

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DE UMA CASA CONTÊINER UTILIZANDO
SOLUÇÕES PASSIVAS E CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL

por

Luis Henrique Alberti

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, maio de 2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Alberti, Luis Henrique

Análise termoenergética de uma casa contêiner
utilizando soluções passivas e climatização artificial
/ Luis Henrique Alberti. -- 2022.

23 f.

Orientadora: Letícia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Contêiner. 2. Cobertura verde. 3. Conforto
térmico. 4. EnergyPlus. 5. Climatização. I. Rodrigues,
Letícia Jenisch, orient. II. Título.

Luis Henrique Alberti

ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DE UMA CASA CONTÊINER UTILIZANDO
SOLUÇÕES PASSIVAS E CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL

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
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Profa. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Andrés Armando Mendiburu Zevallos

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Porto Alegre, maio de 2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pela paciência durante esses longos anos de graduação. As minhas irmãs e meus cunhados que nunca mediram esforços e sempre me apoiaram para que eu pudesse chegar onde estou.

A minha musa inspiradora e namorada Ana Caroline, com quem compartilhei todos os momentos e mesmo distante me deu muita força e vontade para continuar.

Aos meus amigos, com quem sempre pude contar nesse período da minha vida.

A UFRGS, por proporcionar um ensino de excelência, de forma gratuita.

E a todos que, de alguma forma fizeram parte dessa conquista, meu muito obrigado!

Alberti, Luis Henrique. **ANÁLISE TERMOENERGÉTICA DE UMA CASA CONTÊINER UTILIZANDO SOLUÇÕES PASSIVAS E CLIMATIZAÇÃO ARTIFICIAL**. 2022. 23p. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Este estudo avalia o comportamento térmico e energético de uma casa contêiner diante da utilização de soluções passivas de conforto térmico e climatização artificial aplicada ao clima da cidade de Florianópolis, SC. As soluções passivas utilizadas são: isolamento térmico, *brise* horizontal, cobertura verde e cobertura sombreada. Os cenários são simulados através do *software EnergyPlus*, onde as soluções foram combinadas e simuladas para o período de um ano e comparadas ao contêiner sem tratamentos. Foram avaliadas as temperaturas operativas para os dias de menor e maior temperatura externa (TBS), horas de desconforto térmico, baseado no método adaptativo, e o consumo de energia associado a climatização. Verifica-se que as soluções passivas tem impacto significativo na manutenção das temperaturas internas. As soluções passivas reduziram as horas anuais de desconforto térmico em até 8,4% para o ambiente de maior ocupação, com o uso da climatização artificial esse percentual chega a 57,5%. A edificação que combina isolamento térmico, *brise* e cobertura sombreada teve o menor consumo energético associado a climatização, com redução anual de 33,8%.

PALAVRAS-CHAVE: contêiner, cobertura verde, conforto térmico, *EnergyPlus*, climatização

Alberti, Luis Henrique. **THERMOENERGY ANALYSIS OF A CONTAINER HOUSE USING PASSIVE SOLUTIONS AND HVAC**. 2022. 23p. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This study evaluates the thermal and energetic behavior of a house in the face of passive solutions of thermal comfort and artificial air conditioning Applied to the climate of the city of Florianópolis, SC. The passive solutions used are thermal insulation, horizontal brise, green roof, and shaded roof. The scenarios are simulated through the EnergyPlus software. The solutions were combined and simulated for one year and compared to the container without treatments. Based on the adaptive method, the operating temperatures were evaluated for the days of lowest and highest external temperature (DBT), hours of thermal discomfort, and energy consumption associated with air conditioning. It is verified that passive solutions have a significant impact on maintaining internal temperatures. Passive solutions reduced the annual hours of thermal discomfort by up to 8.4% for the highest occupancy environment; with artificial air conditioning, this percentage reaches 57.5%. The Building that combines thermal insulation, brise, and a shaded roof had the lowest consumption associated with air conditioning, with an annual reduction of 33.8%.

KEYWORDS: container, green roof, thermal comfort, EnergyPlus, air conditioning

NOMENCLATURA

Símbolos

A	Área	[m ²]
C _p	Calor específico	[J/kgK]
\dot{Q}	Carga térmica	[W]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção	[W/m ² K]
q''	Fluxo de calor	[W/m ²]
N _{superfícies}	Número de superfícies	Adimensional
N _{zonas}	Número de zonas térmicas	Adimensional
$C_z \frac{dT_z}{dt}$	Taxa de energia armazenada na zona térmica	[W]
T	Temperatura	[K]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]

Abreviaturas e acrônimos

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
DOE	<i>US Department of Energy</i>
HVAC	<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>
CB	<i>Contêiner Bruto</i>
CI	<i>Contêiner com Isolamento</i>
CIB	<i>Contêiner com Isolamento e Brise</i>
CIBV	<i>Contêiner com Isolamento, Brise e Cobertura Verde</i>
CIBS	<i>Contêiner com Isolamento, Brise e Cobertura Sombreada</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	ENERGYPLUS	2
2.1	BALANÇO ENERGÉTICO DAS ZONAS TÉRMICAS	2
2.2	BALANÇO ENERGÉTICO NAS SUPERFÍCIES	2
2.3	CONDUÇÃO ATRAVÉS DAS PAREDES.....	3
2.1	MODELO ADAPTATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO	3
3	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA	4
3.1	CASA CONTÊINER	4
3.1.1	ELEMENTOS CONSTRUTIVOS	4
3.1.2	CARGAS TÉRMICAS INTERNAS	5
3.1.3	SISTEMA DE AR CONDICIONADO	6
4	METODOLOGIA.....	6
4.1	SIMULAÇÕES	6
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	9
5.1	TEMPERATURA INTERNA.....	9
5.2	CONFORTO TÉRMICO	13
5.3	CONSUMO DE ENERGIA.....	13
6	CONCLUSÃO.....	15
	REFERÊNCIAS	16

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho foi realizado com o intuito de analisar o consumo de energia de uma pequena casa contêiner diante da utilização de estratégias que amenizassem o consumo de energia da mesma. Para tal, foram buscados trabalhos desenvolvidos anteriormente que guiassem este trabalho na busca das melhores alternativas a serem utilizadas.

De acordo com Occhi e De Almeida (2016), desde o início da década de 90 os contêineres vêm sendo empregados como matéria prima na construção civil como uma alternativa sustentável e econômica, reduzindo o impacto ambiental e diminuindo o custo das obras em até 30% em relação a construções convencionais de alvenaria. Porém, para que os mesmos sejam habitáveis, é necessário que sejam feitos isolamentos térmicos e acústicos, uma vez que os contêineres são fabricados com materiais metálicos com boa condutividade térmica.

Os estudos de Bezerra et al. (2021) mostram os efeitos do consumo energético associado à climatização artificial para todas as regiões brasileiras diante de cenários de aquecimento global. O aumento da demanda de energia varia conforme as regiões brasileiras, sendo observado um aumento potencial de 190% para um cenário de aquecimento global de 4°C. Para que esses efeitos não se traduzam em alta demanda energética, medidas de eficiência energética devem ser promovidas.

Viana (2018) analisou diferentes tipos de isolamentos térmicos em uma casa contêiner a partir de simulações no *software EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2017). O estudo mostrou que para este tipo de moradia é indispensável o uso de adaptações, visto que o contêiner sofre grande influência das temperaturas externas e da radiação solar. O estudo ainda indica que uma cobertura adaptada se faz necessária para que se obtenha um melhor desempenho térmico, com temperaturas mais amenas no verão e temperaturas internas mais agradáveis no inverno. Nesse trabalho foram simuladas uma cobertura verde e uma cobertura ventilada, a fim de demonstrar o impacto das mesmas no conforto térmico dos habitantes do contêiner.

Os *brises* são elementos de proteção que barram a incidência da radiação solar direta e, conseqüentemente, diminuem o fluxo de calor (oriundo de radiação solar direta) para o ambiente interno. Podem ser utilizados na vertical ou horizontal, dependendo da orientação solar que se deseja proteger. Da Cunha (2011) analisou os impactos no conforto térmico e na economia de energia diante da implementação de *brise-soleil* em uma edificação no centro da cidade de Pelotas, RS. O estudo constatou um aumento de 8% nas horas de conforto térmico no período de um ano com o uso da proteção solar. Também foi constatado a redução no consumo de energia para a climatização artificial, gerando um *pay-back* do custo de implementação das proteções de 8,4 anos.

Segundo Wark e Wark (2003) os telhados verdes ou coberturas verdes existem desde os tempos antigos. Os primeiros registros conhecidos são dos zigurates na antiga Mesopotâmia. Acomb, Clark e Lang (2008), afirmam que as coberturas verdes possibilitam inúmeras vantagens, entre elas está a redução das ilhas de calor nos grandes centros urbanos e o isolamento térmico, tornando o ambiente interno mais agradável, com temperaturas que podem chegar até 10°C abaixo da temperatura externa e podendo gerar economia de 15% a 30% nos custos de climatização artificial.

Cipriano (2003 *apud* Ness, 2012) analisou os resultados da comparação entre os valores medidos e simulados através do *software EnergyPlus* para uma edificação, constatando que o *software* é confiável. Para a comparação foi analisado o consumo de energia elétrica em um ambiente climatizado na cidade de Porto Alegre.

