

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

ADEQUAÇÃO DE UMA CASA PROTEGIDA PELA TERRA AO
CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

por

Luiz Antonio Piccoli Junior

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, Dezembro de 2012

ADEQUAÇÃO DE UMA CASA PROTEGIDA PELA TERRA AO
CONFORTO TÉRMICO E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

por

Luiz Antonio Piccoli Junior

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.

Prof.

Prof.

Porto Alegre, 7 de Dezembro de 2012.

PICCOLI JUNIOR, L. A. **Adequação de uma Casa Protegida pela Terra ao Conforto Térmico e Eficiência Energética**. 2012. 15 páginas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Neste trabalho é dada continuação a um estudo que simulou o desempenho termo-energético de uma casa protegida pela terra, com o objetivo de adequar a residência ao conforto térmico e eficiência energética. A casa é unifamiliar e parcialmente encoberta por terra, situada na região metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. A camada de terra que encobre parte da casa atua como capacitor térmico, diminuindo a amplitude da variação de temperatura dentro da casa. Foram utilizados como instrumentos de melhoria nas condições de conforto e eficiência energética: Clarabóias que ajudam no aproveitamento de iluminação e ventilação natural nos ambientes que não possuem janelas, proteções solares horizontais que auxiliam na uniformização da luz natural incidente, tubos de ventilação para a ventilação cruzada e efeito chaminé nos ambientes que não têm as clarabóias, chaminé para retirar o calor dissipado pela geladeira na cozinha durante o verão, isolamento térmico no envoltório da residência, sistema de coleta de água da chuva, coletores solares e fogão à lenha para o aquecimento de água nos banhos e do ambiente. Para desenvolver este trabalho foram utilizados os softwares de desenho DraftSight e SketchUp junto com o *plug-in* OpenStudio, e o de simulação de desempenho energético EnergyPlus, bem como os dados climáticos de Porto Alegre. Apenas em 3,32 % do total de horas do ano a edificação esteve fora da faixa de conforto térmico considerada para a temperatura operativa (19° a 28°C), o sistema de coleta de água da chuva supriu os sanitários da casa durante 70 % das horas do ano e o sistema de aquecimento se mostrou satisfatório utilizando somente energias renováveis.

PALAVRAS-CHAVE: Casa protegida pela terra, EnergyPlus, conforto térmico.

PICCOLI JUNIOR, L. A. **Adequacy of one Earth-Sheltered Home to Thermal Comfort and Energy Efficiency**. 2012. 15 pages. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

This work is a continuation of a study that simulated the thermal energy performance of an earth-sheltered home, in order to adapt the residence to thermal comfort and energy efficiency. It is a single-family house and is partially underground, located in Porto Alegre, state of Rio Grande do Sul. The layer of earth that covers part of the house acts as a thermal capacitor, reducing the range of temperature variation inside the house. Were used as tools of improving comfort and energy efficiency: Skylights to improve natural lighting and ventilation in rooms that do not have windows, horizontal blinds that help homogenize the incident natural light, ventilation tubes for cross ventilation and stack effect in rooms that do not have skylights, chimney to remove the heat dissipated by the refrigerator in the kitchen during the summer, insulation, rainwater collection system, solar panels and wood stove for heating water in the baths and rooms. To develop this work, DraftSight and SketchUp with plug-in OpenStudio were used as drawing softwares and EnergyPlus as energy performance simulation software. Climatic data of Porto Alegre also were used in this work. Only in 3.32% of the total hours of the year the building was out of thermal comfort range considered (19° to 28° C), the rainwater collection system supplied the house for 70% of the hours of the year and the heating system proved satisfactory comfort using only renewable energy.

KEYWORDS: Earth-sheltered home, EnergyPlus, thermal comfort.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. METODOLOGIA	3
4.1. Modelo simulado	3
4.1.1. Balanço de energia da superfície exterior	4
4.1.2. Condução na construção	4
4.1.3. Balanço de energia da superfície interior	5
4.1.4. Balanço de energia do ar interior	6
4.1.5. Equações de balanço de energia	6
4.2. Metodologia para simulação do envoltório de terra	7
5. ESTRATÉGIAS DE PROJETO.....	7
5.1. Apresentação geral	7
5.2. Projeto do envoltório	8
5.3. Área envidraçada ótima	8
5.4. Iluminação natural.....	9
5.5. Ventilação natural	10
5.6. Sistema de aquecimento de água	10
5.7. Coleta de água da chuva	11
6. RESULTADOS.....	12
6.1. Resultados conforto térmico.....	12
6.2. Resultados energia	12
7. CONCLUSÕES	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
APÊNDICE A	16

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, soluções alternativas para projeto de edificações termicamente eficientes têm sido muito valorizadas, pois buscam utilizar recursos naturais e locais para atingir os mesmos resultados de outras que não o fazem. Isso somente é possível com estratégias inteligentes de projeto, desenvolvidas com metodologias reconhecidas, proporcionando viabilidade a essa solução. Nessa tendência, diversas iniciativas de projeto e construção de casas enterradas modernas surgiram nos últimos anos, com o objetivo de serem ecologicamente sustentáveis e proporcionarem conforto aos ocupantes. Com a utilização de ferramentas computacionais e métodos consistentes de simulação, é possível obter resultados bastante precisos e avaliar diversas estratégias de projeto para residências enterradas sem a necessidade de construí-las.

Casas protegidas pela terra são residências que possuem terra em seu envoltório, podendo ser totalmente ou parcialmente enterradas. Roy, 2006, descreve em seu trabalho as casas protegidas pela terra como residências energeticamente eficientes, iluminadas, secas e silenciosas. As casas enterradas ganharam destaque logo após a segunda fase da crise do petróleo, em 1973, quando a busca por alternativas de condicionamento térmico em residências ficou mais atrativa.

Esse trabalho é a continuação de um estudo desenvolvido por Letti, 2012, no qual foi avaliado o desempenho termo-energético de uma casa enterrada na região metropolitana de Porto Alegre. Diversas estratégias de projeto são elaboradas e simuladas nesse trabalho para melhorar as condições de conforto térmico e de eficiência energética da residência.

2. OBJETIVOS

Para as condições adequadas de conforto o desafio é diminuir as horas de desconforto de frio que a residência estudada por Letti, 2012, apresenta durante o inverno de Porto Alegre, de maneira que a amplitude de temperaturas se mantenha dentro dos limites considerados pela norma ASHRAE 55, 2004. Para que a residência seja eficiente nos usos de energia, esse trabalho objetiva elaborar uma alternativa para o aquecimento elétrico de água nos banheiros e também um sistema de coleta de água da chuva.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É evidente que casas protegidas pela terra podem ser alternativas muito bem sucedidas para reduzir o impacto ambiental, proporcionar ambientes agradáveis e com conforto térmico. Todavia, existem alguns desafios a serem enfrentados nesse tipo de construção. Umidade acumulada no solo, integridade estrutural da construção, capacidade de renovação do ar e aproveitamento de luz natural são desafios presentes na construção de casas protegidas pela terra. Todos esses itens devem ser avaliados em conjunto, visto que combinados influenciam diretamente no conforto dos ocupantes. Casas enterradas devem ser projetadas com foco nas características bioclimáticas locais para que seja possível aproveitar o máximo de recursos disponibilizados naturalmente na região [Kimura, 1994].

A umidade do solo é um dos principais fatores que limitam construções de casas enterradas [Xibin et alli, 2009]. O primeiro passo para se construir uma casa protegida pela terra sem problemas de umidade no seu interior é escolher o sítio correto para sua construção. O local não deve ser acumulador de água, ou seja, deve permitir que a água escoe naturalmente para um sítio inferior. Caso isso não seja possível, sistemas de drenagem podem ser utilizados para que a água não fique acumulada no local aonde a casa será construída [Seifert, 2006]. O tipo de solo também é importante para prevenção de problemas relacionados à umidade. O solo mais adequado é rico em areia e cascalho, ou seja, granular. Essa composição permite que a água escoe rapidamente e não apresenta variações de volume significantes com a umidade existente [NREL, 1997, retirado de Letti, 2012].

Os materiais estruturais utilizados em casas protegidas pela terra devem, obviamente, ser capazes de suportar os esforços impostos pelo solo que circunda a casa. O concreto

reforçado é usualmente o material mais utilizado, pela sua durabilidade, resistência ao fogo e resistência estrutural. Usualmente o telhado possui vegetação que ajuda a evitar a erosão [NREL, 1997], e que também traz ganhos em resfriamento passivo para o interior da casa protegida pela terra. Esses ganhos acontecem por evaporação de umidade da superfície do solo e pela estabilidade térmica que ele apresenta [Kimura, 1994].

Materiais isolantes térmicos são geralmente utilizados em casas enterradas. Staniec e Nowak, 2009, estudaram o comportamento termo-energético de uma casa protegida pela terra com espessuras diferentes de isolamento térmico. O estudo mostrou que o isolamento térmico diminui a influência que o solo tem sobre a casa, e por isso deve ser cuidadosamente dimensionado especificamente para cada região. A quantidade de superfícies que serão isoladas e a espessura do isolamento tendem a ser menores se o clima da região for tropical, já que o isolamento vai dificultar a retirada de calor do ambiente nos meses de verão. A técnica de isolamento também depende do tipo de casa enterrada.

A absorção e acumulação de calor pelo solo durante o verão através do resfriamento passivo de uma casa enterrada e retorno desse calor ao ambiente no inverno é um método chamado de *Passive Annual Heat Storage* e foi originalmente introduzido por Hait, 1983 [Anselm, 2008]. A terra troca calor constantemente com a atmosfera, absorvendo grandes quantidades de calor durante o verão e devolvendo essa energia durante o inverno. Em geral, em profundidades a partir de 6 metros a temperatura do solo se aproxima da temperatura média anual do ar da região, [Hait, 2010]. Dessa maneira uma residência com grande área em contato com o solo a profundidades próximas de 6 metros possui uma proteção contra variações bruscas da temperatura externa.

