

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

VALÉRIA HENRIQUE VITÓRIA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL PADRÃO NZEB:
ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO (II)

Niterói
2021

VALÉRIA HENRIQUE VITÓRIA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL PADRÃO NZEB:
ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO**

PROJETO DE CONCLUSÃO DE CURSO (II)

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para conclusão do curso.

Orientador:

Prof. Marcelo Jasmim Meiriño

Coorientador:

Prof. Gilberto Figueiredo Pinto Filho

Niterói
2021

Ficha Catalográfica elaborada pelo Aluno. Acesse o site:

<http://www.bibliotecas.uff.br/bee/ficha-catalografica>

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

V845a Vitória, Valéria Henrique
ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL PADRÃO
NZEB: ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO / Valéria Henrique
Vitória ; Marcelo Jasmim Meirino, orientador ; Gilberto
Figueiredo Pinto Filho, coorientador. Niterói, 2020.
57 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Civil)-Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia,
Niterói, 2020.

1. Eficiência Energética. 2. Energia Renovável. 3.
Simulação Computacional. 4. NZEB. 5. Produção intelectual.
I. Meirino, Marcelo Jasmim, orientador. II. Pinto Filho,
Gilberto Figueiredo, coorientador. III. Universidade Federal
Fluminense. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDD -

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

VALÉRIA HENRIQUE VITÓRIA

**ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA EDIFICAÇÃO RESIDENCIAL PADRÃO NZEB:
ESTUDO DE CASO NO RIO DE JANEIRO**

Projeto de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para conclusão do curso.

Aprovada em 10 de maio de 2021.

BANCA EXAMINADORA

Marcelo Jasmim Meiriño

Prof. Nome Completo do Coorientador- UFF

Gilberto Figueiredo Pinto Filho

Prof. Nome Completo do Coorientador- UFF

Renata Faísca

Prof. Nome do Membro da Banca- UFF

Wilson Teixeira

Prof. Nome do Membro da Banca- UFF

Niterói
2021

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todos os alunos e profissionais da área de construção civil que buscam conhecimento na área de construção com eficiência energética.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me ajudado e permitido chegar até aqui, aos meus pais Valdir e Valcira e minha irmã Vanessa que me apoiaram nessa trajetória. Também aos que me passaram o conhecimento necessário para essa formação e desenvolvimento desse trabalho, como os professores Marcelo Meiriño e Gilberto Figueiredo.

RESUMO

As edificações representam uma parte significativa do consumo energético mundial. Uma proposta para minimizar esse consumo é a implementação de edificações padrão *Net Zero Energy Building* e/ou *Nearly Zero Energy Building*. Estes tipos de construções já existem em diversas localidades, porém, elas não são comuns no Brasil. Este estudo se propõe a identificar a viabilidade técnica de ambos os conceitos na realidade brasileira. Assim, para realizar esta análise foi feito o levantamento das referências técnicas vigentes sobre o tema (em especial a ISO 52.000, NBR 15.220 e NBR 15.575) e os sistemas construtivos mais utilizados. Em seguida, esses padrões foram aplicados a uma simulação computacional por meio do software *EnergyPlus*, utilizando como modelo o projeto de uma edificação residencial localizada na cidade Rio de Janeiro. A análise se concentrou no impacto energético da envoltória da edificação, utilizando um modelo de referência e outros cinco modelos construtivos comuns no contexto nacional. Estes modelos foram analisados quanto ao uso de ventilação natural e, posteriormente, quanto ao uso de um sistema híbrido de ventilação e climatização. Essas considerações geraram dados comparativos de consumo de energia. Apesar de todos os modelos terem apresentado resultados de consumo de energia dentro da margem de referências internacionais para locais com climas também quentes, alguns modelos puderam se destacar, e, neste caso, o modelo de menor consumo energético apresentou valores 22 % inferiores ao modelo de referência. A este modelo foi associado a um fornecimento de energia solar fotovoltaica para atender a um requisito fundamental de um NZEB: uso de fonte de energia renovável. Os resultados demonstraram que as tecnologias construtivas e o potencial energético nacional apresentam um saldo energético positivo para a implementação de um nZEB no Brasil.

Palavras-chave:

NZEB, Análise Energética, Simulação Computacional, Consumo de Energia, Ventilação Natural, Energia Renovável

ABSTRACT

Buildings represent a significant part of global energetic consumption. A proposal to minimize this consumption is implementing Net Zero Energy Building and/or Nearly Zero Energy Building standards. This type of construction already exists in several locations, but they are not usual in Brazil. This research aims to identify technical feasibility of those concepts in Brazilian reality. Thus, to develop this analysis, a survey of technical references existing about the subject (in particular the ISO 52.000, NBR 15.220 and NBR 15.575) and the most used building systems is performed. Thereafter, these regulations were applied in a computer simulation through EnergyPlus software, using as model a project of a residential building in Rio de Janeiro. The analysis focused on the energetic impact of the building envelope, using a reference model and five other construction models common in the national context. These models were analyzed in terms of natural ventilation and then, for the use of a hybrid system with ventilation and air conditioning. These considerations generated comparative data of energy consumption. Although those models were shown to be in the scope of international reference to warm climate places, some models were highlighted, and in this case, the model of lower energy consumption presented results 22% inferior to the reference model. This model is then associated with a supply of solar photovoltaic energy in order to apply one of the fundamental requirements of nZEB: the use of renewable energy sources. The results have shown that building technologies and national energetic potential report a positive energetic balance to a NZEB implementation in Brazil.

Keywords:

NZEB, Energy Analysis, Computer Simulation, Energy consumption, Natural Ventilation, Renewable Energy

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1:	Software de modelagem SkecthUp + Plugin Euclid.....	16
Figura 2:	Software de Simulação <i>EnergyPlus</i>	17
Figura 3:	Campo da Programação Compactada.....	18
Figura 4:	Campo de Definição dos Materiais.....	18
Figura 5:	Campo de Definição da Construção.....	19
Figura 6:	Campo de Controle de superfícies de aberturas para Ventilação Natural ..	20
Figura 7:	Campo de Controle de tipos de aberturas para Ventilação Natural.....	21
Figura 8:	Campo de Geração Solar Fotovoltaica.....	22
Figura 9:	Zoneamento Bioclimático.....	26
Tabela 1:	Padrão de ocupação diários dos APP – NBR 15575-1: 2021.....	27
Tabela 2:	Taxa metabólica – RTQ-R: 2012 e NBR 15575-1: 2021.....	27
Tabela 3:	Padrão de iluminação - NBR 15575-1: 2021.....	28
Tabela 4:	Densidades de potência instalada - NBR 15575-1: 2021.....	29
Tabela 5:	Intervalo de temperaturas externas de bulbo seco NBR 15575-1: 2021.....	30
Tabela 6:	Faixas de temperatura operativa para determinação do PHFT _{APP} NBR 15575-1: 2021.....	29
Figura 10:	Planta Baixa da Edificação.....	35
Figura 11:	Vistas da Edificação Modelada no <i>Sketchup</i>	36
Figura 12:	Zona Bioclimática 8.....	37
Tabela 7:	Diretrizes Construtivas – NBR 15.220: 2003.....	37
Tabela 8:	Transmitância térmica de paredes externas U (W/m ² . K)– NBR 15.575-4: 2021.....	38
Tabela 9:	Área mínima de ventilação em dormitório e salas – NBR 15.475 -4: 2021	38
Tabela 10:	Transmitância térmica de coberturas U (W/m ² .K) – NBR 15.475 -5:2021	38
Tabela 11:	Propriedades Térmicas para paredes e pisos do modelo de referência – NBR 15.475 -1: 2021.....	38
Tabela 12:	Propriedades Térmicas para coberturas do modelo de referência – NBR 15.475 -1: 2021.....	39
Tabela 13:	Composição do Modelo de Referência.....	39
Figura 13:	Modelo de Parede e propriedades térmicas.....	40
Figura 14:	Modelo de cobertura e propriedades térmicas.....	40
Figura 15:	Modelo de cobertura e propriedades térmicas de laje pré-moldada de EPS	41
Figura 16:	Modelo de cobertura e propriedades térmicas telhado vegetado intensivo	41
Tabela 14:	Nível de Desempenho e Material utilizado.....	42
Tabela 15:	Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa dos dormitórios.....	43
Tabela 16:	Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa.....	44
Tabela 17:	Temperatura anual máxima de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa.....	44
Tabela 18:	Consumo Anual de Energia.....	45
Tabela 19:	Uso Final de Energia Elétrica (kWh).....	45

Figura 17	Módulo Fotovoltaico 340W - OSDA – ODA340-30-M.....	47
Figura 18	Projeção dos módulos fotovoltaicos na edificação.....	47
Figura 19	Inversor Solar Fotovoltaico PHB– Monofásico 2900 W.....	48
Tabela 20	Geração de Energia Elétrica (kWh).....	48
Figura 20	Consumo Anual de Energia.....	49
Figura 21	Uso Final de Energia Elétrica.....	51
Figura 22	Temperatura de superfícies características da edificação MR	52
Figura 23	Temperatura de superfícies características da edificação modelo FPAT.....	52
Figura 24	Balanço Energético da Edificação.....	53
Tabela 21	Aberturas da Edificação	58
Figura 25	Aberturas da Edificação nas quatro fachadas	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANNEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
APP	Ambiente de Permanência Prolongada
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica
EPBD	Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios
FMAT	Forro de Madeira, Ar e Telha
FPAT	Forro de PVC, Ar e Telha
FV	Fotovoltaico (a)
GEE	Gases de Efeito Estufa
HSP	Horas de Sol Pleno
HVAC	Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
ISO	Organização Internacional de Padronização
LMAT	Laje Maciça, Ar e Telha
LMTV	Laje Maciça, Terra e Vegetação
LPMEAT	Laje Pré-Moldada com EPS, Ar e Telha
MR	Modelo de Referência
NBR	Norma Brasileira
NZEB	Edificação de necessidades de energia zero
nZEB	Edificação de necessidades quase nulas de energia
PHFT _{APP}	Percentual de horas de ocupação de cada APP dentro da faixa de temperatura operativa
PHFT _{UH}	Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa
PVC	Policloreto de Vinila
RTQ-R	Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais
TBS	Temperatura externa de bulbo seco
Tomáx _{APP}	Temperatura operativa anual máxima de cada APP dentro do período de ocupação
Tomáx _{UH}	Temperatura operativa anual máxima da UH dentro do período de ocupação
UE	União Europeia
UH	Unidade Habitacional
ZEB	Edifícios Zero de Energia
IEA	Agência Internacional de Energia

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
1.1	Considerações Iniciais	13
1.2	Situação Problema	14
1.3	Objetivos da Pesquisa	15
1.3.1	Objetivo geral	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Organização da Pesquisa	15
2.	METODOLOGIA	17
3.	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	Cenário Mundial	23
3.2	Cenário Brasileiro	24
3.2.1	Panorama Energético	24
3.2.2	Referências Normativas	25
3.2.2.1	Zoneamento Bioclimático	25
3.2.2.2	Padrões de Ocupação e Cargas Internas	26
3.2.2.3	Ventilação Natural	29
3.2.2.4	Fornecimento de Energia Renovável	31
3.2.2.5	Abrangência das Referências Brasileiras	33
4.	ESTUDO DE CASO	35
4.1.	A Edificação Analisada	35
4.2	Diretrizes Construtivas	37
4.3	Condições de Referência	38
4.4	Condições de Desempenho	39
4.5	Resultados	43
4.5.1	Ventilação Natural	43
4.5.2	Sistema Híbrido	45
4.5.3	Geração de Energia Renovável	46
4.6	Discussão	49
5.	CONCLUSÃO	53
6.	REFERÊNCIAS	56

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

Nas últimas décadas, as mudanças no comportamento humano ocasionaram um aumento no consumo de energia, sendo impulsionado pela crescente migração de pessoas para as cidades e o acesso cada vez maior à tecnologia. Esse consumo energético tem sido responsável por diferentes impactos ambientais e sociais. Devido a isso, o setor de energia tem chamado cada vez mais atenção para pesquisas e novas políticas (Papadis e Tsatsaronis, 2020; Revkin, 2019).

Atualmente, os edifícios são responsáveis por mais de um terço do consumo global de energia final e quase 40% das emissões de CO_2 . Diversos fatores contribuíram para este cenário, envolvendo tanto os meios de geração de energia como também a maneira como ela é consumida. Por exemplo, ao analisar a etapa de fornecimento de energia, o que se observa é que cerca 85% das fontes de energia usadas no mundo se baseiam em combustíveis fósseis, que apresentam problemas como escassez e provocam danos socioambientais. A Agência Internacional de Energia (IEA) demonstrou em estudos recentes que, quanto ao uso da energia, a demanda para aquecimento e resfriamento, que já era significativa, vem apresentando um crescimento cada vez maior devido aos eventos climáticos extremos. Por exemplo, durante 2010-2018, a demanda de resfriamento de ambientes aumentou mais de 33% e a demanda para aquecimento de água teve um aumento de 11% (EPE, 2020; Gholami, Røstvik e Müller-Eie, 2019; IEA, 2019a; b; IPCC, 2014).

Com o objetivo de reduzir o consumo energético relacionado à construção civil, edificações eficientes vêm sendo estudadas. Um conceito que tem apresentado boas perspectivas é o *Net Zero Energy Building* (NZEB).

O conceito NZEB não apresenta uma definição amplamente aceita devido a diferentes contextos e realidades nacionais, mas existe um princípio comum sobre o tema (Cabeza e Chàfer, 2020; Sulzakimin *et al.*, 2020).

Este princípio está relacionado com três grupos de estratégias:

- Redução das necessidades energéticas da edificação com medidas de arquitetura passiva, como considerações de orientação, ventilação natural, iluminação, materiais de isolamento e outros;
- Uso de tecnologias eficientes energeticamente quanto aos sistemas de HVAC, iluminação e aparelhos;
- Uso de fonte de energia renovável.

Uma edificação de padrão NZEB atende a estes grupos de estratégias estando conectada a uma rede, e, neste caso, assim como no termo ‘net’ sugere, ela está concentrada em manter o equilíbrio líquido entre a energia recebida e a fornecida à rede dentro do período estipulado (Resende, Monzón-Chavarrías e Corvacho, 2020; Sartori, Napolitano e Voss, 2012).

Acompanhando esse conceito, porém com o propósito de torná-lo mais viável, surge o padrão *Nearly Zero Energy Building* (nZEB). Definido pela União Europeia na Diretiva 2010/31/UE, o nZEB é um edifício com necessidades quase nulas de energia, de desempenho energético muito elevado, determinado com base na energia anual calculada ou efetivamente consumida. As necessidades quase nulas ou muito pequenas devem ser cobertas em grande parte por energia proveniente de fontes renováveis, produzida no local ou nas proximidades (Comissão Europeia, 2019).

Assim, a edificação nZEB não necessita atingir valores nulos de energia, o que para muitos pode ser visto como uma ideia irrealizável, mas neste caso a edificação busca os números mais próximos possíveis de zero dentro dos parâmetros locais.

