

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

SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMO-ENERGÉTICO DE UMA
CASA PROTEGIDA PELA TERRA

por

Anderson Andrighetti Letti

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

Porto Alegre, Junho de 2012

SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO TERMO-ENERGÉTICO DE UMA
CASA PROTEGIDA PELA TERRA

por

Anderson Andrighetti Letti

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. Bardo E. Joseff Bodmann

Prof. Daniel Dall'Onder Santos

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 15 de junho de 2012.

Dedico este trabalho aos meus mestres e incentivadores,
Marco Antônio e Helena Vitória Letti.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, aos meus pais, Marco Antônio e Helena, e ao meu irmão e amigo, Vini, pelo amor, carinho e paciência compartilhados durante esta prazerosa caminhada.

À minha namorada Romi pelo amor, companherismo e pelos materiais de pesquisa e inspiração sugeridos durante a confecção deste trabalho.

Aos amigos conquistados durante estes anos de universidade e que se já se tornaram eternos: Mateus (Gallo), Ronan, Miguel, Bolfoni, Felipe (Limitinho), Bruno (Anão), Diego (Gnomo) e Edu Brofman. Sem vocês não teria chegado até aqui com o conhecimento adquirido.

À todos meus amigos, que em algum momento compartilharam comigo momentos de alegria ou decepção durante estes anos de UFRGS, em especial cito: Marcel, Eric, Diego, Costa, Carol e Aline.

À todos meus familiares e amigos de Vacaria.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, por compartilhar seu conhecimento e sua paixão por *Climatização e Eficiência Energética*.

“Aprenda como se você fosse viver para sempre.
Viva como se você fosse morrer amanhã.”
Mahatma Gandhi

LETTI, A. A. **Simulação Do Desempenho Termo-Energético De Uma Casa Protegida Pela Terra**. 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

Este trabalho apresenta uma residência unifamiliar projetada de forma a constituir-se uma Casa Protegida pela Terra. Este tipo de casa é caracterizada por receber terra em sua envoltória para manter as temperaturas internas estáveis e oferecer conforto térmico à seus ocupantes. A motivação para este estudo originou-se da carência de informações para casas protegidas pela terra em climas tropicais e subtropicais, assim sendo, buscou-se representar o comportamento termo-energético deste tipo de construção na cidade de Porto Alegre. Para adequar a habitação às novas exigências da sociedade, de casas sustentáveis e integradas ao meio onde estão inseridas, optou-se pela utilização de climatização do ar de forma passiva, utilização da energia solar para iluminação natural e geração de energia. Através da simulação do comportamento termo-energético da residência utilizando-se do programa destinado a este fim, *EnergyPlus*, observou-se que as temperaturas dos cômodos ficaram dentro do limite de conforto térmico para o ser humano durante a maior parte do ano. A não utilização de sistemas ativos de condicionamento de ar associado ao uso da energia solar para iluminação e geração de energia propiciou que o balanço de energia elétrica gerada pela consumida fosse positivo ao longo do ano.

PALAVRAS-CHAVE: Casa protegida pela terra, *EnergyPlus*, desempenho termo-energético, conforto térmico.

LETTI, A. A. **Simulation of an Earth-Sheltered house thermal-energetic performance.** 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.

ABSTRACT

This paper presents a single-family residence designed in order to constitute an Earth-Sheltered House. This type of house is characterized by receiving soil on its envelope to keep internal temperatures stable and provide thermal comfort to its occupants. The motivation for this study stemmed from the lack of information for earth-sheltered houses in tropical and subtropical climates, therefore, sought to represent the thermo-energetic behavior of this kind of construction in the city of Porto Alegre. To adapt to society's new housing demands, sustainable and integrated into the environment homes, where they are inserted, it was opted for the use of passive air conditioning, using solar energy for daylighting and energy generation. By simulating the thermo-energetic behavior of residence using the program intended for this purpose, EnergyPlus, it was noted that the temperature of the rooms remained within the limits of thermal comfort for the human being for the greater part of the year. No use of active air conditioning systems associated with the use of solar energy for lighting and power generation provided that the balance of electricity produced by consumed was positive throughout the year.

KEYWORDS: Earth-sheltered house, EnergyPlus, thermo-energetic performance, thermal comfort.

Sumário

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	OBJETIVOS	1
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4.	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	3
4.1.	CONDIÇÕES AMBIENTAIS	3
4.2.	RESIDÊNCIA MODELO	6
4.3.	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS	7
5.	PARÂMETROS PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	7
5.1.	MÉTODOS UTILIZADOS PELO ENERGYPLUS	7
5.1.1.	TROCA TÉRMICA COM SOLO	7
5.1.2.	MODELO PARA TUBOS ENTERRADOS.....	8
5.1.3.	MODELO DE VENTILAÇÃO ATRAVÉS DO EFEITO DO VENTO E EFEITO CHAMINÉ.....	9
5.1.4.	MODELO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS	10
5.2.	CONTROLE DE ILUMINAÇÃO	11
5.3.	CONDIÇÕES PARA CONFORTO TÉRMICO	11
6.	ANÁLISES E RESULTADOS	12
6.1.	CONFORTO TÉRMICO.....	12
6.2.	ILUMINAÇÃO	13
6.3.	BALANÇO DE ENERGIA ELÉTRICA	13
6.4.	COMPARATIVO COM HABITAÇÃO CONVENCIONAL	14
7.	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	14
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	ANEXOS.....	19

1. INTRODUÇÃO

O aproveitamento pelo homem das características térmicas oferecidas pelo solo é evidenciado desde o período paleolítico, sendo parcialmente abandonado com a criação das cidades. Hoje, com a crescente preocupação com a utilização eficiente da energia, observa-se uma tendência de utilizar os recursos energéticos oferecidos pela natureza. É neste contexto que as Casas Protegidas pela Terra estão inseridas, na busca de trocas térmicas com a grande massa térmica que é o solo.

Devido à imensidão do volume do solo e de propriedades de armazenamento de energia e atraso térmico de aproximadamente dois meses em relação as condições climatológicas, as trocas de calor se realizam de forma eficiente com estruturas inseridas neste meio. Estas características do solo, associadas à proteção contra ventos, tempestades e raios solares, fazem com que o projeto de casas protegidas pela terra seja um campo atrativo de estudo e investimentos. Este recente interesse neste tipo de construção é refletido no crescente número de estudos realizados na área, principalmente na Europa e América do Norte. No Brasil, porém, o assunto é relativamente novo e pouco difundido, não havendo muitas pesquisas na área para os diferentes climas existentes no país.

Uma Casa Protegida pela Terra é caracterizada por ser uma construção que possui terra circundando suas paredes externas e, muitas vezes, sobre teto. Este solo que envelopa a casa tem que, necessariamente, ser um volume termicamente significativo para evitar que as amplitudes térmicas do exterior sejam refletidas no interior da residência. Uma boa correlação para exemplificar o comportamento térmico destas residências pode ser observada em porões de casas antigas ou em garagens subterrâneas.

Tendo em vista a necessidade de utilização eficiente de energia renovável e o atual anseio em construções sustentáveis, este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento termo-energético em uma habitação protegida pela terra na região de Porto Alegre e, posteriormente, otimizá-la de tal forma que requisitos de conforto térmico sejam atingidos sem utilização de equipamentos de condicionamento de ar ativos para, finalmente, buscar transformar a residência em um Prédio de Energia Líquida Zero, visando gastar pouca energia e produzir o que se gasta.

2. OBJETIVOS

O ser humano vêm se assistindo de habitações protegidas pela terra desde o início de sua jornada pelo planeta, porém poucos estudos foram realizados para demonstrar o comportamento termo-energético deste tipo de construção em regiões de clima tropical e subtropical. O presente trabalho tem o intuito de gerar informações sobre dito comportamento em uma residência familiar na região de Porto Alegre com o uso de sistemas de condicionamento de ar passivo. Outro objetivo almejado será o de projetar a casa de tal forma que esta se torne um Prédio de Energia Líquida Zero, ou PELZ, com investimento inicial semelhante ao de uma casa convencional com dimensões equivalentes.

Para que o primeiro e segundo objetivos sejam, concomitantemente, alcançados serão utilizados os recursos naturais disponíveis para condicionamento de ar e transformação de energia elétrica a partir de fontes naturais renováveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O solo possui a característica de agir como um capacitor térmico, acumulando calor no verão e liberando no inverno. Este grande capacitor tem um atraso térmico, *thermal lag*, de aproximadamente seis semanas em relação a temperatura média do ar [Roy, 2006]. Essas duas características, armazenamento e atraso, da Terra asseguram que o solo não irá sofrer variações de temperatura significativas com mudanças climáticas. Por essas razões o solo raramente atinge a temperatura do ar em um dia normal de verão, mesmo em pequenas profundidades de solo. Tendo isso em conta, é possível utilizar a terra como um Sistema de

Armazenamento de Calor Passivo Anual, PAHS (sigla em inglês para *Passive Annual Heat Storage System*) [Anselm, 2007].

Casas Protegidas pela Terra, ou CPT, são estruturas construídas utilizando-se da terra como material superficial e, com funcionalidade para atender as necessidades comuns das pessoas. Essas estruturas, no passado, eram construídas por pessoas sem conhecimentos formais em arquitetura ou engenharia pelo fato de que esse tipo de residência poderia fornecer abrigo, conforto e segurança. Contudo, com as recentes buscas por redução do consumo de energia e aumento de eficiência energética nas edificações, têm-se voltado a atenção para casas que utilizam o solo, não só como estrutura, senão como um artifício para a utilização passiva da energia disponibilizada pela terra, [Anselm, 2007].