Chiras, 2003, apresenta três tipos de casas protegidas pela terra e compara essas construções quanto a oito principais fatores que impactam na qualidade de uma residência comum. A tabela 3.1, adaptada e traduzida para português, mostra essa comparação.

Tabela 3.1 – Comparação entre os tipos de casas protegidas pela terra

	No nível do solo e encoberta com terra	Parcialmente abaixo do nível do solo	Totalmente abaixo do nível do solo
Impacto visual na paisagem natural	Maior	Intermediário	Mínimo
Potencial para aquecimento passivo solar	Excelente	Excelente	Pequeno
Estabilidade Térmica	Boa, mas menor entre as três opções	Intermediário	Excelente
Proteção contra o vento	Boa, mas menor entre as três opções	Intermediário	Excelente
Vistas	Excelente em todas direções	Excelente em uma direção	Mínimo
Proteção contra ruído	Boa, mas menor entre as três opções	Intermediário	Excelente
Potencial para iluminação natural	Excelente	Excelente, quando realizado corretamente	Menor
Custo	Menor	Intermediário	Maior

A casa protegida pela terra que é estudada nesse trabalho faz parte de um estudo desenvolvido por Letti, 2012. Essa residência é do tipo parcialmente enterrada na encosta de uma colina com leve inclinação, situada em Viamão – RS. A figura 3.1 mostra a planta baixa e uma vista 3D da casa estudada por Letti. A casa possui somente uma fachada exposta que está orientada com azimute de 27 graus. A área total é de 85 m² e a casa foi dimensionada

para uma família de três a quatro pessoas contando com dois dormitórios, um escritório, dois banheiros, sala e cozinha.

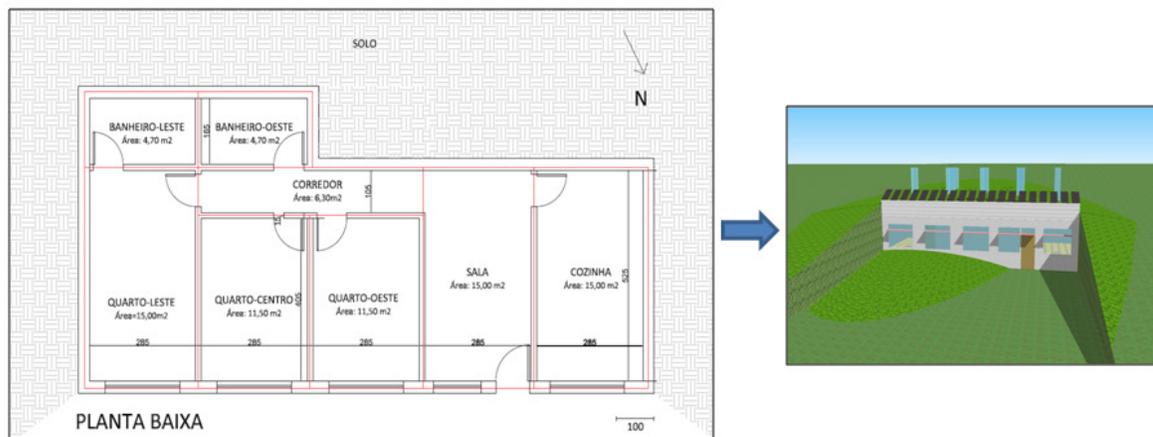


Figura 3.1: Planta baixa e vista tridimensional da casa protegida pela terra estudada por Letti, 2012.

Os resultados obtidos por Letti mostraram que a construção de casas enterradas no clima da região de Porto Alegre é uma ótima alternativa para obter conforto térmico, pois quando comparada a uma residência não enterrada, a casa protegida pela terra apresentou um desempenho termo-energético superior. Contudo, a casa apresentou muitas horas de desconforto de frio durante o inverno ultrapassando o limite recomendado pela norma ASHRAE 90.1-2007. Como recomendações foram citadas a utilização de muro trombe na fachada, aumento da área envidraçada e utilização de lareira para aquecimento.

Os detalhes construtivos e metodologias utilizadas no trabalho de Letti não são todos descritos nesse estudo, com exceção de alguns casos em que importantes mudanças foram consideradas. A nova casa protegida pela terra com todas as modificações estratégias visando conforto térmico e eficiência energética é apresentada assim como a metodologia utilizada e os novos resultados obtidos.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desse trabalho foram utilizados os *softwares* de desenho DraftSight e Google SketchUp 8 com o *plug-in* OpenStudio, e também o *software* de simulação de eficiência energética EnergyPlus.

4.1. MODELO SIMULADO

Nesse capítulo é apresentada uma descrição resumida do modelo simulado no *software* EnergyPlus, assim como as hipóteses consideradas nos cálculos. Descrições mais detalhadas desses cálculos podem ser vistas em ASHRAE Fundamentals, 2009.

O balanço global de energia que ocorre na simulação leva em consideração os mecanismos de condução, convecção e radiação entre cada construção e superfície de cada zona térmica e também o balanço convectivo que ocorre com o ar. Esse método é chamado de *Heat Balance Model* (HB) e muitos *softwares* de cálculo energético o utilizam. Assim como qualquer modelo, o HB possui algumas simplificações. A primeira e mais fundamental é a hipótese de que o ar dentro da zona térmica é suficientemente misturado, significando que sua temperatura é uniforme no espaço limitado pela zona. Para as superfícies da zona se assume temperatura uniforme, irradiação uniforme e que são difusamente radiantes. A condução de calor que ocorre dentro das construções é considerada unidimensional. Dessa maneira, podemos dividir o HB em 4 processos distintos que em conjunto constituem o modelo:

- Balço de energia da superfície exterior;
- Condução na construção;
- Balço de energia da superfície interior;
- Balço de energia do ar interior.

Construções são as paredes, pisos, telhados e janelas. A figura 4.1 ilustra a relação existente entre esses processos para uma construção opaca numa zona térmica. Todos os componentes na figura participam do balanço energético. A figura 4.1 também mostra uma visão esquemática de uma zona térmica, sem a parede frontal para melhor visualização.

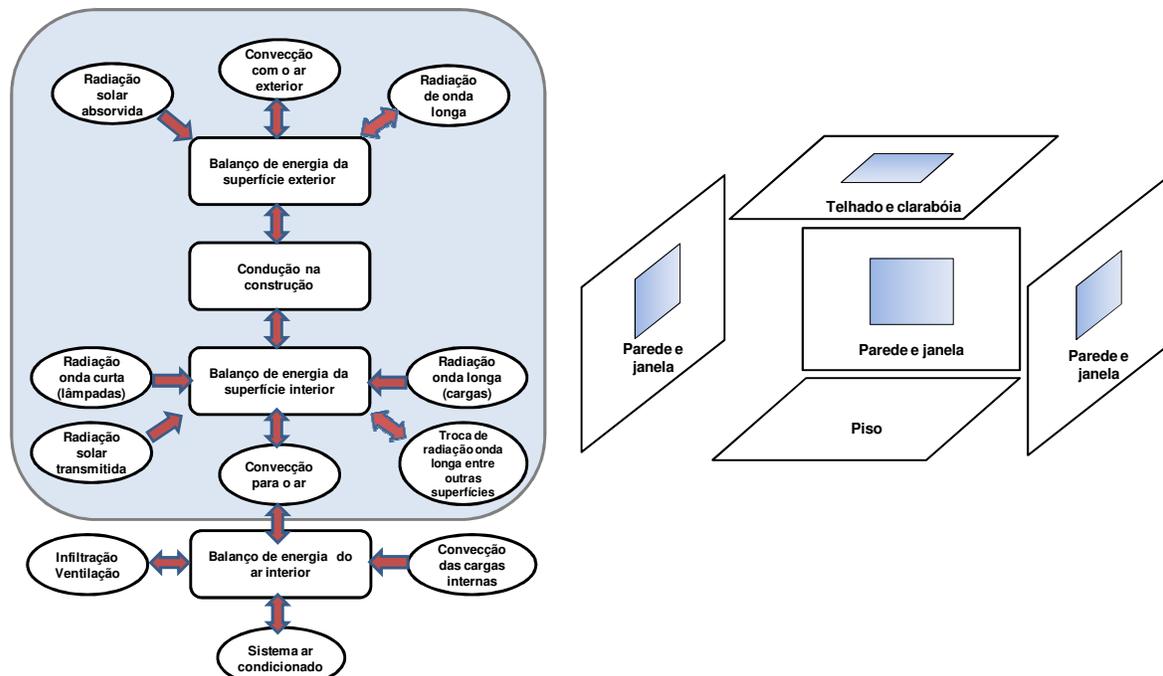


Figura 4.1: Esquema que relaciona os processos do balanço de energia e zona térmica

4.1.1. BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE EXTERIOR

O balanço de energia de cada superfície exterior da zona é:

$$q''_{\alpha\text{sol}} + q''_{\text{LWR}} + q''_{\text{conv}} - q''_{\text{ko}} = 0 \quad (4.1)$$

Sendo que: $q''_{\alpha\text{sol}}$ = fluxo da radiação solar direta e difusa absorvida pela superfície, W/m^2 ; q''_{LWR} = fluxo da troca de radiação de onda longa com as redondezas, W/m^2 ; q''_{conv} = fluxo por convecção com o ar exterior, W/m^2 ; q''_{ko} = fluxo por condução na superfície externa da construção, W/m^2 ;

4.1.2. CONDUÇÃO NA CONSTRUÇÃO

Esse processo envolve as temperaturas da superfície interna e externa da construção e os fluxos condutivos de calor correspondentes, todos dependentes do tempo. Os métodos computacionais mais utilizados para o cálculo iterativo do processo de condução são diferença finita e função de transferência. O método de função de transferência converge mais rapidamente para o resultado e por isso foi utilizado nesse trabalho. As funções de transferência de condução (*CTFs – conduction transfer functions*) são usadas nas equações a

seguir. As equações para os fluxos de calor da superfície interior e exterior de uma construção da zona térmica são:

$$q''_{ki}(t) = -Z_0 T_{si,\theta} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{si,\theta-j\delta} + Y_0 T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{so,\theta-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,\theta-j\delta} \quad (4.2)$$

$$q''_{ko}(t) = -Y_0 T_{si,\theta} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{si,\theta-j\delta} + X_0 T_{so,\theta} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{so,\theta-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,\theta-j\delta} \quad (4.3)$$

Onde X_j = CTF da superfície exterior, $j = 0,1,\dots,nz$; Y_j = CTF do corpo da parede, $j = 0,1,\dots,nz$; Z_j = CTF da superfície interior, $j = 0,1,\dots,nz$; Φ_j = CTF do fluxo de calor, $j = 0,1,\dots,nq$; θ = tempo; δ = incremento de tempo; T_{si} = temperatura da superfície interior, °C; T_{so} = temperatura da superfície exterior, °C; q''_{ki} = fluxo de calor condutivo na superfície interior, W/m²; q''_{ko} = fluxo de calor condutivo na superfície exterior, W/m². Os dois limites dos somatórios (nz e nq) dependem da construção das paredes, telhados ou pisos. O método utilizado no EnergyPlus para o cálculo dos CTFs é baseado em equações matriciais lineares e é referido *como state space method*.