1.2 Situação Problema

Os conceitos NZEB e nZEB estão sendo implementados em muitos lugares. No entanto, apesar de existirem construções desse tipo em países em desenvolvimento, como no caso da Índia, a maioria dos exemplos existentes se encontra em países desenvolvidos, sendo estes na Europa e América do Norte. Esse fato ocorre devido às barreiras que se apresentam em países em desenvolvimento (e nesses incluímos o Brasil), estando elas relacionadas com a condição socioeconômica do país e com a carência de estudos climáticos com as condições locais (Mussal, 2013; Walter Costa, David Amorim e Ribeiro Silva, 2020).

Essas diferenças levantam alguns questionamentos, como por exemplo: seria possível recorrer a medidas energéticas viáveis, de acordo com as tecnologias arquitetônicas existentes no Brasil, para obter um NZEB e/ou nZEB em nosso país?

1.3 Objetivos da Pesquisa

1.3.1 Objetivo geral

Esse trabalho se propõe a fazer uma análise da viabilidade energética de um NZEB e/ou nZEB no Brasil, considerando as normas vigentes e os sistemas construtivos mais empregados. Esta análise é feita por meio do programa computacional de simulação *EnergyPlus* (versão 8.7.0), utilizando como modelo o projeto de uma edificação residencial localizada no Rio de Janeiro.

A avaliação se concentra na análise da envoltória da edificação, com a finalidade de identificar as medidas energéticas mais adequadas à realidade brasileira que se incluam neste tópico para obter um NZEB e/ou nZEB.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Pontuar aspectos no nZEB no cenário mundial
- Contextualizar o cenário energético brasileiro
- Identificar os parâmetros de desempenho de uma construção de acordo com as normas vigentes no Brasil
- Simular uma construção com as tecnologias arquitetônicas existentes no país
- Apresentar e analisar resultados de consumo de energia
- Estimar um fornecimento de energia renovável
- Identificar a viabilidade de uma construção nZEB e/ou NZEB no Rio de Janeiro

1.4 Organização da Pesquisa

O capítulo 1 apresenta algumas considerações iniciais de definição do conceito NZEB e nZEB, justificando a necessidade de abordar o tema e revelando os objetivos principais da pesquisa.

O capítulo 2 esclarece a metodologia de estudo com base em uma revisão bibliográfica e especificações para a simulação energética.

O capítulo 3 apresenta aspectos da literatura internacional sobre nZEB, relaciona pontos do contexto brasileiro quanto a eficiência energética e identifica normas técnicas brasileiras relacionadas com o tema.

O capítulo 4 desenvolve o estudo de caso, identifica os requisitos de desempenho energético que as edificações localizadas no Rio de Janeiro necessitam atender, descreve as composições

construtivas que são mais comumente utilizadas na envoltória das edificações brasileiras, relaciona esses aspectos para obter modelos construtivos de estudo, apresenta cálculos de uso de ventilação natural, faz uso de um sistema híbrido de ventilação e climatização para estudo, apresenta dados de consumo de energia obtidos na simulação computacional, estima o fornecimento de energia renovável compatível com a demanda e apresenta um balanço energético da edificação.

O capítulo 5 apresenta uma conclusão sobre o estudo de caso, associando os resultados obtidos com a concepção de um nZEB.

2. METODOLOGIA

O método de uma pesquisa visa identificar o caminho percorrido para alcançar um objetivo. Entre os diferentes métodos identificados por Gray (2012), podemos associar este trabalho ao método indutivo, pois se trata de um empirismo, em que fatos e experimentos particulares são utilizados para obter um princípio geral.

Quanto ao modelo de estudo, este trabalho é fundamentado em um modelo exploratório, uma vez que foram feitas pesquisas bibliográficas sobre o tema a fim de identificar em artigos científicos alguns conceitos e exemplos de edificações de padrão NZEB e/ou nZEB. Além disso, foram realizadas pesquisas na literatura existente, para conhecer as normas brasileiras que se aplicam ao tema (Gray, 2012; Vergara, 2013).

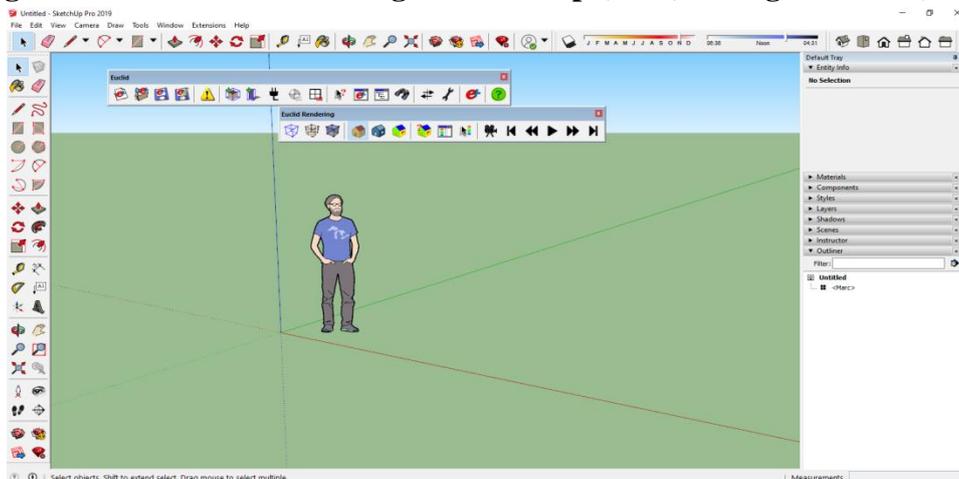
O trabalho não se concentra apenas em um levantamento bibliográfico, mas também faz uso de um estudo de caso. Nesta etapa, o trabalho caracteriza um objeto de estudo, define suas diretrizes e então gera resultados que possibilitam a construção de novas óticas e perspectivas (Gray, 2012).

O objeto de estudo é uma edificação residencial unifamiliar localizada no Rio de Janeiro, Brasil. De acordo com as normas NBR 15.575 (2013), NBR 15.220 (2005) e outros regulamentos técnicos, são identificados os parâmetros de conforto térmico da edificação.

Como etapa de experimentos, é feita uma análise de desempenho térmico. Esta análise é feita utilizando o método de simulação computacional.

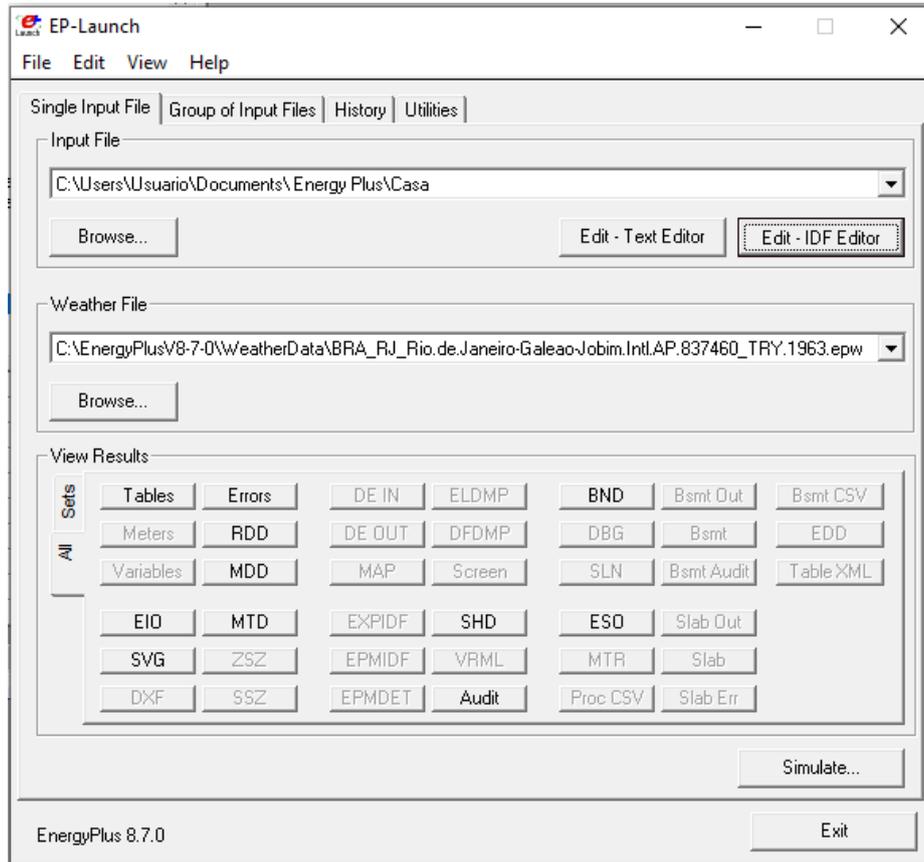
O *software* de modelagem utilizado foi o *SketchUp* (2019), utilizando como Plugin o *software Euclid* (9.4.3) apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Software de modelagem SketchUp (2019) + Plugin Euclid (9.4.3)



A análise energética segue a recomendação da NBR 15.575-1 em utilizar um programa computacional de simulação energética, de acordo com a ASHRAE 140. Para isso, foi escolhido o *EnergyPlus* (versão 8.7.0), apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Software de Simulação *EnergyPlus* (8.7.0)

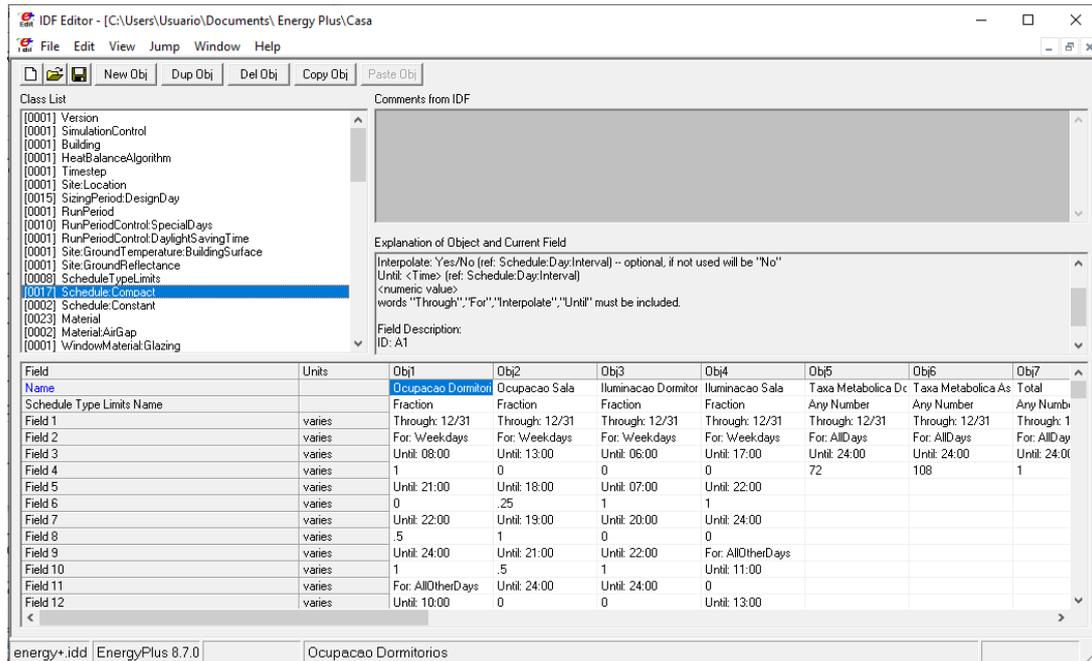


Para realizar as simulações no *EnergyPlus*, se faz necessário inserir diversos dados no programa. Inicialmente é preciso inserir os dados climáticos no ficheiro *Weather File*. Os arquivos com os dados das cidades já cadastradas podem ser obtidos no próprio site do *EnergyPlus*.

O comando 'IDF Editor' nos possibilita acessar campos específicos para definir a construção, o padrão de ocupação, uso de iluminação, climatização entre outros.

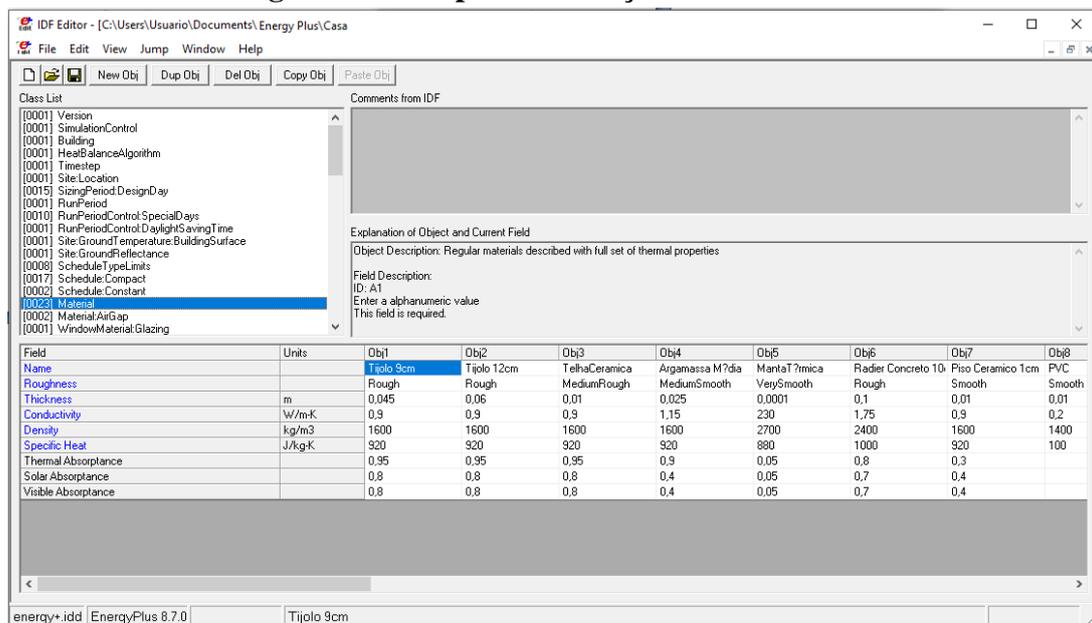
Um campo bem relevante é o campo 'Schedule: Compact' em que inserimos toda a programação para iluminação, climatização e outros fatores de acordo com os regulamentos técnicos (Figura 3).