2 ENERGYPLUS

Neste capítulo são apresentados os métodos que o programa *EnergyPlus* utiliza para a realizar os cálculos de carga térmica e do consumo de energia da edificação. O programa desenvolvido pelo e distribuído pelo Departamento de Energia do Estados Unidos (DOE), tem como método de cálculo o balanço de energia para as cargas térmicas. A condução de calor se dá através dos elementos da edificação de forma transiente utilizando funções de transferência por condução, convecção e radiação. O programa ainda permite que o usuário determine intervalos de tempo (*timestep*), arquivo climático, posição geográfica da edificação, condições de contorno, sistema de climatização e/ou ventilação, e variáveis de saída da simulação.

2.1 BALANÇO ENERGÉTICO DAS ZONAS TÉRMICAS

Segundo o manual do *EnergyPlus* (ENERGYPLUS, 2017), uma zona térmica é um volume de ar à temperatura uniforme, tendo para cada zona um sistema independente de controle térmico. Com a edificação dividida em mais de uma zona, é possível analisar cada ambiente separadamente, identificando qual tem maior ou menor demanda de energia.

Utilizando o balanço térmico para cada componente da edificação (paredes, janelas, forro, piso), a solução é encontrada a partir da equação de energia dado pela equação que segue:

$$C_z \frac{dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad (1)$$

na qual $C_z \frac{dT_z}{dt}$ é a taxa de energia acumulada no ar da zona térmica (W), $\sum_{i=1}^{N_{sl}} \dot{Q}_i$ é a soma das cargas internas convectivas (W), $\sum_{i=1}^{N_{superficies}} h_i A_i (T_{si} - T_z)$ é a transferência de calor por convecção das superfícies (W), $\sum_{i=1}^{N_{zonas}} \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$ é a transferência de calor devido à mistura de ar entre zonas (W), $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$ é a transferência de calor devido a infiltração de ar externo (W) e \dot{Q}_{sys} é a saída do sistema de ar (W).

2.2 BALANÇO ENERGÉTICO NAS SUPERFÍCIES

Os fluxos de energia nas paredes internas e externas são das formas condutiva, convectiva e radiativa, e o balanço energético dos seus fluxos é dado pelas seguintes equações:

Parede interna:

$$q''_{LWX} + q''_{SW} + q''_{LWS} + q''_{ki} + q''_{sol} + q''_{conv} = 0 \quad (2)$$

na qual q''_{LWX} é o fluxo líquido de troca radiante de ondas longas entre as superfícies da zona (W/m²), q''_{SW} é o fluxo líquido de radiação de ondas curtas da iluminação para a superfície (W/m²), q''_{LWS} é o fluxo de radiação de onda longa oriunda dos equipamentos da zona para a superfície (W/m²), q''_{ki} é o fluxo de condução para o interior através da parede (W/m²), q''_{sol} é o fluxo de radiação solar transmitida absorvida na superfície (W/m²) e q''_{conv} é o fluxo de calor por convecção para o ar da zona (W/m²).

Parede externa:

$$q''_{asol} + q''_{LWR} + q''_{conv} - q''_{ko} = 0 \quad (3)$$

na qual q''_{asol} é o fluxo de calor de radiação solar direta e difusa absorvida (W/m^2), q''_{LWR} é o fluxo de radiação de onda longa trocado com o ar e arredores (W/m^2), q''_{conv} é o fluxo convectivo trocado entre o ar externo e a superfície (W/m^2) e q''_{ko} é o fluxo de calor por condução do exterior através da parede (W/m^2).

A transferência de calor devido à convecção externa é feita usando a equação para o coeficiente de transferência de calor por convecção forçada representada abaixo:

$$h_c = h_n + R_f \left[\sqrt{h_n^2 + (aV_z^b)^2} - h_n \right] \quad (4)$$

na qual h_n é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural (W/m^2K), R_f é a rugosidade da superfície (adim), a é constante ($W/m^2K(m/s)^b$), b é constante (adim) e V_z é a velocidade do vento (m/s).

2.3 CONDUÇÃO ATRAVÉS DAS PAREDES

As funções de transferência de calor por condução (CTF) calculam os fluxos de calor dentro da superfície. A mais básica solução temporal são as equações de fator de resposta, que relacionam o fluxo de calor em uma superfície de um elemento com uma série infinita de temperaturas em ambos os lados de uma parede (ENERGYPLUS, 2021a). A forma básica de uma solução baseada em CTF é mostrada nas seguintes equações, onde o subíndice “t” indica o passo de tempo:

Fluxo de calor interno:

$$q''_{ki}(t) = -Z_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Z_j T_{i,t-j\delta} + Y_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ki,t-j\delta} \quad (6)$$

Fluxo de calor externo:

$$q''_{ko}(t) = -Y_o T_{i,t} - \sum_{j=1}^{nz} Y_j T_{i,t-j\delta} + X_o T_{o,t} + \sum_{j=1}^{nz} X_j T_{o,t-j\delta} + \sum_{j=1}^{nq} \Phi_j q''_{ko,t-j\delta} \quad (7)$$

nas quais X_j é o coeficiente de fator de resposta da CTF externo, Y_j é o coeficiente de fator de resposta da CTF cruzado, Z_j é o coeficiente de fator de resposta da CTF interno, Φ_j é o coeficiente de fator de resposta de fluxo da CTF, T_i é a temperatura na face interna da parede (K), T_o é a temperatura na face externa da parede (K), q''_{ki} é o fluxo de condução de calor para o interior, na face interna da parede (W/m) e q''_{ko} é o fluxo de condução de calor do exterior, na face externa da parede (W/m).

2.1 MODELO ADAPTATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO

O modelo de conforto adaptativo estabelecido pela ASHRAE (ASHRAE, 2010b) define duas regiões de conforto para os ambientes, com 90% e 80% de aceitabilidade do tempo das zonas ocupadas. Para o presente trabalho, foram considerados os limites de temperatura com aceitabilidade de 80% dos ocupantes, definidos como

$$\text{Limite superior de aceitabilidade 80\% (}^\circ\text{C)} = 0,31 t_o + 21,3 \quad (8)$$

$$\text{Limite inferior de aceitabilidade 80\% (}^\circ\text{C)} = 0,31 t_o + 14,3 \quad (9)$$

em que t_o é a temperatura média mensal de bulbo seco do ar externo. O modelo é aplicável para temperaturas externas entre 10°C e $33,5^{\circ}\text{C}$. O gráfico com as faixas de temperaturas aceitáveis pode ser visto no Anexo B.

3 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

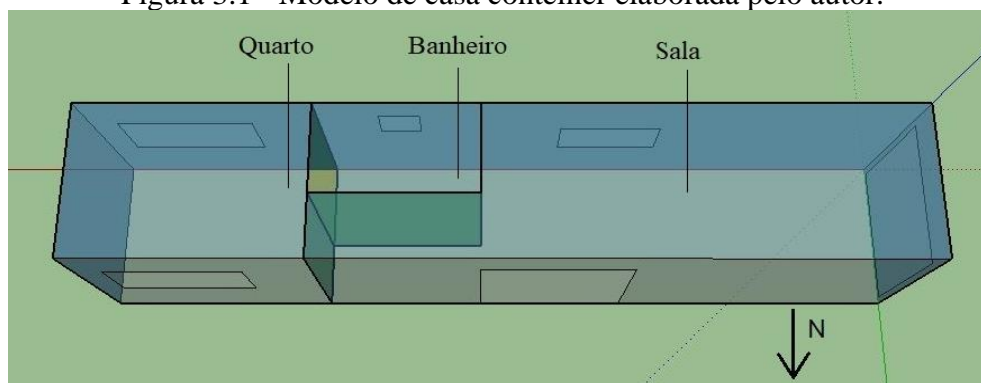
A crescente necessidade na redução do consumo de recursos tem aumentado a demanda por moradias alternativas como as casas contêiner, que necessitam de estratégias construtivas visando o conforto térmico dos ocupantes e menor consumo de energia.

Foram simuladas algumas estratégias como isolamento, *brise*, cobertura verde e cobertura sombreada com o propósito de analisar e comparar o comportamento das temperaturas operativas, horas de conforto térmico ao longo do ano e o conforto térmico em relação a um contêiner sem tratamento.

3.1 CASA CONTÊINER

A casa contêiner em questão, Figura 3.1, elaborada pelo próprio autor, é baseada em diversos projetos existentes utilizando um contêiner de 40 pés (12,20 m) *High Cube*, que tem como diferencial uma altura maior que a dos demais, com 2,90 m. O contêiner foi dividido em 3 zonas térmicas e tem um total de $29,26\text{ m}^2$ se encaixando no conceito de *Tiny House*. Ainda conta com $84,62\text{ m}^2$ de área de fachada com área de janelas que representam 18%.

Figura 3.1 - Modelo de casa contêiner elaborada pelo autor.



Na Figura 3.1 é possível ver as zonas térmicas e a orientação do modelo, localizado na cidade de Florianópolis, SC. As áreas de piso e volume de cada zona pode ser encontrada no Apêndice B.