4.1.3. BALANÇO DE ENERGIA DA SUPERFÍCIE INTERIOR

Para cada superfície interior o balanço de energia pode ser escrito como:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (4.4)$$

Sendo que q''_{LWX} = fluxo radiante líquido de onda longa entre as superfícies internas da zona, W/m²; q''_{SW} = fluxo radiante de onda curta que chega à superfície vindo das lâmpadas, W/m²; q''_{LWS} = fluxo radiante de onda longa que chega na superfície vindo dos equipamentos, W/m²; q''_{ki} = fluxo por condução pela construção na superfície interna, W/m²; q''_{sol} = fluxo radiante absorvido pela superfície vindo do sol, W/m²; q''_{conv} = fluxo de calor convectivo para o ar da zona térmica, W/m². Nessa formulação, é assumido que o ar da zona térmica não interage com a radiação de onda longa, sendo totalmente transparente para essas ondas. A radiação de onda curta das lâmpadas é distribuída uniformemente sobre as superfícies da zona. O fluxo de calor provenientes dos equipamentos é dividido em convectivo para o ar e radiante distribuído uniformemente nas superfícies. No EnergyPlus o usuário pode decidir qual a fração desse fluxo que é radiante.

O ganho por radiação solar total através de uma janela consiste da radiação solar que é diretamente transmitida mais uma parcela de calor que é uma fração do total absorvido pelo vidro da janela. Essa segunda parcela contribui para o balanço energético por convecção e emissão de radiação de onda longa. A radiação solar transmitida diretamente pode ser uniformemente distribuída dentro das superfícies da zona ou pode ser calculada para a incidência real do sol dentro da zona. O segundo tipo requer que todas as zonas em que a radiação solar será calculada sejam côncavas. A geometria do modelo estudado nesse trabalho possui zonas térmicas convexas e por isso a radiação solar transmitida por janelas é uniformemente distribuída nas superfícies.

O cálculo do fluxo de calor proveniente do sol através de janelas utiliza o coeficiente de ganho de calor solar (*SHGC – solar heat gain coefficient*) e combina as duas parcelas de ganhos de calor. O SHGC é definido como

$$SHGC = \tau + \sum_{k=1}^n N_k \alpha_k \quad (4.5)$$

onde τ = transmitância do vidro; α_k = absortância da camada k do vidro; n = número de camadas; N_k = fração da radiação solar absorvida que contribui para o ganho de calor dentro da zona; Os SHGCs são corrigidos de acordo com o ângulo de incidência do sol.

4.1.4. BALANÇO DE ENERGIA DO AR INTERIOR

Quatro fatores contribuem para o balanço de energia do ar e somados resultam na energia acumulada no interior da zona térmica:

$$\rho c_p V \frac{dT}{dt} = q_{conv} + q_{CE} + q_{IV} + q_{sys} \quad (4.6)$$

Onde q_{conv} = taxa de calor por convecção das superfícies, W; q_{CE} = taxa de calor por convecção de cargas internas, W; q_{IV} = taxa de calor sensível causado por infiltração e ventilação do ar, W; q_{sys} = taxa de calor relacionada ao sistema de condicionamento de ar, W; ρ = densidade do ar da zona, kg/m³; c_p = calor específico do ar da zona, J/(kg.K); V = volume da zona térmica, m³.

No EnergyPlus, a potência dos equipamentos, lâmpadas e energia dissipada pelos ocupantes das zonas são dados de entrada no programa. Essa energia de carga interna é diretamente adicionada no balanço, sendo que o usuário indica qual a parcela dessas energias que é radiante e qual parcela será adicionada no balanço com o ar interior. Ou seja, o cálculo convectivo não é realizado nesses casos, e sim considerado uma fonte interna com a potência determinada, pois é muito difícil prever qual a temperatura superficial dessas cargas internas. Para resolver a equação (4.6) foi utilizado a aproximação por diferença finita de terceira ordem, método padrão do EnergyPlus, pois possibilita valores de *timestep* flexíveis sem resultar em instabilidades no processo iterativo.

4.1.5. EQUAÇÕES DE BALANÇO DE ENERGIA

Sendo i o índice referente à construção e j referente à hora do dia, as equações (4.1) e (4.3) são combinadas e resolvidas para T_{so} , produzindo um número de equações igual ao número de construções, que são aplicáveis em cada incremento de tempo:

$$T_{so,i,j} = \left(\sum_{k=1}^{nz} T_{si,i,j-k} Y_{i,k} - \sum_{k=1}^{nz} T_{so,i,j-k} Z_{i,k} - \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q''_{ko,i,j-k} + q''_{\alpha sol,i,j} + q''_{LWR,i,j} + T_{si,i,j} Y_{i,0} + T_{o,j} h_{co,i,j} \right) / (Z_{i,0} + h_{co,i,j}) \quad (4.7)$$

Onde T_o = temperatura do ar exterior, °C; h_{co} = coeficiente convectivo exterior, W/m².K; k = índice relativo ao cálculo dos CTF's, em substituição ao índice j das equações (4.2) e (4.3). Para T_{si} as equações 2 e 4 são combinadas:

$$T_{si,i,j} = \left(T_{si,i,j} Y_{i,0} + \sum_{k=1}^{nz} T_{so,i,j-k} Y_{i,k} - \sum_{k=1}^{nz} T_{si,i,j-k} Z_{i,k} - \sum_{k=1}^{nq} \Phi_{i,k} q''_{ki,i,j-k} + T_{a,j} h_{ci,j} + q''_{LWS} + q''_{LWX} + q''_{sol,e} \right) / (Z_{i,0} + h_{ci,i,j}) \quad (4.8)$$

A equação que fornece o valor de energia necessária do condicionador de ar para cada incremento de tempo vem da equação do balanço com o ar interior:

$$q_{sys,j} = \sum_{i=1}^{n_{sup}} A_i h_{ci} (T_{si,i,j} - T_{a,j}) + q_{CE} + q_{IV} + \rho c_p V \frac{dT}{dt} \quad (4.9)$$

Sendo n_{sup} o número total de superfícies internas da zona.

O modelo simulado no EnergyPlus também faz o balanço de massa para resolução da umidade absoluta do ar interior da zona térmica. A formulação para o cálculo da umidade é semelhante a do balanço de energia do ar interior, basicamente substituindo a temperatura

pelo conceito de umidade do ar. A equação diferencial resultante também é resolvida por diferença finita de terceira ordem. A quantidade de umidade no ar interior influencia na potência requerida do sistema de condicionamento de ar, contudo, nesse trabalho as zonas estudadas são naturalmente condicionadas.

4.2. METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DO ENVOLTÓRIO DE TERRA

Para simular o efeito térmico que a terra causa na residência ao longo do ano, foram utilizados os valores de temperatura do solo para as profundidades 0,5 m, 2 m e 4 m, que são disponibilizadas pelo arquivo climático de Porto Alegre [LABEEE, 2012]. O solo que envolve a casa foi representado nas paredes e no piso por uma camada de 1,5 m de terra, sendo que a temperatura dessas camadas, na face mais distante da casa, é prescrita conforme a profundidade da parede e do piso. Os pisos foram simulados como em contato com uma camada de terra que apresenta o perfil de temperaturas de profundidade 4 m, já as paredes com o perfil de 2 m de profundidade. A casa conta com clarabóias, cujas paredes ficam mais próximas da superfície e para essas foi utilizado o perfil de temperaturas de 0,5 m. A figura 4.2 mostra o gráfico com as temperaturas do solo e compara com a linha de tendência da temperatura de bulbo seco de Porto Alegre [LABEEE, 2012]. Nesse gráfico fica evidente a defasagem entre as temperaturas externa de Porto Alegre e do solo. Os dados de temperatura para as profundidades do solo são disponibilizados pelo LABEEE em médias mensais. Para evitar mudanças bruscas de temperatura do solo entre um mês e o próximo, esses valores foram expandidos com interpolação linear mensal para a obtenção de valores diários e inseridos no programa.