Figura 3 – Campo da Programação Compactada



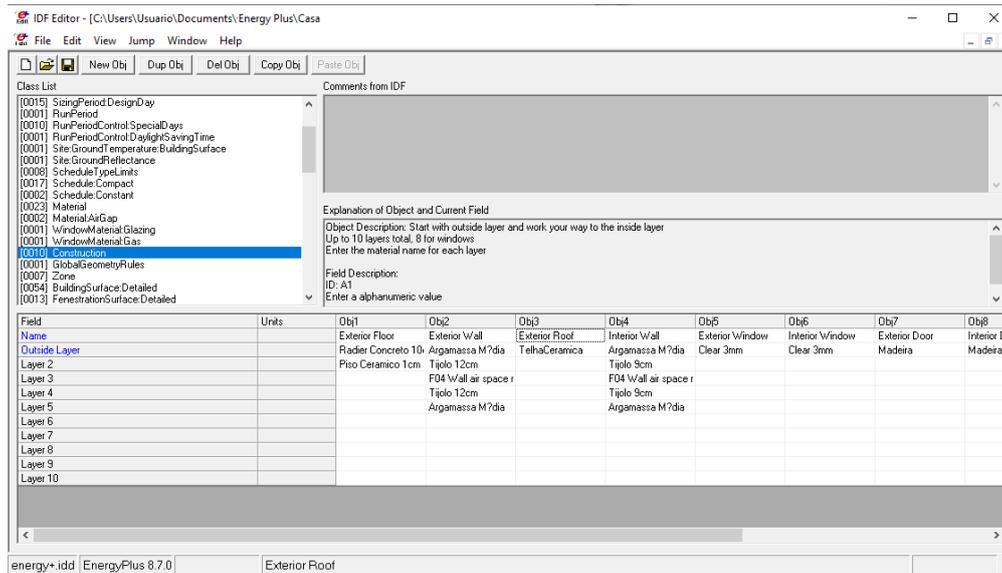
Outro campo essencial é o campo ‘Material’, em que inserimos os materiais no programa de acordo com as suas dimensões e as suas propriedades físicas, como condutividade, calor específico e densidade (Figura 4).

Figura 4 – Campo de Definição dos Materiais



Com os materiais inseridos, é possível editar o campo ‘Construction’ que define as camadas da construção conforme Figura 5.

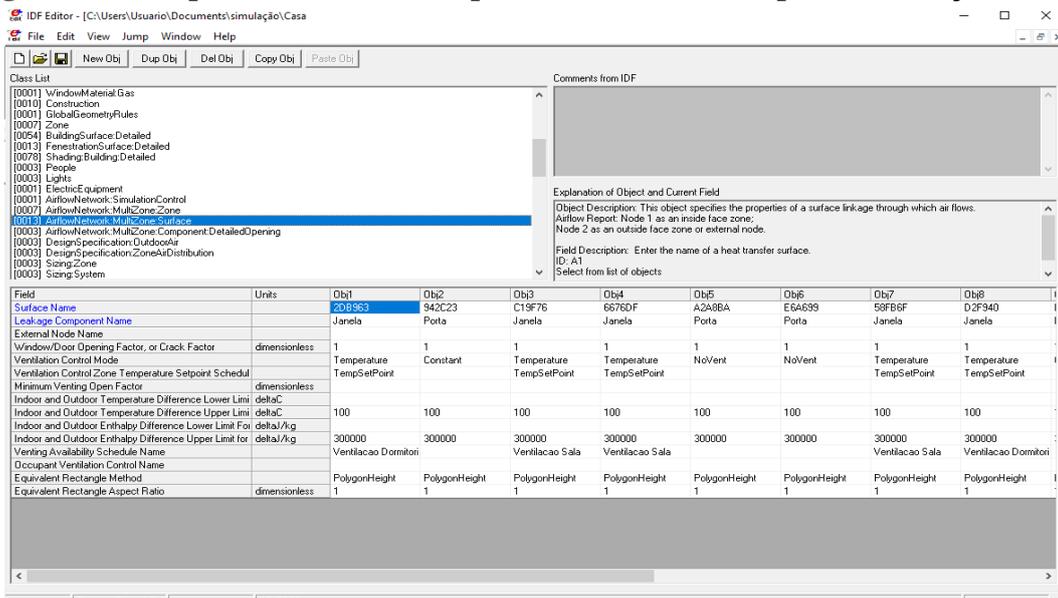
Figura 5 – Campo de Definição da Construção



Diversos dados são importados automaticamente do programa de modelagem, como superfícies de construção, janelas e sombreamento, mas estes devem ser revisados e os materiais devem ser associados às superfícies para poder executar a simulação no *EnergyPlus*. Os valores obtidos são apresentados no comando ‘Tables’, conforme a configuração de saída de dados (Figura 2).

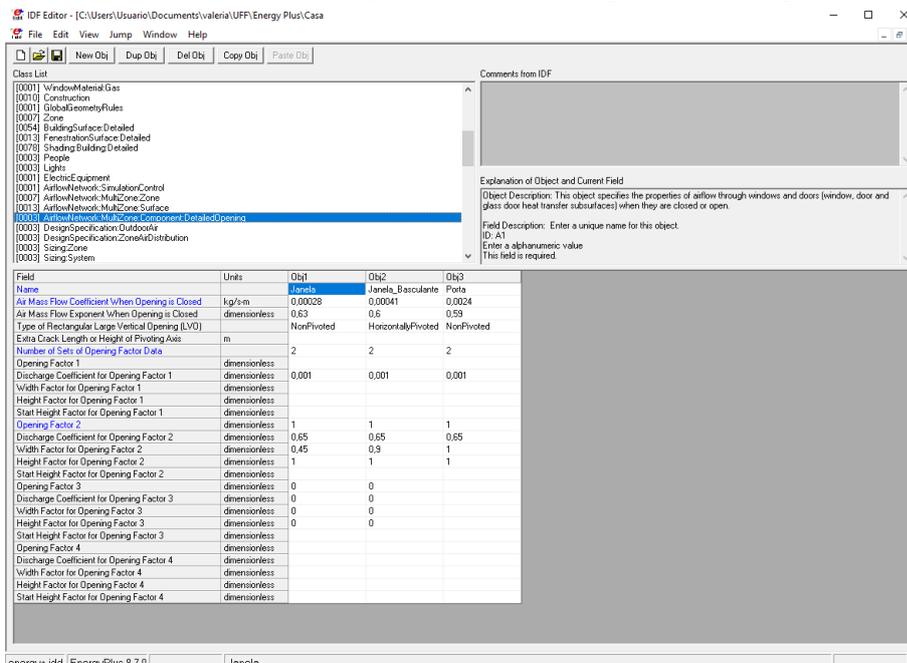
O *EnergyPlus* nos fornece campos para inserir parâmetros da edificação e assim realizar a simulação de ventilação natural. O modelo de cálculo do fluxo de ar é denominado ‘AirflowNetwork’. Neste caso, para adotar a estratégia de ventilação natural, é necessário inserir parâmetros básicos e também informações de controle da ventilação, através das aberturas internas e externas das zonas térmicas (Figura 6).

Figura 6 – Campo de Controle de superfícies de aberturas para Ventilação Natural



Além dessas informações, parâmetros de frações de aberturas de fechamentos são dados inseridos no programa dependendo do tipo utilizado (portas, janelas duas folhas, basculante, etc.), conforme Figura 7.

Figura 7 – Campo de Controle de tipos de aberturas para Ventilação Natural



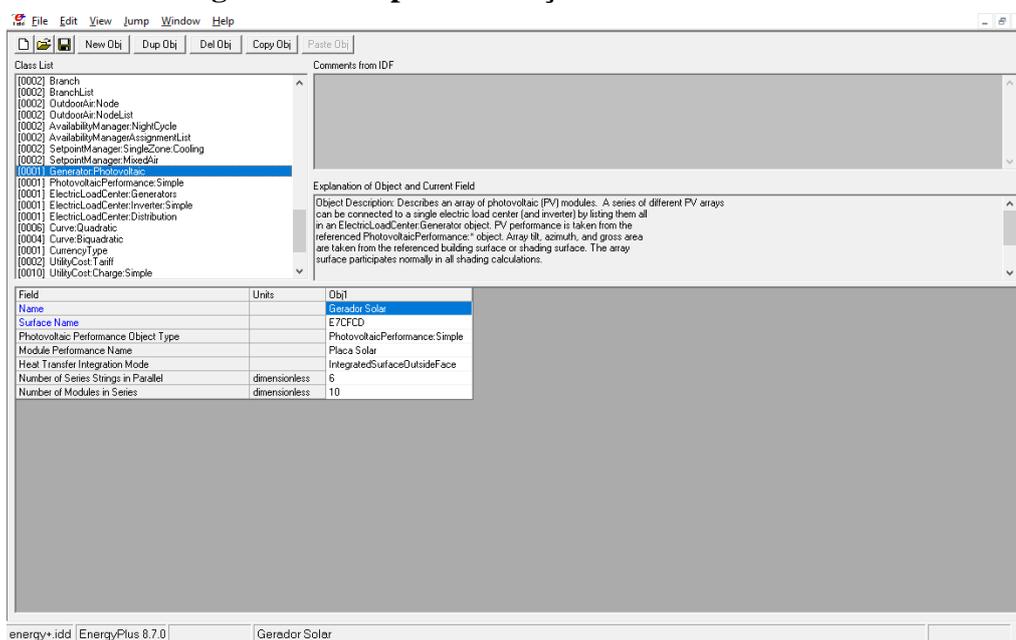
Todos esses parâmetros podem ser obtidos em normas vigentes, como a NBR 15.575:2021. Com todas essas informações é possível realizar a simulação de ventilação.

A partir da análise de resultados, o presente trabalho se propõe a indicar os melhores sistemas da envoltória para atingir um desempenho térmico otimizado. Adicionalmente, é possível estabelecer o fornecimento de energia renovável com o uso da fonte escolhida, a energia solar fotovoltaica (FV).

A estimativa de geração de energia é feita no próprio *EnergyPlus*. O software disponibiliza uma interface para energia solar fotovoltaica. No entanto, esta análise não abrange a parte térmica dos módulos fotovoltaicos, como a transmissão de calor entre os materiais que compõem o módulo FV e o ambiente interno e externo. A análise está concentrada apenas na geração de energia elétrica (Rodrigues, Carlo e Oliveira Filho, 2018).

No programa *EnergyPlus* é possível encontrar diferentes modelos fotovoltaicos, porém, nesse estudo de caso, o modelo adotado foi o ‘Generator FV Simple’ (Figura 6). Esse modelo é o mais simples para previsão de geração de energia fotovoltaica, aplicado a análises de projetos em fase inicial e estimativas de níveis de geração anual, sem especificar o desempenho detalhado de um módulo FV. Neste modelo o projetista insere no programa dados fixos dos módulos fotovoltaicos e inversores que podem ser facilmente obtidos nos catálogos dos equipamentos existentes no mercado (EnergyPlus, 2014; Rodrigues, Carlo e Oliveira Filho, 2018).

Figura 8 – Campo de Geração Solar Fotovoltaica



Com os valores de consumo e geração de energia da edificação, foi possível realizar um balanço energético e gerar resultados que podem identificar a viabilidade técnica de um NZEB e/ou nZEB no local de estudo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cenário Mundial

A iniciativa da União Europeia em reduzir o consumo de energia por meio da reformulação do conceito NZEB e o estabelecimento do nZEB na Diretiva 2010/31/UE de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD) promoveu efeitos significativos no cenário mundial. Embora a Diretiva tenha estabelecido uma definição ampla do conceito, designando a descrição pormenorizada da forma de aplicação aos países membros (por meio de seus planos nacionais), ela foi muito importante, pois impulsionou o desenvolvimento de diversas políticas e medidas energéticas (EPBD, 2010).

Uma organização de grande relevância que incluiu o conceito nZEB em uma de suas normas foi a Organização Internacional de Padronização (ISO). A ISO 52000:2017- Desempenho Energético de edifícios, avaliação mais abrangente – na parte 1/ anexo H, propõe uma metodologia para alcançar um nZEB. Além de reafirmar a definição do EPBD 2010/31/EU, esse informativo aponta três requisitos a serem atingidos (ISO, 2017).

O primeiro requisito se refere ao levantamento das necessidades de energia. As necessidades de energia devem se basear nas condições locais e no projeto da edificação. Neste ponto estão inclusas as considerações que envolvem o envelope da construção, projeto bioclimático, zoneamento, assim como a garantia de condições ambientais internas que evitem efeitos negativos como falta de ventilação e mofo.

O segundo requisito envolve o uso total de energia primária. Este requisito reflete o desempenho dos sistemas da construção (HVAC, água quente, iluminação) que consomem energia. A análise faz uso de fatores de multiplicação para que, a partir de valores de uso final de energia, seja possível obter o uso de energia primária, pois esta permite considerar as perdas de energia que ocorrem em alguns sistemas fora dos limites da edificação.

O terceiro requisito concentra o uso total de energia primária não renovável, sem compensação de energia. Nesta etapa é considerada a energia utilizada nos serviços (aquecimento, ventilação, etc) e não inclui os efeitos de exportação de energia.

A avaliação final do nZEB gera então um indicador de energia primária não renovável com compensação de energia, ou seja, na avaliação final é feito um balanço entre o consumo de energia não renovável e o renovável. Neste caso estão inclusos diferentes usos de energia e a parcela de energia renovável a ser exportada é computada na compensação de energia. Assim, nesta etapa a parcela de consumo de energia não renovável que não sofre compensação de energia é adotada como um indicador.

Nas considerações apresentadas pela ISO 52.000: 2017 não são encontrados valores fixos de limites de consumo de energia, mas é possível observar que ela estabelece aspectos críticos e fatores de ponderação para o cálculo de energia primária que permitem uma análise mais concreta da edificação.

Um indicador de desempenho de energia primária que foi especificado na EPBD 2010/31/EU, e que é citado nesta ISO, é o indicador relacionado com a unidade e o período da análise: kWh/(m².ano). Porém, além deste fator, alguns parâmetros de desempenho foram definidos posteriormente também pela Comissão Europeia na Recomendação 2016/1318 e devem ser considerados atualmente. Baseado nos custos e nas tecnologias previstas para 2020, este documento apresenta padrões de referência de desempenho energético para as diferentes zonas climáticas da UE. No caso de países situados em climas mais quentes, na zona do Mediterrâneo, as habitações unifamiliares novas deveriam se enquadrar no intervalo de 0-15 kWh/ (m².ano) de energia primária (Comissão Europeia, 2016).

Estes valores se aplicam a edificações em outro continente, porém, ao levar em conta que esta zona é a que possui temperaturas médias mais próximas às do Rio de Janeiro, este valor pode ser utilizado como parâmetro para o local que será estudado (Britannica, 2019).

3.2 Cenário Brasileiro

3.2.1 Panorama Energético

As edificações apresentam grande impacto no contexto energético brasileiro. De acordo com o Ministério Nacional de Minas e Energia (MME), em 2018, do total de energia elétrica consumida no país, quase 50% foi consumida em edifícios, sendo 22% em edifícios residenciais, 15% em edifícios comerciais e 7% em edifícios públicos (MME, 2018).

A matriz energética brasileira é mantida em grande parte por geração de energia proveniente de fontes renováveis, sendo significativamente representada pelas hidrelétricas, que contribuem com

mais de 60% da matriz energética nacional. No entanto, estudos mostram que a maior parte do potencial hidrelétrico já foi aproveitada e não apresenta crescimento devido à dificuldade de financiamento para construção de novas usinas e a resistência a impactos ambientais. Por outro lado, outras fontes renováveis possuem ampla margem de exploração, como as fontes de energia solar fotovoltaica, eólica, biomassa e outras (EPE, 2020; Master, Amorim e Silva, 2020)

Apesar da sua grande extensão territorial, o Brasil apresenta um alto nível de radiação solar em todo o país, ocupando uma posição privilegiada no uso de fonte de energia solar fotovoltaica quando comparado com outros países. Por exemplo, a região brasileira menos ensolarada recebe em média 25% a mais de irradiação solar do que a região mais ensolarada da Alemanha (Rodrigues, Carlo e Oliveira Filho, 2018; Rütther e Salamoni, 2011).