As primeiras construções protegidas pela terra que se tem registro datam de seiscentos mil anos atrás e foram encontradas em Kamitakamori, no Japão [reportagem publicada na página da revista Japan Times, acessado em 25 de março de 2012]. Em algumas regiões ainda podem ser encontradas vilas inteiras de casas protegidas pela terra como na província de Shanxi, no norte da China, no Vale de Goreme da Capadócia, na Turquia e em Matmata, na região sul da Tunísia, conforme evidenciado por Temeemi e Harris.

Segundo definição do documento DOE/GO-10097-373 do *DoE - United States Department of Energy*, 1997, existem dois tipos básicos de casas protegida pela terra – subterrânea e coberta por terra. A casa do tipo subterrânea representa uma estrutura construída totalmente abaixo da superfície do solo, enquanto que a coberta por terra pode ser construída acima ou parcialmente abaixo desta superfície, com o solo cobrindo uma ou mais de suas paredes. Ambos os tipos construtivos possuem o telhado coberto por terra como um opcional do projeto e este telhado pode ter vegetação para evitar erosão.

A partir destes dois tipos básicos de construção, desenvolveu-se três formas construtivas distintas descritas abaixo e representadas esquematicamente na Figura 3.1:

- Átrio – estrutura Subterrânea, onde um átrio serve como meio de recebimento de iluminação e ventilação e, também, como caminho de entrada para a habitação;
- Planta Elevada – estrutura considerada como Coberta por Terra e construída em escavação realizada na encosta de um morro, onde apenas uma face fica exposta ao exterior, geralmente envidraçada e voltada para a Linha do Equador;
- Planta Coberta – construída sobre a superfície do terreno e, posteriormente, coberta com terra em todas, ou quase todas, as paredes externas.

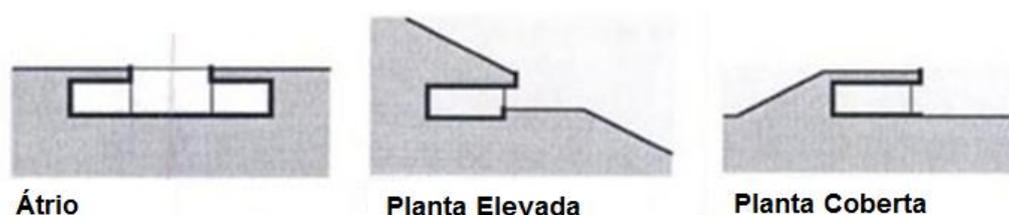


Figura 3.1 Formas construtivas de Casas Protegidas pela Terra

Existem algumas considerações que devem ser levadas em conta antes de decidir-se em construir uma CPT. Deve ser observado o clima, a topografia do terreno, a condição do solo na área onde será efetuada a construção. O documento DOE/GO-10097-373 salienta que a construção terá maior custo-benefício em locais com extremos de temperatura significantes e com topografia favorável para escavação. Outras vantagens e desvantagens das casas protegidas pela terra em relação a casas convencionais são citadas por vários autores. Eckert et alii, 1978, citam como principal vantagem a menor suscetibilidade de uma CPT ao impacto de temperaturas externas extremas, fazendo com que os ocupantes não sintam os efeitos de climas adversos, em outras palavras, a temperatura interna é mais estável do que em casas comuns criando, desta forma, ambientes mais confortáveis. Esta estabilidade térmica é decorrente do fato de a terra na envoltória da residência funcionar como um grande capacitor

térmico absorvendo essas variações bruscas de temperatura. Outras vantagens citadas, tais como a redução de custos com manutenção das superfícies externas, como pintura e limpeza das paredes, redução do ruído no interior da casa e, conforme evidenciado no documento do *DoE* mencionado anteriormente, diminuição dos valores gastos em apólices de seguro, por apresentar maior proteção contra ventos fortes e desastres naturais. Existe também a vantagem de melhor aproveitamento do espaço externo e estético, pois este tipo de residência não gera impacto visual no terreno onde está inserida, [Temeemi et al, 2004].

Muitos autores citam como principal desvantagem a existência de problemas sociais e psicológicos a serem vencidos caso as casas protegidas pela terra sejam implementadas em larga escala. Estes problemas são relacionados ao fato destas casas possuírem poucas janelas contribuindo, assim, para que as pessoas sintam-se isoladas e com ideia de confinamento, gerando a sensação de claustrofobia, [Golany, 1983, citado em Temeemi, 2004]

Segundo o artigo escrito por Temeemi, o alto investimento inicial em estruturas protegidas pela terra é controverso na literatura. Alguns autores afirmam que os custos de construção são muito mais altos do que para casas convencionais construídas de madeira, com dimensões e qualidades semelhantes. A primeira razão para o incremento de valor deve-se ao fator estrutural, pois é necessário uma estrutura reforçada para sustentar a massa do solo sobre a casa. De qualquer forma este custo estrutural não deve ser conclusivo de que casas protegidas pela terra são mais caras que as convencionais. Alguns autores, como Klodt (1985) e Baggs (1991), dizem que os custos são competitivos com os de casas convencionais. Já Carpenter (1994) diz que, em alguns casos, o custo para construir uma casa protegida pela terra é menor que para casas normais, pois o valor extra gasto com as necessidades especiais de uma casa protegida é superado pela economia realizada na compra de janelas, de equipamentos para resfriamento e aquecimento e com a quase isenção de investimentos em acabamentos externos. Temeemi reforça o fato de que a longo prazo as economias obtidas pela redução do consumo de energia justifica o investimento inicial extra.

Infiltração é um inconveniente que deve ser levado em consideração na hora da construção de residências cobertas por terra para evitar transtornos futuros. No que diz respeito a umidade no interior destes modelos a literatura é controversa. Temeemi assegura que não há evidências de efeitos adversos no interior das construções e cita Lee et al, o qual afirma que na Coreia do Sul, lugar de clima quente-úmido, os níveis de umidade no interior das habitações protegidas é mais estável, porém é notável a grande dependência do nível de umidade do solo local.

4. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

Para estudar o comportamento de uma casa protegida pela terra foi proposto um modelo de residência de tamanho médio, localizada na região sul de Viamão, na região de Porto Alegre – localização geográfica 30°07'01"S 51°02'15"W. Esta residência foi construída virtualmente no programa de distribuição livre *Google SketchUp*, onde foram definidas as dimensões da planta baixa, de aberturas e pé direito, e com o auxílio do *plugin OpenStudio* foram definidas as zonas térmicas da mesma, coincidindo com as divisões dos cômodos da casa projetada.

4.1. CONDIÇÕES AMBIENTAIS

O clima da região de Porto Alegre é classificado como subtropical úmido, apresentando grande variação de temperaturas e estações bem definidas durante o ano.

Neste trabalho foi utilizado o arquivo climático da cidade de Porto Alegre disponibilizado pelo *site* do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações – LABEEE/UFSC – o qual apresenta variações de temperatura de acordo com o gráfico da Figura 4.1.

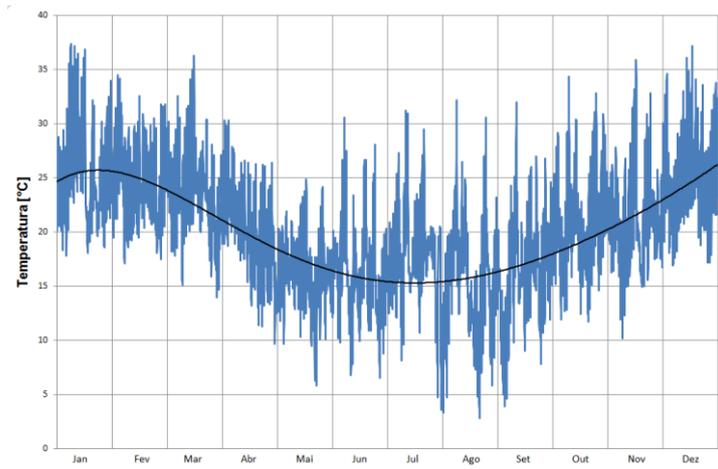


Figura 4.1 Temperatura externa de Porto Alegre durante o ano climático

Para análise higrométrica da cidade de Porto Alegre foi utilizado o programa *AnalysisBio*, desenvolvido pelo LABEEE (LABEE,2010). Este programa indica a porcentagem de horas, em um ano, em que as temperaturas atingem o conforto térmico naturalmente. Tal programa permite definir estratégias de projeto para que o interior da habitação forneça um alto grau de conforto térmico com baixo consumo de energia. Para definir estas estratégias, o programa utiliza a Carta Bioclimática de Givoni, apresentada na Figura 4.2, já com os pontos de temperatura anual de Porto Alegre e onde se pode observar regiões delimitadas por linhas de mesma cor. Cada ponto indica a temperatura e umidade relativa registrado em uma hora do ano, havendo, então, 8760 pontos sobre a carta. As regiões indicam qual deve ser a estratégia a se adotar para fazer com que os pontos nesta determinada região migrem para a área de conforto, região 1 da carta.

