



CASA PROTEGIDA PELA TERRA COM ENERGIA LÍQUIDA ZERO

Luiz A. Piccoli Junior (1); Anderson A. Letti (2); Luiza P. Haussen (3); Paulo O. Beyer (4)

(1) Eng. Mecânico, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Eng. Mecânica, luiz.piccoli@ufrgs.br

(2) Engenheiro Mecânico, ninoletti@gmail.com

(3) Graduanda no curso Arquitetura e Urbanismo, lu_haussen@hotmail.com

(4) Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, paulo.beyer@ufrgs.br

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Sarmento Leite nº 425, Bairro Cidade Baixa, Porto Alegre – RS, 90050-170, Tel.: (51) 3308-3929.

RESUMO

Neste trabalho é simulado o desempenho termo-energético de uma casa protegida pela terra com o objetivo de se obter um ambiente confortável termicamente, eficiente nos usos e energia e com energia líquida zero. 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. A casa conta com 22 painéis fotovoltaicos para produção de energia elétrica. 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, o sistema de aquecimento se mostrou satisfatório utilizando somente energias renováveis e a produção de energia elétrica anual superou os usos em 928 kW.h.

Palavras-chave: casa protegida pela terra, EnergyPlus, conforto térmico.

ABSTRACT

In this work is simulated the thermal energy performance of an earth-sheltered home, in order to achieve a comfortable, thermally efficiency and net zero energy building. 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. The house has 22 photovoltaic panels for electricity production. 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, the heating system proved satisfactory comfort using only renewable energy and the electric energy production overcame electric energy uses in 928 kW.h.

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

1. INTRODUÇÃO

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. 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.

A umidade do solo é um dos principais fatores que limitam construções de casas enterradas (Xibin et alli, 2009). Caso a água presente no solo não escoe naturalmente para um sítio inferior, 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).

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 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, 1985). 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.

2. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho de uma residência parcialmente enterrada situada na região metropolitana de Porto Alegre para que, sem a utilização de sistemas ativos de condicionamento de ar, apresente conforto térmico. Além disso, a casa deve aproveitar recursos naturais para aquecimento de água dos banhos, captação de água para os sanitários e produção de energia elétrica, de maneira que tenha eficiência energética e apresente balanço anual de energia igual ou superior a zero.

3. MÉTODO

A residência foi desenvolvida e analisada com os softwares EnergyPlus, DraftSight e SketchUp. O ano climático considerado está disponível em LABEEE (2012) e foi obtido com o método TMY (Typical Meteorological Year) que utiliza dados horários registrados pelo INMET entre os anos de 2000 e 2010. As condições ambientais, os métodos adotados para simulação do envoltório de terra e para a simulação da vegetação acima da casa, e os sistemas que compõem a casa são detalhados nos subitens seguintes.

3.1. Condições ambientais

O clima da região de Porto Alegre é classificado como subtropical úmido apresentando grande amplitude térmica e estações do ano bem definidas. O tipo de solo que circunda a casa também influi nos níveis de conforto a serem atingidos pela edificação. Foi considerado um terreno real localizado no sul de Viamão-RS, na região metropolitana de Porto Alegre, com localização geográfica 30°07'01"S, 51°02'15"W. O tipo de solo observado no local é arenoso leve e pouco úmido. As propriedades do solo estão listadas na tabela 1 e foram retiradas de ASHRAE (2007), para um solo com areia leve e 5 % de água.

Tabela 1 – Características do solo arenoso leve com 5 % de água.

Condutividade térmica [W/m.K]	Densidade [kg/m ³]	Calor específico [J/kg.K]
1,4	1285	1076

A terra que circunda a casa deve atuar como um capacitor térmico, defasando a curva de variação de temperatura e também reduzindo a amplitude térmica no interior da residência. O gráfico da figura 1 mostra o perfil de temperaturas para diferentes profundidades do solo e as médias diárias da temperatura de bulbo seco do ar em Porto Alegre, retirados do arquivo climático de Porto Alegre (LABEEE, 2012). Mesmo com a grande amplitude térmica na região, as temperaturas do solo se mantêm numa faixa de 15 a 25 °C. Verifica-se também que a temperatura do solo é defasada em relação às variações externas, devido à grande inércia térmica que possui.

