitir uma transferência do calor do ar para o solo.

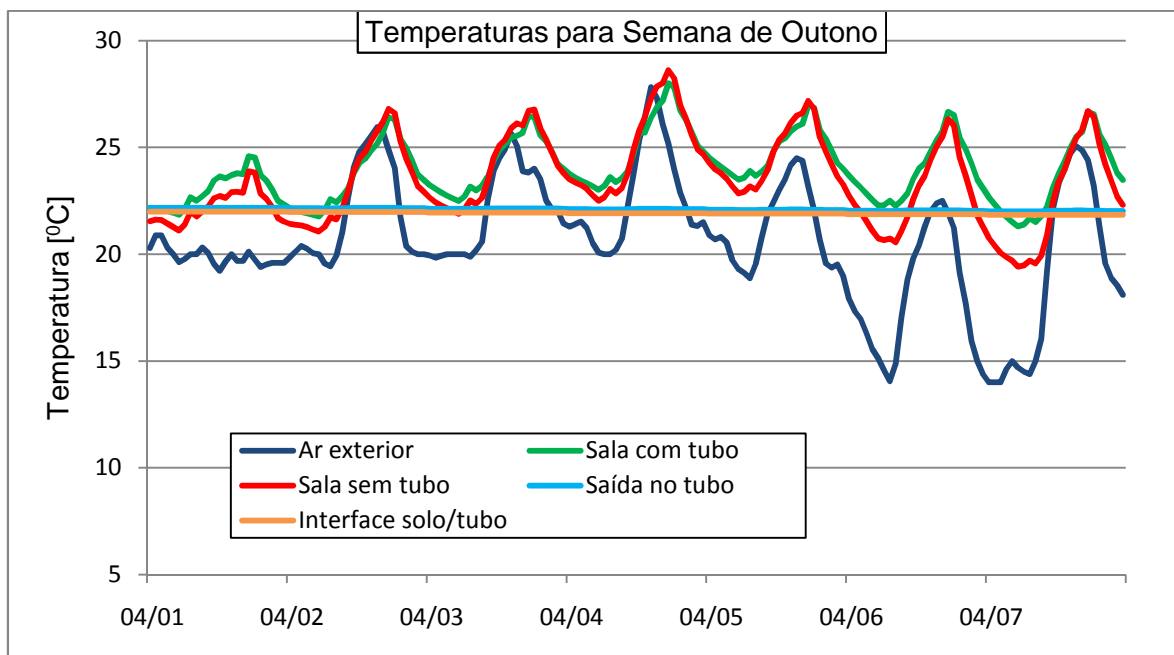


Figura 4.8: Temperaturas simuladas para uma semana de outono

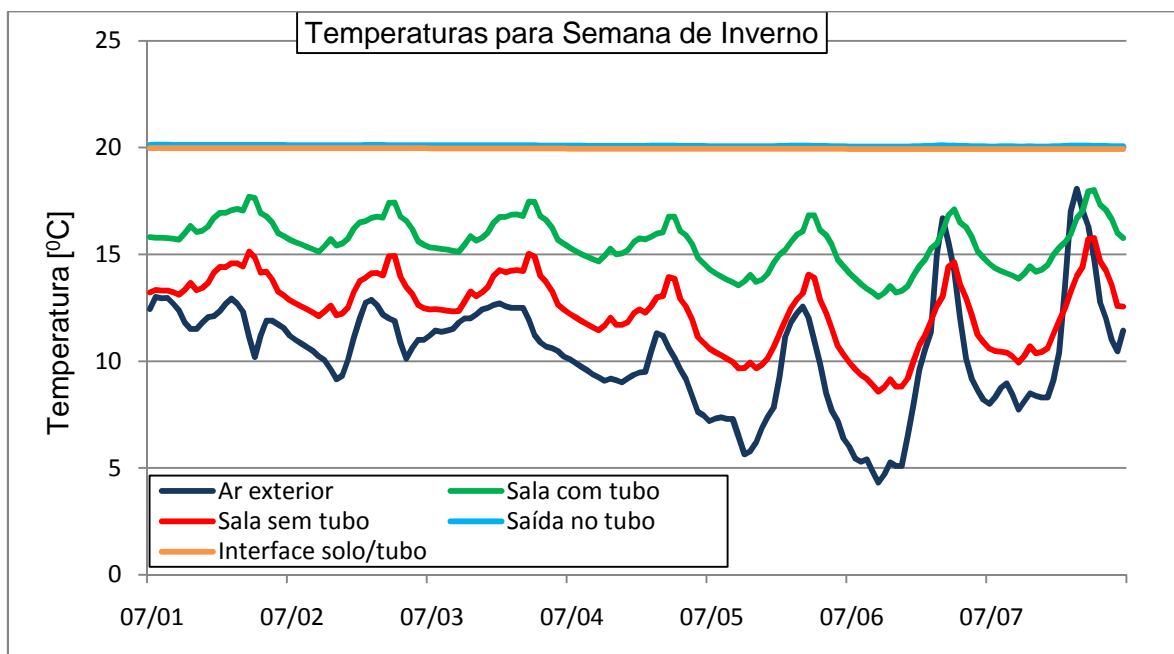


Figura 4.9: Temperaturas simuladas para uma semana de inverno

Em climas frios, o uso dos tubos enterrados se mostrou bastante vantajoso. Isso se pode observar pela temperatura interna da sala, linha verde na figura 4.9, que apresenta valores mais altos do que a temperatura sem o uso dos tubos.