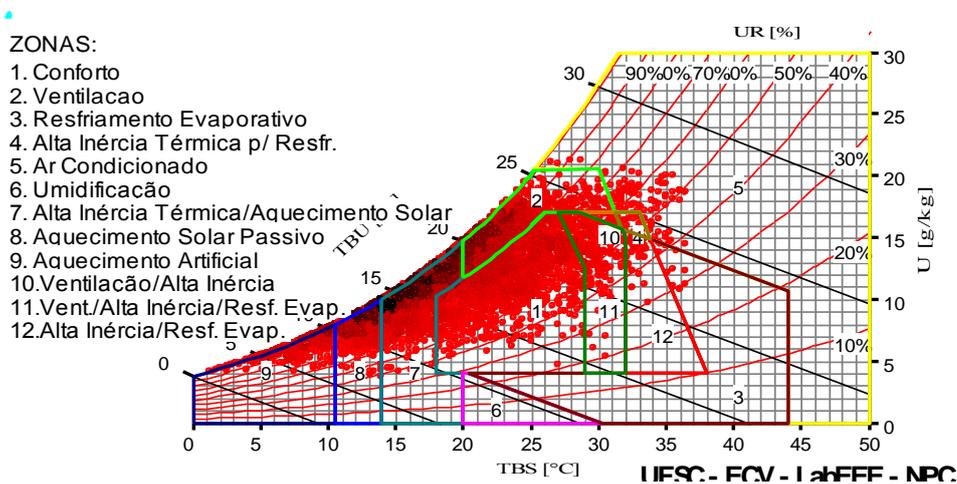


Figura 4.2 Carta Bioclimática para Porto Alegre

O programa relaciona os pontos gerados a partir do arquivo climático com as regiões da carta, que por sua vez foram determinadas de acordo com o modelo de Givoni para países quentes e em desenvolvimento econômico, gerando estratégias de condicionamento térmico passivo, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Dados da carta bioclimática e estratégias passivas para obter conforto térmico

Conforto		22,70%
Desconforto	Calor	25,70%
	Frio	51,60%
Estratégias Para Obtenção de Conforto:		
Calor		
* Ventilação		23,30%
* Alta Inércia para Resfriamento		4,79%
* Resfriamento Evaporativo		4,46%
* Ar Condicionado		1,28%
Frio		
* Alta Inércia Térmica/Aquecimento Solar		33,8%
* Aquecimento Solar Passivo		11,8%
* Aquecimento Artificial		6,07%

A composição do solo ao redor deste tipo de construção desempenha um papel muito importante, pois a condutividade térmica e densidade deste podem viabilizar ou não o projeto, uma vez que as trocas térmicas da residência serão realizadas, principalmente, com o solo. O solo mais adequado, segundo documento do *US Department of Energy* de 1997, é o tipo granular, como areia e cascalho. O motivo pelo qual este é considerado o mais apropriado é por ser bastante permeável o que permite que a água escoe rapidamente e, principalmente, por não expandir e contrair-se conforme a umidade existente. A tabela 4.2 foi adaptada e traduzida do Manual ASHRAE 2007 [Schulz, 2011].

Tabela 4.2 Propriedades Térmicas de Solos

		Densidade seca, kg/m ³	Condutividade, W/(m.K)	Difusividade, x 10 ⁻⁷ m ² /s
Solos				
Argilosa pesada	15% água	1925	1,4 a 1,9	4,86 a 7,06
	5% água	1925	1,0 a 1,4	5,44 a 7,06
Argilosa leve	15% água	1285	0,7 a 1,0	5,44 a 6,36
	5% água	1285	0,5 a 0,9	6,48
Areia pesada	15% água	1925	2,8 a 3,8	9,72 a 12,73
	5% água	1925	2,1 a 2,3	10,76 a 16,20
Areia leve	15% água	1285	1,0 a 2,1	5,44 a 10,76
	5% água	1285	0,9 a 1,9	6,37 a 13,89
Rochas				
Granito		2650	2,3 a 3,7	9,72 a 10,76
Calcário		2400 a 2800	2,4 a 3,8	9,72 a 15,04
Arenito		2570 a 2730	2,1 a 3,5	7,52 a 12,73

As propriedades térmicas do solo utilizadas no presente trabalho foram a de um solo com características de areia pesada com 15% de água, por assemelhar-se muito ao observado no terreno para o qual a casa proposta foi projetada.

A renovação de ar de cada ambiente da residência deve obedecer a norma ABNT-NBR 6401-1980, a qual cita que deve ser insuflado ao interior do recinto 17 m³/h de ar externo por pessoa, ou seja, 4,7 l/s.

Segundo a norma ASHRAE 55-2004 não existe limites para o conteúdo de umidade no interior de habitações naturalmente condicionadas. De qualquer forma os tubos enterrados e tubos de ventilação por efeito do vento e efeito chaminé ajudarão na renovação do ar e controle de umidade.

4.2. RESIDÊNCIA MODELO

O projeto de uma CPT precisa ser diferenciado para buscar iluminação e ventilação eficientes e, ao mesmo tempo, tenham o máximo de superfícies em contato direto com o solo para propiciar as trocas térmicas, chegou-se as dimensões apresentadas na Figura 4.3 para uma residência unifamiliar normal. Nesta figura é apresentada a planta baixa com as dimensões dos cômodos, as áreas internas e os nomes dados às zonas térmicas (os retângulos vermelhos representam os limites das zonas). A orientação geográfica também é mostrada, representando a inclinação de 27°, em sentido horário, de um eixo normal a fachada em relação ao norte geográfico. A altura do pé direito não é mostrada na figura, mas seu valor é de três metros e o piso está a 4 metros da superfície do solo.

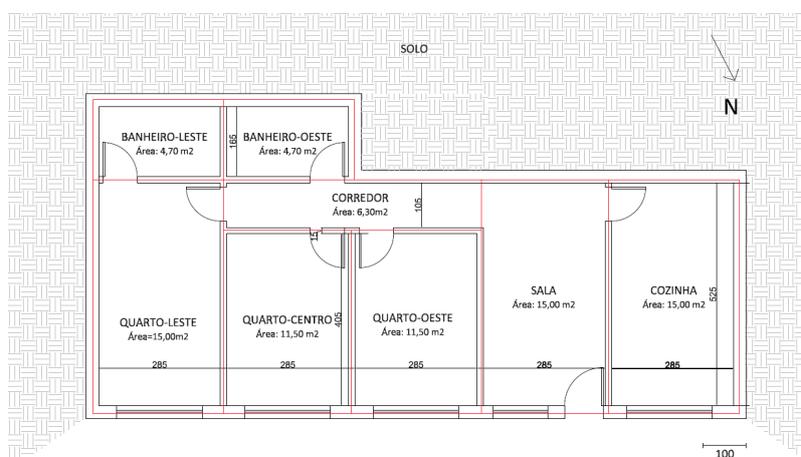


Figura 4.3 Planta baixa da Casa Protegida pela Terra

Através dos dados de entrada no *EnergyPlus* foram definidos os materiais construtivos da residência – apresentados na Tabela 4.3 de forma que o material externo da construção fique na parte superior da linha.

Tabela 4.3 Materiais construtivos

	Materiais	Espessura [mm]
Cobertura	Manta asfáltica	-
	Concreto pesado	200
	Isolamento acústico	19
Paredes externas	Manta asfáltica	-
	Concreto pesado	200
	Estuque	25
Paredes internas	Estuque	20
	Tijolo	102
	Estuque	20
Piso	Manta asfáltica	-
	Concreto pesado	200
	Madeira	13
Janela	Vidro SKN 154™*	6
	Espaço de Ar	6
	Vidro claro	3
Porta	Madeira	25

* Vidro SKN 154™ – produzido pela *Saint-Gobain Glass* – ver anexos.

4.3. FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

Para a análise termo-energética do presente trabalho fez-se necessário o uso de quatro programas computacionais, sendo todos disponibilizados de forma gratuita pelos seus desenvolvedores através da *internet*. Para verificação das condições climáticas da cidade de Porto Alegre e definição das melhores estratégias de projeto utilizou-se o programa *AnalisisBio*. Para modelagem em 3D usou-se o *Google SketchUp*, associado ao *plugin* chamado *OpenStudio* para criação das zonas térmicas e condições de contorno básicas das superfícies, e, finalmente, para a análise termo-energética propriamente dita utilizou-se o *EnergyPlus*.

O programa *AnalisisBio* foi desenvolvido pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, vinculado ao Núcleo de Pesquisa em Construção da Universidade Federal de Santa Catarina, com o objetivo principal de propiciar de maneira rápida e clara, meios de análises de estratégias bioclimáticas para projeto de edificações [Labeee, 2010]. A versão utilizada foi a 2.1.1 – 2.2.

A modelagem geométrica foi criada utilizando-se o *software Google SketchUp*, versão 11.0.11752 desenvolvido pela *Google Inc.*. Em conjunto com o *SketchUp* foi utilizado o *plugin OpenStudio*, versão 1.0.7.390, desenvolvido pelo *NREL – National Renewable Energy Laboratory* para o *United States Department of Energy*. Este adendo tem como objetivo fazer a ligação entre os dados gerados no *SketchUp* com o *EnergyPlus*, transformando os dados do primeiro compreensíveis para o segundo. As zonas térmicas, superfícies de troca térmica, de sombreamento, portas e janelas são definidas através do *plugin OpenStudio*.

O programa *EnergyPlus*, versão 7.0.0, foi utilizado para a análise termo-energética deste trabalho. Este *software* foi desenvolvido pelo *NREL* com a intenção de auxiliar engenheiros e arquitetos para dimensionar sistemas de condicionamento de ar e otimizar o desempenho energético. O objetivo inicial da equipe que criou o *software* foi o ajudar na redução de energia durante a crise energética ocorrida no início da década de 1970. [Getting Started with *EnergyPlus*, 2011].

5. PARÂMETROS PARA DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

5.1. MÉTODOS UTILIZADOS PELO ENERGYPLUS

“De acordo com o manual do *EnergyPlus*, 2010, o programa assume as seguintes hipóteses para o balanço de energia: temperatura uniforme das superfícies, radiação de onda curta e longa uniformes, troca de radiação entre as superfícies, condução no interior do elemento e temperatura uniforme nas zonas térmicas. As três etapas do procedimento do balanço de energia feito pelo programa são calculadas na ordem: superfícies externas, superfícies internas e o ambiente de ar interno de cada zona.” [Extraído de Schulz, 2011].