3.1.1 ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

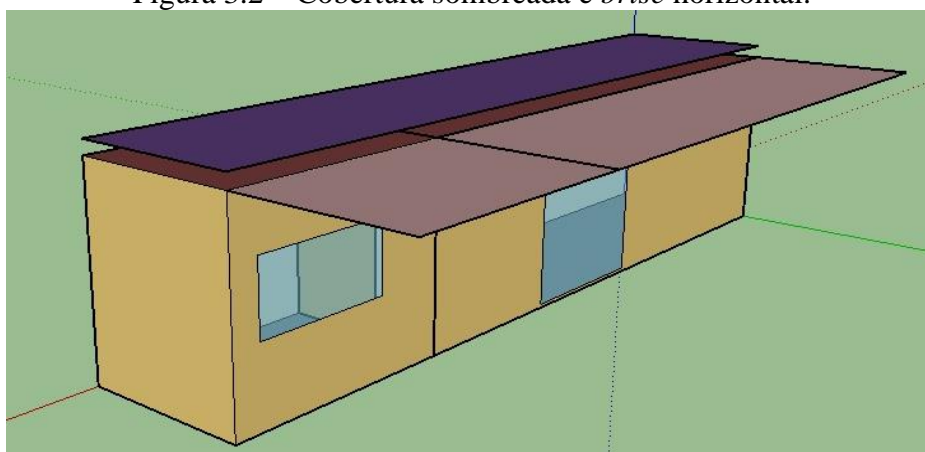
Esta seção é dedicada a descrição dos materiais utilizados na composição dos elementos construtivos da edificação.

O contêiner bruto (sem tratamento) é composto por aço galvanizado (1 mm) com pintura impermeabilizante com absorvância de 30% nas paredes e cobertura, e madeira compensada no piso (25 mm) da sala e quarto. O banheiro ainda tem piso cerâmico sobre a madeira (2 mm). Para o tratamento térmico das paredes e cobertura foram utilizadas camadas de lã de rocha (50 mm) e gesso acartonado (22 mm). Também foram considerados valores de resistência térmica de câmaras de ar não ventiladas devido às ondulações na camada de aço galvanizado e nas paredes internas. Os valores foram obtidos de acordo com NBR 15520-2/2005 (ABNT,

2005), considerando superfície de alta emissividade e espessura de 30 mm, podem ser vistos no Anexo A. Os vidros externos são claros com espessura de 3 mm.

Neste trabalho são propostos dois tipos de cobertura: a cobertura verde e uma cobertura sombreada. Para a cobertura sombreada os elementos construtivos se mantêm os mesmos do tratamento térmico, porém com um elemento de sombreamento de mesma área da cobertura do contêiner, afastado 20 cm da mesma, como mostra a Figura 3.2.

Figura 3.2 – Cobertura sombreada e *brise* horizontal.



A cobertura verde conta com várias camadas, com funções de impermeabilização, drenagem, substrato e vegetação como pode ser visto no Anexo A. Para a camada de vegetação foi utilizada a função *RoofVegetation* do programa *EnergyPlus*, com 20 cm de altura. Também foi proposta a utilização de um *brise* horizontal ao longo de toda a fachada Norte, com 2,5 m de largura, Figura 3.2. As propriedades de todos os elementos utilizados na construção são detalhadas no Anexo A.

3.1.2 CARGAS TÉRMICAS INTERNAS

As cargas térmicas internas são taxas de calor liberadas por equipamentos elétricos, iluminação e pessoas no interior do ambiente. Para o presente estudo, foram analisadas apenas as duas zonas de maior permanência dos ocupantes.

A edificação é ocupada apenas por uma pessoa durante o dia, que realiza atividades leves, dissipando 117 W com 30% de fração radiante na maior parte do tempo, exceto durante o horário de almoço, onde foi considerada atividade mais intensa dissipando 189 W com a mesma fração radiante. No período noturno, a edificação tem dois ocupantes, que durante o sono dissipam, cada um, 72 W com 30% de fração radiante. Os valores foram obtidos na norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010a).

A iluminação interna possui taxa média de dissipação de calor de 12 W/m² para todos os ambientes analisados, com 32% de fração radiante e 23% de fração visível, dados baseados na ASHRAE 1282-RP “*Lighting Heat Gain Distribution in Buildings*” de Daniel E. Fisher e Chanvit Chantrasrisalai (ENERGYPLUS, 2021b).

Para os equipamentos elétricos considerou-se uma taxa de dissipação de calor de 16 W/m² para sala e cozinha, com 50% de fração radiante. O consumo da geladeira, equipamento que fica mais tempo ligado, foi declarado separadamente dissipando 80 W com a mesma fração radiante. Maiores detalhes do perfil de funcionamento horário podem ser encontrados no Apêndice A.

3.1.3 SISTEMA DE AR CONDICIONADO

O sistema de ar condicionado empregado na edificação é do tipo Bomba de Calor (Bomba de Aquecimento de Terminal Completo), sistemas frequentemente utilizados em residências para fornecer tanto aquecimento quanto resfriamento, sendo uma alternativa para a utilização direta de energia elétrica para aquecimento.

O sistema foi programado para funcionar durante o dia conforme o esquema de ocupação, das 8h às 22h para os dias de semana e a partir das 9h nos fins de semana para a zona sala. Para o ambiente quarto foi definido todos os dias entre 22h e 8h. A temperatura programada é a mesma para os dois ambientes, sendo 24°C para o verão e 22°C para o inverno. O fluxo de ar externo foi estabelecido conforme a ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013), resultando em 0,01428 m³/s para a sala e 0,00745 m³/s para o quarto. Os valores utilizados para os cálculos podem ser vistos no Anexo C.

4 METODOLOGIA

Como proposta de tornar o contêiner termicamente confortável com menor consumo de energia, foram feitas simulações utilizando combinações de isolamento térmico, *brise* horizontal na fachada com maior incidência de Sol e dois tipos de cobertura, verde e sombreada. As cargas térmicas internas e sistema de ar-condicionado da edificação possuem as mesmas configurações para todos os modelos propostos.

4.1 SIMULAÇÕES

Na primeira etapa foi realizada a simulação da edificação base (contêiner bruto). Foram analisadas as temperaturas operativas (T_{op}) ao longo do dia para os dois ambientes principais da edificação em comparação com a temperatura externa, temperatura de bulbo seco (TBS). Para isso, foram escolhidos os dias com maior e menor temperatura externa ao longo do ano, de acordo com o arquivo climático. Nas Figuras 4.1 e 4.2 podemos ver que as temperaturas para os dois ambientes ficam acima da temperatura externa durante o período da tarde. Com o sistema de climatização a temperatura da zona sala é reduzida em até 6°C para os horários mais críticos da tarde. No período noturno, o ambiente quarto apresenta um pequeno aumento na temperatura com o uso da climatização artificial.

Figura 4.1 – Temperaturas ao longo do dia de maior TBS (*Free Running*).

