

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
*CAMPUS* LITORAL NORTE  
DEPARTAMENTO INTERDISCIPLINAR  
ENGENHARIA DE GESTÃO DE ENERGIA

**RONALD ANTUNES GOMES**

**ESTUDO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO  
UNIFAMILIAR COM ENERGIA LÍQUIDA ZERO**

Tramandaí

2021

**RONALD ANTUNES GOMES**

## **ESTUDO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR COM ENERGIA LÍQUIDA ZERO**

Este trabalho foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da atividade de ensino “Trabalho de Conclusão de Curso”, do Departamento Interdisciplinar e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Flavio Vanderlei Zancanaro Junior, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Flavio Vanderlei Zancanaro Júnior, UFRGS.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

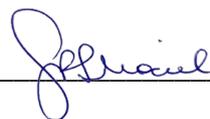
Prof. Dr. Adriano Roberto da Silva Carotenuto, UNIPAMPA.

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Juliana Klas, UFRGS.

Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil.

**Coordenadora COMGRAD-EGE:** \_\_\_\_\_  
**Prof. Dr<sup>a</sup>. Gabriela Pereira da Silva Maciel**



# ESTUDO TERMOENERGÉTICO DE UMA EDIFICAÇÃO UNIFAMILIAR COM ENERGIA LÍQUIDA ZERO

Ronald Antunes Gomes<sup>1</sup> – ronald.gomes@ufrgs.br

Flavio Vanderlei Zancanaro Júnior<sup>1</sup> – flavio.zancanaro@ufrgs.br

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento Interdisciplinar – Engenharia de Gestão de Energia.

**Resumo.** Atualmente as edificações apresentam um grande consumo de energia associado aos diversos equipamentos e sistemas agregados. Diante da possibilidade de construir edificações eficientes, através de alternativas corretas, o planejamento e implantação de medidas de eficiência energética se torna uma estratégia para economia de energia. Nesse contexto, o conceito de Prédio de Energia Líquida Zero (NZEB – Net Zero Energy Building), onde o balanço de energia anual da edificação é menor ou igual à zero, apresenta-se como uma alternativa viável. Este trabalho tem como objetivo apresentar o estudo termoenergético de uma edificação para obter a energia líquida zero, assim compreendendo e analisando os usos de energia presentes na edificação com a utilização de simulação computacional. A edificação a ser considerada fica localizada na cidade de Xangri-Lá/RS com área total construída de 207 m<sup>2</sup>. A simulação termoenergética será realizada no programa EnergyPlus, utilizando dados climáticos do litoral norte gaúcho. Assim, obtém-se a compreensão dos usos de energia presentes na edificação, minimizando-os com estratégias eficientes e possibilitando a diminuição do consumo de energia. Após a aplicação das medidas de eficiência energética, o número de módulos fotovoltaicos necessários para suprir o consumo de energia elétrica ao longo do ano foi estimado e analisado com uso da ferramenta computacional. Essa análise demonstrou que as propostas apresentadas tiveram uma influência no consumo de energia, principalmente para modificação na cobertura com a utilização de telhas de cerâmica, possibilitando reduzir o consumo total em 3,03% e 6,17% em climatização. Assim, o consumo de energia elétrica anual foi zerado com a aplicação de um sistema fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, EnergyPlus, Energia Líquida Zero

**Abstract.** Nowadays the buildings have a large consumption of energy related to electric equipment and aggregate systems. Nonetheless, the possibility to build efficient buildings, through correct alternatives, the planning, and implementation of energy efficiency measures become a strategy of energy saving. In this context, the concept of Net Zero Energy Building, where the annual balance of energy use, is less or equal to zero, becomes a viable alternative. This article presents the energy study of a single family house to obtain an NZEB, through understanding and analysis of the energy use at the house, using software of computation simulation. The house to be considered is located in the city of Xangri-Lá in Brazil, with an area of 207m<sup>2</sup>. The energy simulation will be made with EnergyPlus software, using the climate data of the north shore of Rio Grande do Sul/Brazil. Thus to understand the energy uses at the house, using efficiency strategies to minimize, and reduce energy consumption. After the application of the energy efficiency measures, the right number of solar panels are defined and analyzed, to zero the annual energy consumption with the software of simulation. This analysis shows the present proposals influenced energy consumption, principally for the changes of the roof with ceramic tiles, making it possible to reduce the total consumption by 3.03% and 6.17% in HVAC. The annual energy consumption will be zero with a photovoltaic system.

**Keywords:** Energy Efficiency, EnergyPlus, Net Zero Energy Building

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente no Brasil, o setor residencial apresenta um consumo de 10,3% de toda a energia que é transformada no país, esse balanço inclui o setor de transportes. De 2018 a 2019, o setor residencial teve um aumento de 0,8% no consumo, no mesmo período o setor industrial apresentou uma redução de 2,7% no consumo de energia, mesmo com um aumento de 1,1% do PIB (BEN, 2020). Dessa forma, é necessário criar uma estratégia para reduzir o consumo de energia no setor residencial, utilizando alternativas benéficas ao meio ambiente. Edificações sustentáveis é um assunto que está em pauta na Europa e agora no Brasil (Domingos, 2020). Devido à necessidade de reduzir o consumo de energia no setor residencial, projetos NZEB (*Net Zero Energy Building*) apresentam potencial de redução, sendo conceitualmente edificações que possuem um baixo consumo de energia e utilizam uma fonte de energia renovável para suprir toda a demanda anual. Se grande parte das edificações adotar esse conceito é possível reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> e, com utilização de fontes renováveis, é possível contribuir para o crescimento do setor de geração distribuída. Essa é uma forma de proteger os consumidores dos aumentos das tarifas de energia.

As edificações NZEB apresentam um balanço de energia líquida igual ou maior que zero, tendo as necessidades energéticas atendidas por uma fonte de energia renovável. As fontes de energia mais utilizadas em projetos NZEB são: energia solar, energia eólica, geotérmica e biomassa. Para viabilizar um projeto NZEB é necessária a aplicação de ações que visam através de indicadores uma eficiência energética, assim possibilitando que a edificação apresente um desempenho energético satisfatório. Projetos NZEB contribuem para redução das emissões de gases que causam o efeito estufa, porque utilizam uma energia limpa, evitando o uso de termoelétricas, assim contribuindo para uma descarbonização e diversificação da matriz energética nacional. No planejamento de uma edificação NZEB, é fundamental realizar uma análise sobre aspectos que influenciam o desempenho térmico da edificação, o estudo da envoltória define quais decisões podem ser tomadas na fase de projeto e quais podem ser adotadas em uma modernização (Cao, 2016). O desempenho térmico adequado possibilita que haja uma sensação de conforto térmico, mesmo que isso seja um fator psicológico é possível definir uma faixa de temperatura interna da edificação. Essa medida reduz a necessidade de resfriamento artificial. Com um desempenho térmico adequado, é possível pensar em estratégias que visam melhorar o desempenho energético da edificação, assim utilizando tecnologias que auxiliem na redução do consumo de energia. O método mais efetivo de realizar um diagnóstico energético e utilizar um programa de simulação computacional, para construir uma projeção do consumo de energia elétrica, assim é possível analisar cada uso de energia e identificar quais são significativos e as oportunidades de melhoria (D’Agostino, 2019).

Foi escolhido como estudo de caso uma edificação unifamiliar com área total construída de 207 m<sup>2</sup>, divididos em dois pavimentos, localizada na cidade de Xangri-Lá no RS (Rio Grande do Sul). Nesta edificação será realizada uma simulação termoenergética, com o objetivo de utilizar esse recurso em um projeto NZEB no setor residencial brasileiro. Assim, aplicando o clima do RS em uma edificação de energia líquida zero e utilizando estratégias que sejam factíveis no Brasil, apresentam-se etapas necessárias para transformar uma edificação convencional em uma NZEB e às estratégias escolhidas para atingir este objetivo. Primeiro foi realizado uma revisão bibliográfica das definições e métodos utilizados em um projeto NZEB ao redor do mundo. Na metodologia são desenvolvidas e definidas as etapas necessárias para dimensionar um projeto NZEB. Depois dessa etapa é apresentado o estudo de caso, onde são aplicadas as etapas desenvolvidas neste estudo, utilizando o método de simulação termoenergética no programa *EnergyPlus*. Dessa forma, são apresentados os resultados e as discussões acerca deste estudo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, busca-se apresentar o conceito de NZEB, a partir da visão de diferentes autores, possibilitando perceber que apesar das inúmeras diferenças, todos os conceitos atingem o mesmo objetivo, que é reduzir as emissões, o consumo de energia e ter uma edificação eficiente. É possível verificar que existem diversos caminhos para alcançar a energia líquida zero em uma edificação.

Segundo Torcellini (2006), NZEB é um prédio com grande redução no consumo de energia, através de medidas de eficiência, assim possibilitando que as necessidades energéticas estejam equilibradas, sendo possível suprir a demanda anual de energia, utilizando uma fonte de energia renovável. O conceito de NZEB pode ser definido de diversas formas, porém o autor criou quatro conceitos que ajudam compreender melhor o tema: *Net Zero Site Energy*, transforma toda a energia demandada pela edificação ao longo do ano, porém não é contabilizada a energia retirada de uma fonte externa (exemplo: gás natural); *Net Zero Source Energy*, transforma toda a energia que é demandada na edificação, tendo um balanço final igual à zero, não necessitando de energia de uma fonte externa; *Net Zero Energy Costs*, quando os custos da energia são zero, a energia transformada é suficiente arcar com todos os custos de energia ao longo do ano, inclusive com as tarifas; *Net Zero Energy Emissions*, transforma toda energia utilizada ao longo do ano de fontes renováveis, sem emissões de CO<sub>2</sub>.

Definido por Marszal (2011), edificações NZEB são uma alternativa factível para redução do consumo de energia e mitigação de gases do efeito estufa. Mesmo sendo um objetivo internacional, ainda não há uma metodologia padronizada para calcular edificações NZEB, há apenas propostas voluntárias para a resolução de casos específicos. Porém há similaridades entre às metodologias propostas, então o autor definiu alguns pontos que devem ser considerados em um projeto NZEB: definir quais aspectos deve possuir um balanço igual à zero, emissões, custo, energia primária, energia consumida; definir o período que vai ser analisado no projeto; definir quais são os usos de energia, definir qual tipo de balanço utilizado para calcular a energia líquida zero; definir uma fonte de energia renovável para atender o consumo da edificação; definir se a edificação vai estar conectada ao sistema elétrico.