5.1.1. TROCA TÉRMICA COM SOLO

O módulo padrão de troca térmica com o solo do *EnergyPlus* considera a temperatura do solo constante e definida pelo arquivo climático como a temperatura média mensal de superfície, assim sendo, a temperatura do solo em contato com a cobertura da casa seria a mesma que a do solo em contato com o piso da residência. Esta consideração adotada pelo *software* exigiu que outra metodologia fosse utilizada. Para isso escolheu-se o módulo *OtherSideCoefficient*.

Neste modelo podem ser determinados inúmeros perfis horários de temperatura e associá-los às superfícies desejadas, permitindo, assim, consideração de diferentes temperaturas de solo para diferentes profundidades das superfícies.

Para isto foram criados dois diferentes perfis horários de temperatura, um para a temperatura de solo à 2,5 metros de profundidade e outro para profundidade de 5 metros.

Na constituição dos materiais das superfícies foi introduzido uma camada de terra de um metro de espessura. Esta camada de terra funciona como o capacitor térmico e a temperatura na “superfície externa” desta terra é a temperatura dos perfis horários. Sendo que o perfil de

temperaturas para 2,5 metros é utilizado para fazer a troca térmica com as paredes laterais, onde 2,5 representa a altura média da parede mais um metro de terra sobre a cobertura e 5 metros representa a altura do piso até a superfície do solo mais a espessura da camada de terra na constituição do material do piso.

5.1.2. MODELO PARA TUBOS ENTERRADOS

De acordo com o livro *Engineering Reference*, do *EnergyPlus*, para a simulação de tubos enterrados o programa utiliza um modelo de transferência de calor com o solo bastante complexo para calcular a temperatura do solo na profundidade onde está o tubo enterrado. O objetivo deste item não é o de apresentar este modelo matemático por inteiro e, sim, o de fazer uma breve descrição das hipóteses assumidas pelo *software* para aproximação com o comportamento real.

Hipóteses:

- Fluxo convectivo no interior do duto é hidrodinâmica e termicamente desenvolvido;
- Temperatura na vizinhança do tubo é uniforme após uma distância particular a partir do centro do tubo, assim a temperatura do duto é uniforme na distância “r” do centro do tubo, onde “r” é o raio do duto;
- O perfil de temperatura na vizinhança do duto não é afetada pela presença do tubo, assim a temperatura na superfície do tubo é uniforme na direção axial;
- O solo ao redor do tubo possui condutividade térmica homogênea;
- O tubo tem seção uniforme na direção axial;

Para definição de alguns dados de entrada para o *EnergyPlus* fez-se necessária a utilização de um *software* auxiliar do *EnergyPlus* chamado *CalcSoilSurfTemp*, onde são especificadas as condições do solo, o tipo de cobertura deste solo e o arquivo climático da cidade para qual os tubos enterrados estão sendo projetados.

As opções de condições de solo são: 1) pesado e saturado; 2) pesado e úmido; 3) pesado e seco; e 4) leve e seco.

As opções de cobertura do solo são: 1) descoberto e molhado; 2) descoberto e úmido; 3) descoberto e árido; 4) descoberto e seco; 5) coberto e molhado; 6) coberto e úmido; 7) coberto e árido; e 8) coberto e seco.

Com a escolha da condição de solo e tipo de superfície do solo o usuário está definindo a densidade, calor específico, condutividade térmica, coeficiente de absorção e taxa de evaporação para as condições escolhidas.

A taxa de evaporação depende, basicamente, da cobertura e umidade do solo com valores variando entre 0 e 1. Para solos descobertos e saturados a taxa de evaporação corresponde a 1, para solos molhados 0,6 a 0,8, para solos úmidos 0,4 a 0,5, para solos áridos 0,1 a 0,2, para solos secos, a 0. Para solos com cobertura basta multiplicar os valores anteriores por 0,7.

A difusidade térmica (m^2/s), α_s , e condutividade térmica ($W/m \cdot ^\circ C$), k_s , também variam com a densidade e umidade do solo. De acordo com o Manual ASHRAE of *HVAC Applications* de 1991 [descrito no livro *Engineering Reference*, 2011] os valores utilizados nos cálculos são os da Tabela 5.1:

Tabela 5.1 Valores de condutividade e difusidade para condições de solo pré-definidas

Condição do Solo	k_s [W/(m.°C)]	$\alpha_s \times 10^{-7}$ [m ² /s]
Pesado e saturado	2,42	9,04
Pesado e úmido	1,30	6,45
Pesado e seco	0,865	5,16
Leve e seco	0,346	2,80

Este programa auxiliar apresenta três dados de saída: a temperatura média anual da superfície do solo, a amplitude da temperatura do solo, a qual representa a diferença entre a temperatura máxima e mínima durante todo o ano dividido por dois, e, por último, a constante de fase da temperatura da superfície do solo, que representa o número de dias necessários para que a temperatura do solo alcance sua temperatura mínima, a contar do primeiro dia do ano.

De acordo com o observado no terreno para o qual a casa foi projetada escolheu-se um solo pesado e úmido com superfície coberta e úmida, resultando uma temperatura média anual da superfície do solo de 22,14°C, amplitude de 5,79°C e constante de fase de 288 dias, correspondendo ao dia 14 de outubro. Estes valores, juntamente com os valores que caracterizam o tubo enterrado, serviram como entrada para o módulo do *ZoneEarthTube* do *EnergyPlus*. Os valores utilizados para o tubo enterrado foram: raio de 0,1 m, espessura de 0,025 m, comprimento de 50 m e condutividade térmica de um tubo de PVC no valor de 0,2 W/(m.K), otimizados a partir de Schulz, 2011:

5.1.3. MODELO DE VENTILAÇÃO ATRAVÉS DO EFEITO DO VENTO E EFEITO CHAMINÉ

Para renovação do ar interno e ventilação da habitação utilizou-se o módulo *WindAndStack* do *EnergyPlus*, o qual é caracterizado por uma tubulação iniciando-se no teto da residência até o exterior, com a abertura perpendicular ao horizonte. Este módulo utiliza como base de cálculos as equações expressas no manual *ASHRAE Fundamentals 2009* e descritas neste item.

Para este módulo, a vazão volumétrica é função da velocidade do vento e do efeito térmico de chaminé, juntamente com a área de abertura projetada.

A equação utilizada para calcular a parcela da vazão causada pelo efeito dos ventos é dada por:

$$Q_w = C_v AU \quad 5.1$$

onde, Q_w = vazão volumétrica derivada da ação do vento, em m³/s; C_v = efetividade da área das aberturas de entrada de ar, dependente da direção do vento, adimensional; A = área livre das aberturas de entrada de ar, em m²; U = velocidade do vento, m/s.

Para o cálculo de C_v , o *EnergyPlus* relaciona o ângulo efetivo, dado de entrada definido pelo usuário, o qual representa o azimute da entrada de ar, e a direção do vento para cada passo de tempo da simulação, através da equação:

$$C_v = 0,55 + \frac{|\text{ânguloefetivo} - \text{direçãovento}|}{180} * 0,25 \quad 5.2$$

A diferença |ânguloefetivo-direçãovento| deve ficar entre 0 e 180 graus. Se a diferença for maior que 180°, então será subtraído 180° deste valor. Esta equação é uma interpolação linear dos valores recomendados no manual: 0,5 à 0,6 para ventos perpendiculares à abertura de entra e 0,25 à 0,35 para ventos diagonais à esta entrada.

A velocidade e direção do vento são dados de entrada disponíveis no arquivo climático para a cidade onde está sendo simulada a residência, e são distribuídos de hora em hora. A área de abertura é especificada pelo usuário. Os dados de entrada definidos pelo usuário para esta equação foram área de abertura de 0,4m², o que corresponde a dois dutos de 0,5m de diâmetro, e um ângulo efetivo de 154°, para que a abertura ficasse voltada à direção média dos ventos da região durante o ano representado pelo arquivo climático.

Para o cálculo da parcela de vazão gerada pelo efeito chaminé, o *EnergyPlus* utiliza a equação 38 do capítulo 16 do Manual *ASHRAE Fundamentals* de 2009 e apresentada abaixo:

$$Q_s = C_D A \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL} |T_{zone} - T_{odb}|}{T_{zone}}} \quad 5.3$$

onde, Q_s = vazão volumétrica relacionada ao efeito chaminé, em m^3/s ; C_D = coeficiente de descarga pela abertura, adimensional; A = área da abertura, m^2 ; g = aceleração da gravidade, m/s^2 ; ΔH_{NPL} = altura a partir do Nível de Pressão Neutra até a abertura inferior do duto de ventilação, m ; T_{zone} = temperatura de bulbo seco da zona, K ; T_{odb} = temperatura de bulbo seco externa, K ;

Para o cálculo do coeficiente de descarga, C_D , é utilizado a equação 39 do capítulo 16 do manual supra-citado e dada por:

$$C_D = 0,4 + 0,0045 |T_{zone} - T_{odb}| \quad 5.4$$

O nível de pressão neutra, NPL, é, usualmente, a metade da altura do pé direito do ambiente. Para este trabalho utilizou-se 1,5m.