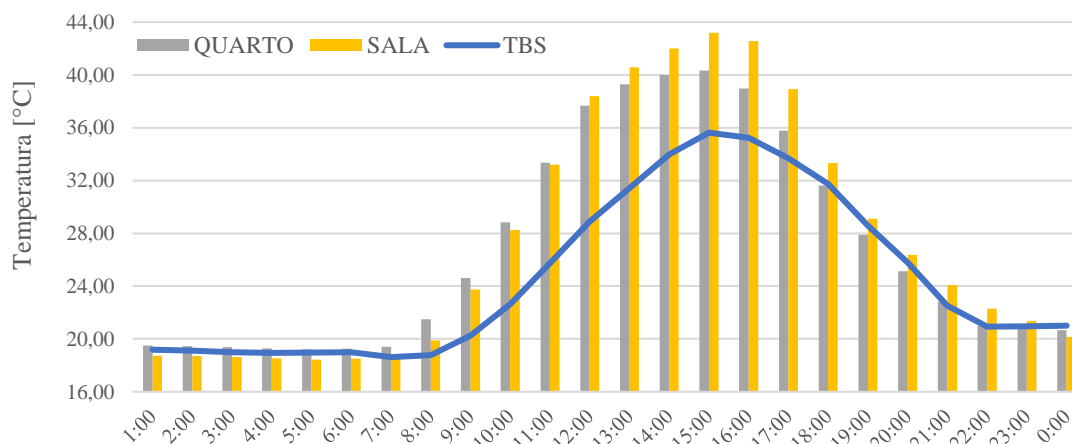
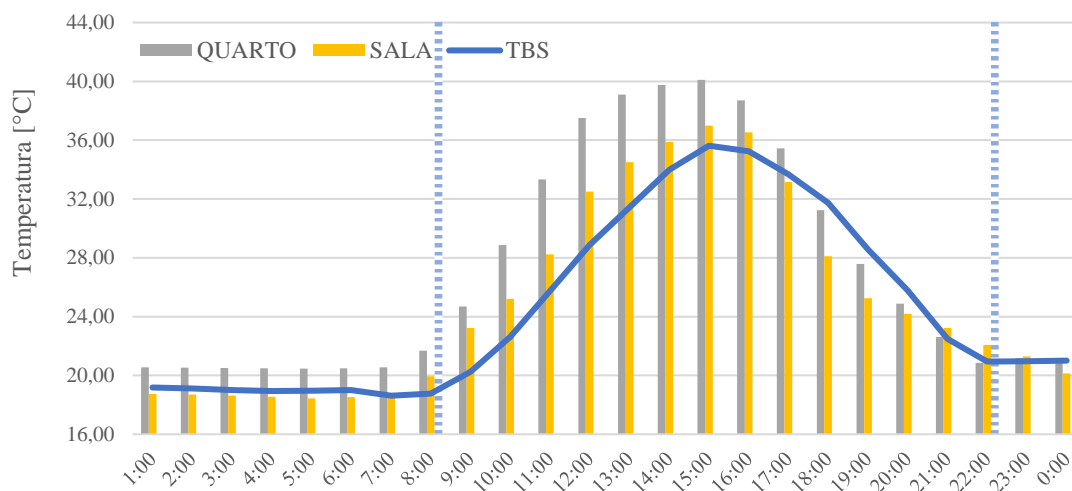
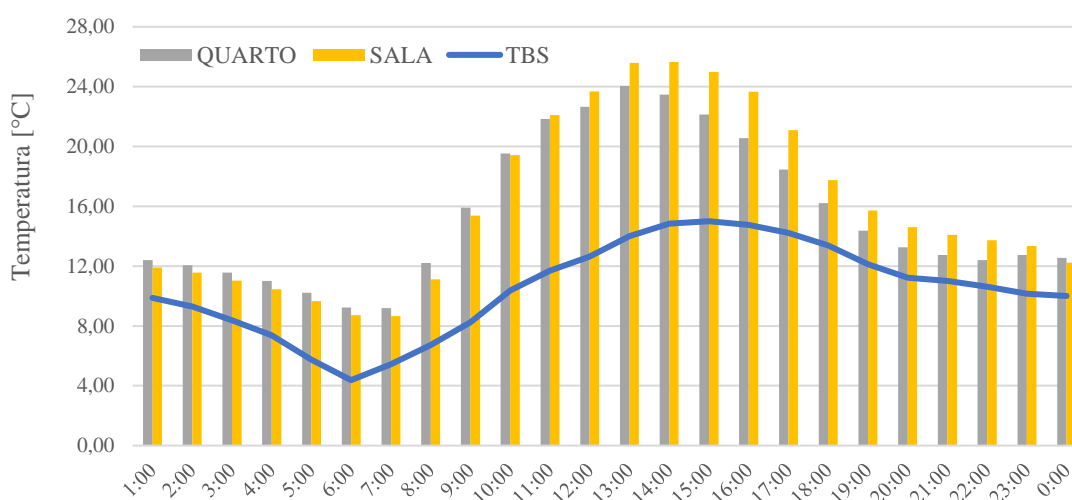


Figura 4.2 – Temperaturas ao longo do dia de maior TBS (HVAC).



No dia de menor temperatura externa do ano, o contêiner tem ganho de energia térmica proporcionando temperaturas mais agradáveis na parte da tarde como mostra a Figura 4.3. Na Figura 4.4 é possível perceber o aumento das temperaturas referente ao uso do sistema de climatização nos horários do final da tarde e noite para a sala e durante a noite no quarto. A maior diferença entre as temperaturas pode ser vista as 7 horas da manhã, chegando a 9°C entre a simulação *free running* e com sistema HVAC, no ambiente quarto. As mudanças de temperatura percebidas nos ambientes estão de acordo com os horários de funcionamento do sistema de climatização, como mostram as linhas tracejadas nos gráficos das Figuras 4.2 e 4.4.

Figura 4.3 – Temperaturas ao longo do dia de menor TBS (*Free Running*).

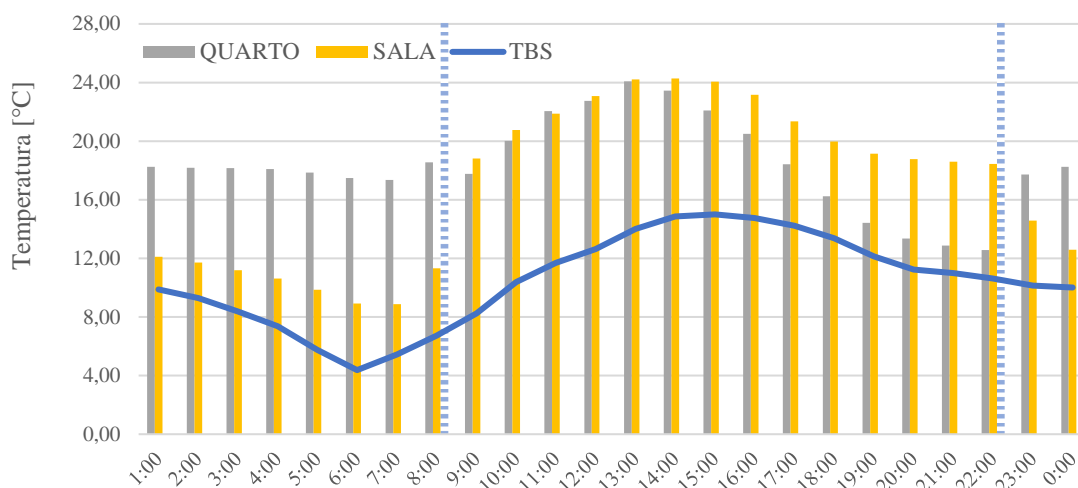


As horas de desconforto térmico foram simuladas pelo modelo adaptativo para 80% de aceitabilidade. Os dados mostrados na Tabela 4.1 referem-se ao tempo, em horas, que não atende ao modelo de conforto adaptativo durante o período de ocupação de cada zona. Em decorrência do ajuste das temperaturas visto anteriormente, podemos perceber que o uso do sistema de climatização reduziu as horas de desconforto das duas zonas analisadas.

Tabela 4.1 – Horas de desconforto térmico do contêiner bruto.

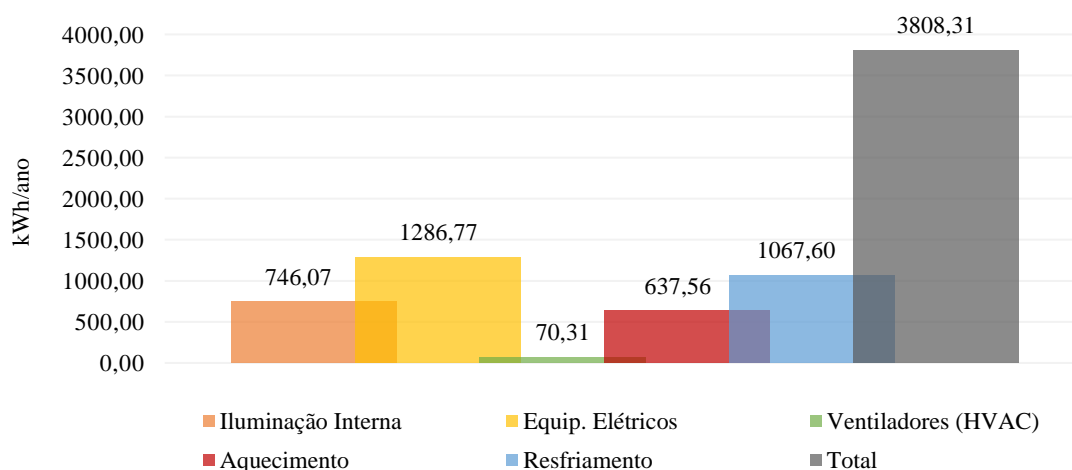
ZONA	<i>Free Running</i> (h)	HVAC (h)
Sala	2752,00	1141,75
Quarto	1719,75	1008,25

Figura 4.4 – Temperaturas ao longo do dia de menor TBS (HVAC).



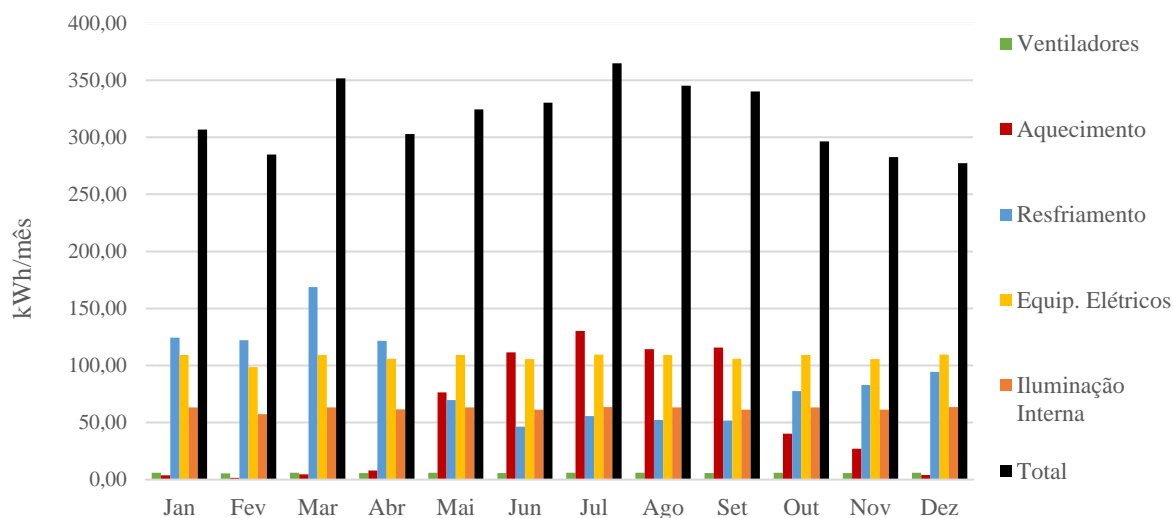
O consumo de energia de climatização corresponde à soma dos consumos de aquecimento, resfriamento e ventiladores do HVAC, que somados representam metade do consumo de energia total da edificação, dos quais 36% são para resfriamento. Os consumos de iluminação interna e equipamentos elétricos são referentes às cargas térmicas internas da Seção 3.1.2. Os resultados do consumo de energia anual da edificação podem ser vistos na Figura 4.5.