Já Cohen (2021) cita que *Net Zero Carbon* é a próxima meta para o desempenho de energia em escritórios. De acordo com UKGBC (*UK Green Building Council*), edifícios com emissões zero podem ser definidos da seguinte forma: emissões zero na operação, emissões zero na construção de um edifício novo ou reformado e emissões zero em todo o ciclo de vida da edificação. É importante deixar claro que *Net Zero Carbon* é diferente de *Net Zero Energy*, é considerado um prédio de energia líquida zero quando o balanço anual é zero e possui geração de energia no local. Um prédio com emissões zero de carbono define que é possível utilizar energia, proveniente de fontes renováveis externas ou nucleares. Em ambos os conceitos é necessário ser energeticamente eficiente, porém fazer melhorias em edifícios já construídos é uma tarefa complicada, porque é necessário fazer intervenções no sistema de operação e manutenção, no sistema de climatização e iluminação, esta é uma forma de se obter um bom desempenho energético. Em edifícios novos, essas mudanças podem ser realizadas na fase de projeto.

De acordo com D'Agostino (2019), os edifícios consomem 40% de toda a energia primária na Europa, tornando-se um fator preocupante. Através dos dados relacionados ao consumo de energia, é possível concluir que grande parte do consumo de energia é relacionada aos edifícios que possuem uma envoltória antiga que não proporciona um desempenho térmico adequado. Isto demonstra que há uma grande oportunidade de economia de energia nesse setor. Como alternativa para reduzir o consumo de energia, são utilizadas edificações NZEB que podem ser definidas da seguinte forma: é uma edificação com um alto desempenho energético, tendo um baixo consumo de energia que é atendido por uma fonte de energia renovável, neste tipo de edificação é importante utilizar um indicador numérico para quantificar a energia primária utilizada ao longo do ano ( $\text{kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ ), os indicadores são definidos pela política energética adotada em cada país.

Magrini (2020) define que, NZEB são edificações que possuem um alto desempenho energético, com um baixo consumo de energia e utilizam uma fonte de energia renovável para suprir a demanda de energia. Desde 2018 todos os prédios públicos na União Europeia devem ser NZEB e a partir de 2020 todos os prédios novos devem adotar esta configuração. Este padrão é uma estratégia para reduzir o consumo de energia e as emissões de  $\text{CO}_2$ . Este modelo construtivo representa uma melhoria no desempenho energético de edifícios novos e uma renovação de edificações já existentes. Uma edificação com energia líquida positiva é uma evolução do NZEB, estas edificações geram um montante de energia maior que a sua demanda anual, isso possibilita que esta energia possa ser utilizada em diversas aplicações, como carregar um carro elétrico ou pode auxiliar o sistema elétrico através da geração distribuída.

Cao (2016), NZEB representa a nova geração de projetos construtivos, porque apresenta uma combinação entre edificações sustentáveis e energia renovável. Para criar uma edificação NZEB é necessário aplicar medidas de eficiência energética e um sistema de geração de energia renovável. As medidas de eficiência visam reduzir o consumo de energia utilizando tecnologias de economia passiva de energia, que incluem uma envoltória eficiente, aquecimento e resfriamento passivos, e uso de energia solar térmica. Estas tecnologias são sensíveis às condições climáticas, por isso devem ser pensadas na fase de projeto. Já o sistema de geração de energia renovável, deve ser escolhido de acordo com as opções disponíveis. Geralmente são utilizados para geração de energia: energia solar, eólica, geotérmica e biomassa, porém cada localização apresenta um número limitado de opções.

D'Agostino (2018) cita que, a estratégia de projeto NZEB deve levar em consideração diversos fatores; clima, localização, materiais, recursos disponíveis e custos. Dessa forma é possível analisar a efetividade das soluções propostas considerando o ciclo de vida da edificação. Com o objetivo de reduzir o consumo de energia da edificação, é possível analisar a eficiência dos sistemas de climatização, iluminação e fotovoltaico, utilizando uma simulação computacional termoenergética. Assim, aspectos como envoltória, janelas, conforto térmico, podem ser considerados na tomada de decisão. Em edificações NZEB são aplicadas tecnologias para reduzir o consumo de energia, o isolamento na envoltória pode ser aplicado de acordo com o clima, porque este pode reduzir a transferência de calor que é responsável pelas perdas internas no inverno e os ganhos internos no verão. Já nas janelas podem ser utilizados vidros duplos ou com baixa emissividade, é possível escolher o vidro adequado de acordo com o resultado da simulação, as janelas contribuem de forma crucial para o desempenho da envoltória. Este influencia diretamente no dimensionamento do sistema de climatização, e no número de módulos fotovoltaicos necessários para suprir a demanda de energia.

Kurnitski (2011) definiu sete passos para avaliar um projeto NZEB: escolher uma edificação de referência; definição dos conceitos construtivos, baseado no desempenho da envoltória; especificar os sistemas técnicos para construção; simulação termoenergética; realizar um balanço de energia com os dados da simulação; calcular custos de construção e o valor presente líquido; análise de sensibilidade da taxa de juros, aumento dos preços da energia e outros parâmetros. Todas essas etapas são levadas de forma independente. Estes passos demonstram que o custo ideal pode ser calculado com um número limitado de simulações e os dados dessas simulações auxiliam na escolha dos melhores componentes construtivos. Estas etapas foram aplicadas em uma edificação de  $171,1 \text{ m}^2$  localizada na Estônia, onde o governo determina um desempenho energético de  $180 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , com a aplicação desses passos foram em uma edificação já construída, foi obtido um desempenho energético de  $110 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$ , abaixo do que é estabelecido. Isso demonstra que construir uma edificação NZEB, além de ser uma medida sustentável, também pode gerar uma economia financeira.

Hamdy (2013) desenvolveu uma metodologia para reduzir o número de iterações em um projeto NZEB. Esta metodologia consiste em três etapas: a primeira etapa consiste em utilizar um algoritmo para encontrar o melhor custo benefício, eficiência energética e variações de projeto que influenciam no desempenho energético, como componentes construtivos da envoltória; a segunda etapa consiste em analisar o consumo de energia primária e o custo ao longo do ciclo de vida da edificação, assim visando encontrar uma relação custo benefício entre estes dois critérios; a terceira etapa é definir estratégias para melhorar os aspectos financeiros e ambientais, dimensionando adequadamente do sistema de climatização e do sistema fotovoltaico. Este método reduz a necessidade de processamento de dados e oferece mais transparência nos resultados em um tempo razoável. Um estudo de caso foi realizado em uma edificação unifamiliar na Finlândia, um clima frio. Através da aplicação desse método foi possível concluir que os objetivos financeiros e ambientais não são contraditórios. Nesta edificação foi possível uma redução de 47% no consumo de energia. Neste caso, o sistema de resfriamento mecânico só se torna uma opção viável quando há um sistema fotovoltaico, caso contrário ele só aumenta o custo de operacional. Sem um sistema fotovoltaico é preferível utilizar ventilação natural, para evitar o superaquecimento. De acordo com este estudo é economicamente viável possuir uma edificação NZEB.

Petran (2019) realizou um estudo que aplica os conceitos NZEB em uma edificação de 1980 localizada na Romênia, tendo como objetivo atingir os padrões estabelecidos para edifícios novos no país: um limite de  $111 \text{ kWh/m}^2\cdot\text{ano}$  de energia proveniente de combustíveis fósseis, um limite de  $30 \text{ kg/m}^2 \text{ ano}$  de  $\text{CO}_2$  emitido, um valor mínimo de 10% de geração de energia renovável, estes são os valores estabelecidos para edifícios residenciais. As melhorias propostas foram:

isolamento térmico nas paredes externas, piso, telhado e substituição das janelas atuais por modelos com isolamento térmico e vidro triplo. Essas medidas são necessárias devido ao clima frio do país. No projeto foi adicionado um sistema fotovoltaico para geração de energia e um sistema solar térmico para o aquecimento dos ambientes. A edificação possui uma demanda de energia de 340 kWh/m<sup>2</sup>-ano em aquecimento e resfriamento, com as medidas apresentadas foi possível uma redução para 111 kWh/m<sup>2</sup>-ano. Todos os critérios de desempenho energético definidos pelo governo foram atendidos, porém este tipo de modernização ainda possui um custo elevado e possui um retorno de investimento de 20 anos.

Segundo Baglivo (2015), uma edificação NZEB em um clima quente, tem mais chances de obter sucesso, se comparado a uma edificação em um clima frio. O autor avaliou uma edificação unifamiliar em Lecce, na Itália, onde o clima é quente, assim foi possível propor estratégias para obter melhorias no desempenho energético. Assim propondo um método em três etapas, para tornar-se uma edificação convencional em NZEB: análise da envoltória e sistemas agregados, estabelecer medidas de eficiência energética e metas, calcular os custos globais. Esta edificação possui um sistema fotovoltaico e utiliza um sistema solar térmico para o aquecimento da água, porém a edificação não possui características de eficiência energética. Neste caso foi utilizado o programa *ProCasaClima2015* para realizar uma simulação termoenergética, assim foram analisados os componentes construtivos da envoltória. Dessa forma, o autor conclui que paredes com menor densidade de massa superficial, apresentam um desempenho térmico melhor. Porém é preciso considerar o custo dos materiais, para que haja um equilíbrio entre custo e eficiência energética.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho é um método criado a partir do que foi encontrado na literatura NZEB e adaptado aos parâmetros construtivos do Brasil. De acordo com Marszal (2011) e Cohen (2021), o prédio de energia líquida zero tem como objetivo zerar as emissões de CO<sub>2</sub>, utilizando uma fonte de energia renovável para suprir todas as necessidades energéticas da edificação. Torcellini (2006) e D'Agostino (2019) citam que um NZEB possui um alto desempenho energético, então todo o projeto NZEB precisa ser de uma edificação eficiente. Cao (2016) e D'Agostino (2018) definem qual a importância de ter uma envoltória eficiente no processo de alcançar um desempenho termoenergético. Inúmeros autores citam metodologias para criar um NZEB, embora não se tenha um método oficial os passos adotados por Kurnitski (2011), Hamdy (2013), Cao (2016), D'Agostino (2018) e Baglivo (2015), possuem similaridades e buscam o mesmo objetivo. Baseado nas ponderações citadas pelos autores foi criado uma metodologia para auxiliar a transformar uma edificação unifamiliar convencional, em uma edificação NZEB. Esse processo será realizado em 3 etapas:

- Linha de base energética (LBE);
- Proposta de eficiência energética;
- Sistema de geração de energia renovável;

Cada etapa da metodologia é apresentada nas próximas seções juntamente com as considerações feitas neste trabalho para obter uma edificação eficiente.