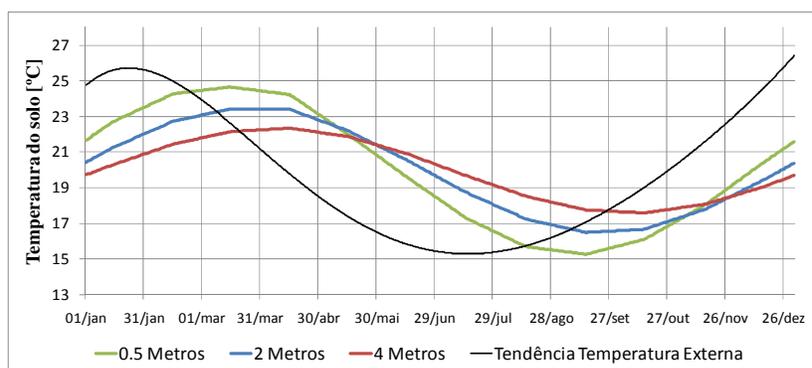


Figura 4.2: Temperaturas do solo e tendência da temperatura externa de Porto Alegre

A cobertura foi dividida em três áreas distintas com aumento linear de espessura, representando o perfil real de terra acima da casa que cresce linearmente a partir da fachada até os fundos da casa. Também foi considerado no cálculo o gramado acima da casa, para isso foi preciso definir uma agenda de precipitação de chuva para o ano climático. Foram utilizados dados de precipitação pluviométrica diários do Jardim Botânico em Porto Alegre [8º Distrito de Meteorologia – Inmet] e gerado um arquivo de entrada de dados para o EnergyPlus com as informações do ano mais representativo em termos de volume total de precipitação, ano 2010.

5. ESTRATÉGIAS DE PROJETO

As estratégias adotadas e simuladas são apresentadas em sete partes.

5.1. APRESENTAÇÃO GERAL

A figura 5.1 mostra uma visão tridimensional da casa enterrada desenvolvida e simulada nesse trabalho e destaca os dispositivos e suas funções. A parte que envolve produção de

energia elétrica com a utilização de painéis fotovoltaicos desenvolvida por Letti, 2012, foi mantida e colocada nas imagens para ilustração do modelo final.

As principais modificações são: instalação de três clarabóias nas áreas que não possuem janelas, aumento da área envidraçada da fachada, utilização de *brises* externos, utilização de cortina automática nas janelas, utilização de chaminé para calor dissipado pela geladeira, aumento da espessura de terra acima da casa, simulação da espessura de terra acima da casa considerando troca de calor latente por evaporação da água com dados pluviométricos de Porto Alegre, utilização de isolamento térmico no envoltório, coleta de água da chuva, coletores solares e utilização de fogão à lenha na casa para aquecimento da água e conforto térmico no inverno.

Os equipamentos são fontes de calor dentro da casa protegida pela terra. A geladeira é o que mais produz energia, sendo responsável por adicionar 40 kW.h de energia por mês na residência (ver tabela A3). Para que durante o verão esse calor não seja adicionado na casa, o condensador da geladeira fica separado do ambiente interno e ligado a uma chaminé, conforme figura 5.1, assim por efeito térmico esse calor é direcionado para o exterior. No inverno essa saída é fechada e o condensador contribui para esquentar o ambiente interno.



Figura 5.1: Quadro geral da casa protegida pela terra

5.2. PROJETO DO ENVOLTÓRIO

Para melhorar as condições do envoltório da residência foram analisadas diversas espessuras e configurações de isolamento térmico na casa. A única construção opaca que não possui isolamento térmico é o piso. Essa configuração se mostrou mais eficiente porque privilegia a troca térmica de dentro da residência com o piso, que é a construção que está em contato com um solo numa profundidade maior e, portanto, com curva de temperatura mais estável (ver figura 4.2). O piso desempenha a importante função, principalmente durante o verão, de esfriar a casa. O isolamento nas demais construções dificulta a troca térmica e conseqüentemente a perda de calor para o exterior e para o solo, em profundidades menos estáveis, nos meses de inverno. A melhor configuração e espessura, juntamente com os demais materiais construtivos para cada construção estão na tabela A1.

5.3. ÁREA ENVIDRAÇADA ÓTIMA

A área total envidraçada e o tipo de vidro foram obtidos através de diversas simulações, visando manter a temperatura operativa dentro da casa num nível aceitável para o conforto térmico. A temperatura operativa é a média ponderada entre a temperatura do ar e a das superfícies internas, ponderada pelos respectivos coeficientes de transferência de calor. A fachada principal possui em 56 % de sua área total vidros duplos, formados por duas camadas de vidro transparente. O vidro exterior tem uma camada *Low-e* de baixa emissividade no infravermelho longo voltada para o espaço entre os dois vidros, para proteger a película. Além disso, esse vidro é seletivo, ou seja, transmite 77 % de luz visível e apenas 43 % de radiação térmica. Isto significa que esse vidro possui boa transmissividade de luz com relativamente baixa transmissividade de calor. Dessa maneira foi possível instalar uma grande área

envidraçada nesses locais sem esquentar muito os ambientes durante as horas de alta radiação solar. De acordo com as simulações realizadas no EnergyPlus, o vidro *Low-e* seletivo se mostrou eficiente para reduzir as horas de desconforto de frio durante o inverno, pois sua baixa emissividade de ondas infravermelhas dificulta a transferência de calor para o exterior. A área envidraçada das clarabóias é composta pelos mesmos vidros da área envidraçada da fachada.

5.4. ILUMINAÇÃO NATURAL

O aproveitamento da iluminação natural é um dos fatores mais importantes para a economia de energia e para o conforto nas edificações. Apesar de o projeto proposto estar parcialmente coberto por terra, as aberturas foram calculadas de forma a utilizar a luz natural disponível sem causar desconforto nos usuários. Nos locais em que a luz natural não consegue chegar lateralmente, ou seja, não é possível colocar janelas, como nos banheiros e na circulação, foram dispostas aberturas zenitais. Assim, apesar de estar semi enterrada, todos os ambientes da casa têm acesso à luz natural. A figura 5.2 mostra a planta baixa da casa e dois cortes. No corte BB é possível ver a clarabóia do banheiro com entrada para o corredor. Na planta baixa estão as posições em que ficam as três clarabóias, nos banheiros e no corredor.

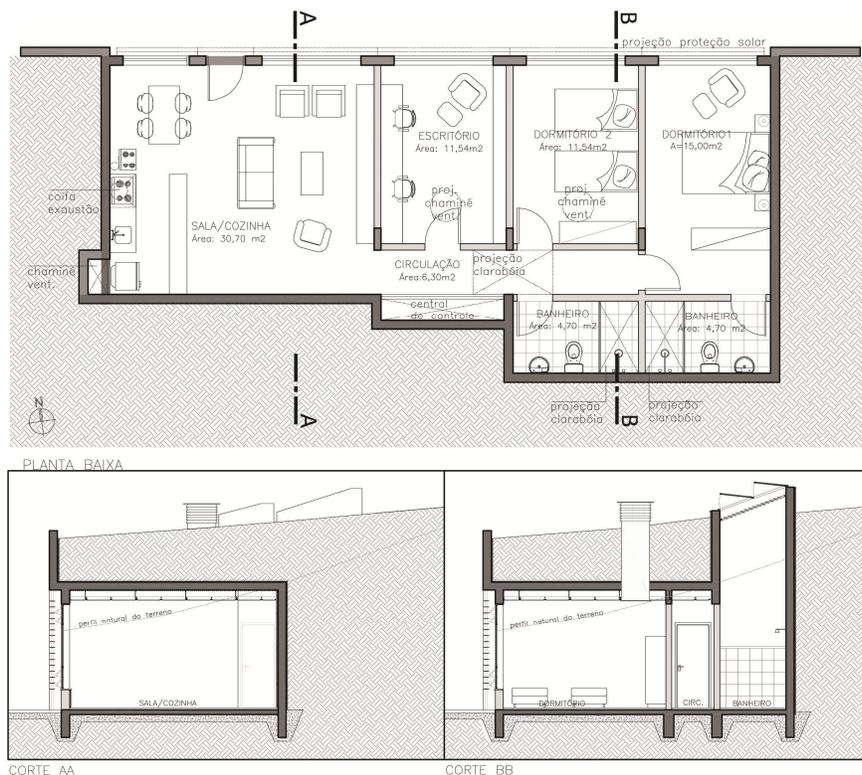


Figura 5.2: Planta baixa e cortes da casa protegida pela terra

A área envidraçada da fachada norte possui proteções solares externas horizontais fixas (*brises*). As lâminas de proteção solar são de alumínio pintado com cor branca, tendo assim refletividade solar e visível de 80 %. A proteção foi projetada para atuar como pequenas prateleiras de luz, dispersando e uniformizando a iluminação natural durante o dia nos dormitórios, escritório, sala e cozinha, além de evitar a formação de manchas de sol nesses ambientes. Também existem proteções internas que são cortinas de tecido com média refletividade (50 %) e baixa transmissividade (10 %). Essas cortinas foram instaladas para que os ocupantes possam ter privacidade e para ajudar a controlar a temperatura interna, por isso na simulação elas foram consideradas fechadas durante a noite e, durante o dia, foram

automatizadas para fechar automaticamente quando a radiação solar na janela chegar até 300 W/m². Esses dispositivos substituíram os tubos de luz e as prateleiras de luz utilizadas por Letti, 2012, para aproveitamento da luz natural na casa.

As clarabóias também estão equipadas com proteções solares em forma de lâminas horizontais, com mesmas cores e configuração de ângulo que os da fachada, para permitirem a regulação da quantidade de radiação que chega até os ambientes e também evitar em parte a formação de manchas de sol. Os mapas de iluminação, figura A1, foram obtidos no plano a 0,75 m do piso e no dia 21 de março as 15 h, mesma data e hora utilizada no trabalho de Letti, 2012. O valor médio de iluminação em todos os ambientes está acima do valor médio recomendado pela norma ABNT-NBR 5413 para residências, que é de 300 lux.

5.5. VENTILAÇÃO NATURAL

A ventilação natural é importante para a renovação do ar e para regular o conforto térmico do ambiente, podendo tanto somar calor como também retirá-lo do ambiente. A ventilação natural pode funcionar ou por efeito chaminé ou por efeito do vento. Esses dois princípios funcionam independentemente e se somam caso ambos estejam atuando. Letti, 2012, descreveu a metodologia que o EnergyPlus utiliza para a simulação desses mecanismos.