Figura 4.5 – Consumo energético anual do contêiner bruto.



A Figura 4.6 mostra o consumo de cada uma das categorias ao longo do ano. É possível observar que o consumo de aquecimento se dá principalmente entre maio e setembro, enquanto o consumo de resfriamento se prolonga por todo ano, tendo maior consumo nos meses de verão.

Figura 4.6 – Consumo energético mensal do contêiner bruto.



5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As estratégias propostas visam melhorar o desempenho térmico do ambiente, proporcionando temperaturas mais agradáveis, melhorando o conforto térmico e reduzindo o consumo de energia para climatização. As análises das temperaturas internas e conforto térmico foram feitas separadamente para as duas principais zonas térmicas da edificação, quarto e sala, enquanto que para o consumo de energia de climatização foram consideradas as zonas em conjunto. As seguintes legendas foram utilizadas: CB para contêiner bruto, CI para contêiner com isolamento, CIB para contêiner com isolamento e *brise*, CIBV para contêiner com isolamento, *brise* e cobertura verde e CBIS para contêiner com isolamento, *brise* e cobertura sombreada.

5.1 TEMPERATURA INTERNA

Todas as alternativas propostas se mostraram mais eficientes em relação a configuração original na redução de temperaturas para o dia de maior TBS analisado. Nas Figuras 5.1 e 5.2 podemos ver os resultados para as simulações do ambiente sala. É possível observar que a edificação base sofre maior influência das temperaturas externas em função da condutividade térmica do material, que facilita o fluxo de calor nas paredes.

Percebe-se que apenas o isolamento térmico não é suficiente para as horas de maior temperatura externa do dia, atingindo temperaturas máximas próximas da configuração CB. Na edificação CIB podemos ver a eficiência do *brise* horizontal, reduzindo o fluxo de calor na fachada norte e proporcionando temperaturas até 6°C mais baixas que a configuração CI. As configurações CIBV e CIBS tem desempenho muito parecido, com destaque para a utilização de cobertura verde, que proporciona o melhor perfil de temperaturas.

Mesmo que as estratégias propostas acarretem em uma redução significativa das temperaturas, a utilização do sistema de ar condicionado é necessária para proporcionar um ambiente mais agradável para os ocupantes. As Figuras 5.2 e 5.4 mostram a redução das temperaturas operativas com a utilização do HVAC. As alternativas com aplicação de coberturas, verde e sombreada, se mostram igualmente eficientes, com maior diferença sobre as edificações sem esses tratamentos nos horários da tarde.

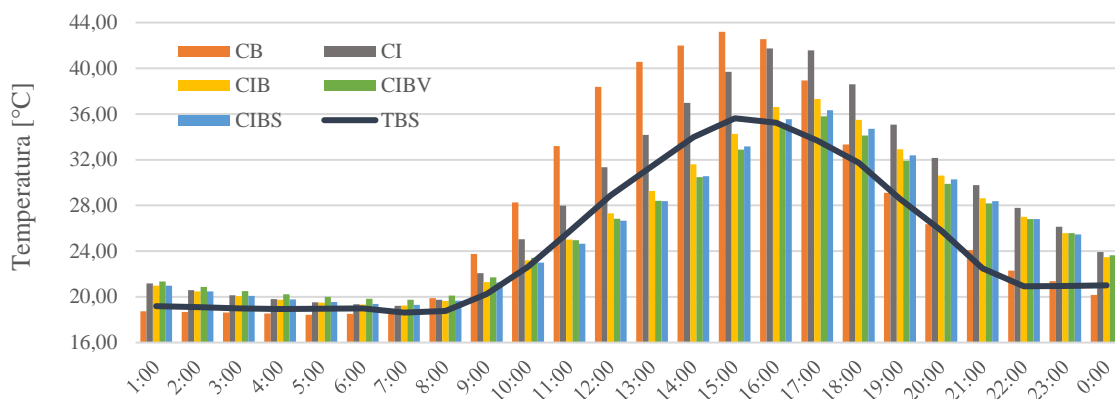
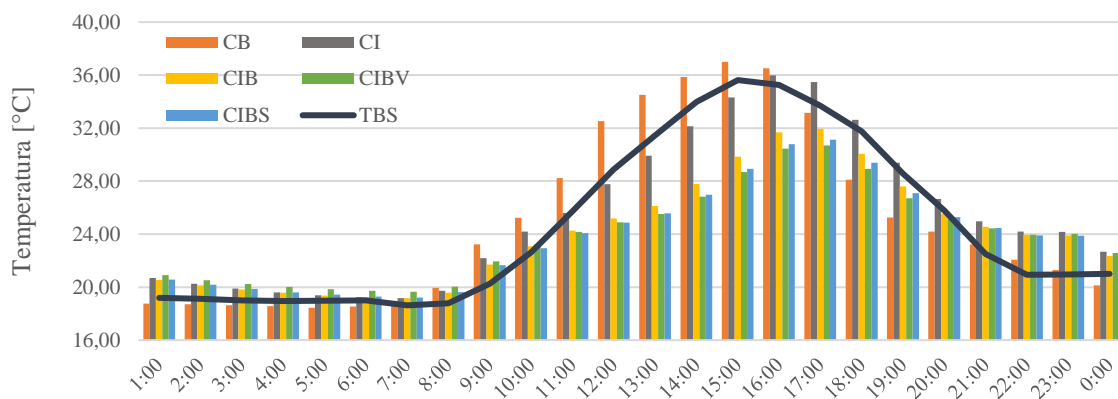
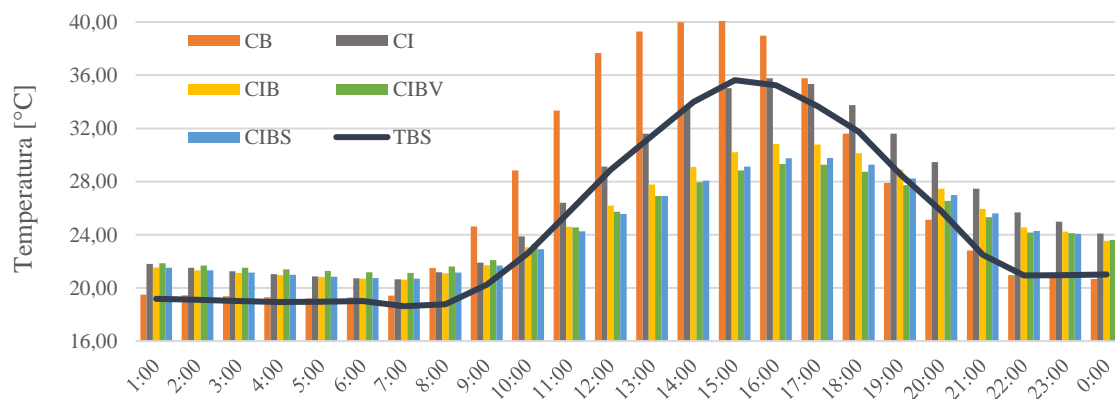
Figura 5.1 – Maior TBS anual para Sala (*Free Running*).

Figura 5.2 – Maior TBS anual para Sala (HVAC).

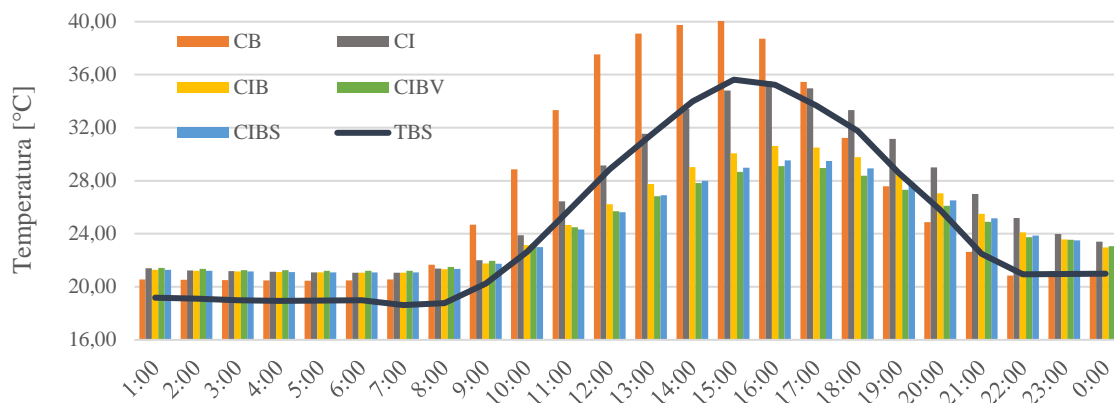


Para o ambiente quarto, os tratamentos propostos são ainda mais eficientes, conseguindo manter as temperaturas mais baixas ao longo do dia e mantendo-as elevadas no período noturno, como mostra a Figura 5.3. Acredita-se que as temperaturas obtidas no ambiente sala sejam mais altas a partir do período da tarde, principalmente por consequência da janela sem proteção na fachada oeste, permitindo maior fluxo de calor provindo da radiação solar direta.