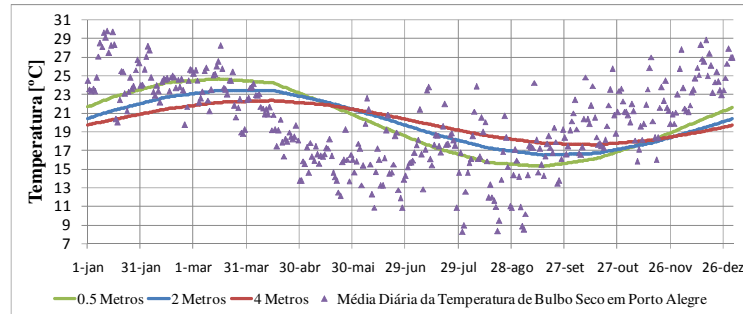


Figura 1 - Temperaturas do solo e médias diárias da temperatura de bulbo seco do ar em Porto Alegre.

3.2. Metodologia para simulação do envoltório de terra e vegetação acima da casa

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 aparecem na figura 1. 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. 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.

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. As espessuras consideradas para a cobertura foram 1,2 m; 1,4 m e 1,6 m. O gramado acima da casa foi simulado com a utilização do modelo *EcoRoof* do EnergyPlus, que considera uma camada de vegetação e terra. Foi simulado um gramado acima da casa com 20 cm de altura. Esse modelo considera também as trocas latentes entre o gramado e o exterior, para isso foi definido 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 diárias de precipitação do ano mais representativo em termos de quantidade anual de precipitação, ano 2010 com 1,3 m de água.

3.3. Apresentação geral da Casa Protegida pela Terra

A casa é parcialmente coberta pela terra, encravada em uma colina de inclinação leve, tendo somente uma fachada exposta que está orientada com azimute de 27 graus. A cobertura é feita por uma camada de terra com vegetação, que evita a erosão. A figura 2 mostra uma imagem em 3D da casa, onde é possível ver seus principais sistemas e suas funções. A residência possui 85 m² de área total e foi dimensionada para uma família de três a quatro pessoas.



Figura 2 – Modelo 3D da casa protegida pela terra.

3.4. Envoltório

Para se obter condições de envoltório satisfatórias 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 por que 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 1). 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 tabela 2 apresenta todas as camadas de materiais considerados na simulação para os grupos construtivos da casa. Nessa tabela pode-se verificar as camadas de terra utilizadas e também as camadas de *EcoRoof* na cobertura. Na cobertura, a camada *EcoRoof* tem espessura constante de 0,5 m, sendo que o restante da camada de solo é representado por terra, totalizando nos valores anteriormente citados de 1,2; 1,4 e 1,6 m. A manta asfáltica tem o objetivo de impermeabilizar as construções em contato com o solo em relação à umidade.

Tabela 2 – Materiais construtivos da Casa Protegida pela Terra.

número	Cobertura 1 (Fachada)	Cobertura 2 (Meio)	Cobertura 3 (Fundos)	Paredes solo	Parede externa (fachada)
1	<i>EcoRoof</i> 0,5 m	<i>EcoRoof</i> 0,5 m	<i>EcoRoof</i> 0,5 m	Terra 1,5 m	Emboço 20 mm
2	Terra 0,7 m	Terra 0,9 m	Terra 1,1 m	Argamassa 20 mm	Concreto 200 mm
3	Argamassa 20 mm	Argamassa 20 mm	Argamassa 20 mm	Manta asfáltica	Isolamento 25 mm
4	Manta asfáltica	Manta asfáltica	Manta asfáltica	Concreto 200 mm	Gesso 19 mm
5	Concreto 200 mm	Concreto 200 mm	Concreto 200 mm	Isolamento 25 mm	-
6	Isolamento 25 mm	Isolamento 25 mm	Isolamento 25 mm	Gesso 19 mm	-
7	Gesso 19 mm	Gesso 19 mm	Gesso 19 mm	-	-

número	Paredes Internas	Piso	Janelas	Porta
1	Emboço 20 mm	Terra 1,5 m	Vidro <i>Low-e</i> seletivo 6 mm	Madeira 25 mm
2	Tijolo 102 mm	Argamassa 20 mm	Espaço ar 6 mm	-
3	Emboço 20 mm	Manta asfáltica	Vidro claro 3 mm	-
4	-	Concreto 200 mm	-	-
5	-	Madeira 13 mm	-	-

3.5. Área envidraçada da fachada

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 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.