Além disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu regulamentações que permitem a microgeração de energia em edificações. Isso se torna particularmente vantajoso no caso da geração de energia solar fotovoltaica, pois, neste caso, a geração de energia é feita utilizando módulos fotovoltaicos, que devido a sua área e peso reduzido, podem ser integrados à envoltória da edificação, gerando energia no próprio local de consumo (ANNEEL, 2015; Urbanetz, Zomer e Rütther, 2011).

Assim, considerando esses aspectos, apesar de atualmente ainda não existir um programa de implantação do NZEB no Brasil, o atual cenário energético brasileiro favorece o estabelecimento deste conceito (Master, Amorim e Silva, 2020).

3.2.2 Referências Normativas

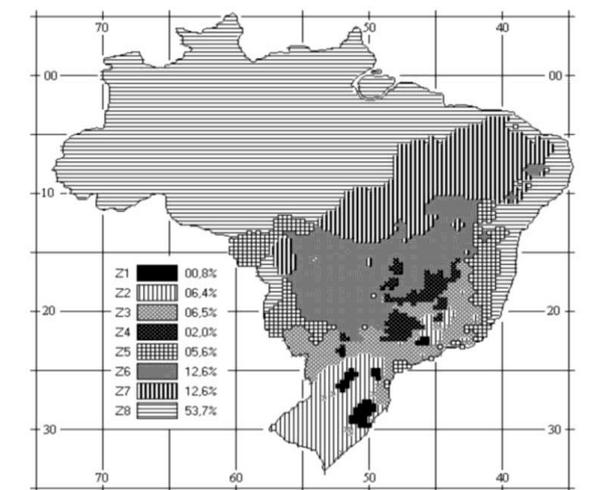
As normas brasileiras ainda não tratam sobre o tema NZEB e/ou nZEB . No entanto, é possível encontrar referências técnicas que se aplicam ao tema e podem ser exploradas para a consideração do conceito no Brasil. O levantamento de referências técnicas de alguns dos tópicos relacionados com o nZEB foi realizado, e as suas principais diretrizes são relacionadas a seguir.

3.2.2.1 Zoneamento Bioclimático

O Brasil é um país que possui uma grande diferença ambiental e socioeconômica dependendo da região em que estamos localizados. Como consequência, cada região pode se diferenciar quanto a sistemas construtivos, materiais utilizados, equipamentos e outros. Assim, as estratégias bioclimáticas devem ser adaptadas a cada localidade (ABNT, 2003).

Em conhecimento desta realidade, a Norma Brasileira NBR 15.220: 2003 de Desempenho Térmico das Edificações estabelece um zoneamento bioclimático, abrangendo um conjunto de recomendações e estratégias construtivas destinadas a habitações unifamiliares. Esta norma compreende oito diferentes zonas separadas de acordo com as condições de temperatura e conforto térmico (Figura 9).

Figura 9 - Zoneamento Bioclimático



Fonte: NBR 15.220 (2003)

Em complemento a esta norma, a NBR 15.575:2013 (com emenda publicada em março de 2021) de Desempenho de edificações habitacionais estabelece requisitos para os sistemas construtivos, que também devem ser considerados para obter as condições de conforto do usuário na edificação.

3.2.2.2 Padrões de Ocupação e Cargas Internas

De acordo com NBR 15575-1: 2021, a modelagem de uma edificação deve considerar a ocorrência de cargas internas por meio da ocupação de usuários de ambientes de permanência prolongada (APP) e do uso de iluminação artificial e de equipamentos. Os padrões estabelecidos na norma estão apresentados nas Tabelas 1 a 4.

Essas informações replicam, e em alguns casos retificam, análises de outras referências de desempenho térmico, como no caso dos padrões apresentados no Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), elaborado pelo INMETRO. (INMETRO, 2012).

Tabela 1 – Padrão de ocupação diários dos APP – NBR 15575-1: 2021

Horário	Ocupação	
	Dormitório (%)	Sala (%)
00:00 – 00:59	100	0
01:00 – 01:59	100	0
02:00 – 02:59	100	0
03:00 – 03:59	100	0
04:00 – 04:59	100	0
05:00 – 05:59	100	0
06:00 – 06:59	100	0
07:00 – 07:59	100	0
08:00 – 08:59	0	0
09:00 – 09:59	0	0
10:00 – 10:59	0	0
11:00 – 11:59	0	0
12:00 – 12:59	0	0
13:00 – 13:59	0	0
14:00 – 14:59	0	50
15:00 – 15:59	0	50
16:00 – 16:59	0	50
17:00 – 17:59	0	50
18:00 – 18:59	0	100
19:00 – 19:59	0	100
20:00 – 20:59	0	100
21:00 – 21:59	0	100
22:00 – 22:59	100	0
23:00 – 23:59	100	0

Tabela 2 –Taxa metabólica – RTQ-R: 2012 e NBR 15575-1: 2021

Ambiente	Atividade	Calor produzido (W/m ²)	Calor produzido por uma pessoa de 1,8 m ² de área de superfície corporal (W)
Dormitório	Dormindo ou descansando	45	81
Sala	Sentado ou assistindo TV	60	108

Tabela 3 – Padrão de iluminação - NBR 15575-1: 2021

Horário	Iluminação	
	Dormitório (%)	Sala (%)
00:00 – 00:59	0	0
01:00 – 01:59	0	0
02:00 – 02:59	0	0
03:00 – 03:59	0	0
04:00 – 04:59	0	0
05:00 – 05:59	0	0
06:00 – 06:59	100	0
07:00 – 07:59	100	0
08:00 – 08:59	0	0
09:00 – 09:59	0	0
10:00 – 10:59	0	0
11:00 – 11:59	0	0
12:00 – 12:59	0	0
13:00 – 13:59	0	0
14:00 – 14:59	0	0
15:00 – 15:59	0	0
16:00 – 16:59	0	100
17:00 – 17:59	0	100
18:00 – 18:59	0	100
19:00 – 19:59	0	100
20:00 – 20:59	0	100
21:00 – 21:59	0	100
22:00 – 22:59	100	0
23:00 – 23:59	100	0

Tabela 4 – Densidades de potência instalada - NBR 15575-1: 2021

Ambiente	DPI (W/m ²)
Dormitório	5,0
Sala	5,0

Com o apoio dessas referências técnicas e de outras, tanto nacionais quanto internacionais, é possível fixar parâmetros de desempenho em programas computacionais de simulação, como o *EnergyPlus*, para avaliar energeticamente uma edificação.

3.2.2.3 Ventilação Natural

A NBR 15.575-1: 2021 especifica que, em análises energéticas, é obrigatória a avaliação de desempenho térmico dos ambientes de permanência prolongada (APP) da unidade habitacional (UH) considerando o uso de ventilação natural.

O procedimento de avaliação por meio de simulação computacional deve avaliar um modelo de referência em comparação a um (ou mais de um) modelo real que possua as características construtivas da edificação (ABNT, 2021a).

A partir desta simulação, devem ser obtidos, como dados de saída, o percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{APP}$) e a temperatura operativa anual máxima de cada APP dentro do período de ocupação ($Tomáx_{APP}$).

A partir desses valores e com a ajuda de cálculos descritos na NBR 15.575-1: 2021 é possível analisar os dois critérios para desempenho térmico de edificações com uso de ventilação natural:

- Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$)
- Temperatura operativa anual máxima da UH dentro do período de ocupação ($Tomáx_{UH}$)

O primeiro critério está associado a um intervalo de temperaturas externas. A identificação desse intervalo é obtida por meio da média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS) do local analisado (Tabela 5). Com esta informação, é possível obter a faixa de temperatura operativa a ser considerada (Tabela 6).

Tabela 5 – Intervalo de temperaturas externas de bulbo seco NBR 15575-1: 2021

Intervalos de temperaturas externas	Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBSm) °C
Intervalo 1	TBSm < 25,0
Intervalo 2	25,0 °C ≤ TBSm < 27,0 °C
Intervalo 3	≥ 27,0 °C

**Tabela 6 – Faixas de temperatura operativa para determinação do $PHFT_{APP}$
NBR 15575-1: 2021**

Intervalos de temperaturas externas	Faixa de temperatura operativa a ser considerada
Intervalo 1	18,0 °C < ToAPPa < 26,0 °C
Intervalo 2	ToAPP < 28,0 °C
Intervalo 3	ToAPP < 30,0 °C

A NBR 15.575-1: 2021 especifica que o modelo com uso de ventilação natural deve buscar, como variável de saída, a temperatura operativa horária de cada APP da unidade habitacional (UH). A partir desta variável, deve-se calcular o percentual de horas de ocupação ($PHFT_{APP}$) por meio da equação (1):

$$PHFT_{APP} = \frac{Nh_{FT}}{Nh_{ocup}} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

$PHFT_{APP}$ – Percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temp. operativa (%);

Nh_{FT} – Número de horas em que o APP se encontra ocupado e com temperatura dentro da faixa de temp. operativa;

Nh_{ocup} – Número de horas em que o APP é ocupado ao longo do ano, equivalente a 2.920 h para salas e 3650 h para dormitórios.

A avaliação de desempenho térmico da edificação se dá com a consideração do percentual de horas em que a unidade habitacional se encontra dentro da faixa de temperatura operativa ($PHFT_{UH}$). O $PHFT_{UH}$ é resultado da avaliação individual de cada ambiente de permanência prolongada ($PHFT_{APP}$) da edificação durante o período de ocupação de acordo com as faixas operativas. Este valor é obtido pelo cálculo explicitado na equação (2).

$$PHFT_{UH} = \frac{\sum PHFT_{APP,i}}{n} \quad (2)$$

Onde:

$PHFT_{UH}$ – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temp. operativa (%);

$PHFT_{APP}$ – Percentual de horas de ocupação do APP dentro da faixa de temp. operativa (%);

n – Número de ambientes de permanência prolongada da UH.

O atendimento do critério do $PHFT_{UH}$ ocorre quando o modelo real a ser adotado ($PHFT_{UH,real}$) é superior a 90% do obtido do modelo de referência ($PHFT_{UH,ref}$).

O segundo critério é referente à temperatura anual máxima $Tomáx_{UH}$, considerada em todas as zonas bioclimáticas. Deve ser determinada a temperatura operativa anual máxima, dentro dos períodos de ocupação, a partir da comparação da $Tomáx$ de cada APP desta UH, adotando o maior valor entre os APP (ABNT, 2021a).

Neste caso, a temperatura operativa anual máxima do modelo real deve ser menor ou igual à obtida para o modelo de referência, com um valor de tolerância máxima, conforme equação (3):

$$Tomáx_{UH,real} \leq Tomáx_{UH,ref} + \Delta Tomáx \quad (3)$$

Onde:

$Tomáx_{UH,real}$ – Temperatura operativa anual máxima do modelo real, em graus Celsius (°C);

$Tomáx_{UH,ref}$ – Temperatura operativa anual máxima do modelo de referência, em graus Celsius (°C);

$\Delta Tomáx$ – Valor de tolerância da temperatura operativa anual máxima, em graus Celsius (°C). Considerar 2°C para UH unifamiliares.

Entre outros aspectos, o atendimento a esses dois critérios é requisito obrigatório para uma edificação com desempenho térmico satisfatório (ABNT, 2021a).

3.2.2.4 Fornecimento de Energia Renovável

Um aspecto fundamental das edificações de padrão NZEB e/ou nZEB é a utilização de fonte de energia renovável. Neste estudo de caso, foi utilizada a fonte de energia solar fotovoltaica, pois, como apresentado anteriormente, as condições climáticas brasileiras favorecem e justificam a utilização deste tipo de geração de energia.

Neste caso, a geração de energia é feita utilizando módulos fotovoltaicos, que podem ser integrados tanto à fachada quanto à cobertura da edificação. Porém, devido a aspectos estéticos e técnicos, eles são mais comumente integrados às coberturas da edificação. Nas coberturas, normalmente há uma menor possibilidade de sombreamento, as superfícies não são utilizadas de maneira significativa e a radiação solar incidente anual por metro quadrado é geralmente superior à das fachadas. Essas condições se aplicam à realidade brasileira, e, por isso, esse projeto faz uso de

sistema FV instalado no telhado da edificação (Shukla, Sudhakar e Baredar, 2017; Urbanetz, Zomer e Rüther, 2011).

O dimensionamento da geração de energia solar fotovoltaica se inicia com o cálculo do consumo diário médio anual descrito na equação (4):

$$E(Wh/dia) = \frac{(E_{anual}/12)}{30} \times 1000 \quad (4)$$

Onde:

E (Wh/dia) – Consumo diário médio anual da edificação;

E_{anual} (kWh) - Consumo medio anual obtido na simulação;

Com essa informação, é possível obter a potência do gerador por meio da equação (5), apresentada pelo CRESESB (2014) no seu Manual de Engenharia Fotovoltaica.

$$P_{FV}(W) = \frac{\left(\frac{E}{TD}\right)}{HSP_{MA}} \quad (5)$$

Onde:

$P_{FV}(W)$ – Potência do gerador FV;

E (Wh/dia) – Consumo diário médio anual da edificação;

HSP_{MA} (h) - Média diária anual de HSP incidente no módulo FV;

TD – Taxa de Desempenho.

A Taxa de Desempenho se refere à relação entre o desempenho real do sistema e o desempenho teórico. De acordo com o CRESESEB (2014), os sistemas FV com condições de radiação solar similares às encontradas no Brasil apresentam um TD entre 70 a 80%. A média diária anual de HSP_{MA} pode ser obtida em bancos de dados climáticos desenvolvidos pelos institutos e laboratórios de pesquisa.

Após o dimensionamento da potência, deve ser feita a avaliação da tecnologia que melhor atende ao projeto. Essa escolha deve considerar aspectos como confiabilidade do fabricante de módulos, parâmetros elétricos e eficiência. Com essa definição, é possível saber a quantidade de

módulos que serão utilizados, como também a área de ocupação do sistema FV. Esses valores são requisitos do *EnergyPlus* para modelagem da geração de energia fotovoltaica (CRESESB, 2014).

A pré-seleção do inversor deve também ser feita antes da análise energética, pois, dados de sua especificação, como sua eficiência e radiação, são parâmetros que precisam ser incluídos no *software*. Esta escolha se relaciona diretamente com a potência do gerador FV, características elétricas do módulo escolhido, características ambientais e topologia da instalação (CRESESB, 2014).

Entretanto, além de conhecer os cálculos de dimensionamento de geração de energia fotovoltaica, faz-se necessário compreender a regulamentação existente na região para esse sistema de energia.

A Resolução Normativa ANEEL 482/2012 estabelece que, no caso de sistemas FV conectados à rede, quando o sistema FV gerar mais energia que a demanda da edificação, a energia excedente é entregue à rede elétrica e o medidor registra essa energia. Quando a edificação consome mais energia do que a gerada em seu sistema FV, essa energia é obtida da rede elétrica e o medidor registra o fluxo contrário (ANEEL, 2012; CRESESB, 2014).