#### 3.1 Linha de base energética

A linha de base energética (LBE) se baseia em dados de um período de tempo e/ou condições especificadas, conforme estabelecido pela organização (ABNT NBR ISSO 50001, 2018). O consumo de energia elétrica é definido como indicador de desempenho energético (IDE), medido em kWh/m<sup>2</sup>-ano. Esta unidade também é utilizada em estudos NZEB. Para criar a linha de base energética é necessário realizar uma projeção do consumo de energia com as condições atuais ou uma estimativa em casos de a edificação estar na fase de projetos. Existem diversas formas de criar essa projeção, porém é necessário analisar todos os fatores que influenciam no desempenho energético de uma edificação. Uma forma eficaz de realizar essa análise é através de uma simulação computacional termoenergética, possibilitando criar um modelo que represente aproximadamente o desempenho térmico da edificação a partir dos componentes construtivos, dos equipamentos elétricos e da disposição da iluminação e ocupação, entre outros. Neste caso, para avaliar a eficiência termoenergética foi utilizado o programa *EnergyPlus* na versão 9.2, possibilitando identificar quais são os usos significativos de energia e quais as melhores oportunidades de economia de energia.

A edificação escolhida para a realização desse estudo é uma residência unifamiliar localizada na cidade de Xangri-Lá/RS, sendo esta composta por dois pavimentos e área total construída de 207 m<sup>2</sup>, sendo 177,85 m<sup>2</sup> de área disponível para ocupação. A edificação possui pé direito de 2,60 m para as tipologias dos dormitórios, lavabo, depósito, área de serviço, sala de jantar e cozinha, e pé direito duplo de 4,60 m na sala de estar e escada. A fachada frontal é orientada geograficamente para sudeste, paralela ao eixo longitudinal inclinada 77° a leste. As Fig. 1 (a) e Fig. 1 (b) apresentam a projeção da vista frontal proposta no projeto arquitetônico e a representação no mapa, respectivamente. Observe que à sua direita e à sua esquerda, a residência possui edificações vizinhas distanciadas a 1,50 m e 3,00 m, respectivamente.

A construção da residência foi finalizada no mês de janeiro de 2021. Dessa forma, a edificação ainda não teve ocupação, por este motivo os dados referentes à ocupação, densidade de equipamentos, sistemas de condicionamento de ar e atividades seguem as características propostas no projeto da edificação e recomendações do Regulamento Técnico

da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), desenvolvido pelo INMETRO para certificação de edificações residenciais, de acordo com o Programa Brasileiro de Etiquetagem Edifica (PBE Edifica). Não será utilizado a RTQ-R para determinar o nível de eficiência energética, apenas para formar o perfil de operação da edificação durante um ano. Os dias de feriados a edificação foi considerada desocupada.



Figura 1 - Vistas Frontais (a) projeto arquitetônico e (b) vista aérea (Adaptado de Google Maps (2021)).

O modelo geométrico trata-se da representação tridimensional da edificação, que tem o intuito de representar, mais fielmente possível, a construção da edificação existente. Cada tipologia é modelada individualmente na forma de zonas térmicas (ZT), definida como um volume de ar a temperatura uniforme com uma envoltória composta por paredes, pisos, teto, portas e janelas (*EnergyPlus Essentials*, 2020). A modelagem geométrica foi realizada a partir das informações da planta baixa, considerando a linha central das paredes como referência para determinar as distâncias entre as superfícies. A Fig. 2 demonstra a modelagem na forma de zonas térmicas. As superfícies na cor roxa são consideradas como sombreamento, não sendo implantado as características construtivas, podendo contribuir para os ganhos ou perdas de calor nas zonas térmicas.

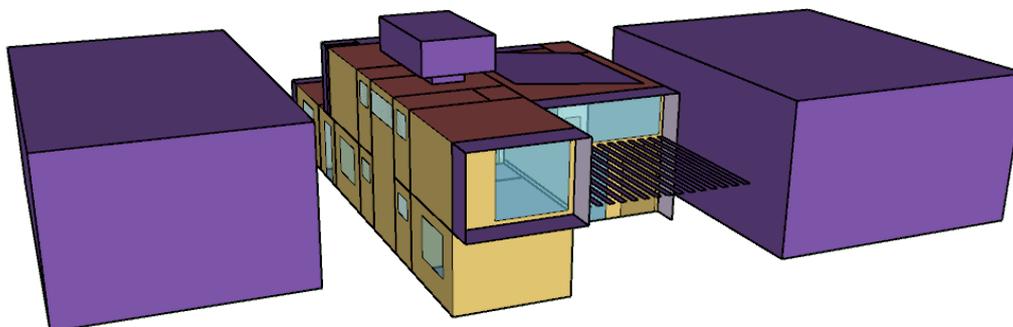


Figura 2 – Modelagem da geométrica na forma de zonas térmicas.

A Tab. 1 apresenta informações das características geométrica de cada ambiente e a Fig. 3 a localização das zonas térmicas. A edificação foi representada em 15 zonas térmicas totalizando uma área total de 177,85 m<sup>2</sup>.

Tabela 1 – Descrição das características das zonas térmicas.

| ZT | Zona térmica             | Pav. | Área (m <sup>2</sup> ) | ZT | Zona térmica     | Pav. | Área (m <sup>2</sup> ) |
|----|--------------------------|------|------------------------|----|------------------|------|------------------------|
| 1  | Sala de jantar / Cozinha | 1    | 34,01                  | 9  | Quarto suíte 3   | 2    | 15,18                  |
| 2  | Área de serviço          | 1    | 6,13                   | 10 | Quarto suíte 4   | 2    | 15,64                  |
| 3  | Depósito                 | 1    | 3,85                   | 11 | Banheiro suíte 1 | 1    | 4,18                   |
| 4  | Lavabo                   | 1    | 2,53                   | 12 | Banheiro suíte 2 | 1    | 4,18                   |
| 5  | Sala de estar            | 1*   | 40,66                  | 13 | Banheiro suíte 3 | 2    | 4,18                   |
| 6  | Escada                   | 1*   | 9,51                   | 14 | Banheiro suíte 4 | 2    | 4,18                   |
| 7  | Quarto suíte 1           | 1    | 15,64                  | 15 | Espaço vazio     | 2    | 2,53                   |
| 8  | Quarto suíte 2           | 1    | 13,45                  | -  | -                | -    | -                      |

\*pavimento com pé direito duplo.

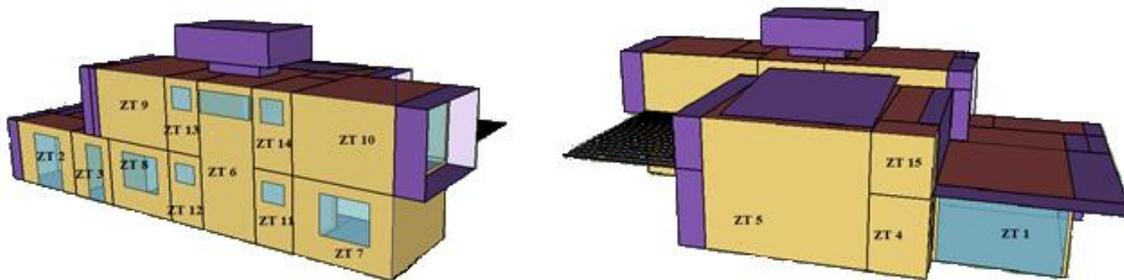


Figura 3 – Localização das zonas térmicas.

As informações meteorológicas utilizadas foram da cidade de Tramandaí/RS, devido a não estar disponível o arquivo climático da cidade de Xangri-Lá/RS. A cidade de Tramandaí/RS fica aproximadamente 24 km de Xangri-Lá/RS e possuem condições climáticas semelhantes. Os dados climáticos têm influência direta nos resultados, porque o desempenho da envoltória é sensível às condições meteorológicas. O arquivo climático utilizado está em formato EPW (*EnergyPlus Weather*), próprio para ser utilizado no programa *EnergyPlus*, fornecidos pelo INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e agregam informações sazonais, como: temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura de orvalho, umidade relativa, entre outros. A cidade de Tramandaí se encontra na zona bioclimática 2.

A composição construtiva das fachadas e coberturas da edificação é especificada a partir das propriedades termofísicas dos componentes construtivos. A propriedade térmica de um material é a resposta do mesmo à aplicação de uma fonte de energia, sendo importante para a análise termoenergética, pois são os elementos construtivos que compõe a envoltória. As propriedades termofísicas mais relevantes e consideradas como dados de entrada no *EnergyPlus* são: espessura –  $L$ , condutividade térmica –  $k$ , massa específica –  $\rho$ , calor específico –  $c_p$ , resistência térmica –  $R$ , emissividade –  $\varepsilon$ , absorptividade solar térmica/visível –  $\alpha$ . Os padrões para cada tipo de construção são, respeitando a ordem crescente do exterior da zona térmica para o interior, inseridos na forma de camadas segundo recomendações da ABNT NBR 15220-2 (2003). A Tab. 2 apresenta maiores detalhes das propriedades físicas consideradas no projeto da edificação juntamente com a transmitância térmica ( $U$ ) de cada composição.