A taxa total de ventilação para este modelo é então calculada por:

$$Ventilação_{WindAndStack} = \sqrt{Q_s^2 + Q_w^2} \quad 5.5$$

5.1.4. MODELO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

O modelo utilizado neste trabalho para simular a produção de energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é um modelo simplificado do *EnergyPlus*. Neste modelo o usuário especifica a eficiência com que as células fotovoltaicas do painel convertem radiação solar incidente em eletricidade. A radiação solar incidente é calculada em função do ângulo do sol, sombras e reflexos projetados sobre os painéis. A potência elétrica disponível produzida pelas superfícies dos painéis fotovoltaicos é calculada utilizando:

$$P = A_{surf} f_{activ} G_T \eta_{cell} \eta_{invert} \quad 5.6$$

onde, P = potência elétrica produzida pelos painéis, em W ; A_{surf} = área total da superfície dos painéis, m^2 ; f_{activ} = fração da área da superfície dos painéis com células ativas, adimensional; G_T = radiação solar incidente total na matriz de painéis, W/m^2 ; η_{cell} = eficiência de conversão das células dos painéis, adimensional; η_{invert} = eficiência de conversão de corrente DC para AC;

Dos dados do lado direito da equação, somente o G_T é calculado pelo *EnergyPlus*, todos os outros são especificados pelo usuário e extraídos de catálogos de fabricantes de Painéis Fotovoltaicos e de inversores de corrente.

O modelo de painel escolhido foi o Kyocera KC 130 GT-2. Do catálogo do fornecedor – ver anexos - foram extraídas as informações dimensionais 1425x652 mm com 36 células de tamanho padronizado, 156x156 mm, e a partir daí calculado a fração da área efetiva de 94 %. Considerou-se a instalação de 22 painéis sobre o telhado da residência em toda a extensão da fachada.

A eficiência de conversão das células fotovoltaicas utilizada foi de 13,9%, extraída da página da *internet* que disponibiliza dados de eficiência para vários modelos de painéis, [http://www.ecocalc.com/manufacturer_pv/1225/Kyocera+Fin ceramics/KC130GT-2?ep=1&prid=, acessada em 20 de maio de 2012].

O inversor escolhido foi um Xantrex modelo XW4548-120/240-60 com eficiência, η_{invert} , de 92,5%. O livro *InputOutputReference* do *EnergyPlus*, sugere uma página da *internet*, com uma vasta quantidade de testes de desempenho de inversores de corrente de onde foram extraídas as informações supracitadas. [http://www.gosolarcalifornia.org/equipment/inverter_tests/summaries/, acessado em 20 de maio de 2012].

5.2. CONTROLE DE ILUMINAÇÃO

Para atender os requisitos da norma ABNT-NBR 5413 com um baixo consumo de eletricidade adotou-se algumas tecnologias para iluminação da residência.

A norma ABNT-NBR 5413 estabelece valores médios de iluminância de 300 lux, medidos a 0,75m do piso, em residências. Nenhum ponto do cômodo deve ter valor de iluminância abaixo de 1/10 do valor médio.

As tecnologias utilizadas foram tubo de luz e prateleira de luz. Para o controle da iluminação foram utilizados sensores fotoelétricos e *dimmers*.

O tubo de luz é constituído de um domo, tipicamente hemisférico e produzido de acrílico transparente, um duto cilíndrico com superfície interna reflexiva, de alumínio de 500 mm revestido com película reflexiva, mais de 99% de reflectância para luz visível – ver imagem do catálogo do fornecedor em anexo – e um difusor, plástico fosco em formato de prato no teto do ambiente a ser iluminado com a função de difundir a luz no ambiente. O módulo de tubo de luz utilizado pelo *EnergyPlus – DaylightingDevice:Tubular* – simula a iluminação, os ganhos solares, condutivo e convectivo de calor gerados pela inserção destes tubos na zona térmica.

Prateleira de luz é um artifício de iluminação que vai instalado nas janelas externas e ajuda a espalhar os raios solares de forma mais homogênea no interior dos cômodos, evitando também as manchas de sol no piso.

O par de componentes que controla a iluminação, formado por sensor fotoelétrico e *dimmer* detecta a luminosidade do ambiente e varia a tensão elétrica das lâmpadas regulando a luminosidade destas de zero até o máximo para que os requisitos da norma sejam atendidos durante os períodos de ocupação do ambiente.

5.3. CONDIÇÕES PARA CONFORTO TÉRMICO

Conforto térmico é um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Se o balanço de todas as trocas de energia as quais está submetido um corpo for nulo ou próximo e a temperatura da pele e a evaporação-transpiração estiverem dentro de certa faixa de controle, pode-se dizer que este homem está em conforto térmico [ASHRAE, 2009]. Pode-se dizer que conforto térmico é uma sensação da mente na qual é expressa satisfação com o ambiente térmico [BEYER, 2011] [extraído de TORRES, 2011].

Conforme definido na ASHRAE 55-2004, norma para conforto térmico em ambientes, utilizou-se neste trabalho a temperatura operativa, T_{OP} , como parâmetro para avaliar as condições internas nos ambientes. A temperatura operativa pode ser definida como uma média ponderada entre a temperatura média radiante e a temperatura do ar ambiente, ponderada pelos coeficientes de troca de calor convectivo e radiante, [BEYER, 2011].

Baseado na ASHRAE 55-2004 estabeleceu-se o intervalo de 19°C até 28°C como faixa aceitável para conforto térmico, ilustrado pela Figura 5.1 e adotado o critério de que possa haver no máximo 300 horas de desconforto no interior de cada cômodo ao longo de um ano climático, o equivalente a 3,4% das horas do ano.

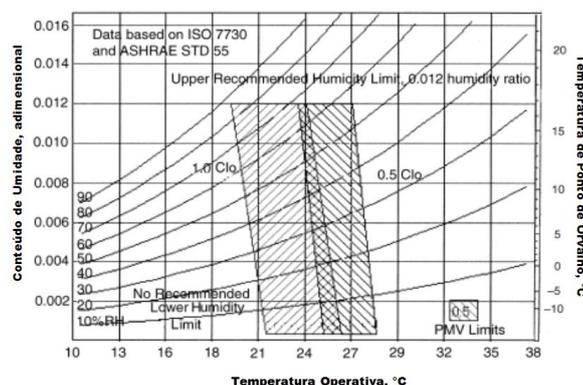


Figura 5.1 Faixa de temperatura operativa para conforto térmico

6. ANÁLISES E RESULTADOS

6.1. CONFORTO TÉRMICO

No subcapítulo 5.3 foram definidos os parâmetros de conforto objetivados neste trabalho, para que a CPT seja termicamente confortável à seus usuários. Na Figura 6.1 são apresentados os gráficos anuais de temperatura para duas zonas térmicas, escolhidas de forma a representar o comportamento geral da casa. Na Tabela 6.1 foram sumariados os dados dos gráficos para comparação com os valores recomendados no subcapítulo 5.3.

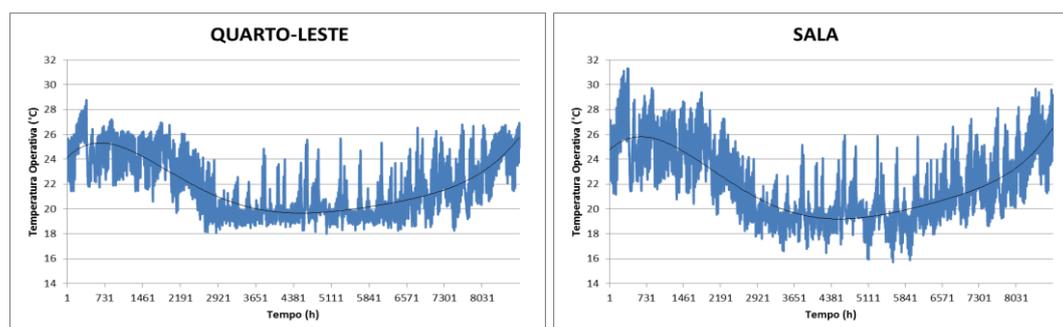


Figura 6.1 Temperatura operativa anual das zonas térmicas

A partir dos dados dos gráficos computou-se o número de horas abaixo de 19°C – desconforto de frio – e o número de horas acima de 28°C – desconforto de calor – para cada zona no período de um ano (8760 horas). Também são expostas na Tabela 6.1 as temperaturas máxima e mínima de cada zona ao longo do ano, apenas como demonstrativo do comportamento térmico da zona.

Tabela 6.1 Número de horas fora da zona de conforto durante o ano

		QUARTO-LESTE	QUARTO-CENTRO	QUARTO-OESTE	COZINHA	BANHEIRO-OESTE	SALA
Conforto	(h)	8426	8273	8111	8367	8760	7426
	(%)	96.2	94.4	92.6	95.5	100	84.8
Desconforto	Frio (h)	316	410	563	381	0	1141
	(%)	3.6	4.7	6.4	4.3	0	13.0
	Calor (h)	18	77	86	12	0	193
	(%)	0.2	0.9	1.0	0.1	0	2.2
	Total	334	487	649	393	0	1334
Temperatura Mínima (°C)		18.0	18.1	17.8	17.8	19.5	15.7
Temperatura Máxima (°C)		28.8	29.8	30.0	28.6	26.9	31.3

Destes dados é possível observar que nenhuma das zonas térmicas, exceto Banheiro-Oeste, conseguiu ficar abaixo do número mínimo de horas de desconforto especificado. Nota-se que as horas em desconforto térmico deram-se para a condição de frio, conforme previsto na simulação prévia do arquivo climático com o uso do *software AnalisisBio* – ver subcapítulo 4.1.

Outro fato que merece ser salientado é o de que os cômodos com maior área superficial das paredes em contato com o solo apresentaram menos horas de desconforto, é o caso das zonas “Quarto-Leste” e “Cozinha”, que estão na periferia da residência.

A zona “Sala” apresentou a pior condição de temperaturas operativas internas, por três motivos principais: pouca área superficial em contato com o solo, maior volume interno em relação às zonas Quarto-Centro e Quarto-Oeste e menor área de vidros em sua fachada pela presença da porta de entrada da residência.

Os banheiros não apresentaram horas fora dos limites de conforto térmico e o corredor apresentou apenas 14 horas em desconforto de calor ao longo de um ano.