Figura 5.3 – Maior TBS anual para Quarto (*Free Running*).

Comparando as Figuras 5.3 e 5.4, podemos perceber a contribuição dos tratamentos para a manutenção das temperaturas no período noturno, onde as temperaturas quase não são influenciadas pelo sistema de climatização.

Figura 5.4 – Maior TBS anual para Quarto (HVAC).



Para o dia de menor temperatura externa do ano as alternativas propostas se mostram relevantes para o ganho térmico da edificação, mantendo as temperaturas internas mais elevadas do que a edificação CB em grande parte do dia, proporcionando maior conforto térmico para os ocupantes nos dias mais frios. Nos gráficos das Figuras 5.5 e 5.6 estão representadas as temperaturas em diferentes modos de simulação para o ambiente sala. A alternativa que utiliza apenas isolamento apresenta temperaturas mais elevadas para a zona sala nas horas da tarde, período em que o ambiente está sendo ocupado, apresentando maior necessidade de resfriamento.

Figura 5.5 – Menor TBS anual para Sala (*Free Running*).

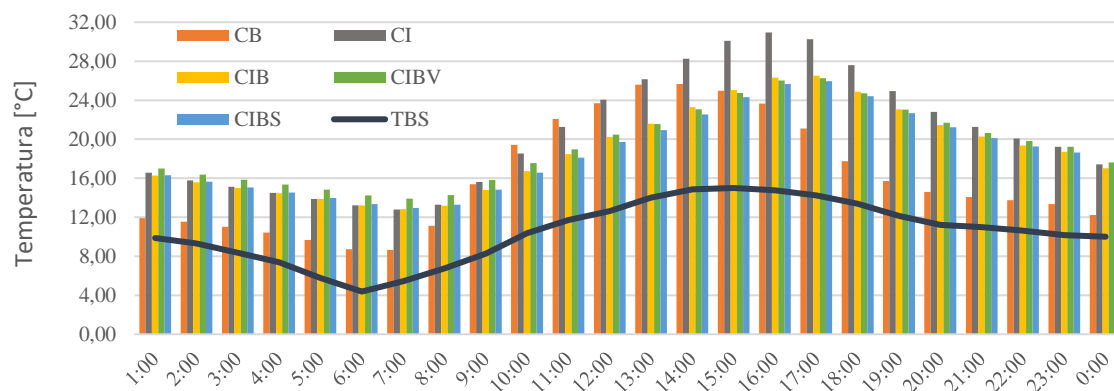
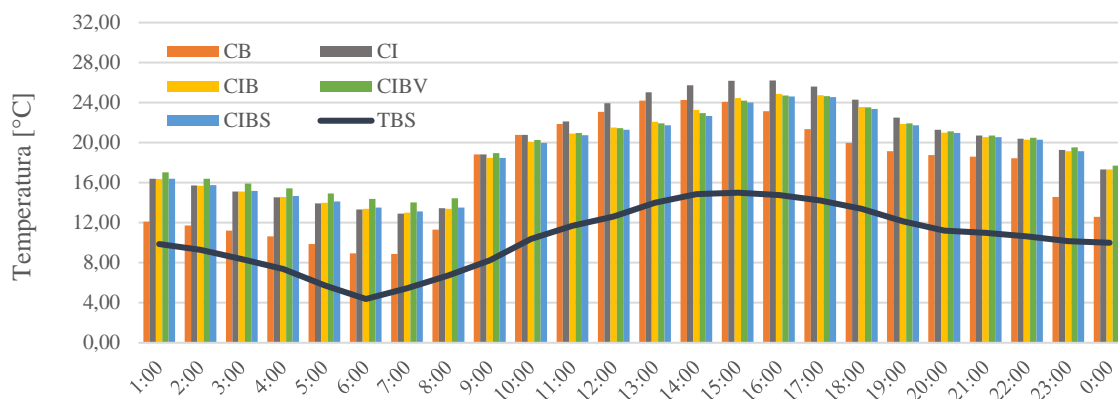


Figura 5.6 – Menor TBS anual para Sala (HVAC).



Para o ambiente quarto, as temperaturas mais representativas são as do período noturno, onde é possível perceber o bom desempenho das alternativas propostas que se mostram fundamentais para obtenção de conforto do usuário. Nas Figuras 5.7 e 5.8 são mostrados os dados obtidos para este ambiente.

Figura 5.7 – Menor TBS anual para Quarto (*Free Running*).

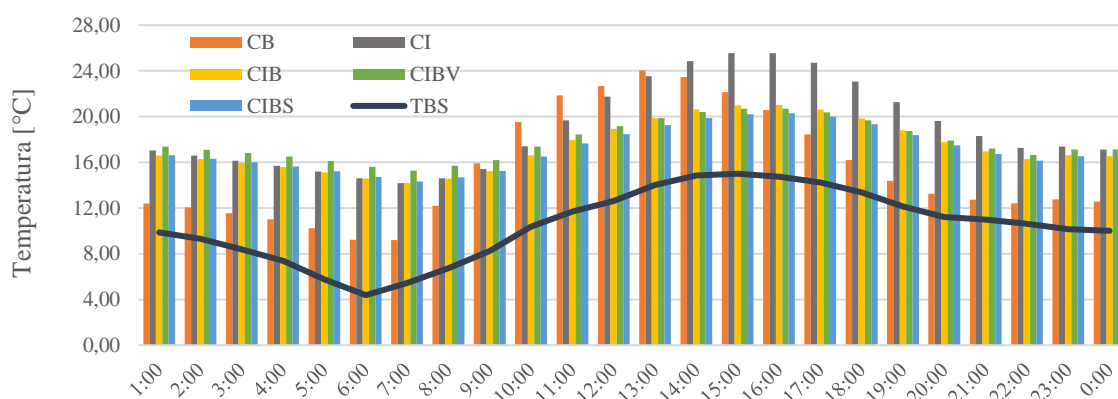
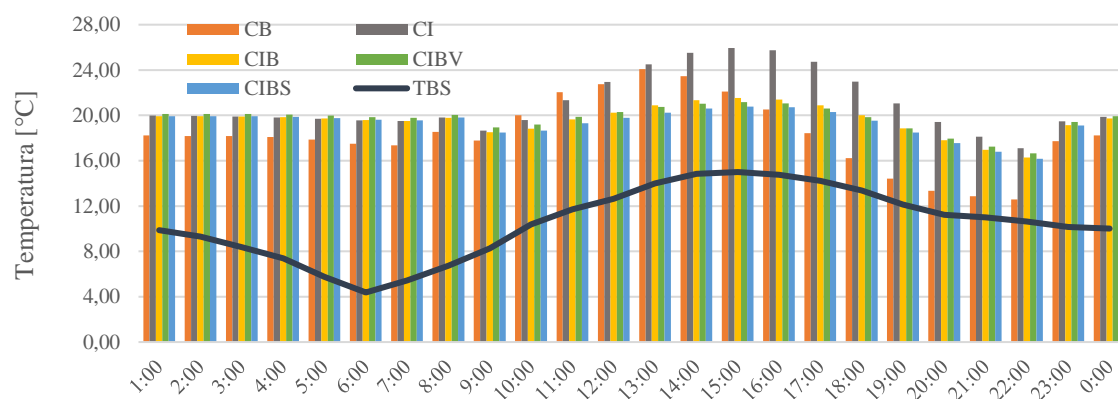


Figura 5.8 – Menor TBS anual para Quarto (HVAC).



O sistema de condicionamento de ar, usado apenas durante a noite, se faz necessário para obter temperaturas mais agradáveis, conforme a Figura 5.8. A configuração CIBV apresentou melhor desempenho para as horas de ocupação da zona, com temperaturas mais altas.

5.2 CONFORTO TÉRMICO

As horas de desconforto térmico para as edificações podem ser comparadas nas Tabelas 5.1 e 5.2, para simulação *free running* e com HVAC, respectivamente. Na Tabela 5.1 é possível perceber que as propostas tem grande redução nas horas de desconforto térmico para o ambiente quarto, chegando a 72,8% para a configuração CIBV, em conformidade com a análise das temperaturas. Para a zona sala, a configuração CIBS apresenta o melhor desempenho em relação ao CB, com 8,4% de redução. A porcentagem negativa mostra um aumento de horas de desconforto para a edificação apenas com isolamento térmico, devido à dificuldade de perder o calor ganho com as altas temperaturas apresentadas na Seção 5.1.

Tabela 5.1 – Horas de desconforto térmico (*Free Running*).