O controle desse fluxo é feito e, caso o balanço ao fim do mês seja positivo (consumidor gerando mais energia do que a demanda), a distribuidora disponibilizará créditos que podem ser compensados em faturas futuras, dentro do prazo estipulado. Todavia, a distribuidora estimula uma cobrança mínima, de acordo com o tipo de consumidor, sendo este um de custo de disponibilidade para o grupo B (baixa tensão), ou demanda contratada para consumidores do grupo A (alta tensão). Assim, para dimensionar um gerador FV de maneira otimizada, esse valor de disponibilidade mínima de energia deve ser considerado no cálculo do consumo médio mensal da edificação (ANEEL, 2010; CRESESB, 2014).

3.2.2.5 Abrangência das Referências Brasileiras

Ao analisar as referências técnicas brasileiras em comparação com outras estrangeiras, como a ISO 52.000: 2017, é possível observar que as especificações nacionais focam no que seriam as primeiras etapas de um nZEB, ou seja, as normas brasileiras de desempenho energético tratam principalmente de estratégias bioclimáticas, zoneamento e outros que condizem com o primeiro requisito da ISO 52000: 2017.

Em relação aos requisitos seguintes da ISO 52000: 2017, relacionados com o uso da energia primária, a regulamentação brasileira até então não trata sobre parâmetros de uso de energia primária consumida em edificações.

No entanto, é possível encontrar regulamentações que se relacionam com a compensação de energia, que se encontra no último aspecto da ISO 52000: 2017 e representa um dos pilares do nZEB.

Em vista disso, este trabalho irá se concentrar na análise do primeiro requisito de um nZEB, focado na envoltória da edificação, com o objetivo de identificar padrões de consumo de energia, e então aplicar este consumo a uma geração de energia de fonte renovável para atuar na compensação de energia e atingir o equilíbrio desejado.

4. ESTUDO DE CASO

4.1. A Edificação Analisada

A edificação analisada é de um modelo de residência unifamiliar de padrão baixo da NBR 12.721: 2005, contendo dois dormitórios, dois banheiros, uma sala, uma cozinha, circulação e varanda, conforme a planta baixa na Figura 10 e vistas do externo e interno da modelagem na Figura 11.

Figura 10 - Planta Baixa da Edificação

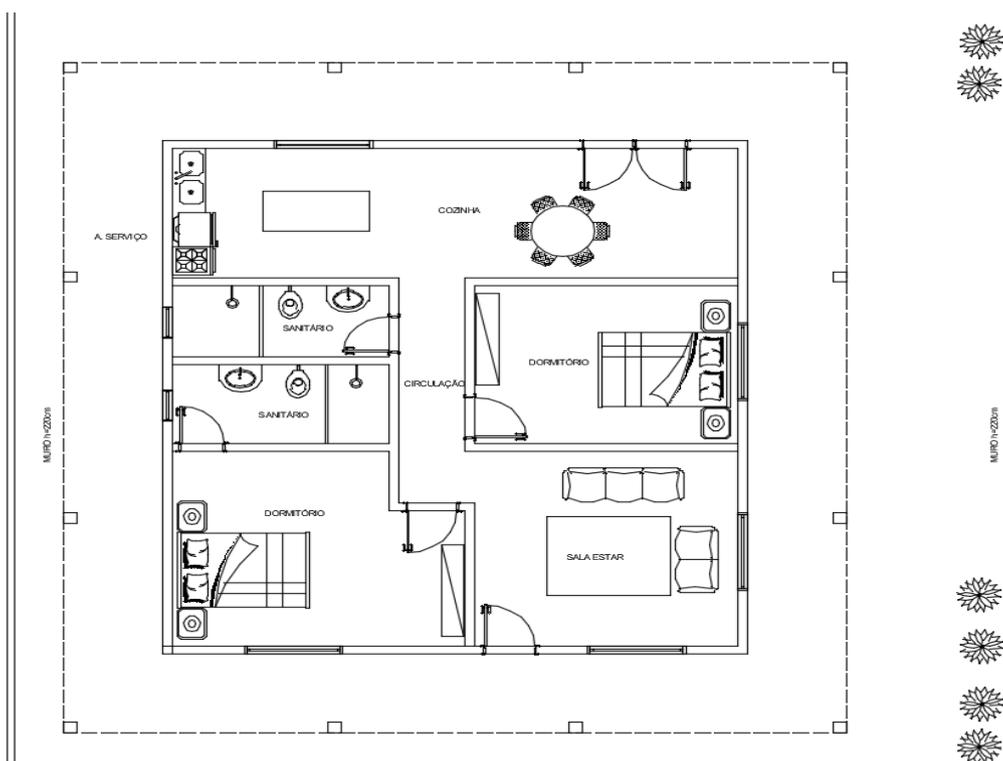
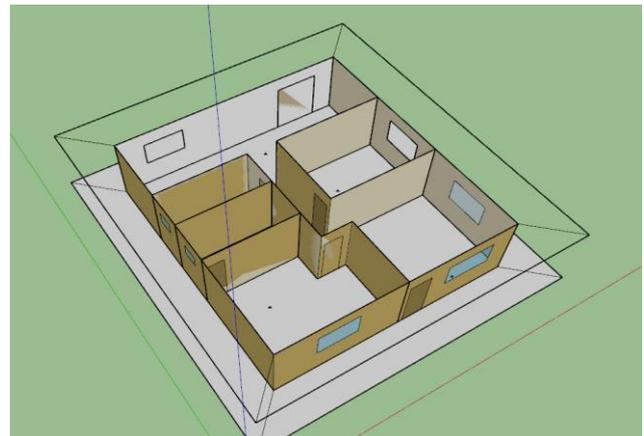
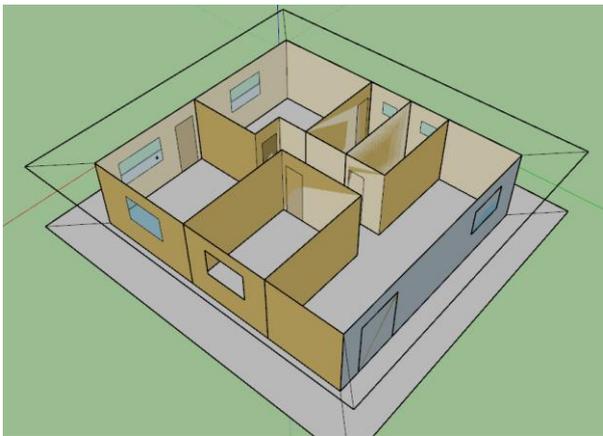
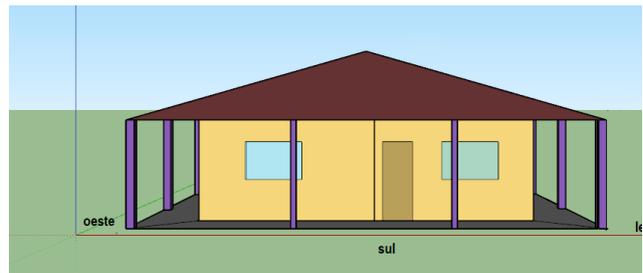
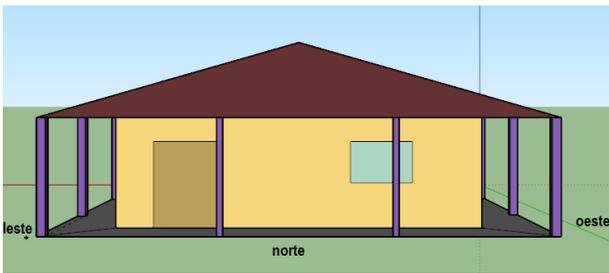
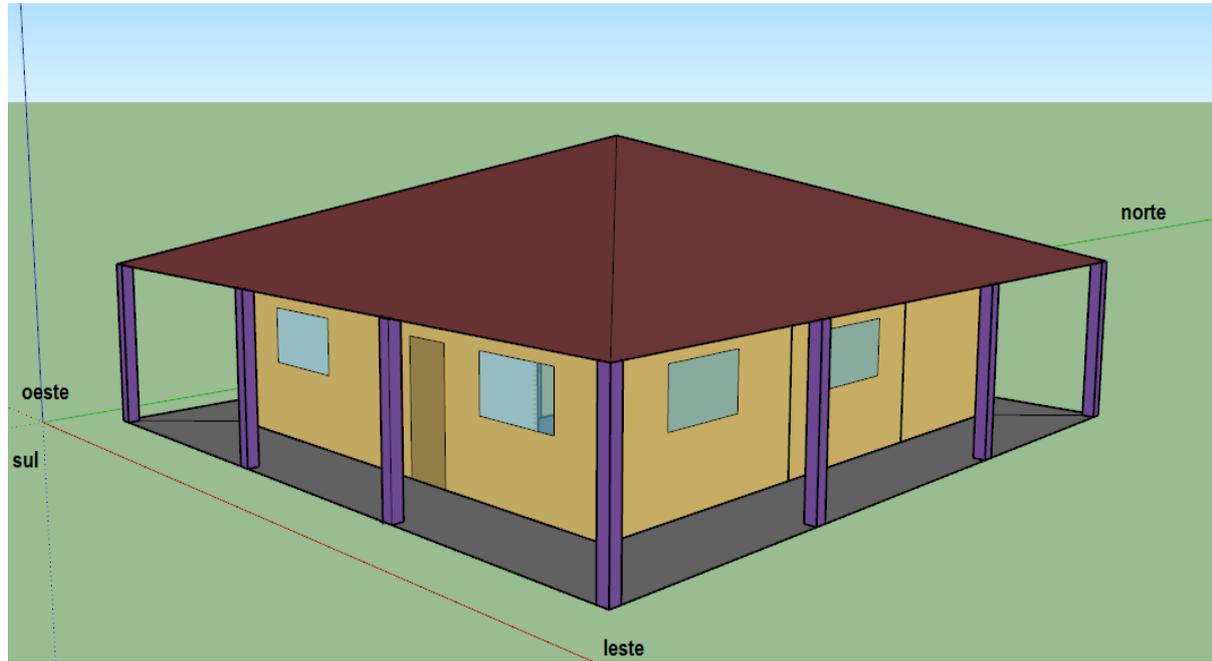


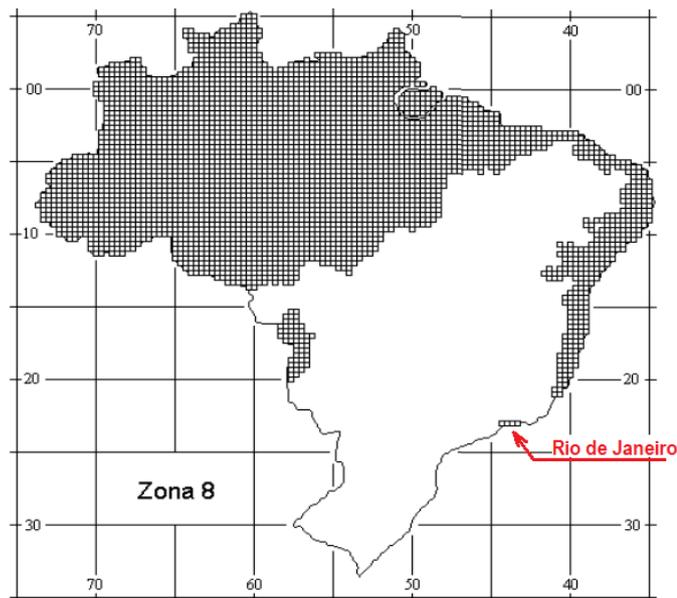
Figura 11 – Vistas da Edificação Modelada no *Sketchup*



4.2 Diretrizes Construtivas

Por este trabalho se tratar de uma edificação estabelecida no Rio de Janeiro, os arquivos climáticos utilizados foram os do Aeroporto Tom Jobim - RJ, e a zona bioclimática considerada foi a zona 8 (Figura 12).

Figura 12 - Zona Bioclimática 8



Fonte: NBR 15.220: 2003

De acordo com as indicações da NBR 15.220: 2003, edificações contidas na zona 8 precisam atender às diretrizes construtivas relacionadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Diretrizes Construtivas – NBR 15.220: 2003

Zona 8		
Tamanho das Aberturas	Grandes	
Sombreamento	Sombrear aberturas	
Paredes Externas	Leve refletora	$U \leq 3,6 \text{ W/m}^2\text{K}$
		$\varphi < 4,3h$
		$FS \leq 4\%$
Coberturas	Leve refletora	$U \leq 2,30 \cdot FT$
		$\varphi < 3,3h$
		$FS \leq 6,5\%$
Estratégia de Condicionamento Passivo	Ventilação cruzada	

NOTA: U é transmitância térmica, φ é o atraso térmico e FS é o fator solar

O fator de correção de transmitância (FT) é estabelecido de acordo com a NBR 15.220-3. Adotado cobertura com ático não ventilado, ou seja, FT = 1.

Em complemento a esses dados, a NBR 15.575: 2021 na parte 4 e 5 estabelece outros requisitos relacionados com a zona bioclimática 8 que devem ser respeitados (ABNT, 2021).

Os parâmetros limites para essa zona são evidenciados nas Tabelas 8 a 10. Essas diretrizes foram obedecidas na modelagem e as áreas de aberturas são explicitadas no Apêndice A.

Tabela 8 - Transmitância térmica de paredes externas U (W/m².K)– NBR 15.575-4:2021

Zona 8	
$\alpha \leq 0,6$	$\alpha > 0,6$
$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$

α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Tabela 9 - Área mínima de ventilação em dormitório e salas – NBR 15.475 -4:2021

Zona 8 – Aberturas Grandes	
Mínimo	$A > 8\% A_{\text{piso}}$

Tabela 10 - Transmitância térmica de coberturas U (W/m².K) – NBR 15.475 -5:2021

Zona 8	
$\alpha \leq 0,4$	$\alpha > 0,4$
$U \leq 2,3FT$	$U \leq 1,5FT$

Nota: α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

O fator de correção de transmitância (FT) é estabelecido de acordo com a NBR 15.220-3.

Adotado cobertura com ático não ventilado, ou seja FT =1.

4.3 Condições de Referência

A análise realizada neste trabalho utiliza uma edificação como referência de desempenho. Esta edificação apresenta as condições de referência detalhadas na NBR 15.575-1: 2021 para ambientes de permanência prolongada ou transitória. O modelo proposto deve adotar paredes e pisos com um elemento de vedação de 100 mm de espessura, composto por um material térmico com as propriedades apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Propriedades Térmicas para paredes e pisos do modelo de referência – NBR 15.475 -1: 2021

Elemento	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absorvância à radiação solar	Densidade kg/m ³
Paredes externas e Internas	1,75	1000	0,58	2200
Pisos	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	2200

A cobertura deve ser composta por telha com 6 mm de espessura, câmara de ar com resistência térmica de 0,21 (m².K)/W e laje com 100mm de espessura, conforme as propriedades da Tabela 12. A norma também especifica que, para edificações localizadas na zona bioclimática 8, como no caso deste estudo, deve-se considerar um isolamento com resistência térmica igual a 0,67 (m².K)/W sobre a laje.