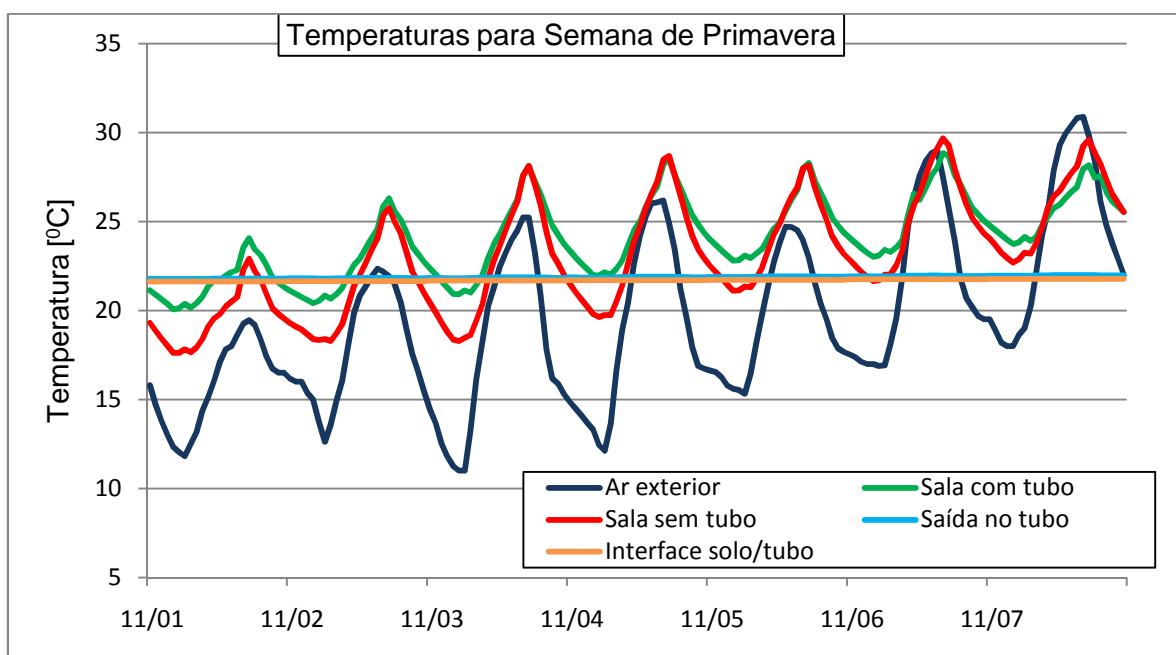


Figura 4.10: Temperaturas simuladas para uma semana de primavera

A figura 4.10, mostra que a temperatura da sala ventilada pelos tubos apresenta valores mais altos do que as temperaturas da sala sem eles, indicando novamente que seu uso em aquecimento de ambientes gera resultados melhores do que em estações quentes.

Na tabela 4.3 abaixo são apresentadas temperaturas médias, máximas e mínimas calculadas para todas as estações do ano para a sala da residência.