3.6. Iluminação natural

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 3 mostra a planta baixa da casa, onde é possível ver as posições em que ficam as três clarabóias, nos banheiros e no corredor. A casa dispõe de controladores de iluminação (*dimmers*) para que a iluminação artificial supra a residência quando a natural não o fizer com a intensidade adequada (300 lux).

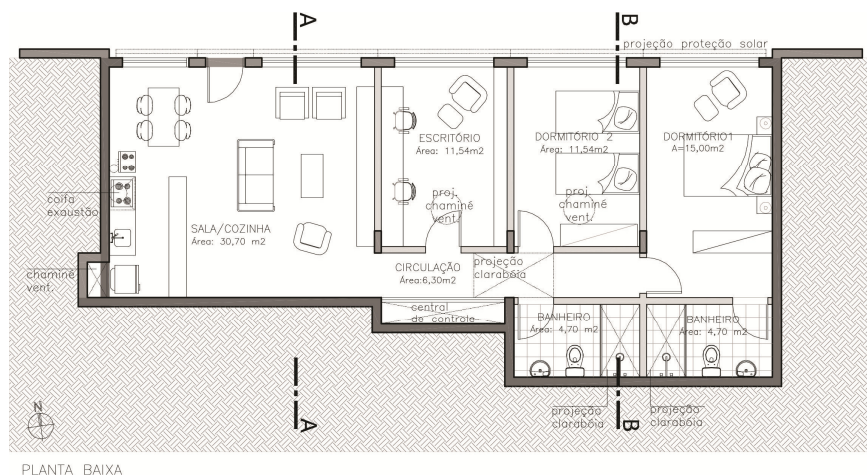


Figura 3 – Planta baixa da Casa Protegida pela Terra.

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.

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.

3.7. Ventilação natural

A ventilação da casa usa as janelas, as três clarabóias e as duas chaminés de ventilação, que estão nos quartos menores, conforme a figuras 2 e 3. 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 4.

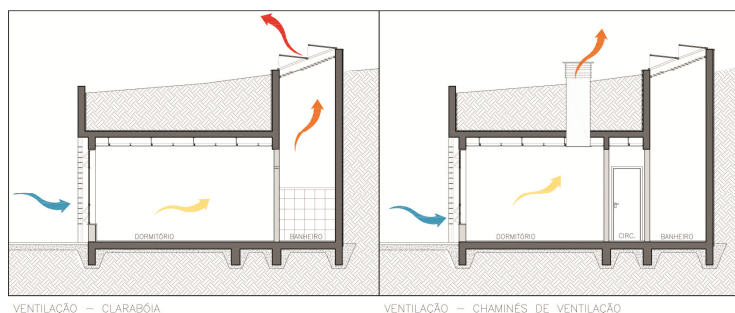


Figura 4 – Ilustração do fluxo da ventilação natural.

A tabela 3 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° C e máximo de 30° C.

Tabela 3 – Dados de entrada para o 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	-

3.8. 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 e conta com três reservatórios de água, sendo um de água fria e os outros dois de água quente.

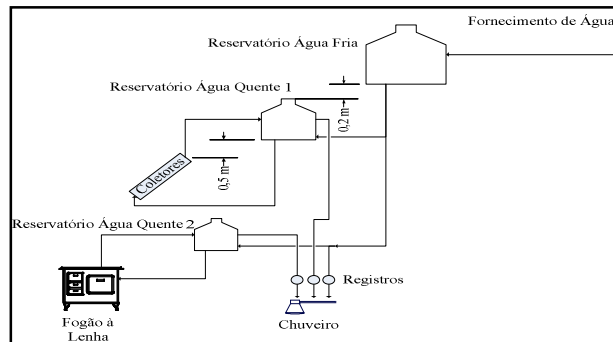


Figura 5 – Diagrama esquemático do sistema de aquecimento de água.

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 (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. (2002), 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.

3.8. 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 (8° 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.