Tabela 2 – Características construtivas e propriedades termofísicas da fachada e cobertura (ABNT NBR 15220-2, 2003; ASHRAE *Handbook*, 2017).

| Construção     | Camadas/Materiais |                             | $L$<br>(m) | $k$<br>(W/m·K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | $R$<br>(m <sup>2</sup> ·K/W) | $U$<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|----------------|-------------------|-----------------------------|------------|----------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| Parede externa | Exterior<br>↓     | Argamassa de reboco externa | 0,025      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            | 1,30                         |
|                |                   | Bloco cerâmico 9x14x24 cm   | 0,0134     | 0,9            | 1.600                          | 920               | -                            |                              |
|                |                   | Camada de ar cerâmica       | -          | -              | -                              | -                 | 0,165                        |                              |
|                |                   | Bloco cerâmico 9x14x24 cm   | 0,0134     | 0,9            | 1.600                          | 920               | -                            |                              |
|                |                   | Camada de ar cerâmica       | -          | -              | -                              | -                 | 0,183                        |                              |
|                |                   | Bloco cerâmico 9x14x24 cm   | 0,0134     | 0,9            | 1.600                          | 920               | -                            |                              |
|                |                   | Camada de ar cerâmica       | -          | -              | -                              | -                 | 0,165                        |                              |
|                | Interior          | Argamassa de reboco interna | 0,025      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            |                              |
| Parede interna | Exterior<br>↓     | Argamassa de reboco interna | 0,025      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            | 2,20                         |
|                |                   | Bloco cerâmico 14x9x24 cm   | 0,019      | 0,9            | 1.600                          | 920               | -                            |                              |
|                |                   | Camada de ar cerâmica       | -          | -              | -                              | -                 | 0,213                        |                              |
|                |                   | Bloco cerâmico 14x9x24 cm   | 0,019      | 0,9            | 1.600                          | 920               | -                            |                              |
|                | Interior          | Argamassa de reboco interna | 0,025      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            |                              |

(continuação)

| Construção                             | Camadas/Materiais         |                                       | $L$<br>(m) | $k$<br>(W/m·K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | $R$<br>(m <sup>2</sup> ·K/W) | $U$<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|----------------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------|----------------|--------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|
| Laje 1º pavimento                      | Exterior<br>↓<br>Interior | Porcelanato                           | 0,01       | 1,21           | 2.250                          | 766               | -                            | 1,98                         |
|                                        |                           | Cimento                               | 0,007      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Laje de concreto                      | 0,1        | 1,75           | 2.200                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Camada de ar entre laje e forro       | -          | -              | -                              | -                 | 0,21                         |                              |
|                                        |                           | Forro de gesso                        | 0,03       | 0,35           | 900                            | 870               | -                            |                              |
| Laje 2º pavimento (cobertura)          | Exterior<br>↓<br>Interior | Argamassa aparente                    | 0,03       | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            | 1,30                         |
|                                        |                           | Impermeabilização o pintura asfáltica | -          | -              | -                              | -                 | 0,026                        |                              |
|                                        |                           | Manta asfáltica                       | 0,004      | 1,15           | 2.500                          | 900               | -                            |                              |
|                                        |                           | Laje de concreto                      | 0,1        | 1,75           | 2.200                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Camada de ar entre laje e forro       | -          | -              | -                              | -                 | 0,21                         |                              |
| Laje sobre a sala de estar (cobertura) | Exterior<br>↓<br>Interior | Argamassa aparente                    | 0,03       | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            | 3,58                         |
|                                        |                           | Impermeabilização o pintura asfáltica | -          | -              | -                              | -                 | 0,026                        |                              |
|                                        |                           | Manta asfáltica                       | 0,004      | 1,15           | 2.500                          | 900               | -                            |                              |
|                                        |                           | Laje de concreto                      | 0,15       | 1,75           | 2.200                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Forro de gesso                        | 0,03       | 0,35           | 900                            | 870               | -                            |                              |
| Laje da sacada                         | Exterior<br>↓<br>Interior | Porcelanato                           | 0,01       | 1,21           | 2.250                          | 766               | -                            | 4,74                         |
|                                        |                           | Cimento                               | 0,007      | 1,15           | 2.000                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Manta asfáltica                       | 0,004      | 1,15           | 2.500                          | 900               | -                            |                              |
|                                        |                           | Laje de concreto                      | 0,1        | 1,75           | 2.200                          | 1.000             | -                            |                              |
| Piso                                   | Exterior<br>↓<br>Interior | Areia seca                            | 0,5        | 0,30           | 1.500                          | 2090              | -                            | 0,51                         |
|                                        |                           | Brita                                 | 0,025      | 0,7            | 1.500                          | 800               | -                            |                              |
|                                        |                           | Concreto                              | 0,1        | 1,75           | 2.200                          | 1.000             | -                            |                              |
|                                        |                           | Cimento                               | 0,007      | 0,72           | 1.860                          | 840               | -                            |                              |
|                                        |                           | Porcelanato                           | 0,01       | 1,21           | 2.250                          | 766               | -                            |                              |
| Portas                                 | -                         | Madeira                               | 0,04       | 0,15           | 614                            | 2.300             | -                            | 2,86                         |

As paredes externas possuem camadas duplas de blocos cerâmicos, pintura externa na cor cinza e pintura interna na cor branca gelo. As paredes internas são constituídas de blocos cerâmicos simples dispostos na forma deitada e com pintura de branco gelo. A cobertura é composta por uma laje de concreto impermeabilizada, sendo diferente sob as zonas térmicas que fazem contato com a sacada (ZT1, ZT2 e ZT3). A cor do forro depende de cada ambiente, sendo de concreto aparente nas zonas térmicas ZT1, ZT5 e ZT15. Demais zonas térmicas possuem forro de gesso na cor branca. A Tab. 3 apresenta valores de emissividades ( $\epsilon$ ) e absorvâncias térmicas ( $\alpha$ ) consideradas para cada pintura. O piso é formado por uma camada de areia, brita, concreto, cimento de assentamento e porcelanato. Também, foi utilizado a temperatura média do solo para cada mês do ano, com base no arquivo climático.

Tabela 3 – Emissividade e absorvâncias (INMETRO, 2013).

| Tipos de superfícies        | $\epsilon$<br>(-) | $\alpha$<br>(-) |
|-----------------------------|-------------------|-----------------|
| Pintura branco gelo         | 0,9               | 0,37            |
| Pintura cinza               | 0,9               | 0,86            |
| Pintura branca              | 0,9               | 0,30            |
| Pintura aparente (concreto) | 0,9               | 0,74            |

As aberturas internas, como portas e janelas foram representadas e consideradas como fechadas. Para as zonas térmicas abertas entre si foi utilizada a propriedade *Air Boundary* como material construtivo. Essa propriedade faz com que a resistência térmica do material seja desprezada, possibilitando a troca de ar entre as zonas térmicas. As esquadrias externas foram representadas no modelo geométrico conforme as dimensões do projeto arquitetônico. As janelas e portas de vidro externas são considerados como fixas (sem abertura). As características termofísicas consideradas são: espessura –  $L$ , transmitância solar –  $\tau_s$ , transmitância visível –  $\tau_v$ , transmitância infravermelho –  $\tau_m$ , refletividade solar frontal e

posterior -  $\rho_s$ , emissividade infravermelho frontal e posterior -  $\varepsilon_{in}$  e condutividade térmica -  $k$ . Neste estudo não foram considerados sistemas de proteção solar. A Tab. 4 apresenta as características termofísicas das aberturas e vidros internos e externos.

Tabela 4 – Características termofísicas das aberturas e vidros (ABNT NBR 15220-2, 2003; ASHRAE *Handbook*, 2017).

|                                  | $L$<br>(m) | $\tau_s$<br>(-) | $\tau_v$<br>(-) | $\tau_{in}$<br>(-) | $\varepsilon_{in}$<br>(-) | $\rho_s$<br>(-) | $k$<br>(W/m·K) |
|----------------------------------|------------|-----------------|-----------------|--------------------|---------------------------|-----------------|----------------|
| Janelas de vidro simples incolor | 0,006      | 0,775           | 0,881           | 0                  | 0,84                      | 0,071           | 0,9            |
| Portas de vidro                  | 0,012      | 0,653           | 0,841           | 0                  | 0,84                      | 0,064           | 0,9            |

As cargas térmicas internas abordadas são compostas pela ocupação, iluminação, equipamentos elétricos e infiltração de ar. Estas cargas podem contribuir para no consumo de energia elétrica e ganho/perda de calor sensível e latente. Assim, faz-se necessário definir um cronograma (*schedule*) de utilização, aplicado a todas horas do dia, todos os dias do ano. Por exemplo, considerando a ocupação de um ambiente, 0 significa que o ambiente que está vazio e 1 (100%) com ocupação máxima. Esta mesma métrica é utilizada com o funcionamento de equipamentos elétricos e iluminação.

O *schedule* de ocupação segue as recomendações da RTQ-R (2012), onde somente os ambientes de permanência prolongada são modelados, quais incluir os dormitórios e as salas, considerando dois padrões de uso: um para os dias de semana e outro para os finais de semana. Nos dormitórios é definida uma ocupação máxima de 2 pessoas e na sala 75% dos ocupantes da edificação. No caso, como a edificação possui quatro dormitórios, têm-se 8 pessoas. Neste caso, considerou-se que 6 pessoas se encontram na sala de estar e 2 pessoas na sala de jantar/cozinha. Em função do tipo de atividade desempenhada em cada ambiente deve ser adotada a taxa metabólica para cada atividade. Nas salas é considerado que as pessoas estão sentadas ou assistindo TV e nos dormitórios estão dormindo ou descansando, produzindo calor de 108 W e 81 W, respectivamente. A Tab. 5 demonstra de que forma foi definido a cronograma de pessoas nos ambientes. Demais ambientes, como depósito, escadas, banheiros, entre outros, não foram consideradas cargas devido a ocupação por não serem ambientes com uso prolongado.