Tabela 4.3: Temperaturas nas quatro estações, em °C

Estação	Com tubos enterrados			Sem tubos enterrados		
	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima	Mínima
Verão	28	37,5	22,7	28,2	38,5	19,6
Outono	21	31	13	19,6	32,6	8
Inverno	19,5	26,5	13	17,8	28	8,6
Primavera	25	36,5	17,5	24,2	37,3	15

5. CONCLUSÕES

Ao analisar detalhadamente cada parâmetro envolvido em um sistema de ventilação por tubos enterrados, percebe-se que a melhor forma de utilização desse método envolve um processo de estudos baseados em fundamentos e trabalhos já realizados. O tipo de solo onde a residência será construída indica se o uso de tubos dará resultados satisfatórios, e isso pode ser investigado previamente coletando informações das características do solo.

As simulações mostraram resultados promissores, embora a maioria dos parâmetros escolhidos tivesse seus valores ótimos utilizados. Muito provavelmente esse não será o caso em uma instalação real, onde fatores externos também devam ser levados em consideração, como custo, espaço físico para o comprimento dos tubos e disponibilidade de profundidade dos

mesmos. Um bom exemplo disso é o comprimento do tubo usado na simulação, de 55 metros, valor alto se comparado as dimensões usuais de terrenos. Deixando como opção utilizar tubos em serpentinas, ou usar mais de um tubo para o mesmo ambiente de forma paralela.

Com relação às temperaturas obtidas no interior da residência, nota-se que a influência dos tubos amortece os picos de temperatura no verão e no inverno. Em estações frias o sistema funcionou melhor do que em climas quentes, pois no inverno a diferença de temperatura entre o ar exterior e o solo, na profundidade do tubo, é maior do que no verão. Com relação aos resultados da análise no verão, a utilização dos tubos pode ser, portanto, usada como apoio a algum outro método de climatização, ou ainda aumentando-se a vazão nos tubos enterrados. Outro meio de tentar tirar o máximo proveito da ventilação se daria automatizando, por meio de termômetros comparadores, os controles de abertura e de fechamento dos tubos, ou a abertura das janelas. É possível ainda pensar na ativação controlada de ventiladores para captar um ar mais vantajoso para a residência, seja do exterior seja provindo dos tubos, por meio de um sistema de comparação automática das temperaturas.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Implementar no *EnergyPlus* as redes de corrente de ar interna para comparar a ventilação natural com os tubos enterrados.
- Simular um método de controle automatizado para abertura dos tubos que, por comparação, permitisse a opção pelo uso de ar exterior.
- Verificar a perda de carga nos tubos, consumo e potência dos ventiladores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., **ASHRAE: Handbook – HVAC Applications**, SI Edition, Atlanta, USA, 2007.

ASHRAE, American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, Inc., **ASHRAE: Handbook Fundamentals**, SI Edition, Atlanta, USA, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1: Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários, Parte 1: Projeto das Instalações**, 2008.

ENERGYPLUS. **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. **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**. São Paulo: Nobel, 1988.

HOLLMULLER, P.; CARLO, J.; ORDENES, M.; WESTPHAL, F.; LAMBERTS, R. **Potential of Buried Pipes Systems and Derived Techniques for Passive Cooling of Buildings in Brazilian Climates**. Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE), Université de Genève – Switzerland, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LABEEE), Universidade Federal de Santa Catarina – Brazil. 2006.

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.

LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acessado em: 14 de junho de 2011.

LEE, K. H.; STRAND, R. K. **Implementation of an Earth Tube System into EnergyPlus Program**. *Proceedings of SimBuild*, MIT, Cambridge, Mass, 2006.

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.