Edificação	Sala		Quarto	
	Horas	Percentual	Horas	Percentual
CB	2752,00	-	1719,75	-
CI	3149,75	-14,5%	638,50	62,9%
CIB	2631,50	4,4%	676,75	60,6%
CIBV	2621,75	4,7%	467,75	72,8%
CIBS	2520,50	8,4%	659,00	61,7%

Quando utilizado o sistema de climatização, as propostas apresentam maiores reduções nas horas de desconforto. A configuração CIBV mostra os melhores resultados para o ambiente quarto, praticamente zerando as horas anuais conforme a Tabela 5.2. A configuração com isolamento ainda mostra mais horas de desconforto em comparação a edificação base, porem com menor diferença em relação a simulação sem o sistema de climatização. No caso do ambiente sala, a CIBS foi a proposta que proporcionou maior conforto térmico.

Tabela 5.2 – Horas de desconforto térmico (HVAC).

Edificação	Sala		Quarto	
	Horas	Redução	Horas	Redução
CB	1141,75	-	1008,25	-
CI	1215,50	-6,5%	47,00	95,3%
CIB	609,75	46,6%	48,00	95,2%
CIBV	505,00	55,8%	6,25	99,4%
CIBS	485,00	57,5%	42,50	95,8%

5.3 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo referente aos equipamentos elétricos e iluminação interna se mantiveram os mesmos para todas as configurações propostas. Assim, para fins de comparação, foram analisados apenas o consumo de climatização da edificação. A comparação do consumo entre

o modelo base e as propostas é mostrada na Tabela 5.3, onde se pode verificar a redução do consumo energético das edificações como resultado das estratégias utilizadas.

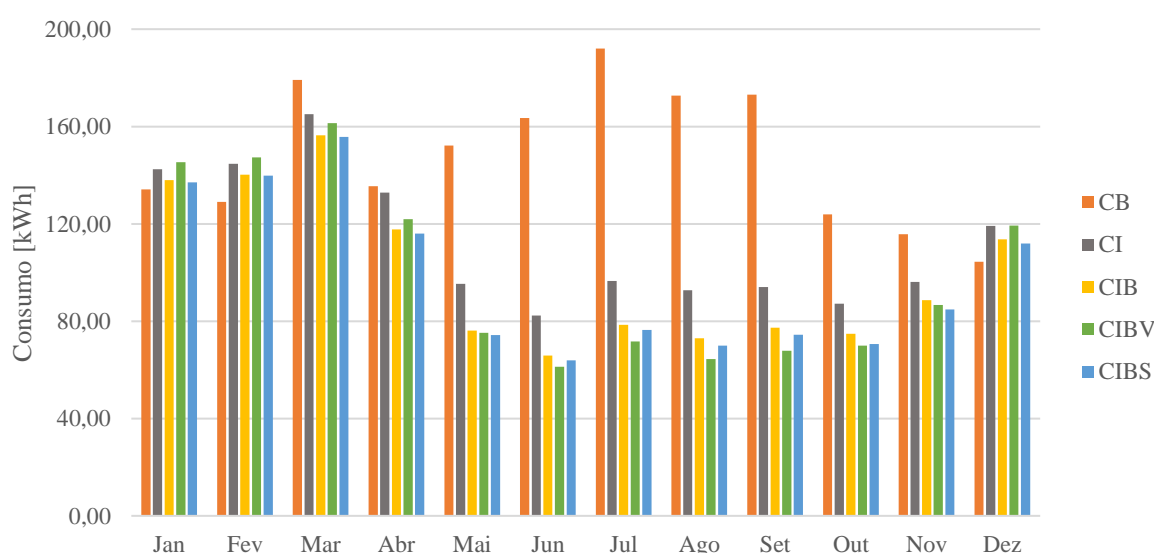
A edificação CIB tem o maior consumo de aquecimento entre as propostas apresentadas, consequência do menor fluxo de radiação solar direta, devido ao sombreamento da fachada norte. Quando acrescentada a cobertura verde, temos o melhor desempenho para aquecimento. A configuração CI apresenta o maior consumo de resfriamento, acima, inclusive, do contêiner sem nenhum tratamento. O melhor desempenho para o resfriamento é proporcionado com a soma da cobertura sombreada. Para a ventilação, todas as propostas mostram reduções similares.

Tabela 5.3 – Comparações entre o modelo base as propostas em kWh/ano.

Edificação	CB	CI	CIB	CIBV	CIBS
Aquecimento	637,56	126,11	141,08	107,39	139,93
Resfriamento	1067,60	1185,55	1022,80	1048,98	998,21
Ventilação (HVAC)	70,31	36,54	36,03	35,91	36,62
Consumo Total	1775,47	1348,20	1199,91	1192,28	1196,83
Redução em relação ao CB	-	24,1%	32,4%	32,8%	33,8%

Como esperado, o consumo de climatização vai diminuindo conforme foram sendo aplicadas as estratégias propostas, chegando as 33,8% de redução anual para a melhor configuração final apresentada. O gráfico da Figura 5.9 mostra o consumo mensal de climatização para as propostas apresentadas no período de um ano.

Figura 5.9 – Comparação entre o consumo mensal de climatização.



Analisando-se a Figura 5.9, tem-se que a redução no consumo é mais expressiva nos meses de inverno devido a menor necessidade do uso do sistema de ar condicionado (aquecimento), justificado pelo melhor desempenho térmico das propostas nos meses de inverno, conforme

analisado na Seção 5.1. Para os meses mais quentes, a maior redução no consumo se dá no mês de março.

6 CONCLUSÃO

Neste estudo procurou-se demonstrar o comportamento do contêiner como edificação e como algumas estratégias podem contribuir para melhorar o seu desempenho térmico e energético. Uma vez que a edificação sem tratamentos tem excelente condutividade térmica é de fundamental importância a utilização de estratégias passivas como as apresentadas no trabalho para o uso pleno do mesmo.

A utilização de isolamento se mostrou importante para diminuir o consumo de energia para a climatização artificial da edificação, mas manteve mais horas de desconforto na zona sala em relação à edificação sem tratamento. A estratégia somada ao *brise* na fachada Norte, para o qual a edificação é orientada, mostrou-se relevante para a redução do consumo de resfriamento em decorrência da proteção contra radiação solar direta na mesma, reduzindo as temperaturas internas e passando a proporcionar menos horas de desconforto que a edificação base. Quando aplicada, a cobertura verde contribuiu para a redução do consumo de aquecimento enquanto a cobertura sombreada teve melhor desempenho para o resfriamento. O uso concomitante de estratégias diminui a influência das temperaturas externas e da radiação solar incidente, proporcionando temperaturas internas mais estáveis, melhorando o conforto térmico dos usuários e reduzindo a necessidade de climatização artificial. Entre as propostas apresentadas, a que teve melhor desempenho foi a CIBS, combinação de isolamento, *brise* e cobertura sombreada, que apresentou perfil de temperatura que contribuiu para a redução das horas de desconforto e o menor consumo energético com HVAC.

Este trabalho buscou ampliar o estado da arte nessa área de conhecimento, tendo em vista a crescente utilização de contêineres na construção civil e a falta de trabalhos avaliando as condições térmicas e energéticas dos mesmos. Para trabalhos futuros sugere-se a aplicação um sistema fotovoltaico que substitua a cobertura sombreada, exercendo a mesma função de sombreamento e gerando energia para a edificação. Também é sugerida a aplicação de paredes verdes, vidros duplos, películas nas janelas e de um *brise* na janela oeste para diminuir ainda mais o aumento das temperaturas no ambiente da sala, e analisar os impactos dos mesmos.

REFERÊNCIAS

ACOMB, Glenn; CLARK, Mark; LANG, Sylvia. **Green roofs/eco roofs**. In: Florida Field Guide to Low Impact Development. Florida, USA: University of Flórida, 2008. Disponível em: http://buildgreen.ufl.edu/Fact_sheet_Green_Roofs_Eco_roofs.pdf. Acesso em: 13 dez 2021.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, EUA: ASHRAE, p. 18, 2010.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55-2010: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta, GA, EUA: ASHRAE, p. 12, 2010.

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 62.1-2013: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality**. Atlanta, GA, EUA: ASHRAE, p. 12, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações**. Rio de Janeiro. 2005.

BEZERRA, Paula *et al.* Impacts of a warmer world on space cooling demand on Brazilian households. **Energy and Buildings**, vol. 234, mar. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778820334824?via%3Dihub>. Acesso em: 19 mar. 2022.

DA CUNHA, Eduardo G. **Mitos e verdades sobre o *brise-soleil*: da estética à eficiência energética**. Arquitetura Revista, 7(1), 73–80. Disponível em: <https://doi.org/10.4013/arq.2011.71.07>. Acesso em: 15 dez. 2021.

ENERGYPLUS. **Version 8.7**. U.S. Department of Energy’s (DOE), 2017. Disponível em: <https://energyplus.net/>. Acesso em 12 dez. 2021.

ENERGYPLUS, U.S. D. of E. **Engineering Reference**. [s.l.], p. 60, 2021. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/EngineeringReference.pdf. Acessado em: 05 mar. 2022.

ENERGYPLUS, U.S. D. of E. **Input Output Reference**. [s.l.], p. 537, 2021. Disponível em: https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v9.6.0/InputOutputReference.pdf. Acessado em: 06 mar. 2022.