Tabela 5 – Perfil de ocupação (RTQ-R, 2012).

| Hora | Dormitórios    |                 | Salas          |                 | Hora | Dormitórios    |                 | Salas          |                 |
|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|      | Dias de semana | Final de semana | Dias de semana | Final de semana |      | Dias de semana | Final de semana | Dias de semana | Final de semana |
| 1 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 13 h | 0              | 0               | 0              | 0,25            |
| 2 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 14 h | 0              | 0               | 0,25           | 0,75            |
| 3 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 15 h | 0              | 0               | 0,25           | 0,5             |
| 4 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 16 h | 0              | 0               | 0,25           | 0,5             |
| 5 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 17 h | 0              | 0               | 0,25           | 0,5             |
| 6 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 18 h | 0              | 0               | 0,25           | 0,25            |
| 7 h  | 1              | 1               | 0              | 0               | 19 h | 0              | 0               | 1              | 0,25            |
| 8 h  | 0              | 1               | 0              | 0               | 20 h | 0              | 0               | 0,5            | 0,5             |
| 9 h  | 0              | 1               | 0              | 0               | 21 h | 0,5            | 0,5             | 0,5            | 0,5             |
| 10 h | 0              | 0,5             | 0              | 0               | 22 h | 1              | 1               | 0              | 0               |
| 11 h | 0              | 0               | 0              | 0               | 23 h | 1              | 1               | 0              | 0               |
| 12 h | 0              | 0               | 0              | 0               | 24 h | 1              | 1               | 0              | 0               |

Os sistemas de iluminação para cada zona térmica possuem no mínimo um acionamento independente para iluminação, não existindo desligamento automático. Considerou-se nesses casos, para fins de simulação, a situação com todas as luzes acesas nos ambientes de permanência prolongada. A potência de iluminação foi determinada por meio das informações do projeto elétrico juntamente com o cronograma de utilização recomendado na RTQ-R (2012). Para os ambientes de permanência prolongada é previsto uma potência de 64 W para os dormitórios, 128 W para a sala de estar e 128 W para sala de jantar/cozinha. Demais zonas térmicas não possuem uso prolongado e não foram atribuídas cargas de iluminação. O perfil de utilização da iluminação é demonstrado na Tab. 6. Outras variáveis importantes para a simulação da iluminação são a frações visível e radiante de dissipação de cada luminária. Adotou-se sistema de iluminação por LED com valores de 0,25 para fração visível e 0,51 para fração radiante (Ahn *et al.*, 2014; *EnergyPlus Essentials*, 2020).

As trocas de ar do ambiente interno com o ambiente externo foram determinadas pela infiltração do ar pelas frestas da edificação com o emprego da opção *Air flow Network*, presente no *EnergyPlus*. A infiltração é o fluxo de ar externo que entra no ambiente interno de forma não intencional, que é feito por frestas ou entrada/saída de pessoas, causadas pelas

diferenças de pressão externa e interna, afetando no consumo de energia, no conforto térmico e qualidade do ar (ASHRAE *Handbook*, 2017). A RTQ-R propõem valores padrões do coeficiente de fluxo de ar por frestas ( $C_Q$ ) de 0,001 kg/s.m e o expoente de fluxo de ar de 0,65, equivalem ao coeficiente de descarga de fluxo de ar relativo ao tamanho da abertura retangulares. Estes dados especificam as propriedades da ventilação natural através das portas e janelas quando estão fechadas ou abertas. As aberturas são consideradas como fechadas.

Tabela 6 - Padrão de uso para iluminação (RTQ-R, 2012).

| Hora | Dormitórios    |                 | Salas          |                 | Hora | Dormitórios    |                 | Salas          |                 |
|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|      | Dias de semana | Final de semana | Dias de semana | Final de semana |      | Dias de semana | Final de semana | Dias de semana | Final de semana |
| 1 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 13 h | 0              | 0               | 0              | 0               |
| 2 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 14 h | 0              | 0               | 0              | 0               |
| 3 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 15 h | 0              | 0               | 0              | 0               |
| 4 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 16 h | 0              | 0               | 0              | 0               |
| 5 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 17 h | 0              | 0               | 1              | 1               |
| 6 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 18 h | 0              | 0               | 1              | 1               |
| 7 h  | 1              | 0               | 0              | 0               | 19 h | 0              | 0               | 1              | 1               |
| 8 h  | 0              | 0               | 0              | 0               | 20 h | 0              | 0               | 1              | 1               |
| 9 h  | 0              | 1               | 0              | 0               | 21 h | 1              | 1               | 1              | 1               |
| 10 h | 0              | 0               | 0              | 0               | 22 h | 1              | 1               | 0              | 0               |
| 11 h | 0              | 0               | 0              | 1               | 23 h | 0              | 0               | 0              | 0               |
| 12 h | 0              | 0               | 0              | 1               | 24 h | 0              | 0               | 0              | 0               |

A carga de equipamentos instalada foi determinada a partir do projeto da edificação. Para todos os equipamentos foram estimados valores de potência com base nos dados de potência média e tempos médios de utilização de aparelhos eletrodomésticos (CEMIG, 2014). Todos os equipamentos selecionados possuem o selo A de eficiência. A Tab. 7 apresenta os equipamentos instalados nos ambientes e o período de utilização. Para todos os equipamentos considerou-se fração radiante igual a 0,5 e fração convectiva de 0,5 (ASHRAE *Handbook*, 2017).

Tabela 7 - Cargas devido aos equipamentos (Adaptado de CEMIG (2014)).

| Tipologia              | Equipamento        | Nº de Unidades | Potência [W] | Dias de operação [Mês] | Horas de operação [Dia] | Consumo mensal [kWh] |
|------------------------|--------------------|----------------|--------------|------------------------|-------------------------|----------------------|
| Sala de jantar/cozinha | Refrigerador       | 1              | 300          | 30                     | 6,00                    | 54,0                 |
|                        | Micro-ondas        | 1              | 1.150        | 30                     | 0,10                    | 3,45                 |
|                        | Forno Elétrico     | 1              | 1.300        | 30                     | 0,25                    | 9,75                 |
|                        | Exaustor           | 1              | 300          | 30                     | 0,25                    | 2,25                 |
|                        | Cafeteira          | 1              | 300          | 30                     | 0,50                    | 4,50                 |
| Sala de estar          | TV LED             | 1              | 120          | 30                     | 2,00                    | 7,20                 |
|                        | Computador         | 1              | 60           | 30                     | 3,00                    | 5,40                 |
|                        | Aspirador de Pó    | 1              | 1.100        | 30                     | 0,10                    | 3,30                 |
| Dormitórios            | TV LED             | 4              | 120          | 30                     | 1,00                    | 14,4                 |
| Área de serviço        | Lava-roupas        | 1              | 460          | 30                     | 0,50                    | 6,90                 |
|                        | Secadora de roupas | 1              | 1.750        | 30                     | 0,25                    | 13,12                |
|                        |                    |                |              |                        | Total:                  | 124,27               |

O consumo de energia com climatização nos ambientes de uso prolongado utiliza o mesmo padrão de utilização, tanto para dormitórios como a sala. A temperatura do termostato para o resfriamento é mantida em 24 °C e para o aquecimento em 22 °C. O cronograma de utilização do condicionamento artificial é das 21 h às 8 h para todos os dias do ano, sendo no período restante considerou-se naturalmente ventilada. A taxa de fluxo de ar por pessoa de 0,00944 m<sup>3</sup>/s. A capacidade dos equipamentos foi escolhida a partir da sugestão do projeto da edificação, sendo para os dormitórios sistemas de *split* de 2640 W (9000 Btu/h) com COP (*Coefficient Of Performance*) de 3,48 para o resfriamento e 3,54 para

o aquecimento e para sala de estar um sistema *split* de 7030 W (24.000 Btu/h) com COP de 3,53 para o resfriamento e 3,55 para o aquecimento. A eficiência do ventilador é de 0,7 enquanto a eficiência do motor 0,9 (RTQ-R, 2012). A sala de jantar/cozinha não foi condicionada. Os condicionadores utilizados possuem a tecnologia *inverter*, para fins da simulação, os sistemas foram modelados com VRF (*Variable Refrigerant Volume*) unitários seguindo as recomendações padrões do *EnergyPlus* (*EnergyPlus Essentials*, 2020).

### 3.2 Proposta de eficiência energética

As medidas de eficiência energética compõem uma parte crucial em um projeto NZEB. De acordo com Petran (2019), Kurnitski (2011), Cao (2016), a envoltória pode influenciar no desempenho térmico de uma edificação, essa é uma oportunidade de melhorar a sensação de conforto térmico, reduzindo o consumo de energia em climatização. Sorgato (2013) define, pode ser adotado como critério no estudo considerar duas temperaturas que representem a maior amplitude térmica ao longo do ano, para isso são selecionados dois dias típicos de projeto. Assim é possível verificar quais são as temperaturas internas, possibilitando dimensionar o sistema de climatização, considerando a carga térmica existente na edificação. Utiliza-se como critério, materiais que diminuam a necessidade de aquecimento e resfriamento artificial. Empregando o método de simulação termoenergética é possível realizar testes, com diversos materiais na envoltória.

A melhoria do desempenho térmico da envoltória é possível com o uso de tecnologias de economia passiva de energia, porém essas tecnologias são sensíveis às mudanças climáticas. Com o programa *EnergyPlus* foi possível utilizar informações climáticas da cidade e simular novas combinações de componentes construtivos para a envoltória, seguindo uma métrica de cálculo. Seguindo essa linha, as seguintes propostas são sugeridas:

**Proposta 1:** a análise do comportamento térmico se as paredes de fechamento externo da envoltória são constituídas de camadas simples de tijolos. A edificação atual possui camadas dupla de tijolos para as paredes externas. Neste caso, as propriedades termofísicas da componente construtiva referente as paredes externas é apresenta na Tab. 8. Demais características físicas e cargas internas se mantem iguais.