APÊNDICE A – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO DA TEMPERATURA INTERNA DOS QUARTOS E DO ESCRITÓRIO

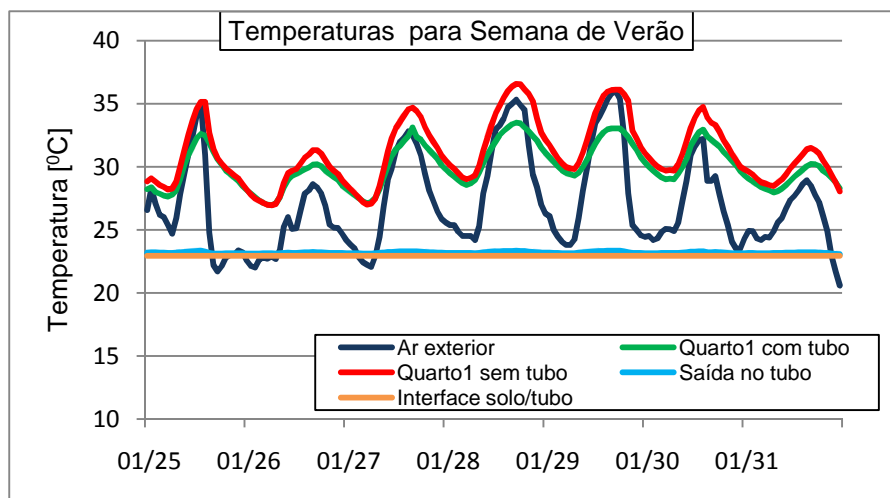


Figura A.1: Temperaturas para semana de verão no Quarto1

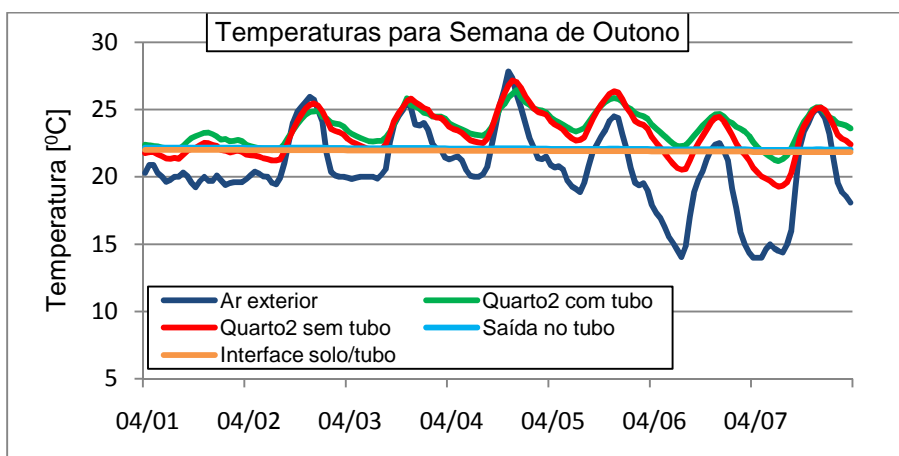


Figura A.2: Temperaturas para semana de outono no Quarto1

