

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

BRAZ BORGES DE OLIVEIRA FILHO

**APLICAÇÃO DO ANEXO 75 (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA)
BASEADA NA REALIDADE BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO NA GRANDE
VITÓRIA**

VITÓRIA-ES

2022

BRAZ BORGES DE OLIVEIRA FILHO

**APLICAÇÃO DO ANEXO 75 (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA)
BASEADA NA REALIDADE BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO NA GRANDE
VITÓRIA**

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Luciana Aparecida Netto de Jesus

VITÓRIA-ES

BRAZ BORGES DE OLIVEIRA FILHO

**APLICAÇÃO DO ANEXO 75 (AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA)
BASEADA NA REALIDADE BRASILEIRA: ESTUDO DE CASO NA GRANDE
VITÓRIA**

Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Civil, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 24 de agosto de 2022.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Luciana Aparecida Netto de Jesus
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientadora

Prof^a. Dr^a. Rudiele Aparecida Schankoski
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinadora interna

Eng. Saile Tomazelli
Examinador externo

RESUMO

A reforma de edifícios combinada à seleção de tecnologias para redução do consumo energético das edificações já construídas é uma alternativa para a mitigação dos impactos ambientais dos edifícios. O projeto do Anexo 75, do acordo de implementação do programa de energia em edificações e comunidades da Agência Internacional de Energia (IEA-EBC), busca comparar o custo da reforma com e sem melhoria de desempenho energético, realizada num conjunto de edifícios de um mesmo distrito ao fim da sua vida útil, com objetivo de verificar medidas de renovação com elevado custo-benefício. Deste modo, com o uso dos procedimentos do Anexo 75, o presente trabalho teve como objetivo analisar a aplicação de medidas de eficiência energética e uso de energia renovável em edifícios de habitações de interesse social construídos na década de 80 no bairro André Carloni, no município de Serra-ES. Para isso, a metodologia adotada incluiu a definição dos cenários de renovação com as medidas de eficiência energética e uso de energia renovável; realização de simulações das diferentes configurações dos edifícios de André Carloni no *software EnergyPlus®*; cálculo dos consumos de energia com base nas recomendações da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R) e da norma ABNT NBR 15.575:2021-1; e estimativa dos custos de acordo com as bases de preço do Departamento de Edificações e de Rodovias do Estado do Espírito Santo (DER-ES) e do Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil (SINAPI) ou com os preços praticados pelo mercado; e comparação dos resultados de consumo de energia e custos dos cenários de renovação com um caso de referência em que é realizada uma reforma sem ganho de desempenho energético. Dentre os cenários de renovação analisados, naquele com melhor custo-benefício, o consumo de energia primária reduziu 91,23% em relação ao caso de referência, em que não há melhoria da eficiência energética. Além disso, a redução estimada das emissões anuais de CO₂ foram de 91% em relação ao caso de referência. Porém, mesmo com a redução dos custos com energia, o custo global foi apenas 1,37% menor do que o estimado para o caso de referência, devido à escolha dos componentes da envoltória na renovação, que não contribuíram significativamente para a redução da carga térmica, em relação ao seu custo.

Palavras-chave: Anexo 75. IEA-EBC. Agência Internacional de Energia. INI-R. NBR 15.575. Simulação energética. Habitação de interesse social. Eficiência energética. Energia renovável.

ABSTRACT

The project of the Annex to the International Energy Agency Energy in Buildings and Communities (IEA-EBC) Programme implementing agreement, named Annex 75, aims to compare the envelope and energy supply systems renovation costs with an anyway renovation by the end of buildings lifespan at district level. The present work aimed to apply the methodology developed on the Annex 75 project to study energy efficiency measures and renewable energy on buildings of social interest constructed by the 80's in Serra-ES. To achieve this goal simulations of different building configurations were performed on EnergyPlus® software, then energy consumption was calculated in accordance with Brazilian regulations, costs were estimated based on the prices established as a reference by the government or on the prices practiced by the civil construction market and the results were compared to an anyway renovation in which there is no increase in energy efficiency. Among the analyzed renovation packages, for the cost optimal one the energy consumption reduced by 91,23% compared to anyway renovation. For that package, the reduction in carbon emissions was 91% compared to same anyway renovation. However, despite the reduction in energy costs, estimated renovation global costs were only 1,37% lower than the global costs for the anyway renovation, due to the choice of envelope components, which did not significantly contribute to the reduction of thermal load on buildings in relation to the cost of renovation.