A ventilação da casa usa as janelas, as três clarabóias e as duas chaminés de ventilação, que estão nos quartos menores, conforme a figura 5.1 e 5.2. Não foi necessário o uso da chaminé no dormitório 1, pois está diretamente ligado ao banheiro e à circulação, ambos com clarabóias. Nos dormitórios, na circulação, na sala e na cozinha as janelas possuem aberturas na parte inferior que são responsáveis pela movimentação de ar. No caso desses ambientes os mecanismos de chaminé e de arraste funcionam juntos, proporcionando uma boa ventilação natural. Nos banheiros, as clarabóias atuam como entrada e saída de ar, já que são ambientes com menor área. Nesse caso, como não existe diferença de altura entre a entrada e a saída de ar, somente o mecanismo de arraste do vento é atuante, considerando que a porta do banheiro esteja fechada. Nos mecanismos de ventilação natural, a menor área atua como um limitador da vazão, contudo, conforme a diferença entre as áreas é aumentada a vazão também aumenta. A função que determina o aumento na vazão causado pelo excesso de área é descrita em ASHRAE Fundamentals, 2009 e foi utilizada nesse trabalho.

A ilustração do fluxo da ventilação natural pode ser vista na figura 5.3. A tabela A2 mostra a altura e as áreas de entrada e de saída consideradas para ventilação natural bem como o fator de aumento de vazão por excesso de área. As aberturas foram automatizadas em função da temperatura de bulbo seco interna dos ambientes, com limite mínimo de 21^o C e máximo de 30^o C.

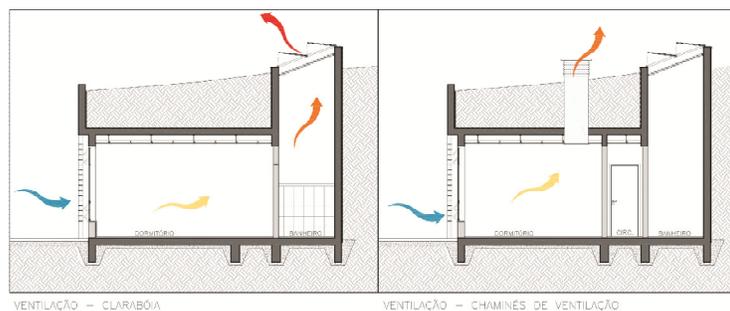


Figura 5.3: Ilustração do fluxo de ventilação natural

5.6. SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA

Com o objetivo de utilizar somente recursos renováveis na casa protegida pela terra, foi desenvolvido um sistema de aquecimento de água. O sistema pode ser visto no diagrama esquemático da figura 5.4 e conta com três reservatórios de água, sendo um de água fria e os outros dois de água quente.

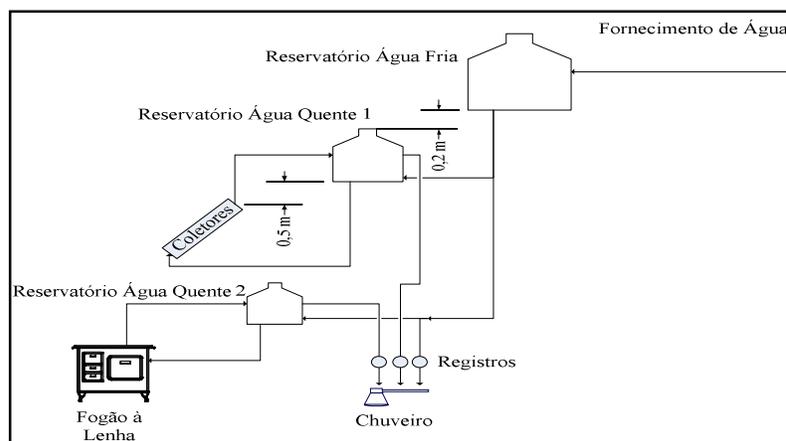


Figura 5.4: Diagrama esquemático do sistema de aquecimento de água

O reservatório de água quente 1 armazena água que é aquecida por meio de um conjunto de painéis coletores de radiação solar. Ao todo são seis painéis com 1 m² de área cada. O desempenho desses painéis foi simulado e comparado com o calor consumido em água quente pela casa. Para estimar o calor consumido em água quente, foram retirados de [ASHRAE Handbook—HVAC Applications (SI) – 2007] a temperatura da água utilizada no banho, 43° C, e também quantidade média de água utilizada em cada banho, 67 litros. A temperatura da água no tanque 1 foi considerada igual a temperatura do solo a 0,5 m de profundidade, já que esse tanque foi considerado isolado e enterrado a 0,5 m abaixo da superfície. Utilizando o calor específico e massa específica da água para a temperatura média de 30 °C foi possível determinar a energia necessária para o aquecimento.

Para suprir a casa protegida pela terra com água quente no inverno, quando a radiação solar é menor e a demanda por água quente é maior, foi adicionado a esse sistema outro subsistema. O reservatório de água quente número 2 é aquecido por um fogão à lenha. Esse fogão utiliza energia renovável disponível no local, ajuda a manter o conforto térmico na residência durante o inverno e possui ótima capacidade de aquecimento de água. Diversos fabricantes fornecem o reservatório, tubulações e conexões para instalação desse tipo de sistema. Para esse trabalho foi escolhido um tanque de 300 litros considerando que o consumo médio de água quente por dia estimado é de 0.266 m³ (266 litros). A energia total dissipada pelo fogão para dentro da residência foi estimada em 5,33 kW.h por dia, 15 % do valor total de calor liberado pela queima da lenha no fogão. O calor total produzido pela queima da lenha foi retirado do trabalho de Teixeira, A. e Resende, R., que estimaram o consumo médio diário de lenha para fogão do município de São João d'Aliança – GO e o calor total médio produzido por dia.

O sistema funciona sem bomba, apenas por efeito termossifão. Para isso, a base do tanque de água fria está a 0,2 m acima do topo do reservatório de água quente 1 e o sistema de coletores fica a 0,5 m abaixo do fundo do tanque de água quente 1. Ambos os reservatórios estão isolados e enterrados protegidos por alvenaria, para diminuição das dissipações térmicas, e situados na colina atrás e acima da casa. O reservatório de água quente 2 fica dentro da residência logo acima do fogão à lenha. Com esse sistema, os banheiros possuem três registros de água, cada um correspondente a um reservatório. Dessa maneira o usuário tem controle da mistura, para escolher a temperatura que deseja.

5.7. COLETA DE ÁGUA DA CHUVA

A coleta de água da chuva é uma maneira eficiente de economizar água tratada e pode ser utilizada para suprir os sanitários. A casa possui um sistema de coleta que utiliza a área dos painéis fotovoltaicos e dos coletores térmicos. A projeção horizontal da área do conjunto de

painéis e coletores é de 21 m². Para simular o desempenho desse sistema, foram utilizados os dados de precipitação de Porto Alegre, de acordo com as medições realizadas no Jardim Botânico [8º Distrito de Meteorologia – Inmet], e também uma estimativa de consumo diário de água nos sanitários, retirada da apostila disponibilizada no *site* do LABEEE [site <<http://www.labeee.ufsc.br/~luis/ecv5644/apostilas/aparecon.pdf>>, acessado em setembro de 2012]. O consumo de água nos sanitários foi estimado em 82 litros por dia, considerando um volume de água para cada descarga de 6,8 litros e 12 acionamentos por dia. O tanque de água coletada fica acima da laje de cobertura da residência, enterrado, e possui capacidade de 1000 litros.

6. RESULTADOS

Os resultados são apresentados divididos em conforto térmico e energia.

6.1. RESULTADOS CONFORTO TÉRMICO

A norma ASHRAE 55 estabelece a faixa de temperatura operativa de 19 a 28º C para condições de conforto térmico e a norma ASHRAE 90.1 limita a quantidade de horas que pode estar fora dessa faixa em 300. A casa protegida pela terra apresentou durante o ano climático 241 horas de desconforto de frio e 50 horas de desconforto de calor das 8760 horas do ano, com base nesse intervalo de temperaturas, ficando assim abaixo do limite de 300 horas.

Foi realizada também uma análise de graus-hora para as horas em que a casa esteve em desconforto. Os graus-hora representam quantos graus em relação a cada hora de desconforto estavam acima ou abaixo do limite estabelecido. O número total de graus-hora representa o total de horas de desconforto multiplicado pelo total de graus acima ou abaixo do limite. Para a casa protegida pela terra, o número total de graus-hora de frio foi 78,7 e o número total de graus-hora de calor foi 61,2. Como o número de horas de desconforto de frio foram 241, verifica-se que em média cada hora de desconforto de frio ficou a 0,33 graus abaixo do limite (19º C). Com o mesmo raciocínio, em média cada hora de desconforto de calor ficou a 1,22 graus acima do limite (28º C).

O gráfico da figura 6.1 mostra como a temperatura operativa do ambiente formado pela sala, cozinha e circulação varia ao longo do ano em comparação com a temperatura externa de Porto Alegre. Mesmo com a alta amplitude térmica do clima de Porto Alegre a casa protegida pela terra e seus sistemas manteve a temperatura operativa interna com baixas variações.