Tabela 8 – Características construtivas (ABNT NBR 15220-2, 2003; ASHRAE *Handbook*, 2017).

| Construção     | Camadas/Materiais         |                             | L<br>(m) | k<br>(W/m·K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | R<br>(m <sup>2</sup> ·K/W) | U<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|----------|--------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Parede externa | Exterior                  | Argamassa de reboco externa | 0,025    | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          | 2,57                       |
|                |                           | Bloco cerâmico 9x14x24 cm   | 0,0134   | 0,9          | 1.600                          | 920               | -                          |                            |
|                | Camada de ar              | -                           | -        | -            | -                              | 0,165             |                            |                            |
|                | Bloco cerâmico 9x14x24 cm | 0,0134                      | 0,9      | 1.600        | 920                            | -                 |                            |                            |
|                | Interior                  | Argamassa de reboco interna | 0,025    | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          |                            |

**Proposta 2:** atualmente essa edificação não possui uma cobertura específica, somente laje maciça de concreto e manta asfáltica. Assim, proponha-se mantendo a laje original e adicionar telhas de fibrocimento. Seguindo a mesma linha da proposta 1, apenas haverá a alteração na cobertura. A Tab. 9 apresenta as propriedades dos materiais considerados.

Tabela 9 – Características construtivas da cobertura (ABNT NBR 15220-2, 2003; ASHRAE *Handbook*, 2017).

| Construção                             | Camadas/Materiais |                  | L<br>(m) | k<br>(W/m·K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | R<br>(m <sup>2</sup> ·K/W) | U<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|----------------------------------------|-------------------|------------------|----------|--------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Laje 2º pavimento (cobertura)          | Exterior          | Telha de fibroc. | 0,08     | 0,95         | 1.900                          | 0,84              | -                          | 0,81                       |
|                                        |                   | Camada de ar     | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
|                                        |                   | Arg. aparente    | 0,03     | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        | Interior          | Imp. asfáltica   | -        | -            | -                              | -                 | 0,026                      |                            |
|                                        |                   | Manta asfáltica  | 0,004    | 1,15         | 2.500                          | 900               | -                          |                            |
|                                        |                   | Laje de concreto | 0,1      | 1,75         | 2.200                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        |                   | Camada de ar     | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
| Forro de gesso                         | 0,03              | 0,35             | 900      | 870          | -                              |                   |                            |                            |
| Laje sobre a sala de estar (cobertura) | Exterior          | Telha de fibroc. | 0,08     | 0,95         | 1.900                          | 0,84              | -                          | 2,01                       |
|                                        |                   | Camada de ar     | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
|                                        | Interior          | Arg. aparente    | 0,03     | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        |                   | Imp. asfáltica   | -        | -            | -                              | -                 | 0,026                      |                            |
|                                        |                   | Manta asfáltica  | 0,004    | 1,15         | 2500                           | 900               | -                          |                            |
|                                        |                   | Laje de concreto | 0,15     | 1,75         | 2.200                          | 1.000             | -                          |                            |

**Proposta 3:** nesta proposta manteve-se os mesmos comportamentos das cargas internas da edificação LBE, mas com alteração no tipo de cobertura, adicionando telhas de cerâmica. Observa-se que as propostas 2 e 3 são condições que podem ser aplicadas na edificação real sem uma significativa alteração na estrutura. A Tab. 10 demonstra a propriedades dos componentes.

Tabela 10 – Características construtivas da cobertura (ABNT NBR 15220-2, 2003; ASHRAE *Handbook*, 2017).

| Construção                             | Camadas/Materiais |                                       | L<br>(m) | k<br>(W/m·K) | $\rho$<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $c_p$<br>(J/kg·K) | R<br>(m <sup>2</sup> ·K/W) | U<br>(W/m <sup>2</sup> ·K) |
|----------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------|--------------|--------------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| Laje 2º pavimento (cobertura)          | Exterior          | Telha de Cerâmica                     | 0,01     | 1,05         | 2.000                          | 920               | -                          | 1,30                       |
|                                        |                   | Camada de ar                          | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
|                                        |                   | Argamassa aparente                    | 0,03     | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        |                   | Impermeabilização o pintura asfáltica | -        | -            | -                              | -                 | 0,026                      |                            |
|                                        | Interior          | Manta asfáltica                       | 0,004    | 1,15         | 2.500                          | 900               | -                          |                            |
|                                        |                   | Laje de concreto                      | 0,1      | 1,75         | 2.200                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        |                   | Camada de ar entre laje e forro       | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
|                                        |                   | Forro de gesso                        | 0,03     | 0,35         | 900                            | 870               | -                          |                            |
| Laje sobre a sala de estar (cobertura) | Exterior          | Telha Cerâmica                        | 0,01     | 1,05         | 2.000                          | 920               | -                          | 2,00                       |
|                                        |                   | Camada de ar                          | -        | -            | -                              | -                 | 0,21                       |                            |
|                                        |                   | Argamassa aparente                    | 0,03     | 1,15         | 2.000                          | 1.000             | -                          |                            |
|                                        | Interior          | Impermeabilização o pintura asfáltica | -        | -            | -                              | -                 | 0,026                      |                            |
|                                        |                   | Manta asfáltica                       | 0,004    | 1,15         | 2.500                          | 900               | -                          |                            |
|                                        |                   | Laje de concreto                      | 0,15     | 1,75         | 2.200                          | 1.000             | -                          |                            |

**Proposta 4:** consiste na substituição de todos os vidros da edificação por vidros laminados, que possuem proteção solar. O vidro laminado escolhido é constituído de duas chapas de 4 mm intercaladas por uma película de alta resistência. As características do vidro escolhido: modelo *Cool lite NKT* da marca Cebrace, com espessura de 8 mm, transmitância à radiação solar de 0,310, refletância à radiação solar na face 1 de 0,200, refletância à radiação solar na face 2 de 0,180, transmitância à radiação solar no espectro visível 0,480, refletância à radiação visível na face 1 de 0,170, refletância visível na face 2 de 0,110, emissividade de ondas longas na face 1 de 0,840, emissividade de ondas longas na face 2 de 0,840, transmitância térmica de 5,700 W/m<sup>2</sup> e fator solar de 0,430 (INMETRO, 2013).

### 3.3 Sistema de geração de energia renovável

Para tornar uma edificação NZEB é necessário gerar toda energia que a edificação demanda ao longo do ano, assim, considera-se somente o consumo de energia elétrica. Neste caso, as opções de fonte de energia renovável poderiam ser um sistema fotovoltaico ou uma turbina eólica, como há muitas edificações no entorno e isso pode influenciar no funcionamento de uma turbina eólica, foi escolhido um sistema fotovoltaico. Esse sistema pode ser projetado de forma a atender toda a demanda de energia elétrica e estar conectado à rede, garantindo que a edificação não fique sem energia nos dias que a geração for inferior a demanda, eliminando a necessidade de baterias. O Brasil possui um sistema de compensação que permite que cada brasileiro possa gerar a sua própria de energia elétrica, a partir de uma fonte renovável e tenha esse valor abatido de sua fatura segundo a Resolução Normativa nº482/2012 (ANEEL, 2021).

Para este projeto foram selecionados módulos de silício policristalino da marca Era Solar, com potência 310 W e eficiência de 19% e área 1,63 m<sup>2</sup>, escolhidos por apresentar a maior eficiência (INMETRO, 2021). Foi implementado o sistema fotovoltaico para a edificação, no *EnergyPlus*, utilizando às características do módulo selecionado. Analiticamente foi estimado uma área de painel de 26,08 m<sup>2</sup>, área equivalente a 16 módulos, localizado no espaço da cobertura que corresponde à sala. Para este estudo foi mantido o mesmo sistema fotovoltaico para todas as propostas de melhoria, assim foi possível quantificar o desempenho energético para cada medida de eficiência energética.

## 4. RESULTADOS

A LBE é a referência que possibilita realizar a comparação entre a situação anterior e posterior as melhorias adotadas. Todos os parâmetros para mensurar a linha de base foram definidos na seção 3.1. A simulação termoenergética demonstrou que anualmente a edificação consome 27,42 kWh/m<sup>2</sup>·ano (4876,38 kWh/ano). Com os dados fornecidos pela simulação é possível verificar a participação de cada uso de energia no consumo total, assim verificando o uso mais

significativo de energia. A Fig. 4 demonstra o gráfico do uso de energia no consumo anual de energia elétrica. Observa-se que a parcela significativa é referente à climatização, consome 49% da energia elétrica anual, somando um total de 13,45 kWh/m<sup>2</sup>·ano. A iluminação apresenta um consumo de 4,89 kWh/m<sup>2</sup>·ano, valor adequado as recomendações da RTQ-R, enquanto os equipamentos apresentam um consumo de 9,08 kWh/m<sup>2</sup>·ano. Com base nesses dados, nota-se que a maior oportunidade de economia de energia é adotar soluções que reduzam a carga térmica, porque o sistema de climatização é afetado pela carga térmica da edificação. Assim, uma alternativa é analisar o comportamento de diferentes componentes construtivos da envoltória.

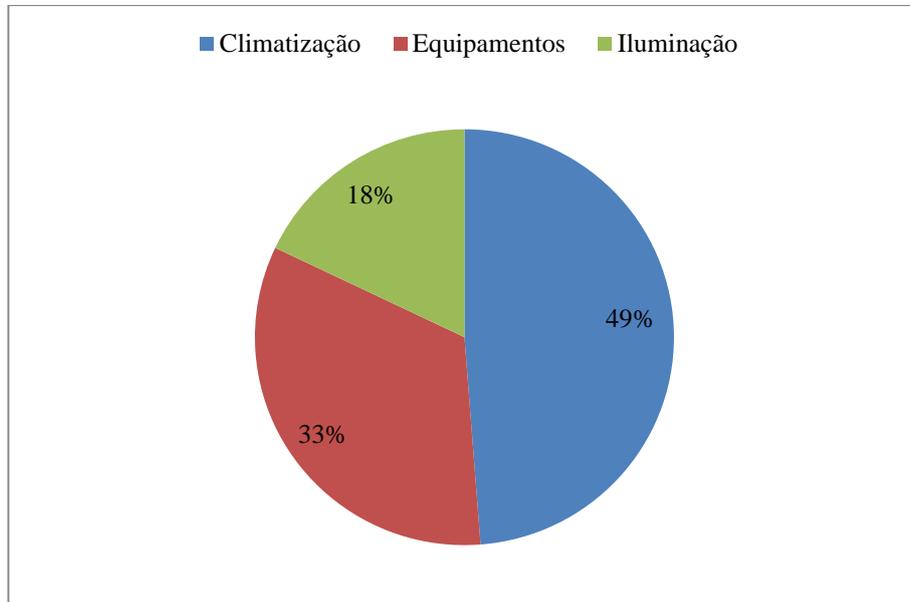


Figura 4 - Uso de Energia

A Fig. 5 demonstra o gráfico da geração mensal de energia elétrica. O sistema fotovoltaico obteve uma geração de energia de 26,70 kWh/m<sup>2</sup>·ano (4748,83 kWh/ano), apresentando a maior geração de energia no mês de dezembro com valor de 3,83 kWh/m<sup>2</sup> (681,66 kWh), e a menor geração de energia no mês de junho de 0,92 kWh/m<sup>2</sup> (163,80 kWh). Atribui-se essas variações devido as estações do ano, no litoral gaúcho, serem bem definidas. No inverno tem-se um período chuvoso com o céu encoberto de nuvens, enquanto que no verão é predominante o clima quente com menor incidências de nuvens e chuvas.