3.9. Produção de energia elétrica

Para suprir as necessidades energéticas da casa protegida pela terra, foram simulados ao longo do ano o desempenho de 22 painéis fotovoltaicos posicionados acima da residência, com as faces orientadas para o norte. Foi utilizado um painel existente no mercado, modelo Kyocera KC 130 GT-2 (catálogo disponível no site do fabricante, <http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5184.pdf>, acessado em setembro de 2012). Cada painel possui dimensões de 1425 x 652 mm e 36 células fotovoltaicas. A eficiência de conversão das células desse painel é de 13,9 %. Foi considerado também o valor de eficiência do conversor elétrico: 92,5 %.

3.10. Equipamentos

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 kWh de energia por mês na residência (PROCEL, 2012). 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 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, esse efeito foi simulado no EnergyPlus.

3.11. Conforto térmico

Para verificação de conforto térmico, baseando-se na norma ASHRAE 55.1 (2004), foi considerada como intervalo de conforto a faixa de 19 a 28° C para a temperatura operativa. Como a residência é naturalmente condicionada, a umidade relativa não é colocada aqui como um objetivo, embora tenha sido verificada.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados e análises são divididos para melhor entendimento.

4.1. Resultados conforto térmico

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 no intervalo 19 – 28° C para a temperatura operativa. Esse número de horas corresponde à quantidade de horas em que alguma das zonas térmicas esteve fora dessa faixa. A norma ASHRAE 90.1 (2007) recomenda 300 horas como valor limite para número de horas fora da faixa de *set point*, no caso de ambientes com de ar condicionado. Interpretado como limite de número de horas de desconforto, pode-se verificar que a casa ficou com um número de horas abaixo desse valor.

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 (19° C). Com o mesmo raciocínio, para 50 horas de desconforto de calor, em média cada hora de desconforto ficou a 1,22 graus acima do limite (28° C).

O gráfico da figura 6 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.

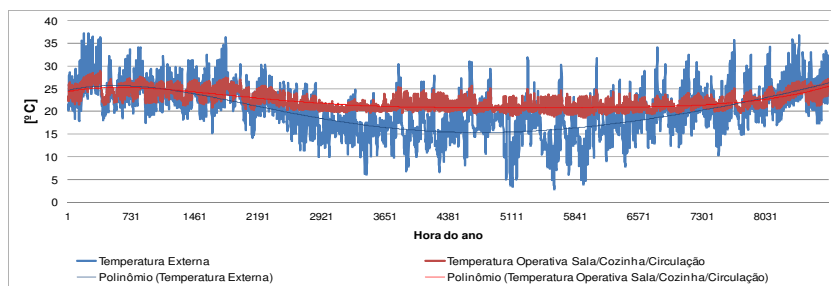


Figura 6 – Temperatura operativa interna e temperatura externa de Porto Alegre.

4.2. Resultados iluminação natural

Os mapas de iluminação, figura 7, foram obtidos no plano a 0,75 m do piso e no dia 21 de março as 15 h. 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. Nas horas do dia em que a iluminação natural não mantiver esse nível de iluminação, as lâmpadas são acionadas por meio do controle automático com *dimmers*. Na circulação, é possível ver a formação de uma mancha de sol, pois os *brises* não evitam totalmente as manchas se a abertura é zenital. Nos outros ambientes não ocorreram manchas.