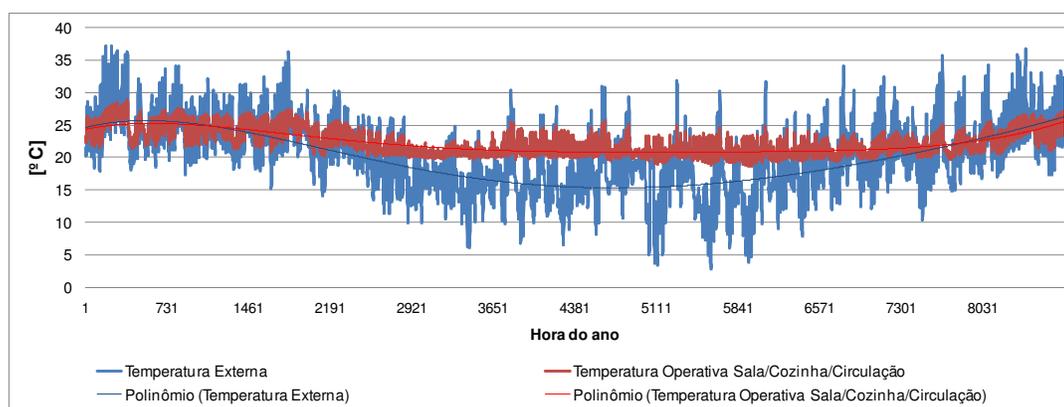


Figura 6.1: Temperatura operativa interna e temperatura externa de Porto Alegre

6.2. RESULTADOS ENERGIA

O gráfico da figura 6.2 mostra a quantidade de calor adicionada ao tanque de água quente 1 diariamente pelo conjunto de painéis com sua curva de tendência e também os

valores consumidos pela casa. É possível ver que o subsistema composto apenas pelos coletores consegue suprir essa demanda de água quente durante os meses de verão e meia estação, mas durante o inverno isso não acontece, já que a radiação solar é menor. Esse resultado mostra a necessidade de outro subsistema para suprir a casa com água quente no inverno. O valor total de energia produzida pelos coletores no ano é de 2.567 kW.h e a estimativa para o calor total consumido no ano é de 2.579 kW.h.

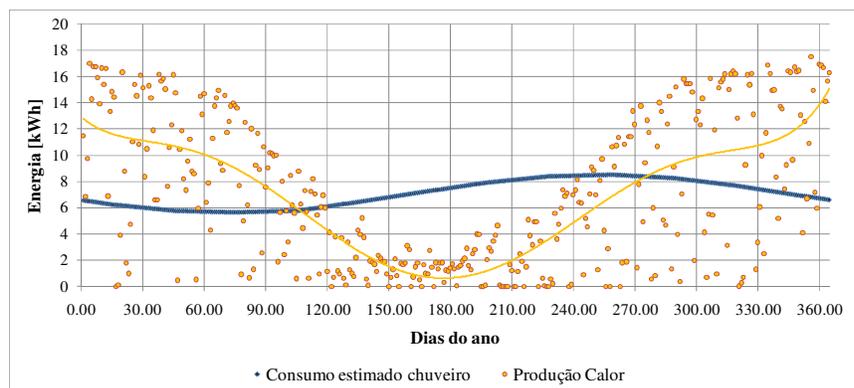


Figura 6.2: Produção e consumo de calor diários

Para o sistema de coleta de água, o gráfico da figura 6.3 mostra o volume de água coletada, o volume de água utilizada e o volume de água acumulada no tanque de água de capacidade 1000 litros para cada dia do ano. Com o tanque de 1000 litros o sistema supre a casa durante 255 dias do ano, ou seja, 70 % dos dias do ano.

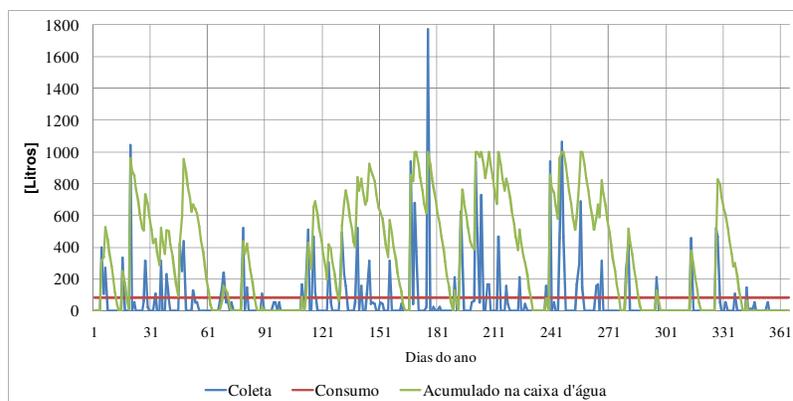


Figura 6.3: Desempenho do sistema de coleta de água com tanque de 1000 litros

Na figura 6.4 está o balanço anual de energia separado por mecanismo de ganho ou perda de calor para cada zona térmica da casa. Esse gráfico reflete a estratégia de utilização de uma grande área envidraçada na casa, pois o principal meio de adição de calor são janelas. Além disso, fica evidente o ganho de calor com a utilização do fogão à lenha, que aparece como equipamento, na área composta pela sala, cozinha e circulação. Os principais meios de perda de calor na casa durante o ano são a condução nas construções opacas e a ventilação. A perda de calor por condução reflete o efeito dos perfis de temperatura do solo em contato com as paredes, piso e teto da casa. A ventilação também conseguiu ajudar bastante no conforto térmico devido ao dimensionamento das aberturas e também a lógica de controle utilizada.

Os ganhos de calor por pessoas, lâmpadas e equipamentos eletrodomésticos são muito pequenos quando comparados aos demais meios. Nas tabelas A3 e A4 estão os dados de potência e consumo considerados para as lâmpadas e para os eletrodomésticos.

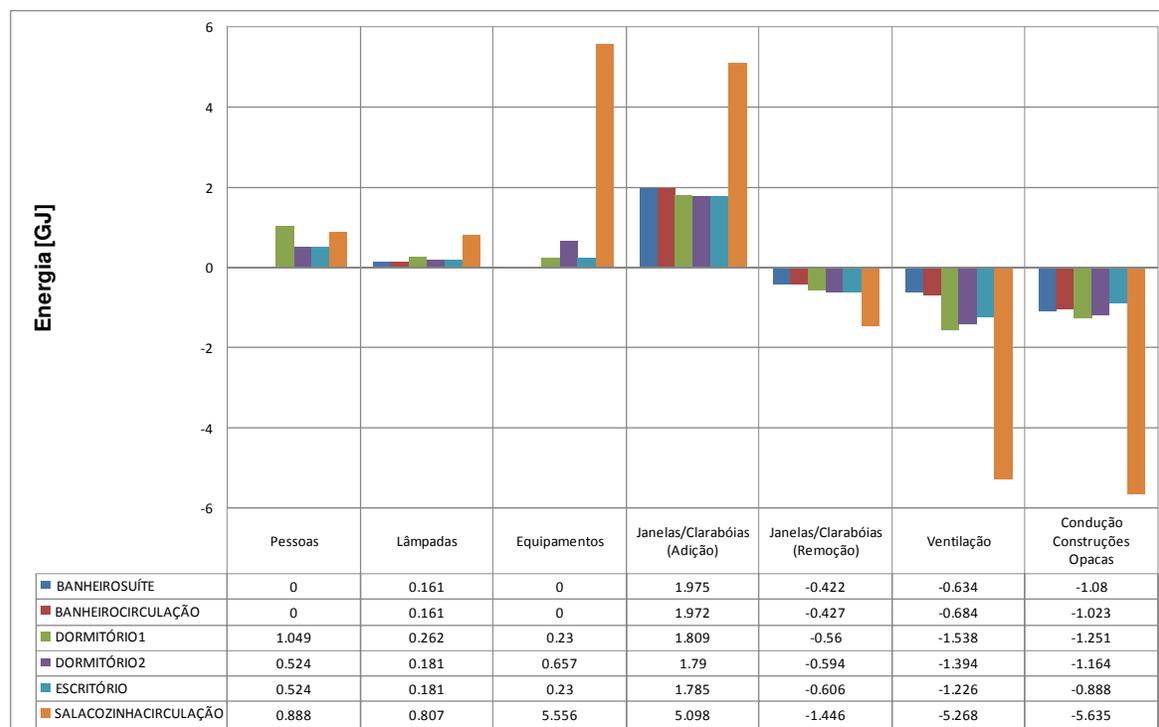


Figura 6.4: Balanço anual de energia separado por zona térmica e mecanismo de ganho/perda

7. CONCLUSÕES

As estratégias propostas para a casa protegida pela terra eliminaram o problema de desconforto de frio, ao todo somente 291 horas do total de 8760 de horas do ano a casa esteve fora da faixa e de temperatura considerada, de 19 a 28° C. A análise de graus-hora permitiu ainda verificar que mesmo quando a residência atinge temperaturas fora da faixa considerada, os valores se mantêm muito próximos dos limites. A utilização de clarabóias se mostrou uma boa alternativa para os tubos de luz, pois permitem maior controle dos ocupantes sobre a quantidade de luz e calor que entra no ambiente e também atuam como aberturas na ventilação natural. As proteções solares também foram mecanismos importantes, pois além de atuarem como prateleiras de luz, ajudam no conforto térmico regulando a quantidade de radiação que entra no ambiente conforme a hora do dia. O aumento da área envidraçada juntamente com a utilização de vidros seletivos proporcionou a reduzir o desconforto de frio e também não esquentar muito a residência durante o verão.