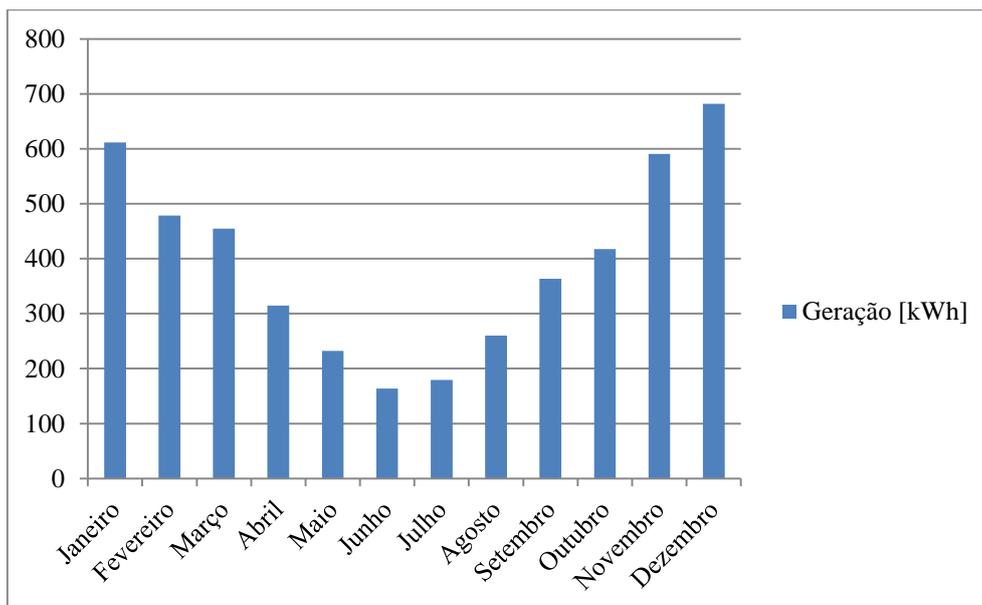


Figura 5 - Geração de energia fotovoltaica

A partir das informações do consumo elétrico mensal da edificação é possível identificar características importantes. A Tab. 11 demonstra um comparativo entre a projeção de consumo de energia elétrica e a geração de energia fotovoltaica,

assim realizando um balanço da energia líquida da edificação. O mês mais crítico de consumo foi junho, que apresentou um consumo elétrico de 3,73 kWh/m<sup>2</sup> (662,86 kWh), onde foi gerado somente 0,92 kWh/m<sup>2</sup> (163,80 kWh). Nota-se que a edificação possui um consumo elevado durante o período do inverno, devido a utilização do aquecimento artificial para manter a temperatura dentro dos limites recomendados. Em um primeiro momento, sem conhecer o comportamento real da ocupação, é aceitável que esse valor de consumo possa sofrer significativa diminuição por se tratar de uma residência que possui lareira. Também, observa-se que o balanço de energia líquida anual é de -0,72 kWh/m<sup>2</sup>·ano (-127,55 kWh/ano), valor negativo indica que o consumo de energia é superior a geração de energia elétrica. Em função da variação mensal da geração de energia pelo sistema fotovoltaico, é indispensável que o sistema esteja conectado à rede.

Tabela 11 – Comparação entre consumo e geração de energia elétrica da LBE

| Mês           | Geração de energia fotovoltaica |         | Consumo de energia LBE |         | Balanço de energia líquida | Climatização LBE |
|---------------|---------------------------------|---------|------------------------|---------|----------------------------|------------------|
|               | kWh/m <sup>2</sup>              | kWh     | kWh/m <sup>2</sup>     | kWh     | kWh/m <sup>2</sup>         | kWh              |
| Janeiro       | 3,47                            | 611,36  | 2,29                   | 407,04  | 1,18                       | 196,3            |
| Fevereiro     | 2,69                            | 478,47  | 2,31                   | 410,30  | 0,38                       | 220,64           |
| Março         | 2,56                            | 454,87  | 2,39                   | 425,72  | 0,17                       | 212,95           |
| Abril         | 1,76                            | 314,46  | 1,60                   | 285,25  | 0,16                       | 79,78            |
| Mai           | 1,30                            | 232,20  | 2,28                   | 406,54  | -0,98                      | 195,4            |
| Junho         | 0,92                            | 163,80  | 3,73                   | 662,86  | -2,81                      | 458,61           |
| Julho         | 1,00                            | 179,58  | 2,61                   | 464,35  | -1,61                      | 255,24           |
| Agosto        | 1,46                            | 260,05  | 2,88                   | 511,44  | -1,42                      | 300,3            |
| Setembro      | 2,04                            | 363,64  | 2,56                   | 455,28  | -0,52                      | 251,43           |
| Outubro       | 2,35                            | 417,82  | 1,48                   | 263,08  | 0,87                       | 53,97            |
| Novembro      | 3,32                            | 590,92  | 1,42                   | 252,18  | 1,90                       | 46,31            |
| Dezembro      | 3,83                            | 681,66  | 1,87                   | 332,34  | 1,96                       | 121,6            |
| <b>Anual:</b> | 26,70                           | 4748,83 | 27,42                  | 4876,38 | -0,72                      | 2392,53          |

As propostas de alterações nos elementos construtivos têm o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica, através de uma melhoria do desempenho térmico da envoltória. A Tab. 12 apresenta um comparativo entre as propostas de eficiência energética e a LBE.

Tabela 12 - Indicador de desempenho energético

|            | IDE (kWh/m <sup>2</sup> ·ano) | Climatização (kWh/m <sup>2</sup> ·ano) | Balanço de energia líquida (kWh/m <sup>2</sup> ·ano) |
|------------|-------------------------------|----------------------------------------|------------------------------------------------------|
| LBE        | 27,42                         | 13,45                                  | -0,72                                                |
| Proposta 1 | 27,88                         | 13,91                                  | -1,17                                                |
| Proposta 2 | 26,90                         | 12,94                                  | -0,20                                                |
| Proposta 3 | 26,59                         | 12,62                                  | 0,10                                                 |
| Proposta 4 | 26,81                         | 12,85                                  | -0,11                                                |

A primeira proposta foi à alteração das características construtivas das paredes externas do projeto original (LBE), ao invés de paredes com camada dupla de blocos de cerâmica foram consideradas paredes simples com uma camada de blocos de cerâmica, esta configuração de parede foi escolhida por ser comum na região. Com esta alteração foi obtido um aumento no consumo energia elétrica 1,67%, a climatização apresentou um aumento de 3,42%. Estes dados demonstram que parede simples tem um desempenho energético inferior ao caso de referência.

A segunda proposta consiste em adicionar uma cobertura com telhas de fibrocimento, essa proposta obteve uma melhora no indicador de desempenho energético. O consumo de energia elétrica apresentou uma redução de 1,90%, com redução de 3,80% no consumo de energia em climatização.

Já a terceira proposta que se apresentou a melhor alternativa de acordo com o indicador de desempenho energético, possibilitando o sistema fotovoltaico zerar o consumo de energia e gerar um excedente. Assim, obteve-se uma redução de 3,03% no consumo total de energia elétrica e redução de 6,17% no uso de energia em climatização. Com a proposta 4, chegou-se o segundo melhor resultado, conseguindo uma redução de 2,22% no consumo de energia elétrica e redução de 4,46% no uso em climatização.

A Tab. 13 demonstra um comparativo entre consumo mensal da proposta que apresentou o melhor resultado no indicador de desempenho com a geração mensal de energia elétrica. É possível verificar que o projeto fotovoltaico não atendeu o consumo de energia elétrica nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro. Porém a edificação obteve um balanço anual de energia líquida positivo, gerando um excedente de 0,11 kWh/m<sup>2</sup>-ano equivalente a 20,31 kWh/m<sup>2</sup>-ano.