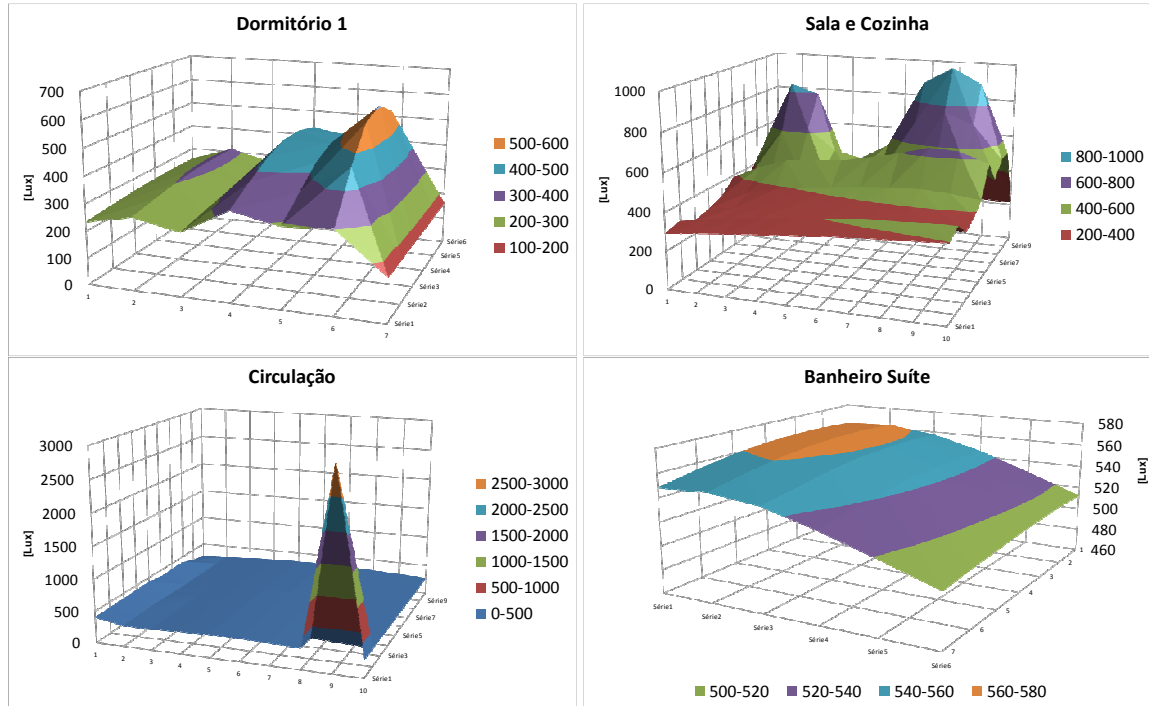


Figura 7 – Mapas de iluminação da casa protegida pela terra.

4.2. Resultados aquecimento de água

O gráfico da figura 8 mostra a quantidade de calor adicionada ao tanque de água quente 1 diariamente pelo conjunto de coletores solares 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.

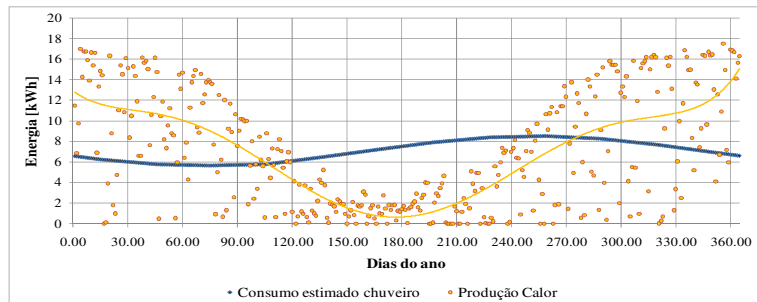


Figura 8 – Produção e consumo de calor diários.

4.3. Resultados coleta de água da chuva

Para o sistema de coleta de água, o gráfico da figura 9 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.

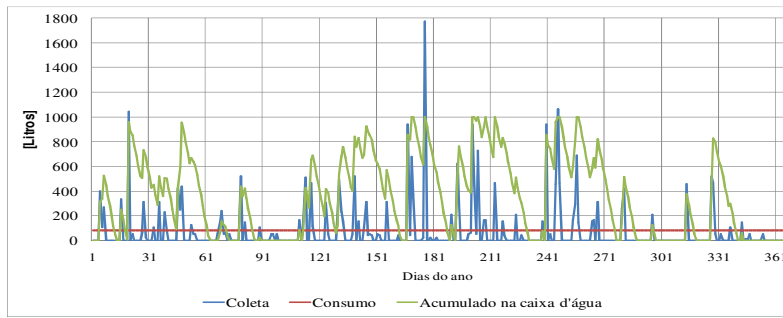


Figura 9 – Desempenho do sistema de coleta de água com tanque de 1000 litros.

4.4. Resultados produção e usos de energia elétrica

O gráfico da figura 10 mostra os valores diários de produção de energia e de consumo elétrico dos equipamentos (lâmpadas e eletrodomésticos).