Esse resultado foi alcançado numa residência naturalmente condicionada, cujos principais mecanismos presentes para retirar calor da residência foram condução de calor para o solo e a ventilação natural, sendo que as aberturas foram automatizadas. Para adicionar calor os principais mecanismos foram a área envidraçada (janelas e clarabóias) e o fogão à lenha, que é ligado somente no inverno. Além disso, a casa protegida pela terra aproveita água da chuva para os sanitários e fogão a lenha e energia solar para aquecer água nos banhos, ou seja, é confortável utilizando soluções pouco ou não agressivas ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, “**ABNT-NBR 5413 Iluminância de interiores**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- Anselm, A. J., “**Passive annual heat storage principles in earth-sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing**”, Energy and Buildings, 2008.
- ASHRAE. “**Fundamentals Handbook**”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2009.
- ASHRAE. “**Applications Handbook**”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2007.
- ASHRAE. “**Standard 55.1 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2004.
- ASHRAE. “**Standard 90.1 – Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2007.
- Chiras, D., “**Down to Earth Homes**”, Mother Earth News, 2003.
- ENERGYPLUS. “**EnergyPlus Engineering Reference**”. U.S. Department of Energy. 2011.
- Hait, J., “**Passive Annual Heat Storage: Improving the Design of Earth Sheltered Homes**”, Mother Earth News, 1985.
- INMET - 8º Distrito de Meteorologia – Jardim Botânico, Porto Alegre. Disponibiliza dados pluviométricos.
- Kimura, K., “**Vernacular Technologies Applied to Modern Architecture**”, Department of Architecture, Waseda University Okubo, 1994.
- LABEE, Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. Disponibiliza arquivos climáticos. Disponível em <http://www.labee.ufsc.br>, acessado em setembro de 2012.
- Letti, A., “**Simulação do Desempenho Termo-Energético de uma Casa Protegida pela Terra**”, Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- NREL, National Renewable Energy Laboratory, “**Earth-sheltered houses**” documento DOE/GO-10097-373, United States Department of Energy, 1997.
- PROCEL, Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/procel> acessado em setembro de 2012.
- Roy, R., “**Earth-Sheltered Homes – There energy-efficient houses are bright, airy, dry and quiet**”, Mother Earth News, 2006.
- Seifert, R., “**Earth-Sheltered Houses – An Energy Factsheet**”, Documento EEM-01359, University of Alaska Fairbanks, 2006.
- Staniec, M., Nowak, H., “**Analysis of The Energy Performance of Earth-Sheltered Houses with Southern Elevation Exposed**”, Eleventh International IBPSA Conference, 2009.
- Teixeira, A. e Resende, R. “**Estimativa do Consumo Residencial de Lenha em uma Pequena Comunidade Rural do Município de São João D’Aliança – GO**” Departamento de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, 2002.
- Xibin, M., Baoyi, C., Jinfeng, M., Wenjie, L., Dongyi, Z., “**Finite Element Modelling of Coupled Heat And Moisture Transfer in Typical Earth-Sheltered Building Envelope**”, Eleventh International IBPSA Conference , 2009.

APÊNDICE A

Tabela A1: Materiais construtivos utilizados na casa protegida pela terra

		Espessura [mm]
Cobertura	Placa de argamassa (proteção manta asfáltica)	20
	Manta asfáltica	-
	Concreto armado	200
	Isolamento térmico	25
	Placa de gesso	19
Paredes em contato com o solo	Placa de argamassa (proteção manta asfáltica)	20
	Manta asfáltica	-
	Concreto armado	200
	Isolamento térmico	25
	Placa de gesso	19
Parede Externa	Emboço	20
	Concreto armado	200
	Isolamento térmico	25
	Placa de gesso	19
Paredes Internas	Emboço	20
	Tijolo	102
	Emboço	20
Piso	Placa de argamassa (proteção manta asfáltica)	20
	Manta asfáltica	-
	Concreto armado	200
	Madeira	13
Janelas Fachada e Clarabóias	Vidro <i>Low-e</i> seletivo	6
	Espaço de ar	6
	Vidro claro	3
Porta	Madeira	25

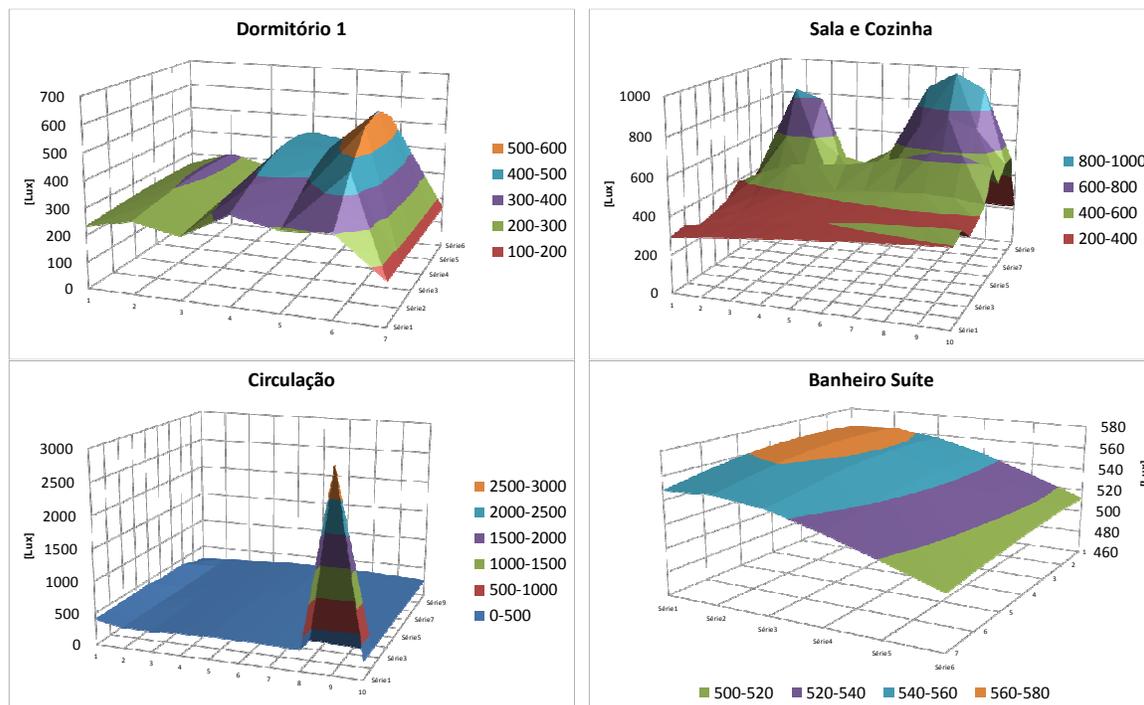


Figura A1: Mapas de iluminação para as 15 horas do dia 21 de março

Tabela A2: Dados de entrada para cálculo da ventilação natural

	Área abertura [m ²]	Área saída [m ²]	Diferença de altura [m]	Fator de aumento da vazão [%]
Sala/Cozinha/Corredor	2,24	1,2	4,37	32
Dormitório 1	1,2	1,29	4,57	-
Dormitório 2 e Escritório	1,2	0,35	4,24	36
Banheiro Suíte	0,65	0,65	0	-
Banheiro	0,65	0,65	0	-