6.2. ILUMINAÇÃO

Os valores de iluminância no interior da residência foram simulados durante o equinócio do dia 21 de março, em acordância com o dia de projeto de verão recomendado pela norma ASHRAE 90.1. Na Figura 6.2 são apresentados os mapas de iluminação para as 15 horas deste dia de projeto para algumas zonas térmicas. Estas zonas foram escolhidas de modo a representar todas as situações da residência.

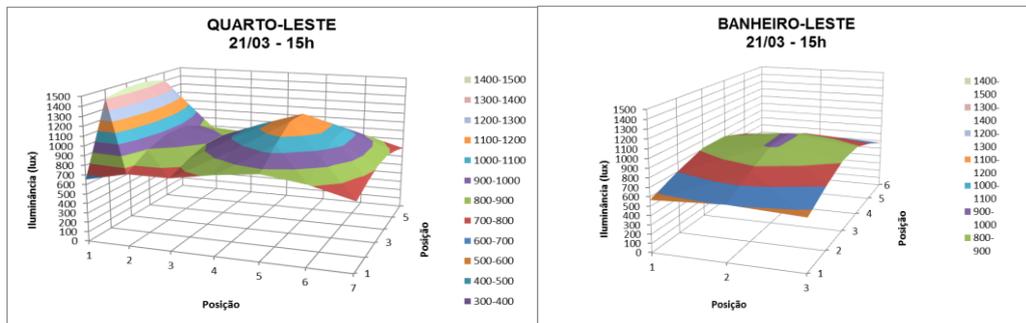


Figura 6.2 Gráficos de iluminância natural para o dia 21 de março às 15 horas

Os valores obtidos satisfazem o requisitado pela norma ABNT-NBR 5413, conforme citado no subcapítulo 5.2. Verifica-se também a influência dos tubos solares, elevação próximo ao centro do cômodo, e a eficiência das prateleiras de luz, as quais evitaram o aparecimento de picos de iluminância, fato representativo de manchas de luz no ambiente.

6.3. BALANÇO DE ENERGIA ELÉTRICA

A instalação de painéis fotovoltaicos foi motivada para que a residência produzisse toda a energia consumida em sítio durante o período de um ano, caracterizando-se assim um prédio de energia líquida zero, PELZ.

Para verificar se foi produzido energia elétrica suficiente para abastecer a casa durante o ano levantou-se os dados de produção de energia pelos painéis fotovoltaicos e de todo o consumo durante o ano, sendo que o consumo é decorrente de iluminação dos ambientes e de equipamentos, tais como televisão, geladeira, microondas, entre outros equipamentos domésticos. Na Figura 6.3 estão mostradas a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos na linha azul e, em vermelho, a consumida pelos equipamentos e lâmpadas.

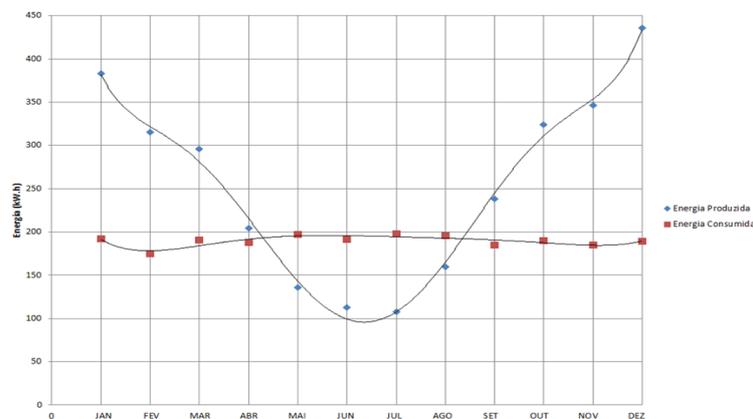


Figura 6.3 Energia produzida e consumida durante o ano

A produção total de energia superou o consumo anual em 784 kW.h podendo-se, assim, chamar a residência de um prédio de energia líquida zero, onde o excedente pode ser injetado na rede elétrica externa e revertido em créditos de energia, de acordo com Nota Técnica nº 0043/2010-SRD/ANEEL.

6.4. COMPARATIVO COM HABITAÇÃO CONVENCIONAL

Para que uma análise comparativa de temperaturas internas com uma habitação convencional pudesse ser efetuada realizou-se a simulação de uma construção com as mesmas dimensões sem o solo como proteção das paredes e do teto. Utilizou-se somente dois cômodos significativos para a comparação, o Quarto-Leste, representando a melhor condição, e a Sala para a pior condição. A distribuição de temperaturas para estes cômodos em uma casa convencional é mostrada na Figura 6.4 e na Tabela 6.2 as horas que esta casa ficou fora da zona considerada como conforto térmico.

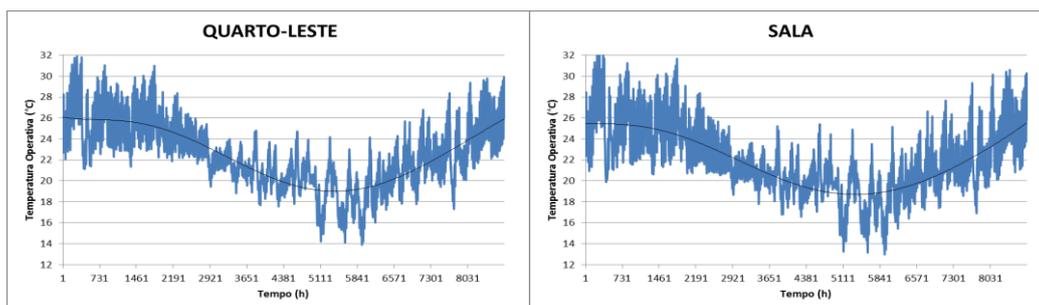


Figura 6.4 Temperatura operativa anual das zonas térmicas para uma casa convencional

Tabela 6.2 Número de horas fora da zona de conforto durante o ano para casa convencional

		QUARTO-LESTE	SALA
Conforto	(h)	7287	7102
	(%)	83.2	81.1
Desconforto	Frio (h)	1084	1330
	(%)	12.4	15.2
	Calor (h)	389	328
	(%)	4.4	3.7
Total		1473	1658
Temperatura Mínima (°C)		13.9	13.0
Temperatura Máxima (°C)		31.9	32.5

Fica evidente que uma casa convencional apresenta uma maior variação de temperaturas em relação à CPT, apresentando mais de 16 % das horas do ano fora do conforto térmico com aumento de 4,4 vezes mais do que a melhor situação da casa protegida pela terra.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente trabalho mostrou que a construção de uma casa protegida pela terra é termicamente viável para o clima da região de Porto Alegre. A escolha por climatizar os ambientes com sistemas passivos e a máxima utilização da luz solar para iluminação interna mostrou-se bastante acertada.

Devido à não utilização de sistemas de condicionamento de ar ativos o requisito de ter no máximo 300 horas fora do conforto térmico, sugerido na norma ASHRAE 55.1-2004, não foi alcançado, porém estes valores são bastante inferiores aos apresentados por uma residência convencional. Por outro lado, a não utilização de sistemas ativos, associado ao uso de painéis fotovoltaicos para geração de energia e de iluminação natural, contribuiu para que o balanço de energia gerada *versus* a energia consumida fosse positivo.

Para adequar as temperaturas internas com a norma ASHRAE 55.1-2004 sugere-se a utilização de muro trombe na fachada norte bem como o aumento da área envidraçada. Uma opção prática seria a implantação de uma lareira, embora sua eficiência térmica seja conhecidamente baixa, este tipo de aquecimento não utiliza energia elétrica e seu combustível pode ser adquirido de forma sustentável, através do recolhimento de galhos ou árvores mortos ou mesmo de reflorestamentos.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, “**ABNT-NBR 5413 Iluminância de interiores**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- Al-Temeemi, A.A., Harris, D.J., “**A guideline for assessing the suitability of earth-sheltered mass-housing in hot-arid climates.**”, Energy and Buildings, 2003.
- Anselm, A. J., “**Passive annual heat storage principles in earth-sheltered housing, a supplementary energy saving system in residential housing**”, Energy and Buildings, 2007
- ASHRAE. “**Fundamentals Handbook**”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2009.
- ASHRAE, “**HVAC Handbook**”, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 1991 e 2007.
- ASHRAE. “**Standard 55.1 – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**”. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, SI Edition, 2004.
- Baggs, S., Baggs, J. C., Baggs, D., “**Australian earth-covered building**”, NSW University Press, 1991.
- Beyer, P. O., “**Apostila de Conforto Térmico**”, DEMEC/UFRGS, 2011.
- Carpenter, P., “**Sod it: an introduction to earth sheltered development in England and Wales**”, Coventry University, 1994.
- ENERGYPLUS. “**EnergyPlus Engineering Reference**”. U.S. Department of Energy. 2011.
- ENERGYPLUS. “**EnergyPlus Input Output Reference**”. U.S. Department of Energy. 2011.
- ENERGYPLUS. “**Getting Started with EnergyPlus**”. U.S. Department of Energy. 2011.
- Eckert, E. R. G., Bligh, T. P., Pfender, E., “**Energy exchange between earth-sheltered structures and the surrounding ground**”, Mechanical Engineering Department, University of Minnesota, 1978.
- Golany, G. S., “**Earth-sheltered dwellings in Tunisia: Ancient lessons for modern design**” Associated University Press, 1998.
- Klodt, G. “**Earth sheltered housing**”, Reston Publishing Co., 1985.
- Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Informações disponíveis no campo “Ajuda” do programa *AnalysisBio*, 2010.
- Lee, S. W., Shon, J. L., “**The thermal environment in an earth-sheltered house in Korea**”, Tunneling Underground Space Technology, 1988.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL), “**Earth-sheltered houses**” documento DOE/GO-10097-373, *United States Department of Energy*, 1997.
- Roy, R. “**Earth-sheltered houses. How to build an affordable underground home**”, New Society Publishers, 1st edition, 2006.
- Schulz, E., “**Eficiência no uso de tubos enterrados para ventilação de residências**”, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- http://www.ecocalc.com/manufacturer_pv/1225/Kyocera+Fineceramics/KC130GT-2?ep=1&prid=, acessada em 20 de maio de 2012.
- http://www.gosolarcalifornia.org/equipment/inverter_tests/summaries/, acessado em 20 de maio de 2012.
- www.japantimes.co.jp, Reportagem de 24 de outubro de 2000, acessado em 25 de março de 2012.