Tabela 12 – Propriedades Térmicas para coberturas do modelo de referência – NBR 15.475 -1: 2021

Elemento	Condutividade Térmica W/(m.K)	Calor específico J/(kg.K)	Absortância à radiação solar	Densidade kg/m ³
Telha com 6 mm de espessura	0,65	840	0,65	1700
Laje com 100mm	1,75	1000	Adotar valor do modelo real	2200

Assim, tendo em vista as propriedades térmicas a serem alcançadas, foram estipuladas as características para a edificação apresentadas na Tabela 13.

Tabela 13 – Composição do Modelo de Referência

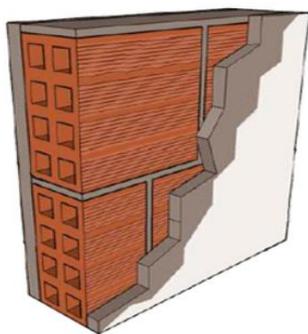
Elemento	Composição
Paredes	Bloco de concreto 9,0 x 19,0 x 39,0 cm, sem revestimento interno e externo, com $\alpha = 0,65$ e $U_{total} = 3,2$ W/m ² .K
Cobertura	Laje maciça 10,0 cm + Câmara de ar de 0,21 67 m ² .K/W + isolamento térmico de 0,67 m ² .K/W + telha cerâmica com $\alpha = 0,65$ e $U_{total} = 0,86$ W/m ² .K

4.4 Condições de Desempenho

As condições de desempenho da envoltória da edificação dos outros modelos analisados foram definidas de acordo com os requisitos térmicos do padrão de desempenho da NBR 15.575 parte 4.

As especificações de desempenho para paredes externas consideram a transmitância térmica, capacidade térmica e absortância. Assim, respeitando aos padrões, a parede escolhida é composta por um bloco cerâmico de 9 cm de espessura, argamassa interna e externa de 2,5 cm conforme Figura 13.

Figura 13- Modelo de Parede e propriedades térmicas



Paredes
Argamassa interna 2.5 cm | Bloco cerâmico 9x19x19 cm | Argamassa externa 2.5 cm

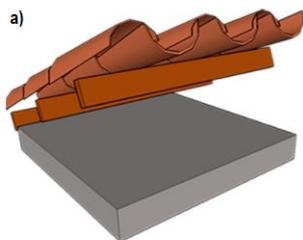
Resistência
0.42 m²K/W
 Transmitância
2.37 W/m².K
 Atraso Térmico
3.3 h
 Capacidade Térmica
151 kJ/m².K

Fonte: Adaptado de NBR 15.575-5 e Projeteer – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

A versão de 2013 da NBR 15.575 apresenta três níveis de desempenho para coberturas. Essa diferenciação era feita em relação a valores limites de absorção solar e transmitância térmica dos conjuntos construtivos. Apesar de da revisão de 2021 da NBR 15.575 não fazer essa distinção, esse trabalho se propõe a analisar diferentes modelos de cobertura, com diferentes valores de transmitância térmica, para melhor compreender a influência desses fatores na edificação (ABNT, 2013; LABEEE, 2018).

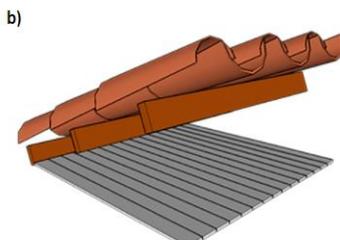
O primeiro modelo adotado de cobertura é composto por uma laje maciça de concreto com 10 cm, câmara de ar superior a 5 cm e telha de fibrocimento de 0,8 cm ou telha cerâmica de 1 cm pintada de cor clara (absorção solar $\alpha = 0,3$), com propriedades descritas na Figura 14a. Além deste modelo, podemos encontrar outras combinações que atendem aos requisitos como telhas cerâmicas ou de fibrocimento com forro de PVC (Figura 14b) ou de madeira (Figura 14c).

Figura 14 - Modelo de cobertura e propriedades térmicas



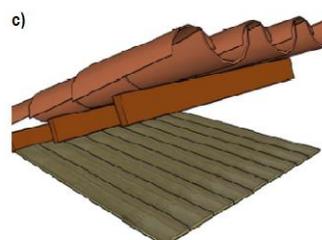
Laje maciça 10 cm | Câmara de ar (> 5,0 cm) | Telha cerâmica 1 cm

Resistência
0.49 m²K/W
 Transmitância
2.05 W/m².K
 Atraso Térmico
5.2 h
 Capacidade Térmica
238 kJ/m².K



Forro PVC 1 cm | Câmara de ar (> 5,0 cm) | Telha cerâmica 1 cm

Resistência
0.57 m²K/W
 Transmitância
1.75 W/m².K
 Atraso Térmico
0.6 h
 Capacidade Térmica
21 kJ/m².K



Forro madeira 1 cm | Câmara de ar (> 5,0 cm) | Telha cerâmica 1 cm

Resistência
0.50 m²K/W
 Transmitância
2.02 W/m².K
 Atraso Térmico
1.0 h
 Capacidade Térmica
26 kJ/m².K

Fonte: Adaptado de NBR 15.575-5 e Projeteer – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

Além desses, outros dois modelos de cobertura com valores inferiores de transmitância térmica também foram analisados. Uma cobertura composta por uma laje pré moldada de EPS 12 cm, câmara de ar superior a 5 cm e telha de fibrocimento de 0,8 cm ou telha cerâmica de 1 cm pintada de cor clara (absorção solar $\alpha = 0,3$) de transmitância térmica de $1,26 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Figura 15). E uma cobertura de um telhado vegetado intensivo composto por uma laje maciça de 10 cm, terra argilosa seca 40 cm e vegetação, tendo transmitância térmica de $0,96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (Figura 16).

Figura 15 - Modelo de cobertura e propriedades térmicas de laje pré-moldada de EPS



Fonte: Adaptado de NBR 15.575-5 e Projeteee – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

Figura 16 - Modelo de cobertura e propriedades térmicas telhado vegetado intensivo



Fonte: Projeteee – Projetando Edificações Energeticamente Eficientes

As normas analisadas não especificam o vidro a ser utilizado, e, devido a isso, foi considerado o uso do vidro com 3 mm para todos os modelos, com F.S =0,87 e U=5,7 W/m².K, sugerido em referências técnicas (CB3E, 2018).

Assim, definindo os modelos de acordo com os níveis de desempenho e utilizando os componentes construtivos mais utilizados, nós avaliaremos as composições contidas na Tabela 14.

Tabela 14 – Nível de Desempenho e Material utilizado

Material e Espessura (cm)	Nomeclatura
Parede: Bloco de Concreto (9)	Modelo de Referência (MR)
Cobertura: Laje maciça (1) + isolamento térmico + câmara de ar (> 5) + telha cerâmica clara ou de fibrocimento (1)	
Parede: Bloco Cerâmico Furado (9) + Argamassa interna e externa (2,5)	Laje Maciça, Ar e Telha (LMAT)
Cobertura: Laje maciça de concreto (10) + câmara de ar (> 5) + telha cerâmica clara ou de fibrocimento (1)	
Parede: Bloco Cerâmico Furado (9) + Argamassa interna e externa (2,5)	Forro de PVC, Ar e Telha (FPAT)
Cobertura: Forro de PVC (1) + câmara de ar (> 5) + telha cerâmica clara ou de fibrocimento (1)	
Parede: Bloco Cerâmico Furado (9) + Argamassa interna e externa (2,5)	Forro de Madeira, Ar e Telha (FMAT)
Cobertura: Forro de madeira (1) + câmara de ar (> 5) + telha cerâmica clara ou de fibrocimento (1)	
Parede: Bloco Cerâmico Furado (9) + Argamassa interna e externa (2,5)	Laje Pré Moldada de EPS, Ar e Telha (LPMEAT)
Cobertura: Laje pré moldada de EPS (12), câmara de ar (> 5) + telha cerâmica CLARA ou de fibrocimento (1)	
Parede: Bloco Cerâmico Furado (9) + Argamassa interna e externa (2,5)	Laje Maciça, Terra e Vegetação (LMTV)
Cobertura: Laje maciça (10) + terra argilosa seca (40) + vegetação	

4.5 Resultados

4.5.1 Ventilação Natural

Assim como apresentado anteriormente, a NBR 15.575-1: 2021 destaca a obrigatoriedade da análise da edificação com uso de ventilação natural. Para isso, é importante iniciar a análise com a delimitação de alguns parâmetros.

O primeiro parâmetro está relacionado com a temperatura média anual de bulbo seco (TBS). De acordo com dados climáticos, a TBS para o Rio de Janeiro é de 23,5°C. Assim, de acordo com as Tabelas 6 e 7, esse estudo se encontra no intervalo 1 e na faixa de temperatura operativa de 18,0°C a 26,0°C (Goulart, Lamberts e Firmino, 1998).

O presente estudo fez a análise dos dormitórios da edificação do modelo de referência e demais modelos construtivos. Os valores de $PHFT_{APP}$ obtidos na simulação para esses ambientes são os apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa dos dormitórios

Modelo	PHFT _{app} (%)	
	Quarto 1 – Fachada SUL/OESTE	Quarto 2 – Fachada LESTE
MR	50,88	66,67
LMAT	57,92	63,04
FPAT	78,58	80,52
FMAT	78,41	80,32
LPMEAT	63,69	67,56
LMTV	62,82	67,48

Assim, para a consideração apenas dos dois dormitórios, os valores de $PHFT_{UH}$ obtidos com o cálculo referenciado na equação (2) são os da Tabela 16.

Tabela 16 – Percentual de horas de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa

Modelo	PHFT _{UH}
MR	58,78
LMAT	60,48
FPAT	79,55
FMAT	79,37
LPMEAT	65,63
LMTV	65,15

Todos os modelos apresentaram porcentagem superior a 52,90 % (0,9 x 58,78 %), sendo então todos superiores a 90% do $PHFT_{UH}$ do modelo de referência. Assim, todos os modelos atendem tal critério de desempenho térmico.

Em relação ao critério de temperatura anual máxima $Tomáx_{UH}$, os valores obtidos por meio da simulação para cada APP foram os apresentados na Tabela 17.

Tabela 17 – Temperatura anual máxima de ocupação da UH dentro da faixa de temperatura operativa

Modelo	Tomáx, app			Tomáx, uh
	Quarto 1	Quarto 2	Sala	
MR	35,96	35,05	36,41	36,41
LMAT	36,64	35,99	37,48	37,48
FPAT	33,74	33,43	34,56	34,56
FMAT	33,77	33,46	34,61	34,61
LPMEAT	35,06	34,51	36,02	36,02
LMTV	33,82	33,35	34,7	34,7

Todas as temperaturas atendem os critérios da equação (3), ou seja, todos os modelos de UH possuem temperatura inferior a $36,41^{\circ}\text{C} + 2^{\circ}\text{C} = 38,41^{\circ}\text{C}$.

Em vista disso, ao analisar os critérios de edificações com uso de ventilação natural, foi possível observar que todos os modelos construtivos com as configurações estabelecidas apresentaram desempenho térmico aceitável para o uso apenas de ventilação natural.

No entanto, para efeito de estudo energético, e considerando o hábito de residentes do Rio de Janeiro de fazer uso de climatização em certas épocas do ano, a edificação foi analisada com um

sistema híbrido, utilizando ventilação natural durante o dia e condicionamento de ar para os dormitórios à noite (período de ocupação do ambiente). Esta análise é explicitada a seguir.

4.5.2 Sistema Híbrido

A partir da consideração de uso de climatização no período de ocupação dos dormitórios de 22:00 as 8:00, o resumo dos valores de consumo anual de energia total obtidos na simulação computacional são revelados na Tabela 18.

Tabela 18 – Consumo Anual de Energia

Modelo Construtivo	Consumo Anual de Energia [kWh]	Consumo Anual de Energia por Área [kWh/m ²]
MR	3060,57	10,07
LMAT	2755,02	9,07
FPAT	2388,43	7,86
FMAT	2395,86	7,89
LPMEAT	2571,63	8,46
LMTV	2569,83	8,46

A simulação também nos permitiu identificar o uso final de energia elétrica por setor, segundo a Tabela 19.

Tabela 19 – Uso Final de Energia Elétrica (kWh)

	Aquecimento	Refrigeração	Iluminação	Equipamentos	Ventilação	Consumo Total [kWh]
MR	0	1436,44	819,52	598,02	206,59	3060,57
LMAT	0	1168,55	819,52	598,02	168,92	2755,01
FPAT	0	850,75	819,52	598,02	120,14	2388,43
FMAT	0	858,0	819,52	598,02	120,31	2395,86
LPMEAT	0	1020,37	819,52	598,02	131,91	2571,63
LMTV	0	1021,59	819,52	598,02	132,49	2569,83

O modelo construtivo que apresentou menor consumo de energia foi o modelo composto por paredes de blocos cerâmicos, argamassa em ambas as faces, e cobertura com telha de cor clara e forro de PVC. Esta informação foi utilizada para realizar o dimensionamento da geração de energia solar fotovoltaica.

4.5.3 Geração de Energia Renovável

O consumo médio anual obtido no modelo construtivo de melhor desempenho energético foi de 2388,43 kWh/ano. Assim, utilizando a equação (4), obtemos o seguinte valor de consumo diário médio anual:

$$E = \frac{(2388,43/12)}{30} \times 1000 = 6634,53 \text{ Wh/dia}$$

A Taxa de Desempenho adotada neste trabalho foi de 70% (pior caso). A média diária anual de HSP_{MA} foi obtida em banco de dados climáticos. Para a cidade do Rio de Janeiro, foi considerada uma média diária anual de HSP_{MA} para irradiação no plano inclinado de latitude (adotado 23°) de 5,00 horas (Enio Bueno Pereira, 2006).

Assim, considerando E (Wh/dia) = 6634,53 Wh/dia, HSP_{MA} (h) = 5,00 h e TD = 0,7, a potência do gerador FV obtida com a equação (5) foi:

$$P_{FV}(W) = \frac{6634,53/0,7}{5,00} = 1895,58 \text{ W}$$

Após o dimensionamento da potência, deve ser feita a avaliação da tecnologia que melhor atende ao projeto. Neste projeto foram adotados Módulos Fotovoltaicos de 340W - OSDA, conforme especificações apresentadas na Figura 17.

Figura 17 –Módulo Fotovoltaico 340W - OSDA – ODA340-30-M



Potência do Painel:	340 Wp
Tolerância:	± 3 W
Tensão de Máxima Potência (V_{mp}):	33,24 V
Corrente de Máxima Potência (I_{mp}):	10,23 A
Tensão em Aberto (V_{oc}):	40,72 V
Corrente de Curto Circuito (I_{sc}):	10,77 A
Tensão Máxima do Sistema:	1000 V
Eficiência:	22,49 %
Temperatura Nominal da Célula (TNOC/NOCT):	45 ± 2 °C
Coefficiente de Temperatura da Corrente:	0,048 %/°C
Corrente Máxima do Fusível:	20 A
Dimensões do Painel:	2000 x 1050 x 60 mm
Peso do Módulo:	37,8 Kg
Código IP da caixa de proteção:	IP 67
Número de Células e Tipo:	60 (6x10), Silício Monocristalino
Vidro, espessura e tipo:	Vidro de alta transparência de 32mm com liga de alumínio anodizado
Garantia	12 anos

Fonte:OSDA

Com os módulos FV de 340 W, o projeto do sistema FV da edificação apresentou uma potência nominal de 2040 W (total de 6 módulos) e configuração representada na modelagem da Figura 18. O inversor selecionado foi o inversor solar fotovoltaico monofásico phb 2900 W, indicado na Figura 19.