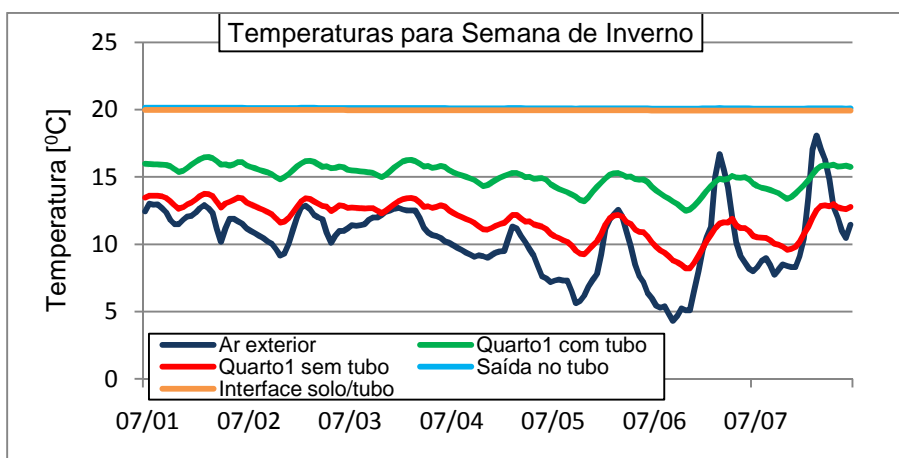


Figura A.3: Temperaturas para semana de inverno no Quarto1

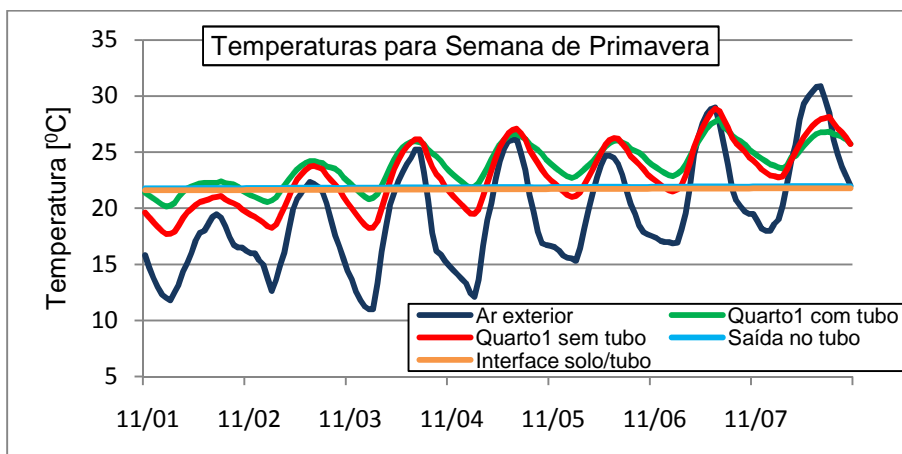


Figura A.4: Temperaturas para semana de primavera no Quarto1

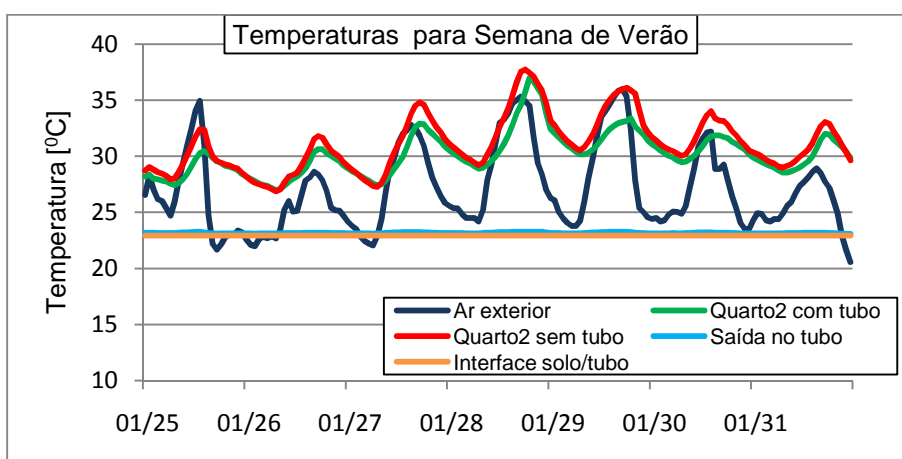


Figura A.5: Temperaturas para semana de verão no Quarto2

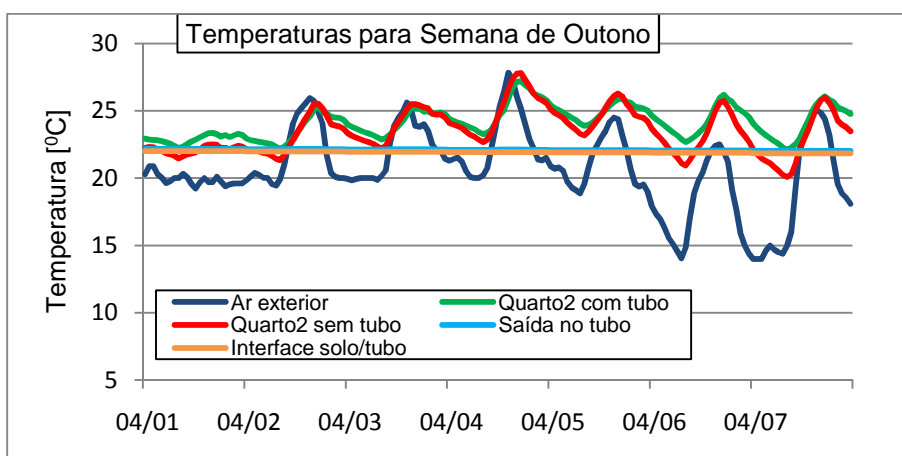