APÊNDICE

Abaixo são apresentadas algumas informações utilizadas para a composição das análises e comparações feitas no corpo do trabalho, porém dispensáveis para o entendimento do trabalho.

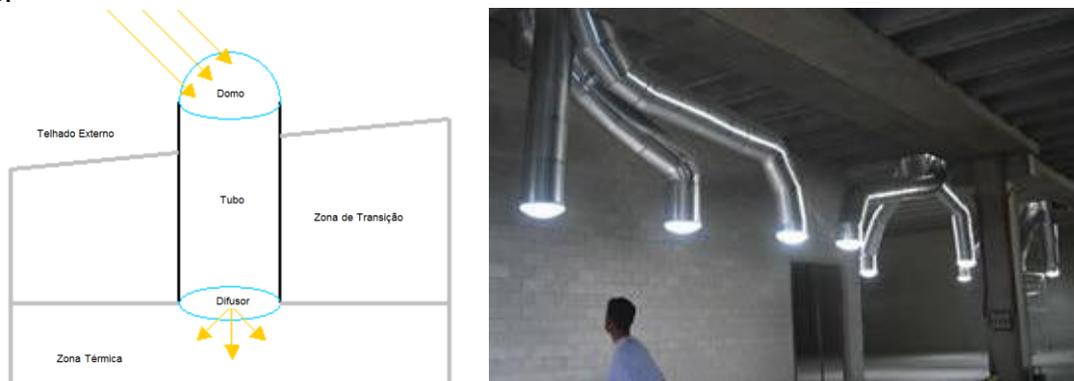


Figura 1 (a) Diagrama esquemático de um tubo de luz e (b) exemplo de aplicação prática de um tubo de luz.

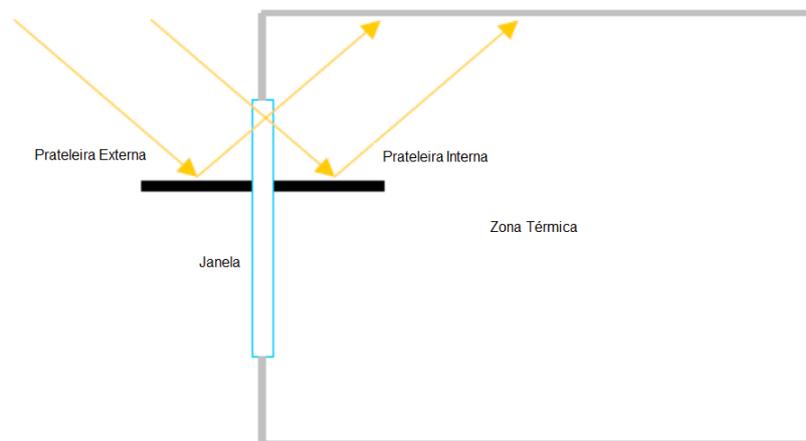


Figura 2 Diagrama esquemático dos raios de sol incidentes em uma prateleira de luz.

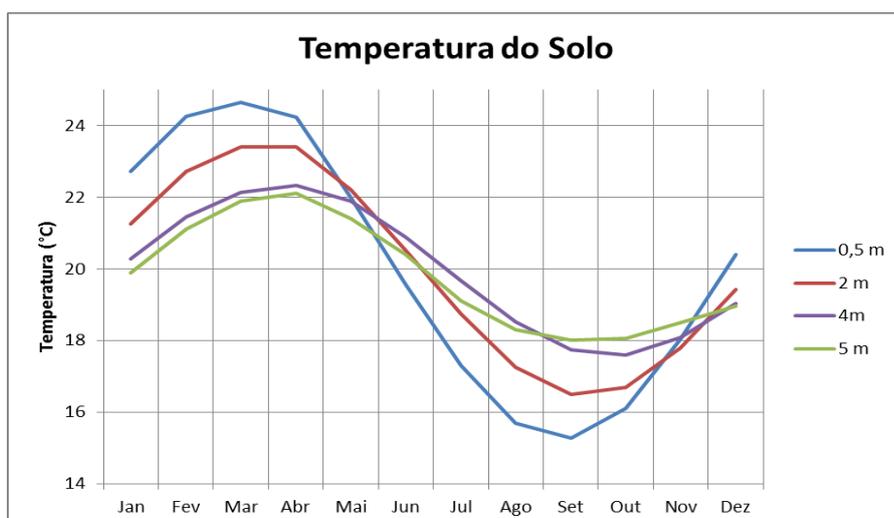


Figura 3 Perfil de temperatura do solo para diferentes profundidades.