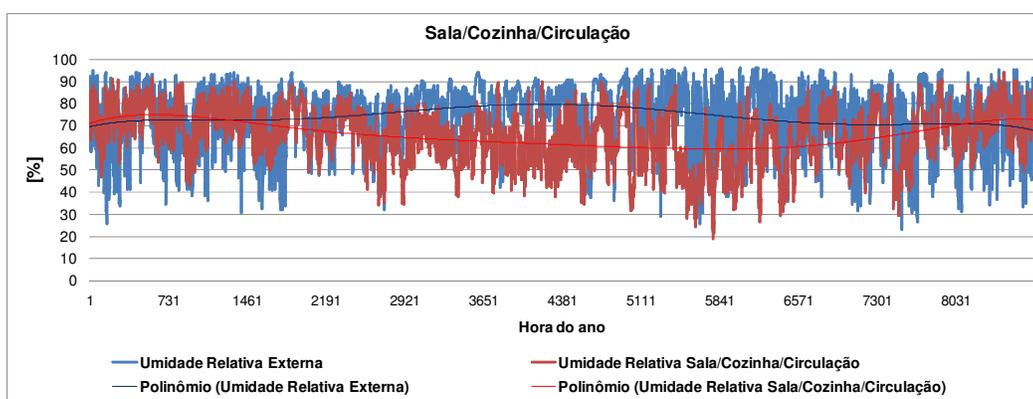


Figura A2: Umidade relativa externa e interna da sala, cozinha e circulação

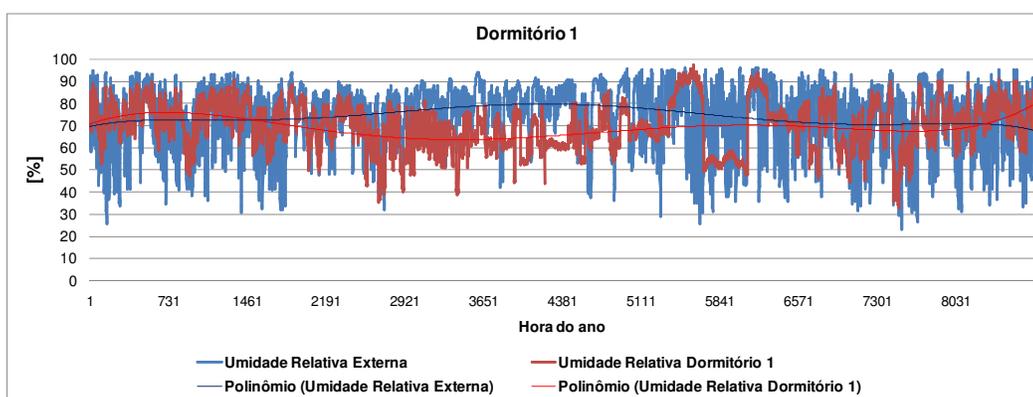


Figura A3: Umidade relativa externa e interna do Dormitório 1

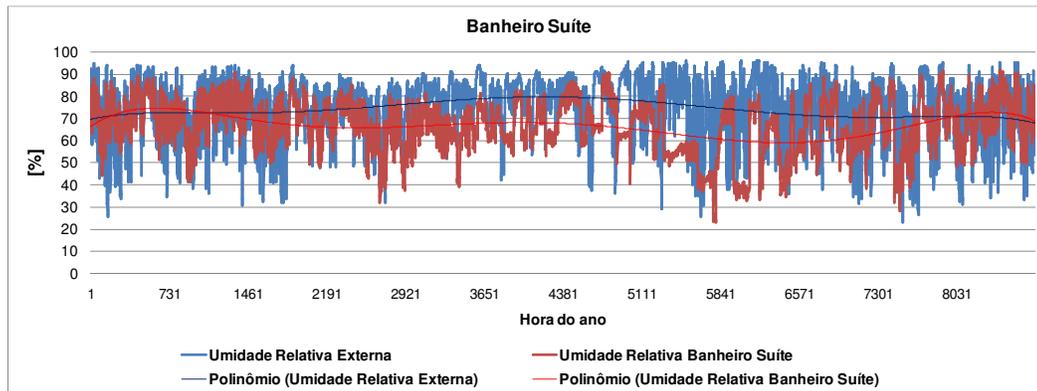


Figura A4: Umidade relativa externa e interna do Banheiro Suíte

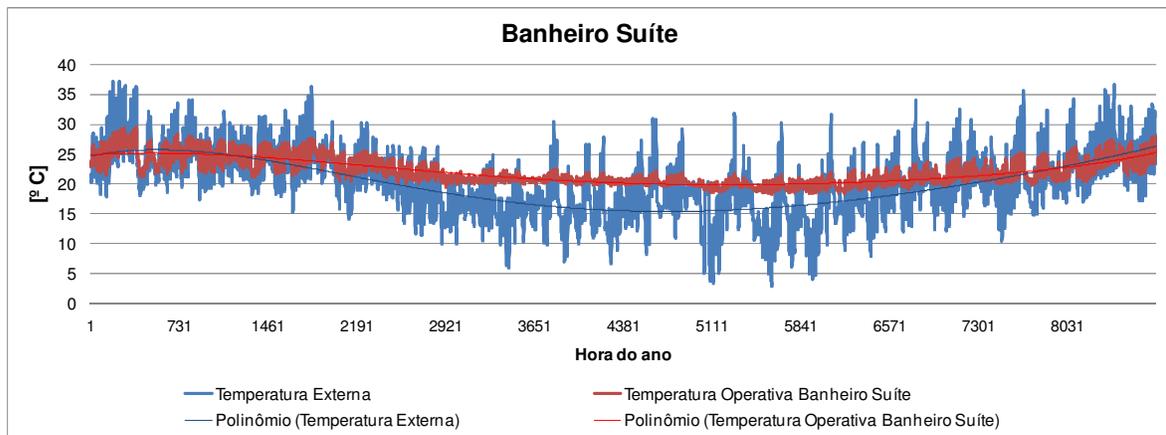


Figura A5: Temperatura externa e temperatura operativa interna do Banheiro Suíte

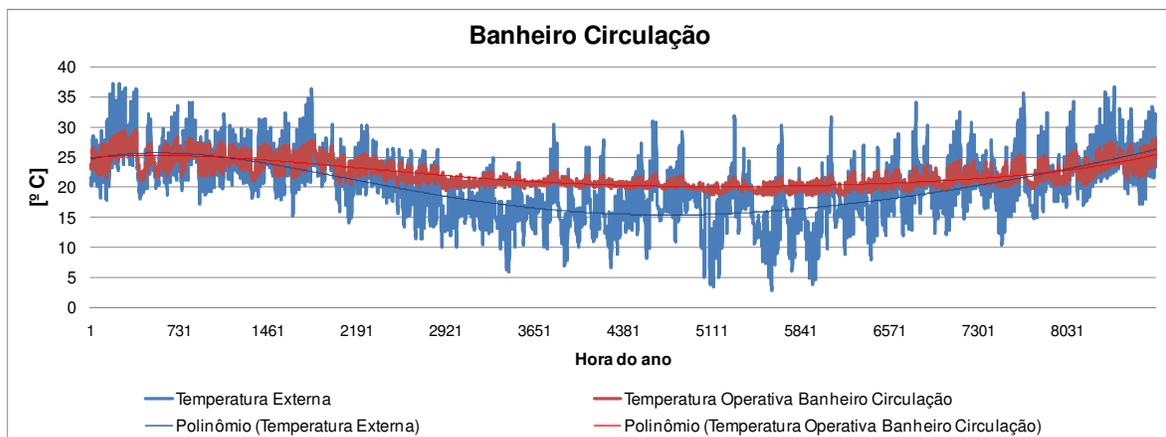


Figura A6: Temperatura externa e temperatura operativa interna do Banheiro Circulação

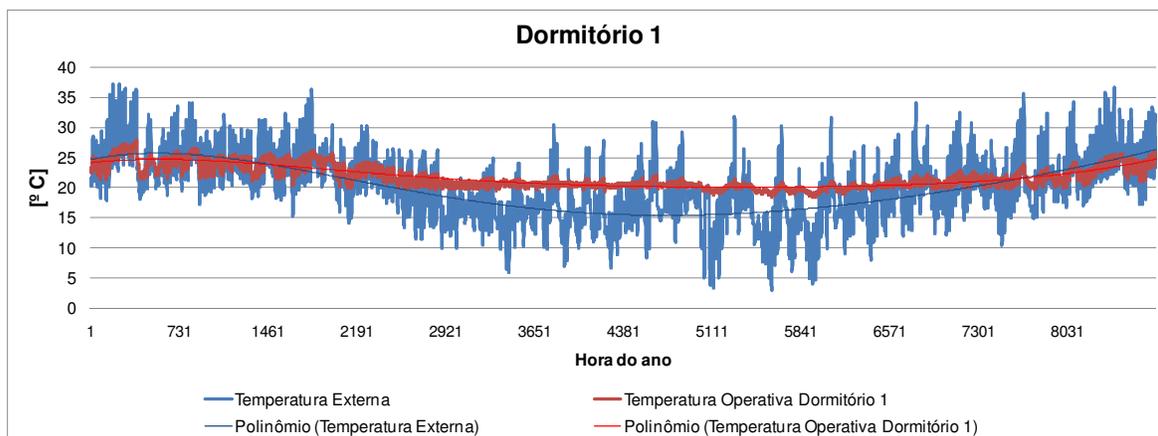


Figura A7: Temperatura externa e temperatura operativa interna do Dormitório 1

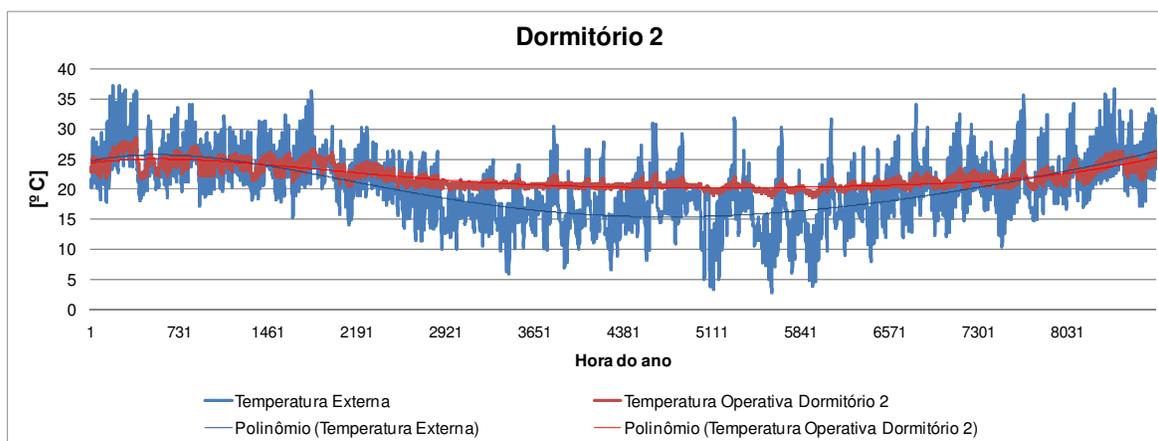


Figura A8: Temperatura externa e temperatura operativa interna do Dormitório 2

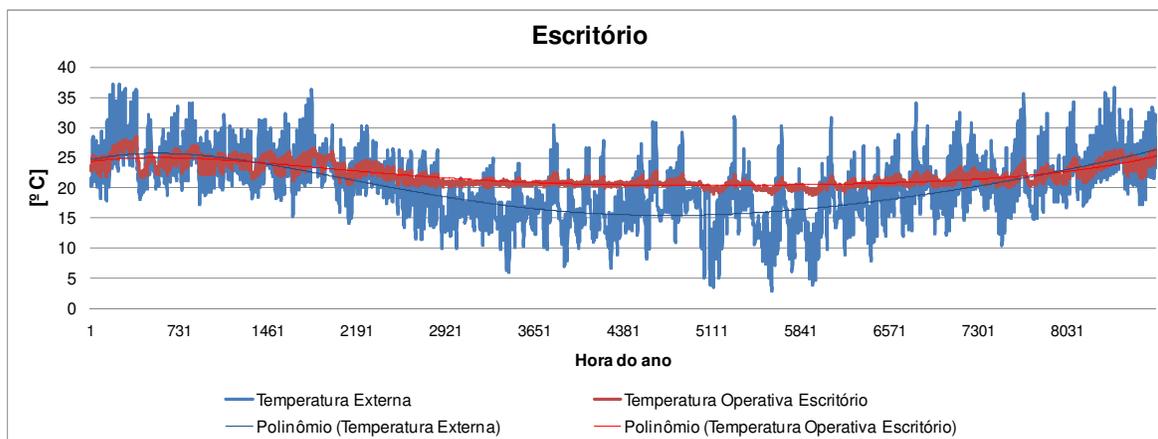


Figura A9: Temperatura externa e temperatura operativa interna do Escritório

Tabela A3: Equipamentos eletrodomésticos considerados na casa protegida pela terra
[PROCEL, 2012]

Ambiente	Equipamentos Elétricos	Potência [W]	Consumo mensal [kWh]
Sala/Cozinha/Circulação	Geladeira Frost Free	55	40
	Microondas	1553	13.98
	Cafeteira	219	6.565
	Torradeira elétrica	800	4
	Liquidificador	358	0.806
	Exaustor Fogão	166	9.96
	TV 40" LED	83	12.45
	Home Theater	350	5.6
	Telefone sem fio	3	2.16
	Videogame	24	1.44
Escritório	Computador	63	15
Dormitório 1	Notebook	20	5
Dormitório 2	Notebook	20	5
Total		3714	121

Tabela A4: Potências de iluminação consideradas por ambiente

Ambiente	Potência Iluminação [W]
Sala/Cozinha/Circulação	206
Escritório	45
Dormitório 1	65
Dormitório 2	45
Banheiros	40
Total	401