LABEE, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/>. Acesso em: 16 dez. 2021.

NESS, Leandro F. **Análise da influência de proteção externa e interna na carga térmica e consumo de energia elétrica para uma edificação**. 2012. 18f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Poto Alegre, 2012. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/60592>. Acesso em: 14 dez. 2021.

OCCHI, Tailene; DE ALMEIDA, Cailane C. O. **Uso de containers na construção civil: Viabilidade construtiva e percepção dos moradores de Passo Fundo – RS**. Revista de Arquitetura IMED, 2016. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/arqimed/article/view/1282/858>. Acesso em: 08 dez. 2021.

VIANA, Françoise S. **Análise de Desempenho Térmico em Módulo de Contêiner Marítimo**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais, 95f. 2018. Disponível em: https://www.propec.ufop.br/uploads/propec_2016/teses/arquivos/dissertacao-analisedesempenhotermico.pdf. Acesso em: 30 nov. 2021

WARK, Christopher G.; WARK, Wendy W. **Green Roof Specifications and Standards: establishing an emerging technology**. The Construction Specifier, v. 56, n. 8, 2003. Disponível em: http://www.renovationcontractorsnearme.com/Images/Pdf/newslinks-803_construction_specifier.pdf. Acesso em: 13 dez. 2021.

ANEXOS

ANEXO A – PROPRIEDAS DOS ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Conforme citado na Seção 3.1.1, as propriedades dos elementos utilizados na construção da edificação são mostradas na Figuras A.1 e A.2 e nas Tabelas A.1 e A.2.

Figura A.1 – Esquema de cobertura verde (VIANNA, 2018).

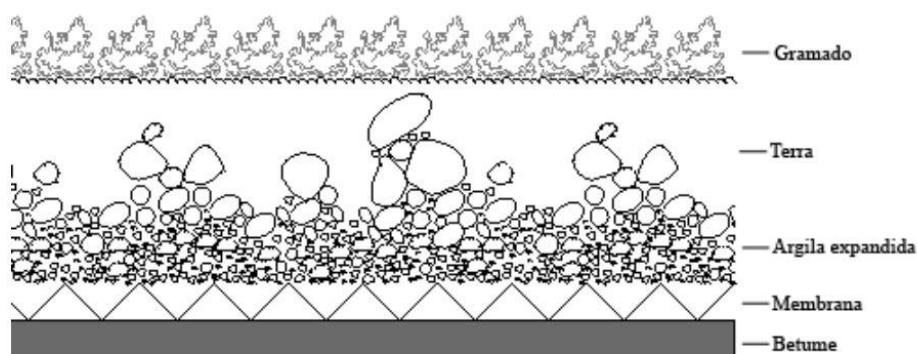


Figura A.2 – Valores de resistência térmica para câmaras de ar não ventiladas (ABNT, 2005).

Natureza da superfície da câmara de ar	Espessura "e" da câmara de ar cm	Resistência térmica R_{ar} $m^2.K/W$		
		Direção do fluxo de calor		
		Horizontal	Ascendente	Descendente
		⇒	⇕	⇓
Superfície de alta emissividade $\varepsilon > 0,8$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,14	0,13	0,15
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,16	0,14	0,18
	$e > 5,0$	0,17	0,14	0,21
Superfície de baixa emissividade $\varepsilon < 0,2$	$1,0 \leq e \leq 2,0$	0,29	0,23	0,29
	$2,0 < e \leq 5,0$	0,37	0,25	0,43
	$e > 5,0$	0,34	0,27	0,61

Tabela A.1 – Propriedades da vegetação do telhado verde.

Emissividade da folhagem	0,95
Refletividade da folhagem	0,22
Resistência estomática mínima	180 s/m
Condutividade do solo seco	0,35 W/mK
Densidade do solo seco	1100 kg/m ³
Absortância solar do solo	0,7
Absortância do solo para luz visível	0,75

Tabela A.2 – Materiais e suas propriedades termofísicas.

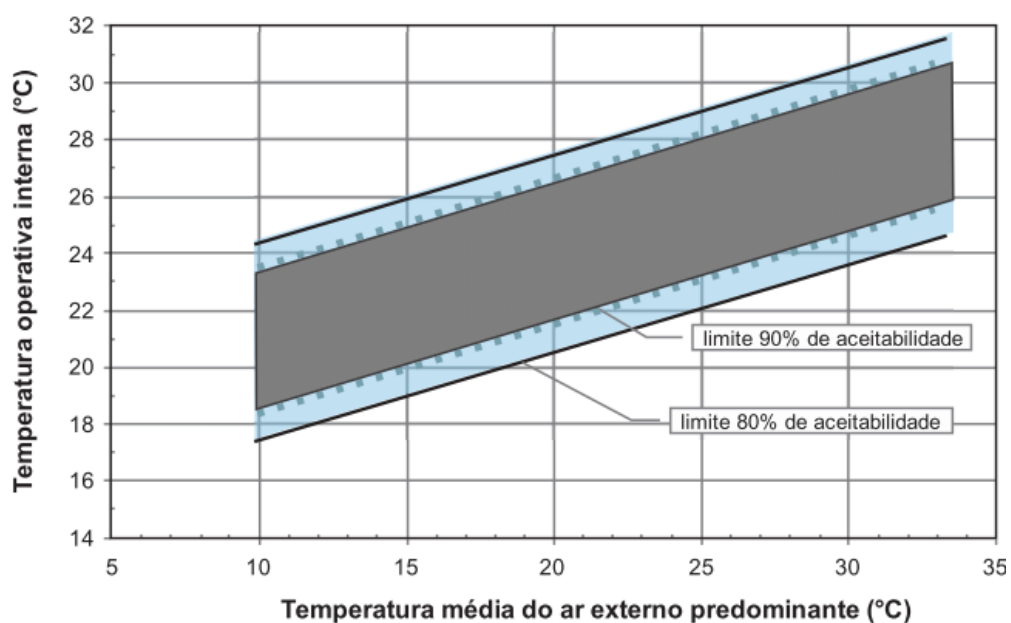
Material	Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/mK)	Massa Específica (kg/m ³)	Calor específico (J/kgK)
Aço galvanizado	0,001	55	7800	460
Argila expandida	0,03	0,16	400	100
Betume asfáltico	0,005	0,17	1000	1460
Chapas de fibra de madeira	0,025	0,29	1000	1340
Gesso Acartonado	0,022	0,35	1000	840
Lã de rocha	0,05	0,045	100	750
Membrana betuminosa	0,005	0,23	1000	1460
Piso cerâmico	0,002	0,9	1600	920
Terra argilosa	0,15	0,52	1700	840

Fonte: Adaptado NBR 15220 (ABNT, 2005).

ANEXO B – MODELO ADAPTATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO

Neste Anexo é apresentada a Figuras B.1, com a faixa de valores utilizada para o cálculo do conforto adaptativo mostrado na Seção 2.1.

Figura B.1 – Limites de temperaturas operativas aceitáveis para o modelo adaptativo (Adaptado ASHRAE, 2010).



ANEXO C – TAXAS MINIMAS DE VENTILAÇÃO

Na Tabela C.1 são apresentados os valores utilizados da Seção 3.1.3 para o cálculo da vazão de ar externo conforme estabelecido pela ASHRAE.

Tabela C.1 – Valores para cálculo de ar externo.

Categoria de Ocupação	R_p [L/s]	R_a [L/sm ²]
<i>Bedroom/Living Room</i>	2,5	0,3

Fonte: Adaptado ASHRAE 62.1 (ASHRAE, 2013).

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARGAS HORÁRIAS DE PESSOAS, ILUMINAÇÃO, EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.

Neste Apêndice são apresentadas as cargas horárias referenciadas na Seção 3.1.2 conforme as Tabelas A.1 e A.2.

Tabela A.1 – Cargas horárias de ocupação interna.

Período	Sala		Quarto
	Dias de Semana	Demais Dias	Todos os Dias
0:00 – 8:00	0%	0%	100%
8:00 – 9:00	50%	100%	0%
9:00 – 18:00	50%	100%	0%
18:00 – 23:00	100%	100%	0%
23:00 – 24:00	0%	0%	100%

Tabela A.2 – Cargas horárias de iluminação interna e equipamentos elétricos.

Período	Sala		Quarto
	Dias de Semana	Demais Dias	Todos os Dias
0:00 – 8:00	0%	0%	0%
8:00 – 9:00	50%	0%	0%
9:00 – 11:00	50%	75%	0%
11:00 – 12:00	75%	100%	0%
12:00 – 18:00	50%	75%	0%
18:00 – 22:00	75%	50%	0%
22:00 – 23:00	75%	50%	100%
23:00 – 24:00	0%	0%	0%

APÊNDICE B – ÁREAS DE PISO, JANELAS E VOLUME DAS ZONAS.

Neste Apêndice são apresentadas as áreas de piso e volume das zonas do contêiner citadas na Seção 3.1 conforme a Tabelas B.1.

Tabela B.2 – Área e volume das zonas.

Zona	Área (m ²)	Volume (m ³)	Área de janela (m ²)
Banheiro	3,36	9,74	0,36
Quarto	8,16	23,66	4
Sala	17,74	51,43	10,88