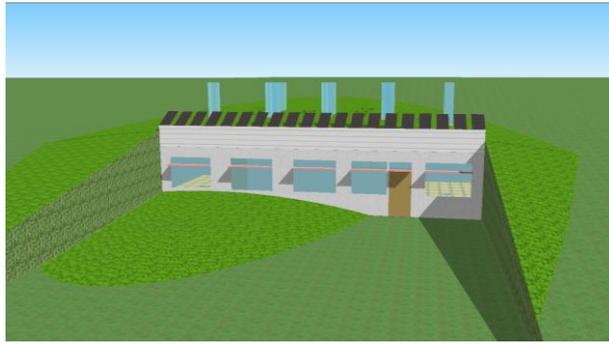


Figura 4 Modelagem representativa da casa inserida no terreno

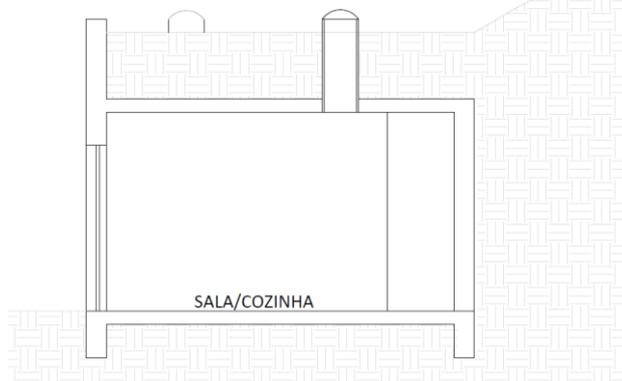


Figura 5 Corte lateral da casa

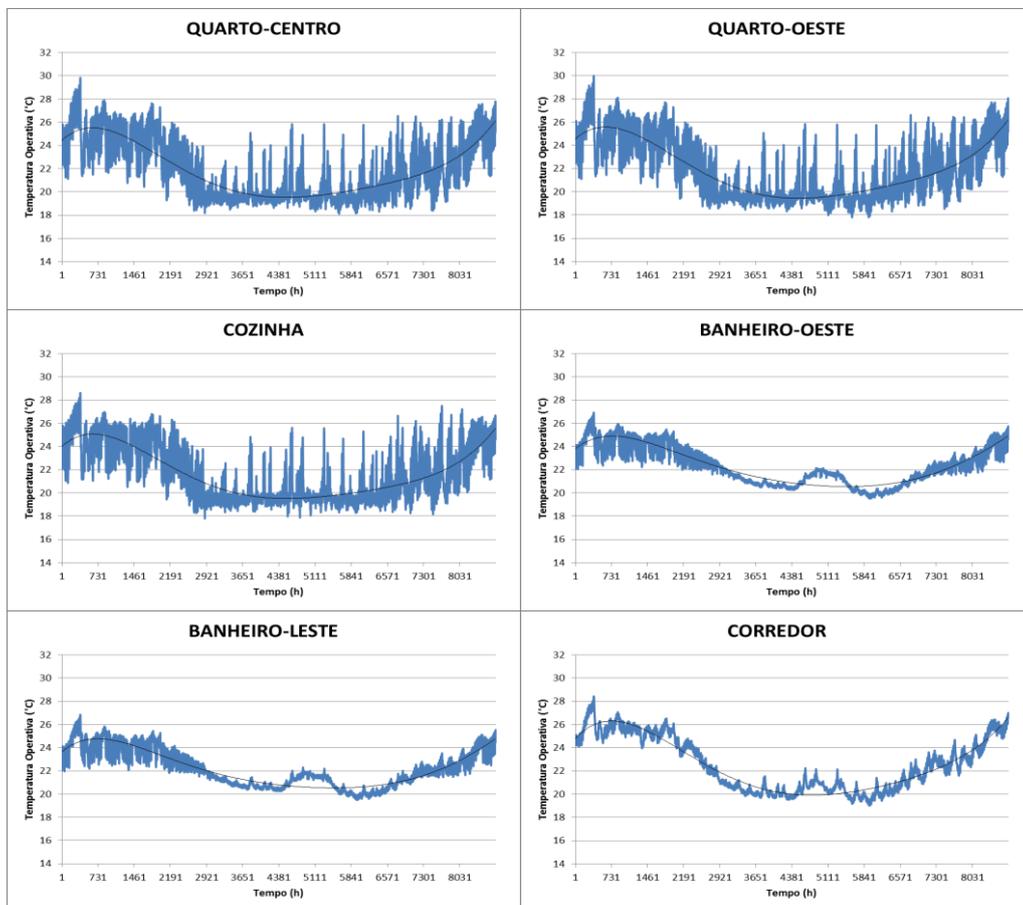


Figura 6 Temperatura operativa anual das zonas térmicas para CPT

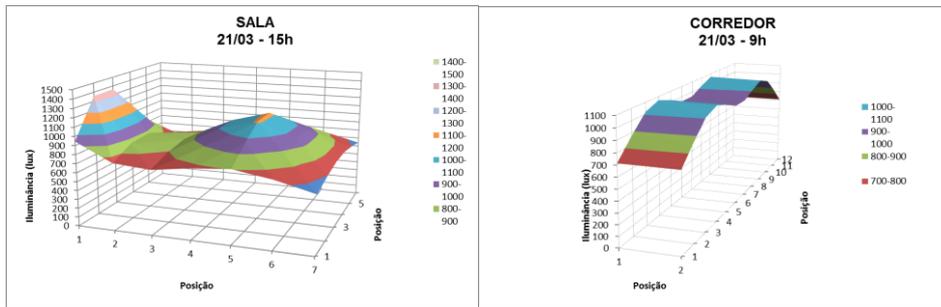


Figura 7 Gráficos de iluminância natural para o dia 21 de março às 15 horas

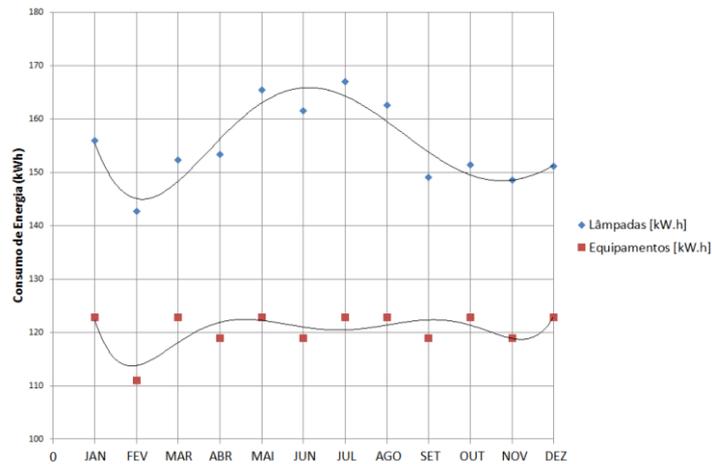


Figura 8 Consumo de Energia por Categoria para CPT

Tabela 1 Balanço de Energia Gerada por Energia Consumida durante o ano

		Média Mensal (kWh)	Total (ano) (kWh)
Energia	Gerada (kWh)	-255.0	-3060
	Consumida (kWh)	189.7	2276
Balanço Energético Anual (kWh)		-	-784

As figuras abaixo são resultados da simulação termo-energética de uma casa convencional.

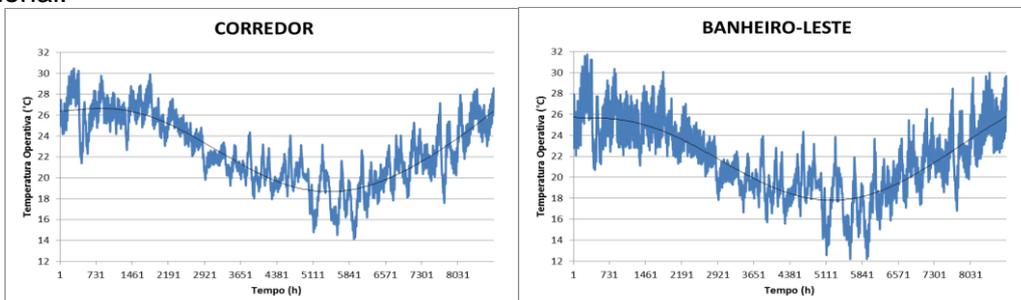


Figura 9 Temperatura operativa anual das zonas térmicas para casa convencional

Tabela 2 Número de horas fora da zona de conforto durante o ano para casa convencional

		QUARTO-CENTRO	QUARTO-OESTE	CORREDOR	BANHEIRO-LESTE	BANHEIRO-OESTE	COZINHA
Conforto	(h)	7837	7441	7229	6526	6572	7747
	(%)	89.5	84.9	82.5	74.5	75.0	88.4
Desconforto	Frio (h)	692	694	1149	1976	1959	636
	(%)	7.9	7.9	13.1	22.6	22.4	7.3
	Calor (h)	231	625	382	258	229	377
	(%)	2.6	7.1	4.4	2.9	2.6	4.3
	Total	923	1319	1531	2234	2188	1013
Temperatura Mínima (°C)		15.4	15.3	14.1	12.2	12.2	14.4
Temperatura Máxima (°C)		30.3	30.9	30.5	31.7	31.6	32.8

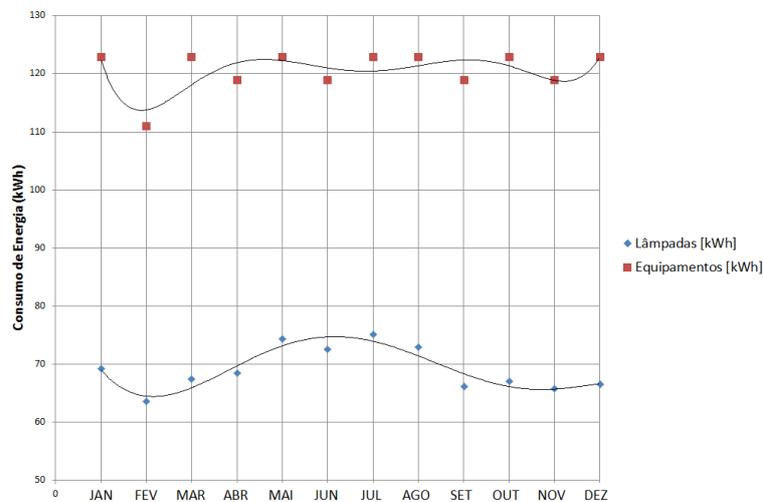


Figura 10 Consumo de Energia por Categoria para casa convencional

ANEXOS

Abaixo são apresentados partes fundamentais de catálogos dos equipamentos selecionados no trabalho juntamente com a fonte de onde foi extraído.

Performances		DGU 6mm - 12mm air - 6mm			
External pane		Clear float			
SKN coating (coating on face #2)		174 / 174 II	165 / 165 II	154 / 154 II	144 II
Light factors					
	LT %	67	59	50	40
	LRe %	10	15	18	21
	LRi %	12	17	20	13
Solar factor					
	g	0.41	0.34	0.28	0.24
	SC ISO 9050	0.44	0.37	0.31	0.26
U-value W/(m ² .K)					
	12 mm Air filled cavity	1.6	1.6	1.6	1.6
	16 mm Argon r filled cavity	1.1	1.1	1.1 / 1.0	1.0

Average values according to EN 410 and EN 673 standards, and subject to modifications. sgg COOL-LITE SKN / SKN II comply with the requirements of the class C the of standard EN 1096 and is CE marked.

Anexo 1 Desempenho dos vidros SKN™

[extraído do catálogo SGG COOL-LITE® SKN disponível em

<http://exprover.saint-gobain-glass.com/upload/products/SG-Cool-Lite-SKII.pdf>]

SPECIFICATIONS

KC130GT

Physical Specifications

Unk : mm (in.)



Specifications

Electrical Performance under Standard Test Conditions (*STC)	
Maximum Power (Pmax)	130W (+10%/−5%)
Maximum Power Voltage (Vmpp)	17.6V
Maximum Power Current (Impp)	7.39A
Open Circuit Voltage (Voc)	21.9V
Short Circuit Current (Isc)	8.02A
Max System Voltage	600V
Temperature Coefficient of Voc	−8.21×10 ^{−2} V/°C
Temperature Coefficient of Isc	3.18×10 ^{−3} A/°C
<small>*STC : Irradiance 1000W/m², AM1.5 spectrum, module temperature 25°C</small>	
Electrical Performance at 800W/m ² , NOCT, AM1.5	
Maximum Power (Pmax)	92W
Maximum Power Voltage (Vmpp)	15.5V
Maximum Power Current (Impp)	5.94A
Open Circuit Voltage (Voc)	19.9V
Short Circuit Current (Isc)	6.47A
<small>NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) : 47°C</small>	

Cells	
Number per Module	36
Module Characteristics	
Length × Width × Depth	1425mm(56.1in.)×652mm(25.7in.)×35mm(1.4in.)
Weight	12.2kg(26.8lbs.)
Cable	(+)750mm(29.5in.) (−)1800mm(70.9in.)
Junction Box Characteristics	
Length × Width × Depth	113.5mm(4.5in.)×75mm(3.0in.)×6mm(0.4in.)
IP Code	IP65
Reduction of Efficiency under Low Irradiance	
Reduction	4.3%
<small>Reduction of efficiency from an irradiance of 1000W/m² to 300W/m² (module temperature 25°C)</small>	

Please contact our office for further information



KYOCERA Corporation

Anexo 2 Especificações técnicas do painei fotovoltaico utilizado no trabalho
[extraído do catálogo KC130GT disponível em
<http://www.kyocerasolar.com/assets/001/5184.pdf>]

- 8. Reflective Tubes: Aluminum sheet, thickness 0.018 inch (0.5 mm).
 - a. General:
 - 1) Interior Finish: Spectralight Infinity high reflectance specular finish on exposed reflective surface. Specular reflectance for visible spectrum (400 nm to 760 nm) greater than 99 percent. Total solar spectrum reflectance (400 nm to 2500 nm) less than 80.2 percent.

Anexo 3 Especificação de refletância do tubo solar utilizado
[Extraído do catálogo do produto Solatube® 750 DS-C disponível em
http://www.solatube.com/common/technical_resources/asset_upload_file436_115035.pdf]