Tabela 13 - Comparação entre consumo e geração de energia elétrica da proposta 3

| Mês           | Geração de energia fotovoltaica |         | Consumo de energia - Proposta 3 |         | Balanço de energia líquida | Climatização - Proposta 3 |
|---------------|---------------------------------|---------|---------------------------------|---------|----------------------------|---------------------------|
|               | kWh/m <sup>2</sup>              | kWh     | kWh/m <sup>2</sup>              | kWh     | kWh/m <sup>2</sup>         | kWh                       |
| Janeiro       | 3,47                            | 611,36  | 2,16                            | 383,59  | 1,34                       | 172,86                    |
| Fevereiro     | 2,69                            | 478,47  | 2,22                            | 394,13  | 0,47                       | 204,47                    |
| Março         | 2,56                            | 454,87  | 2,30                            | 409,21  | 0,26                       | 196,45                    |
| Abril         | 1,76                            | 314,46  | 1,55                            | 275,59  | 0,21                       | 70,11                     |
| Maio          | 1,30                            | 232,2   | 2,23                            | 397,34  | -0,93                      | 186,21                    |
| Junho         | 0,92                            | 163,8   | 3,64                            | 647,93  | -2,72                      | 443,68                    |
| Julho         | 1,00                            | 179,58  | 2,57                            | 456,54  | -1,57                      | 247,44                    |
| Agosto        | 1,46                            | 260,05  | 2,83                            | 503,50  | -1,37                      | 292,36                    |
| Setembro      | 2,04                            | 363,64  | 2,52                            | 449,43  | -0,48                      | 245,58                    |
| Outubro       | 2,35                            | 417,82  | 1,46                            | 259,47  | 0,89                       | 50,36                     |
| Novembro      | 3,32                            | 590,92  | 1,36                            | 241,54  | 1,96                       | 35,66                     |
| Dezembro      | 3,83                            | 681,66  | 1,75                            | 310,25  | 2,08                       | 99,51                     |
| <b>Anual:</b> | 26,70                           | 4748,83 | 26,59                           | 4728,52 | 0,11                       | 2244,69                   |

O comportamento da temperatura de bulbo seco interna para as ZT 5 e 11 (ambientes condicionados) é apresentado na Fig. 6. A temperatura interna obteve uma ligeira variação ao longo do ano ao comparar o modelo de referência (LBE) e a proposta com menor consumo de energia elétrica. Na LBE a temperatura da sala oscilou entre 19,37 °C a 25,72 °C, já no mesmo ambiente com a cobertura sugerida na proposta 3 a temperatura oscilou de 19,56 °C a 25,64 °C. Análogo a análise anterior a temperatura de suíte 1 (ZT 11) na LBE variou entre 19,95 °C a 25,18 °C, já com as alterações da proposta 3, a temperatura oscilou entre 19,99 °C e 25,14 °C. Observa-se que as variações de temperatura extrapolaram os valores sugeridos como temperatura de termostato, assim, tudo indica que o sistema de climatização proposto no projeto poderá não estar adequadamente dimensionado para manter as condições de conforto térmico e qualidade do ar durante o ano inteiro.

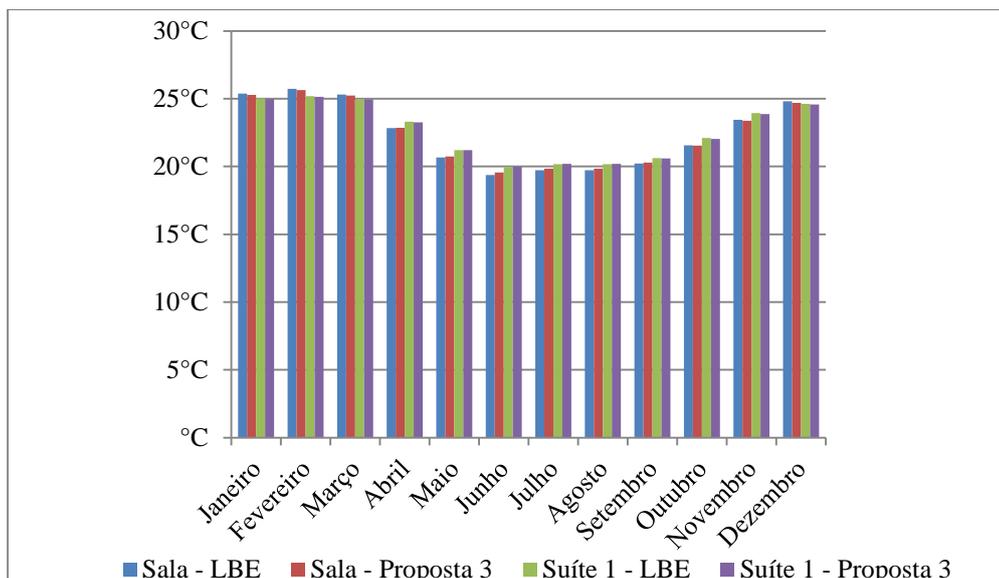


Figura 6 - Temperatura interna

Todas as propostas apresentam alteração no consumo de energia elétrica, porém somente a proposta 3 pode ser caracterizada como NZEB, porque possibilitou que o projeto fotovoltaico atenda toda a demanda de energia elétrica anual. Estes resultados demonstram que é possível ter uma edificação NZEB no litoral do RS, utilizando pequenas alterações na envoltória e um sistema fotovoltaico.

## 5. CONCLUSÃO

Edificações com energia líquida zero são uma alternativa factível para o litoral norte do RS. O estudo realizado verificou que, a aplicação medidas de eficiência energética na envoltória e um sistema fotovoltaico são suficientes para zerar o consumo de energia. Estas edificações são uma alternativa para reduzir o consumo de energia no setor residencial. Este tipo de edificação leva em consideração fatores como clima, localização, materiais e sistemas agregados. Desta forma, foi possível propor quatro alternativas para melhorar o desempenho termoenergético e verificar utilizando uma simulação computacional termoenergética.

Dentre as propostas apresentadas, somente a proposta 3 torna a edificação NZEB. Essa proposta consiste em adicionar uma cobertura com telhas de cerâmica no projeto original. Esta é uma mudança que pode ser realizada em uma futura modernização, sem necessidade de uma mudança drástica no projeto arquitetônico, essa proposta pode ser combinada com a proposta 4 que é mudança de todos os vidros, por vidros laminados. Essas propostas apresentaram um resultado positivo no desempenho termoenergético da edificação. É preciso considerar que a edificação está localizada no Rio Grande do Sul, o significa que a medidas adotadas são específicas para este caso, é necessário realizar uma simulação termoenergética em cada projeto, antes de propor melhorias.

Esses resultados corroboram para que o conceito de edificações com energia líquida zero seja adotado no Rio Grande do Sul. Este conceito é uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica, uma combinação entre energia renovável e eficiência energética. Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se coletar os dados de operação reais, realizar uma análise do comportamento da carga térmica da edificação e dimensionamento do sistema de climatização. Por fim, expandir o estudo de edificações NZEB em outras cidades e construções/técnicas do Rio Grande do Sul. Assim possibilita investigar as alternativas e aplicação de componentes construtivos na envoltória, possibilitando o desenvolvimento de novas tecnologias para economia de energia do setor residencial.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR. 15.220-2. Desempenho Térmico de Edificações Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- ABNT NBR. ISO 50.001. Sistemas de gestão da energia — Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro, Brasil, 2018.
- ANEEL, 2021, Resolução Normativa nº 482/2012. Disponível em < <https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas>> Acesso em 2 de março de 2021.
- ASHRAE *Handbook* – Fundamentals (SI edition). Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2017.
- Ahn, B. L., Jang, C. Y., Leigh, S. B., Yoo, S., Jeong, H., 2014. Effect of LED lighting on the cooling and heating loads in office buildings. *Applied Energy* 113 (2014) 1484–1489.
- Baglivo, C., Congedo, P., D’Agostino, D., Zacà, I., 2015, Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate, *energy*, v. 83, p. 560-575.
- BEN, 2020. Balanço Energético Nacional 2020. Disponível em <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>> Acesso em 19 de março de 2021.
- Beyer, P., Pasquali, F., Hennes, A., Ziebell, C., 2012, Aumento da eficiência energética de um edifício existente, Mercofrio 2012 – Congresso Internacional de Ar Condicionado, Refrigeração, Aquecimento e Ventilação.
- Cao, X., Dai, X., Liu, J., 2016, Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade, *Energy and buildings*, v. 128, p. 198-213, 2016.
- Cohen, R., Desai, K., Elias, J., Twinn, R., 2021, Net zero carbon: performance targets for offices, *Building Services Engineering Research and Technology*, p. 0143624421991470.
- Companhia Energética de Minas Gerais S.A. Guia do melhor consumo: dicas de economia de energia e segurança com a rede elétrica. Belo Horizonte: CEMIG, 2014. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/>. Acesso em: 01 março 2021.
- D’Agostino, D., Mazzarella, L., 2019, What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions, *Journal of Building Engineering*, v. 21, p. 200-212.
- D’Agostino, D., Parker, D., 2018, A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe, *Energy*, v. 149, p. 814-829.
- Domingo, R., Gabriel, L., 2020, Proposta de modelo Casa de Energia Zero (CEZ) de baixo padrão para Zona Bioclimática 07 com avaliação da viabilidade econômica, *E&S Engineering and Science*, v. 9, n. 2, p. 14-26.
- EnergyPlus Essentials, 2020. EnergyPlus™ Version 9.4.0 Documentation, U.S. Department of Energy. Disponível em <<https://energyplus.net/documentation>> Acesso em 07 de abril de 2021

- Hamdy, M., Hasan, A., Siren, K., 2013, A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy and Buildings*, v. 56, p. 189-203
- INMETRO, 2013. Anexo Geral V – Catálogo de propriedades térmicas de paredes, coberturas e vidro. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produospbe/regulamentos/anexov.pdf>> Acesso em 30 de Abril de 2021.
- INMETRO, 2021. Tabelas de Consumo. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/sistema-fotovoltaico.asp>> Acesso em 30 de Abril de 2021.
- Kurnitski, J., Saari, A., Kalamees, T., Vuolle, M., Niemelä, J., Tark, T., 2011, Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation, *Energy and Buildings*, v. 43, n. 11, p. 3279-3288.
- Magrini, A., Lentini, G., Cuman, S., Bodrato, A., Marengo, L., 2020, From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example, *Developments in the Built Environment*, p. 100019.
- Marszal, A. J., Heiselberg, P., Bourelle, J. S., Musall, E., Voss, K., Sartori, I., Napolitano, A., 2011, Zero Energy Building – A review of definitions and calculation methodologies, *Energy and buildings*, v. 43, n. 4, p. 971-979.
- Petran, H., Varga, S., Fogas, N., 2019, Experimental Nearly Zero Energy Building with Green Technology–Renovation Pilot through Passive House Expertise. In: *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, p. 03029.
- Projeteee, 2021. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em <<http://projeteee.mma.gov.br/>> Acesso em 24 de Março de 2021.
- RTQ-R, 2012. Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residências. Disponível em <<http://www.pbeedifica.com.br>> Acesso em 3 de março de 2021.
- Sorgato, M., J., Melo, A., P., Lamberts, R., 2013, Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15.575, *Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído*, v. 12.
- Torcellini, P., Pless, S., Deru, M., 2006. *Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition*, National Renewable Energy Laboratory Drury Crawley, U.S. Department of Energy, Estados Unidos.