Figura 18 – Projeção dos módulos fotovoltaicos na edificação

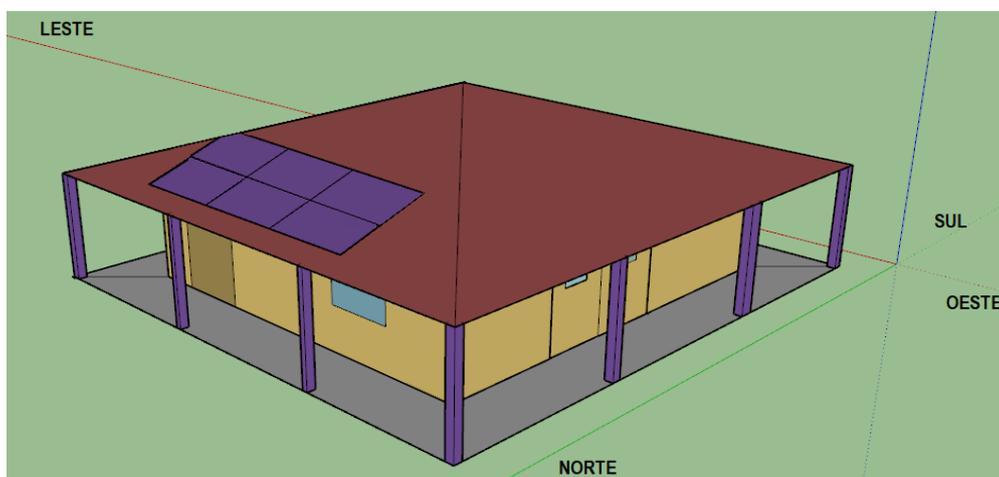


Figura 19 – Inversor Solar Fotovoltaico PHB– Monofásico 2900 W



Dados da Entrada CC		
	PHB2900D-NS	PHB5000D-NS
Max. Tensão CC [V]	580	580
Faixa de Operação SPMP [V]	125-550	125-550
Tensão CC de Partida [V]	120	120
Corrente CC Máxima [A]	11 / 11	11 / 11
Número de Strings / MPPT	2 / 2	2 / 2
Conector CC		MC4
Dados de Saída CA		
Potência CA Nominal [W]	2900	5000
Max. Corrente CA [A]	23,8	22,8
Saída Nominal CA	115, 120 e 127Vca; 60Hz	208, 220, 230, 240 e 254Vca; 60Hz
Faixa de Operação CA	92-139,7Vca; 57,5-62Hz	166,4-279,4Vca; 57,5-62Hz
THD		<3%
Fator de Potência	Unitário (0,95 Capacitivo. / 0,95 Indutivo)	
Conexão CA	Monofásico	Monofásico /Bifásico
Eficiência		
Max. Eficiência	96,01%	97,8%
Eficiência SPMP		>99,9%

Fonte:PHB

A inserção desses dados no *EnergyPlus* gerou os resultados apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 –Geração de Energia Elétrica (kWh)

Período (Meses)	Geração de Energia (kWh)
Janeiro	286,45
Fevereiro	271,97
Março	249,95
Abril	221,66
Maiο	178,21
Junho	166,78
Julho	154,82
Agosto	224,84
Setembro	200,58
Outubro	237,44
Novembro	240,58
Dezembro	263,15
Total	2696,43

4.6 Discussão

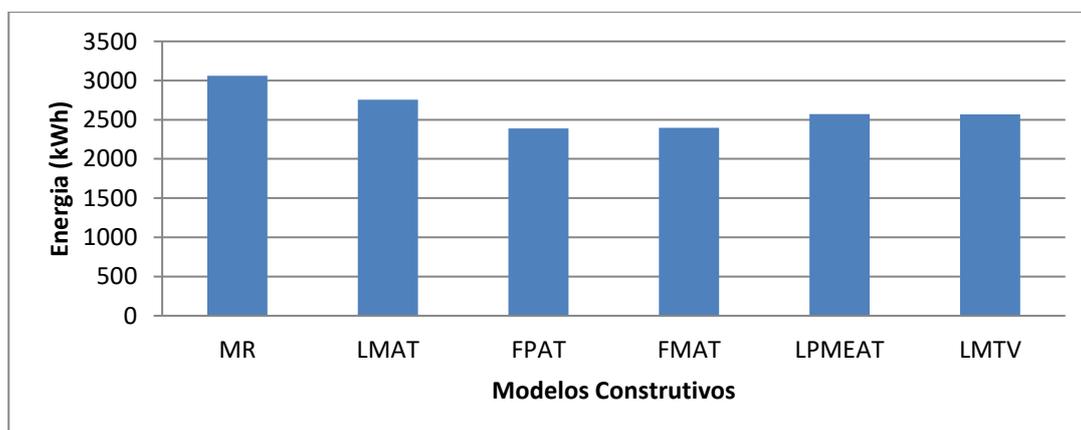
O estudo de caso apontou regulamentos brasileiros que se aplicam ao tema NZEB e/ou nZEB. No contexto atual, essas referências normativas especificam a aplicação de apenas algumas estratégias de arquitetura passiva, como apresentado, especificações relacionadas ao uso de ventilação natural, e aspectos da escolha de materiais da envoltória da edificação. No entanto, assim como foi identificado neste estudo, essas diretrizes podem ser suficientes para apresentar uma edificação com necessidades quase nulas de energia.

Os resultados dos critérios de uso de ventilação natural nos demonstraram que esse recurso se torna benéfico para edificações de climas similares ao do Rio de Janeiro, apresentando resultados de conforto ambiental na maior parte do ano, estando esses valores dentro da faixa aceitável descrita nas regulamentações brasileiras vigentes.

Em relação a edificações com sistemas híbridos de ventilação natural e climatização do ambiente, os dados de consumo de energia da edificação nos mostraram que todos os modelos analisados apresentaram valores de consumo anual de energia por área dentro da faixa de 0 a 15 kWh/m², que é a margem de consumo esperada para os países de regiões quentes membros da EU. Assim, estes valores mostram que os sistemas construtivos brasileiros possuem um grande potencial energético, considerando as condições climáticas nacionais.

Além disso, na comparação dos modelos construtivos, foi possível observar que mesmo atendendo aos padrões mínimos de desempenho, as edificações podem apresentar valores de consumo de energia bem distintos. O lançamento dos valores de consumo anual de energia em um gráfico nos permite visualizar o padrão de consumo de todos os modelos construtivos (Figura 20).

Figura 20 – Consumo Anual de Energia (kWh)



Ao observar a Figura 18 é possível identificar que a margem de consumo da edificação permanece entre 2400 e 3100 kWh/ano, atingindo o pico no modelo de referência que utiliza como componente construtivo parede de bloco de concreto (9 cm) sem revestimento, e em sua cobertura, utiliza telha de cor clara e laje maciça (10 cm).

Os modelos que apresentam os menores valores de consumo de energia são os que, em suas coberturas, fazem uso de forros como superfície de fechamento entre as telhas e a edificação. A cobertura com telhas de cerâmica e forro de PVC é a que apresenta menor resultado, seguida pela cobertura com forro de madeira que apresenta dados de consumo muito semelhantes. Ao observar os números absolutos, a simulação energética identifica uma diferença de demanda de 22% entre o modelo de referência e o de menor consumo de energia.

Essa diferença de desempenho nos demonstra a necessidade de uma análise de diferentes características físicas e térmicas dos materiais. Os modelos de melhor desempenho possuem transmitância térmica semelhante ou até mesmo superior a outros modelos, ou seja, eles permitem uma maior troca de calor do ambiente externo para o interno. No entanto, seus dados de consumo foram inferiores. Isso nos demonstra que analisar apenas esse aspecto, o que era feito em normas anteriores, não é o suficiente para obter o melhor desempenho térmico.

No entanto, quando analisamos outros dados dos materiais escolhidos, observamos que os modelos que obtiveram melhor desempenho foram os que possuíam menores valores de capacidade térmica e o atraso térmico.

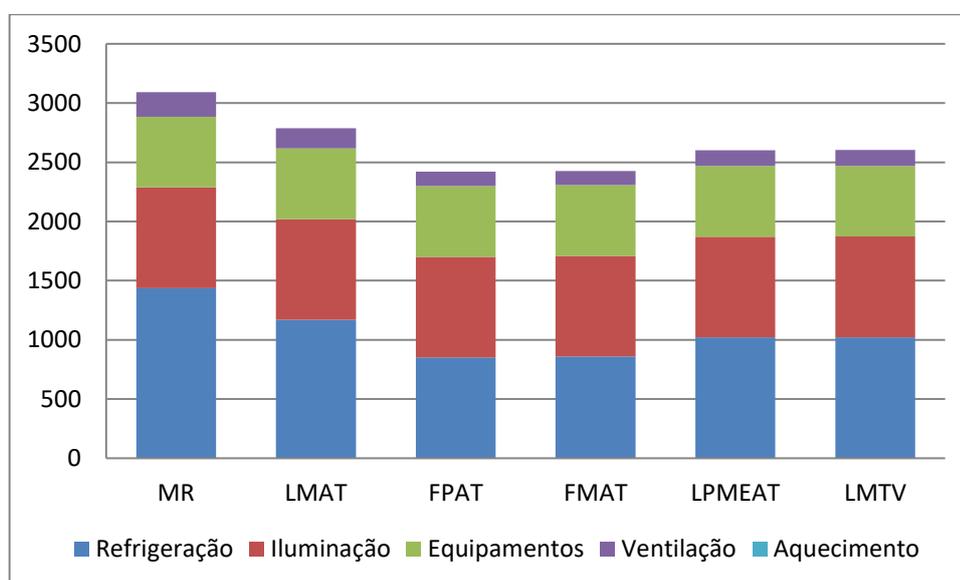
Envelopes das edificações que possuem materiais com altos valores de capacidade térmica e atraso térmico favorecem a inércia térmica da edificação. Nessa situação a edificação tem uma maior capacidade de absorver e armazenar calor. Esse tipo de estratégia se torna interessante para ambientes que possuem temperaturas noturnas consideravelmente inferiores às temperaturas diurnas. Assim, no período da noite, a edificação transfere calor do envelope da construção para o interior do ambiente, reduzindo essa diferença de temperatura.

Porém, essa estratégia pode não ser benéfica para climas quentes, pois armazena o calor do dia e aquece o ambiente no período da noite, tornando o ambiente ainda mais quente que o normal. Considerações assim podem ser interessantes em períodos frios, mas por essa parcela ser pouca em relação aos períodos quentes em locais como o Rio de Janeiro, se essa estratégia for utilizada, deve ser associada a outras estratégias bioclimáticas para obter o desempenho desejável ao longo de todo o ano.

Considerando que, neste trabalho, a análise de consumo energético foi realizada com o uso de ventilação natural apenas durante o dia, e no período da noite faz uso de climatização dos ambientes ocupados para manter o conforto térmico do usuário sem estar associado a outras estratégias bioclimáticas de equilíbrio, observamos que, nos modelos construtivos de maior inércia térmica, a edificação possui uma maior necessidade de energia para atender a demanda térmica.

Essa análise é confirmada pelos dados de do uso final de energia elétrica apresentados na Figura 21.

Figura 21 – Uso Final de Energia Elétrica



Os valores de iluminação e equipamentos permanecem iguais em todos os modelos. Os serviços que apresentam variações e representam a grande parcela do consumo de energia elétrica estão relacionados com a climatização do ambiente, confirmando a influência da inércia térmica da edificação.

Esses dados comprovam que a escolha dos materiais da envoltória possui um grande impacto no consumo energético total e deve ser cuidadosamente analisada na etapa de projeto da edificação. Essa perspectiva é confirmada pela comparação dos valores de temperatura de algumas superfícies da edificação ao norte e sul. A Figura 22 nos apresenta um perfil de temperatura média mensal da edificação do modelo de referência ao longo de um ano e a Figura 23 o perfil da edificação que apresentou o menor consumo de energia, a edificação com parede de bloco cerâmico (9cm) e argamassa interna e externa (2,5 cm), e, na cobertura, telha (cor clara) e forro PVC (1cm).

Figura 22 – Temperatura de superfícies características da edificação MR

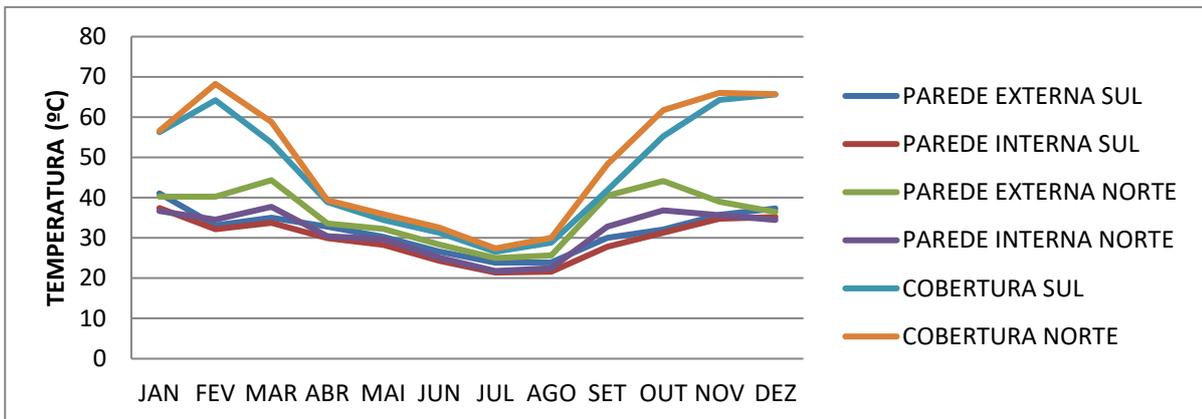
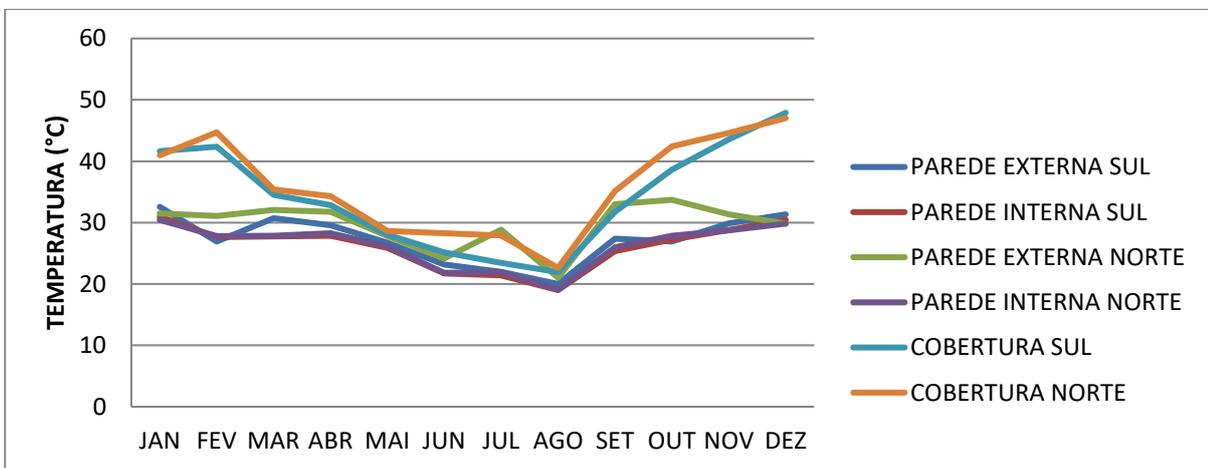


Figura 23 – Temperatura de superfícies características da edificação modelo FPAT



Os picos de temperatura das edificações estudadas apresentam valores bem distintos, principalmente quando analisamos as superfícies que se encontram na cobertura. O modelo que apresenta cobertura mais eficiente absorve menos calor, reduzindo a necessidade de climatização do ambiente interno para atingir o conforto ambiental.