Figura A.6: Temperaturas para semana de outono no Quarto2

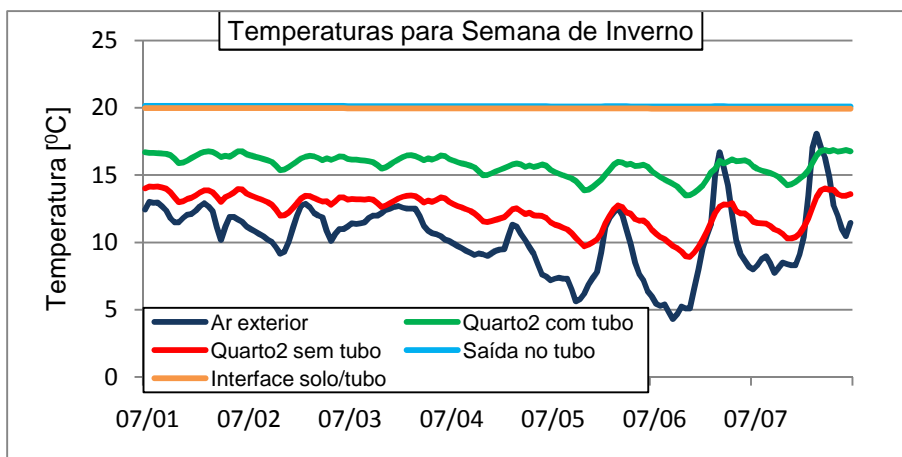


Figura A.7: Temperaturas para semana de inverno no Quarto2

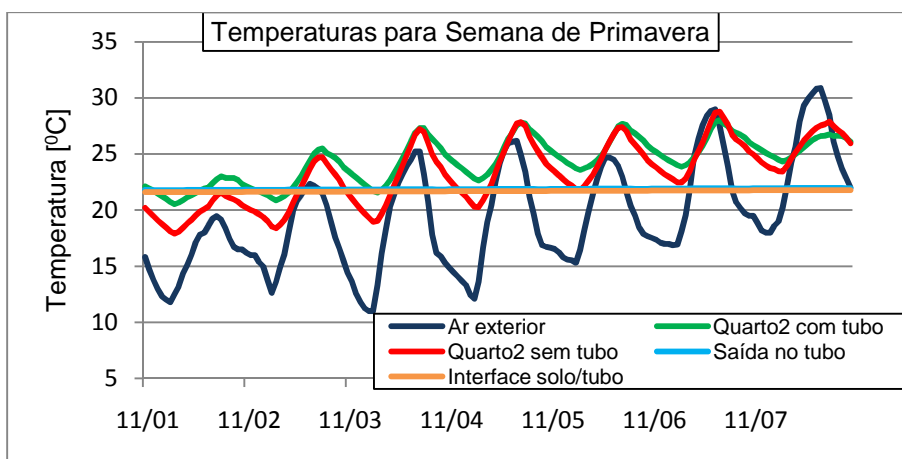


Figura A.8: Temperaturas para semana de primavera no Quarto2

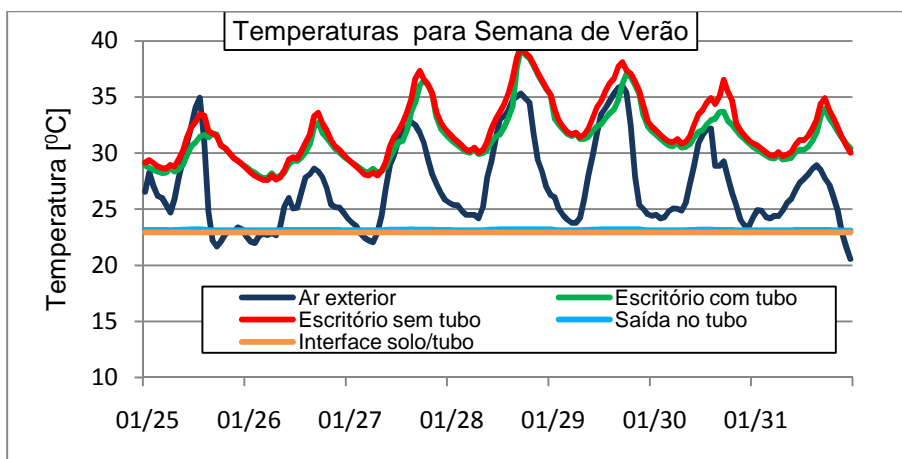


Figura A.9: Temperaturas para semana de verão no Escritório