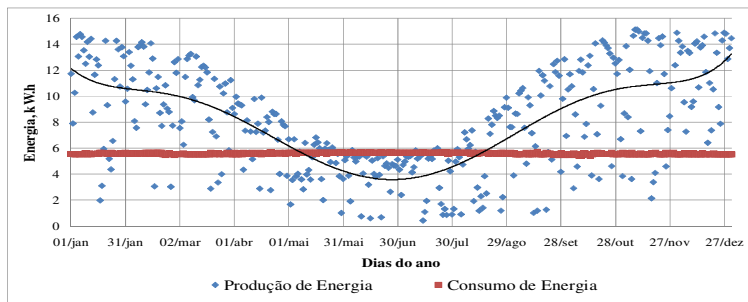


Figura 10 – Produção e consumo de energia para cada dia do ano.

A energia elétrica total produzida em um ano na casa protegida pela terra é de 2967 kW.h, a energia elétrica total consumida é de 2039 kW.h. A casa ficou com o balanço energético positivo com um excedente de 928 kW.h, caracterizando-a como uma residência de Energia Líquida Zero (NZEB - Net Zero Energy Building). A energia excedente pode ser direcionada para a rede elétrica externa e revertida em créditos energéticos (Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL).

4.5. Balanço anual térmico da casa

Na figura 11 está o balanço anual térmico separado por mecanismo de ganho ou perda de calor para cada zona 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.

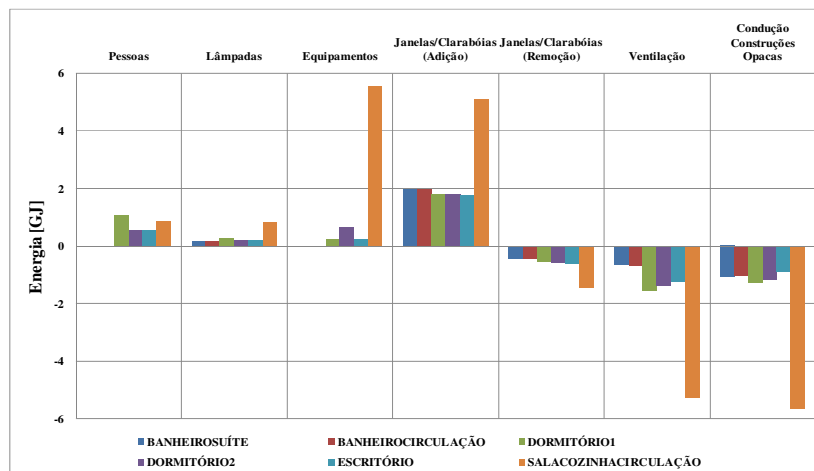


Figura 11 – Balanço térmico anual separado por zona térmica e mecanismo de ganho/perda.

5. CONCLUSÕES

As estratégias propostas para a casa protegida pela terra possibilitaram, mesmo com a grande amplitude térmica de Porto Alegre, manter a temperatura operativa das zonas em níveis aceitáveis de conforto. Ao todo somente 3,32 % das horas do ano a casa esteve fora da faixa e de temperatura operativa considerada. A análise de graus-hora permitiu ainda verificar que mesmo quando a residência atinge temperaturas fora dessa faixa, os valores se mantêm muito próximos dos limites.

A utilização de clarabóias se mostrou eficiente, 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, utiliza fogão a lenha e energia solar para aquecer água nos banhos e para produzir energia, ou seja, é confortável utilizando soluções pouco ou não agressivas ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- HAIT, J. **Passive Annual Heat Storage: Improving the Design of Earth Sheltered Homes**. Mother Earth News, 1985.
- INMET - 8º Distrito de Meteorologia. **Disponibiliza dados pluviométricos**. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/metroclima/default.php?p_secao=16>, acessado em setembro de 2012. – Jardim Botânico, Porto Alegre.
- KIMURA, K. **Vernacular Technologies Applied to Modern Architecture**. Department of Architecture, Waseda University Okubo, 1994.
- LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética de Edificações. **Disponibiliza arquivos climáticos**. Disponível em <<http://www.labee.ufsc.br>>, acessado em setembro de 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. **Disponibiliza dados para equipamentos elétricos domésticos**. Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/procel>>, acessado em setembro de 2012.
- ROY, R. **Earth-Sheltered Homes – These 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.