Em vista disso, ao analisar tais dados de modelos de edificações de clima quente, se tornam aplicáveis as considerações que, materiais que possuem baixa transmitância térmica (transmitem menos calor do externo para o interno), mas possuem alta inércia térmica (uma alta capacidade de armazenar o calor), podem não ser vantajosos se não forem associados a outras estratégias bioclimáticas, pois, no período noturno, irão transmitir o calor absorvido ao longo do dia para a edificação, exatamente no horário de ocupação do ambiente.

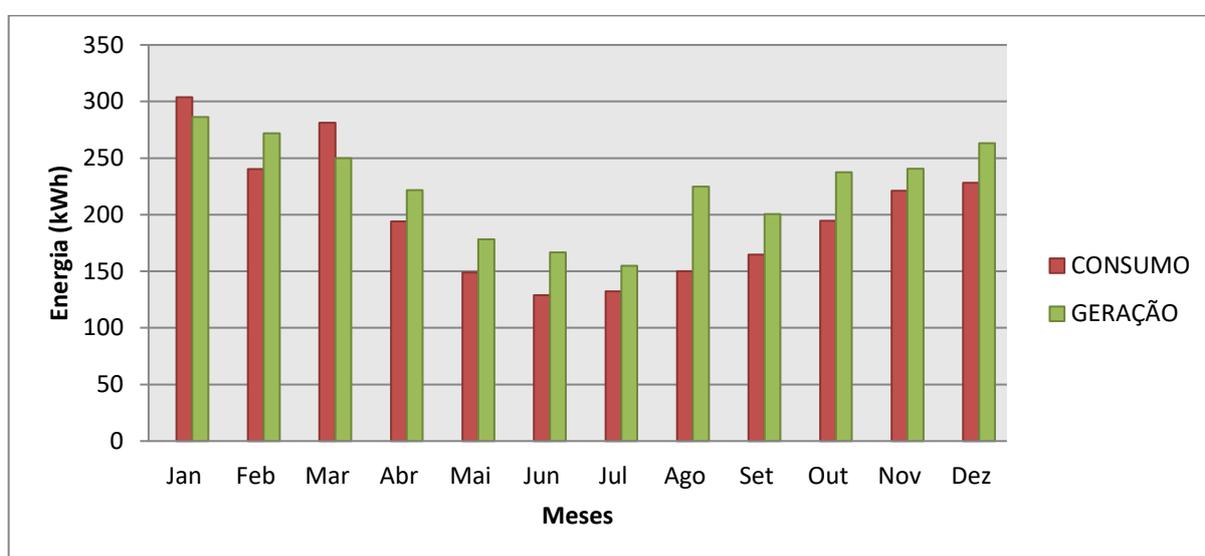
Assim, em localidades de climas similares ao analisado, fatores relacionados com condutividade térmica e atraso térmico devem ser considerados e, dependendo da configuração da edificação, modelos construtivos de baixa inércia térmica podem apresentar melhor desempenho

energético. E nesse aspecto, um envelope que permita o resfriamento livre e sombreamento de fechamentos transparentes são estratégias bioclimáticas que devem ser exploradas.

Após essas considerações que evidenciam o modelo de envoltória mais eficiente, é possível avançar para a etapa seguinte.

A análise energética da edificação estudada nos apresentou valores de consumo e fornecimento de energia. Ao associar ambos, podemos obter um balanço energético da edificação. Este balanço é apresentado na Figura 24.

Figura 24 – Balanço Energético da Edificação



O balanço da edificação obtido do *EnergyPlus* apresentou um saldo anual positivo de exportação de 308,8 kWh/ano, ou seja, além de atender a necessidade da edificação, ainda permitiu a geração de energia que pôde ser exportada para a rede elétrica.

Assim, a associação do modelo construtivo mais eficiente a uma fonte de energia renovável, no caso a energia solar fotovoltaica, pôde comprovar que existe disponibilidade de recurso energético no local estudado para alcançar o conceito NZEB e/ou nZEB.

Além disso, apesar de a análise computacional apresentar limitações, ela nos destacou aspectos positivos para a implantação do conceito NZEB e/ou nZEB em edificações localizadas no Rio de Janeiro.

5. CONCLUSÃO

As edificações de padrão nZEB já são realidade em muitos países. Este tipo de edificação de alto desempenho energético, com o poder de mitigar diversos problemas ambientais, tem se tornado cada vez necessário no contexto mundial. A situação do Brasil não é diferente, e por isso o estudo desde modelo de edificação no cenário brasileiro se torna tão significativo.

O estabelecimento de um novo conceito construtivo não depende apenas do interesse de usuários, mas necessita de referências técnicas e legislações vigentes. O levantamento das diretrizes relacionadas ao tema nos apresentou recomendações tanto nacionais como internacionais. Com elas, foi possível fazer uma simulação energética através do programa computacional *EnergyPlus*.

A análise energética nos expôs dados de consumo de energia de uma edificação residencial unifamiliar localizada no Rio de Janeiro, de diferentes modelos construtivos. Os resultados obtidos demonstraram que a escolha de materiais da envoltória da edificação, como paredes e cobertura, influenciam diretamente o consumo de energia da edificação.

Ao apresentar o uso final de energia, o estudo também permitiu identificar as necessidades energéticas de maior relevância, que são informações importantes para as considerações estratégicas de arquitetura passiva.

Os resultados da simulação energética associados à geração de energia solar fotovoltaica demonstraram que edificações localizadas no Rio de Janeiro possuem disponibilidade de recursos para se obter uma produção de energia renovável compatível com a demanda de uma edificação residencial de modelo padrão baixo. Nesse aspecto, considerações da regulamentação de geração de energia devem ser avaliadas para se obter um projeto aprimorado.

A avaliação de outras estratégias de arquitetura passiva, considerações de escolha de sistemas mecânicos da construção, um estudo de outras fontes de energia renovável, a consideração do efeito da distribuição de temperatura nas superfícies em áreas urbanas (com influência no microclima local), como também uma investigação da viabilidade econômica do projeto são aspectos necessários para afirmar o sucesso do conceito nZEB no Brasil e podem ser tema de estudos futuros.

No entanto, analisando os aspectos técnicos envolvidos nesse trabalho, é possível afirmar que, se medidas energéticas forem consideradas no projeto da edificação, as tecnologias construtivas

existentes vinculadas ao fornecimento de energia renovável podem apresentar resultados razoáveis de desempenho energético e permitir a aplicação do conceito NZEB e/ou nZEB no Brasil.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 15220 - Desempenho térmico de edificações**, 2003.
- ABNT. **NBR 15575 - Edificações habitacionais- Desempenho**. 2013.
- ABNT. **NBR 15575-1 - Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais**. 2021a.
- ABNT. **NBR 15575 - Edificações habitacionais — Desempenho Parte 4: Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas — SVVIE**. 2021b.
- ABNT. **NBR 15575 - Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 5: Requisitos para os sistemas de coberturas**. 2021c.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482**, 2012. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>
- ANEEL, A. N. DE E. E. Resolução Normativa 414/2010. **Resolução Normativa Nº 414 De 9 De Setembro De 2010**, p. 205, 2010.
- ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 687**, 2015. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>
- BRITANNICA, T. E. OF E. **Clima Mediterrâneo**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/Mediterranean-climate>>. Acesso em: 20 mar. 2021.
- CABEZA, L.; CHÀFER, M. Opções tecnológicas e estratégias para edifícios com energia zero contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas: uma revisão sistemática. 2020.
- CB3E. **Proposta de Instrução Normativa Inmetro para a Classe de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R)**, 2018. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B02A05065->>>
- COMISSÃO EUROPEIA. RECOMENDAÇÃO (UE) 2016/1318 DA COMISSÃO de 29 de julho de 2016 relativa às orientações para a promoção de edifícios com necessidades quase nulas de energia e das melhores práticas para assegurar que, até 2020, todos os edifícios novos tenham necessidades . **Jornal Oficial da União Europeia**, n. 208, p. 46–57, 2016.
- COMISSÃO EUROPEIA. **Diretiva de desempenho energético de edifícios**. Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en>. Acesso em: 12 maio. 2020.
- CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**Rio de Janeiro, 2014.
- ENERGYPLUS. **Geração no local - O gerenciador de distribuição do centro de carga elétrica**. Disponível em: <https://www.energyplus.net/sites/default/files/docs/site_v8.3.0/EngineeringReference/14-OnSiteGeneration/index.html#overview>. Acesso em: 11 abr. 2021.
- ENIO BUENO PEREIRA. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: [s.n.].
- EPBD. Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010 , relativa ao desempenho energético dos edifícios. **Jornal Oficial nº L 153**, p. 13–35, 2010.
- EPE. **Balanco Energético Nacional**Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-521/Relatório Síntese BEN 2020-ab 2019_Final.pdf>
- GHOLAMI, H.; RØSTVIK, H. N.; MÜLLER-EIE, D. Análise econômica holística do sistema fotovoltaico integrado de edifícios (BIPV): avaliação de estudo de caso. **Energy and Buildings**, v. 203, n. 109461, 2019.
- GOULART, S. V. G.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras. p. 1–345, 1998.
- GRAY, D. **Pesquisa no Mundo Real**. 2. ed. Porto Alegre: [s.n.].
- IEA. **Edifícios**. Disponível em: <<https://www.iea.org/topics/buildings>>. Acesso em: 3 jun. 2020a.
- IEA. **Relatório de status global de 2019 para edifícios e construção**, 2019b. Disponível em:

<https://webstore.iea.org/download/direct/2930?fileName=2019_Global_Status_Report_for_Buildings_and_Construction.pdf>

INMETRO. **Regulamento Técnico da Qualidade para Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais**, 2012.

IPCC. **Mudanças Climáticas 2014**, 2014. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>>

ISO. **ISO 52000 - Desempenho energético de edificações- Avaliação abrangente de EPB**, 2017.

LABEEE, L. DE E. E. EM E. Desenvolvimento de um modelo equivalente de avaliação de propriedades térmicas para a elaboração de uma biblioteca de componentes construtivos brasileiros para o uso no programa EnergyPlus. **Journal of Chemical Information and Modeling**, v. 53, n. 9, p. 1689–1699, 2018.

MASTER, J. F. W. C.; AMORIM, C. N. D.; SILVA, J. C. R. Diretrizes de retrofit para a obtenção de edificações com energia zero líquida para edifícios de escritórios em Brasília. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. 101680, 2020.

MME. Balanço Energético Nacional 2018. p. 292, 2018.

MUSSAL, E. **Edifícios com energia zero líquida em todo o mundo**, 2013. Disponível em: <<https://batchgeo.com/map/net-zero-energy-buildings>>

OSDA. 340 W Paine Solar. p. 61730, [s.d.].

PAPADIS, E.; TSATSARONIS, G. Desafios na descarbonização do setor de energia. 2020.

PHB. **Inversor Solar Fotovoltaico Monofásico PHB**. Disponível em: <https://www.energiasolarphb.com.br/pdf/PHB780-XS_PHB1500-XS_v2.0.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2021.

RESENDE, J.; MONZÓN-CHAVARRÍAS, M.; CORVACHO, H. A aplicabilidade de edifícios residenciais com energia quase nula / líquida no Brasil - Um estudo de uma habitação de baixo padrão em três diferentes zonas climáticas brasileiras. 2020.

REVKIN, A. **A maioria dos americanos agora se preocupa com a mudança climática - e quer consertá-la**. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/2019/01/climate-change-awareness-polls-show-rising-concern-for-global-warming/>>. Acesso em: 31 jul. 2020.

RODRIGUES, T. T. V.; CARLO, J. C.; OLIVEIRA FILHO, D. Modelagem térmica de fotovoltaicos semitransparentes: impactos na eficiência da célula e no desempenho da zona. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, v. 9, n. 4, p. 305–318, 2018.

RÜTHER, R.; SALAMONI, I. O potencial dos setores urbanos brasileiros para a geração de energia solar fotovoltaica de forma integrada às edificações. **Fórum Patrimônio**, v. 4, n. 1, p. 10, 2011.

SARTORI, I.; NAPOLITANO, A.; VOSS, K. Edifícios com energia zero líquida: uma estrutura de definição consistente. **Energy and Buildings**, 2012.

SHUKLA, A. K.; SUDHAKAR, K.; BARENDAR, P. Avanço recente em tecnologias de produtos BIPV: uma revisão. **Energy and Buildings**, v. 140, 2017.

SULZAKIMIN, M. *et al.* **Benefícios para Edifícios de Saúde Pública em relação a Edifícios com Energia Zero Líquida (NZEBS): Avaliações iniciais IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Anais...2020**

URBANETZ, J.; ZOMER, C.; RÜTHER, R. Compromissos entre forma e função em sistemas fotovoltaicos integrados à construção e conectados à rede (BIPV) em locais de baixa latitude. **Building and Environment**, v. 46, n. 10, p. 2107–2113, 2011.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em Administração**. 14. ed. São Paulo: Atlas, 2013.

WALTER COSTA, J. F.; DAVID AMORIM, C. N.; RIBEIRO SILVA, J. C. Diretrizes de retrofit para a obtenção de edificações com energia zero líquida para edifícios de escritórios em Brasília. **Journal of Building Engineering**, v. 32, n. August, p. 101680, 2020.

APÊNDICE A

As aberturas da edificação estudada seriam as referências da NBR 15.575 e os seus valores são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 – Aberturas da Edificação

	ÁREA DOS AMBIENTES (m ²)	ABERTURAS DOS AMBIENTES			ABERTURAS POR AMBIENTES (%)
		JANELAS (m ²)	PORTAS (m ²)	TOTAL (m ²)	
QUARTO 1	15,2	1,5	1,47	2,97	20%
QUARTO 2	11,96	1,5	1,47	2,97	25%
SANITÁRIO 1	4,92	0,3	1,26	1,56	32%
SANITÁRIO 2	4,43	0,3	1,26	1,56	35%
SALA / COZINHA	40,49	4,5	4,83	9,33	23%

As fachadas com as respectivas áreas de aberturas se encontram na Figura 25.

Figura 25 – Aberturas da edificação nas quatro fachadas