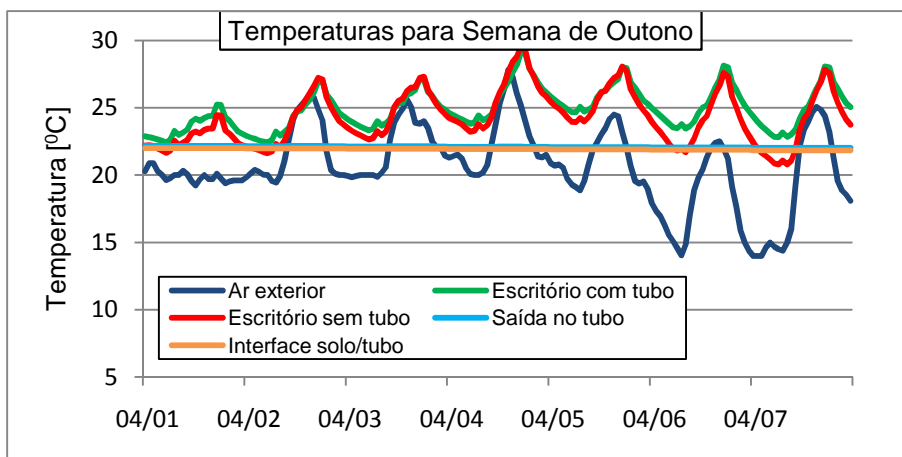


Figura A.10: Temperaturas para semana de outono no Escritório

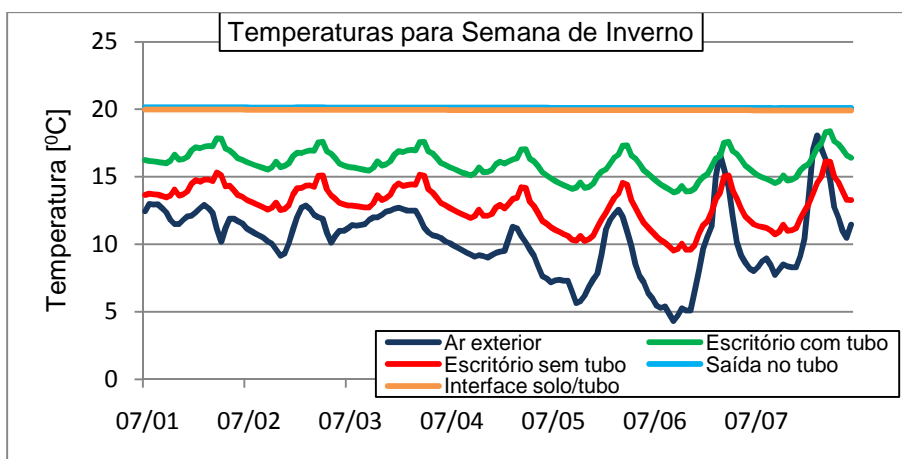


Figura A.11: Temperaturas para semana de inverno no Escritório

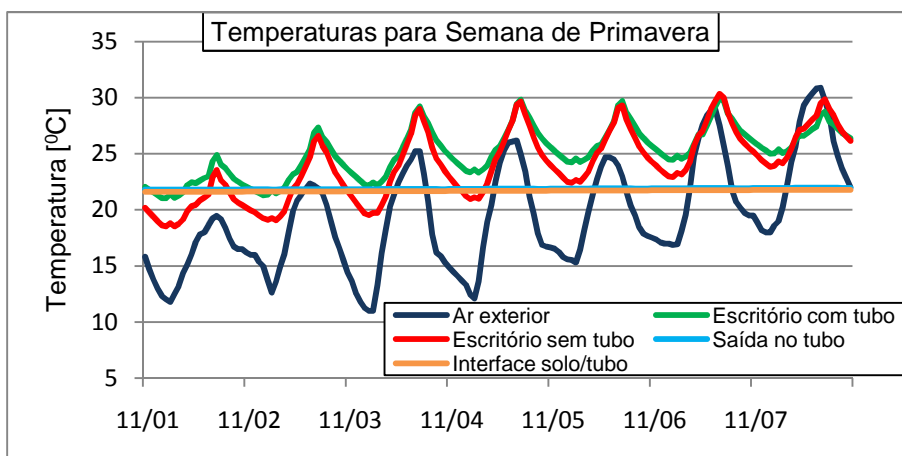


Figura A.12: Temperaturas para semana de primavera no Escritório