Keywords: Annex 75; IEA-EBC; International Energy Agency; INI-R; NBR 15.575; Energetic simulation; Housing of social interest; Energy efficiency; Renewable energy.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ciclo de utilização da biomassa (esquerda) e do petróleo (direita) | 18 |
| Figura 2 – Proporção entre fontes renováveis e não renováveis na matriz energética do mundo e do Brasil..... | 18 |
| Figura 3 – Distribuição da matriz energética em diferentes fontes de energia, no mundo e no Brasil..... | 19 |
| Figura 4 - Distribuição da matriz de energia elétrica em diferentes fontes de energia, no mundo e no Brasil..... | 19 |
| Figura 5 – Representação esquemática das intervenções em edificações, em que “M” representam as manutenções e “R” uma renovação | 24 |
| Figura 6 – Comparação entre renovação “convencional” e renovação energética em uma edificação..... | 29 |
| Figura 7 – Resultados genéricos de uma análise de custo ótimo..... | 30 |
| Figura 8 – Vista aérea do Bairro Picoto | 31 |
| Figura 9 – Vistas gerais dos edifícios do Bairro Picoto | 32 |
| Figura 10 – Emissões anuais, consumo de energia primária e custos para cada cenário do estudo em Braga, PT | 35 |
| Figura 11 – Sistema de isolamento térmico externo StoTherm..... | 39 |
| Figura 12 – Telhas termoacústicas da Calha Forte, com núcleo em (a) EPS e (b) poliuretano..... | 40 |
| Figura 13 – Esquema do funcionamento do vidro insulado do (a) primeiro e (b) segundo cenário | 41 |
| Figura 14 – Unidade evaporadora e condensadora do sistema <i>split inverter</i> (sem escala) | 42 |
| Figura 15 – Unidades evaporadoras e unidade condensadora do sistema VRF (sem escala) .. | 43 |
| Figura 16 – Kit de painéis fotovoltaicos..... | 43 |
| Figura 17 – Interface do <i>software</i> EnergyPlus® | 45 |
| Figura 18 – Interface do <i>software</i> SketchUp® com <i>plug-in</i> Euclid® | 46 |
| Figura 19 – Vista do bairro André Carloni..... | 57 |
| Figura 20 – Localização do bairro André Carloni | 57 |
| Figura 21 – Delimitação da área considerada como o distrito do estudo de caso, com indicação das configurações e orientação espacial dos edifícios..... | 58 |
| Figura 22 – Vista de exemplos de edifícios com configurações (a) 2Q50, (b) 2Q45 e (c) 1Q37 | 60 |
| Figura 23 – Divisão das zonas térmicas “NPxyz” (hachurado), “QPxyz” (verde) e “SPxyz” (azul) nos edifícios com configurações (a) 2Q50, (b) 2Q45 e (c) 1Q37 | 62 |
| Figura 24 – Temperatura operativa do ambiente sala, localizado no 4º pavimento, bloco B e apartamento 3 (SP4B3) em um dia quente (21/02) | 64 |

| | |
|--|-----|
| Figura 25 – Temperatura operativa do ambiente sala, localizado no 4º pavimento do edifício, bloco B, apartamento 3 (SP4B3) em um dia frio (21/07)..... | 65 |
| Figura 26 – Paredes com sistema de isolamento térmico exterior (ETICS) em cada configuração de edifício | 67 |
| Figura 27 – Proposta de instalação do sistema VRF | 68 |
| Figura 28 – Painéis fotovoltaicos instalados nas coberturas dos edifícios | 68 |
| Figura 29 – Modelagem dos edifícios (a) 1Q37, (b) 2Q45 e (c) 2Q50 para simulação no EnergyPlus®..... | 69 |
| Figura 30 – Emissões anuais, consumo de energia primária e custos para cada cenário | 77 |
| Figura 31 – Custos da renovação do caso de referência e do cenário P2 + 3-VRF+PV | 78 |
| Figura 32 – Planta baixa do pavimento tipo dos edifícios “2Q50” | 102 |
| Figura 33 – Planta baixa do pavimento tipo dos edifícios “2Q45” | 103 |
| Figura 34 – Planta baixa do pavimento tipo dos edifícios “1Q37” | 104 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Exemplos de tecnologias passivas, ativas e proativas consideradas como medidas de eficiência energética para edificações..... | 21 |
| Quadro 2 – Exemplo de tecnologias que podem ser utilizadas para melhoria do desempenho energético de edificações, levantadas pelo projeto do anexo 75 do IEA-EBC | 25 |
| Quadro 3 – Abordagem do projeto para diferentes questões relacionadas à tipologia..... | 28 |
| Quadro 4 – Propriedades físicas dos elementos da envoltória das edificações de Picoto | 32 |
| Quadro 5 – Pacotes de reforma para melhoria da envoltória das edificações | 34 |
| Quadro 6 – Pacotes de soluções de sistema de fornecimento de energia | 34 |
| Quadro 7 - Dados necessários para análise do estudo de caso | 38 |
| Quadro 8 – Parâmetros utilizados para os diferentes sistemas da edificação..... | 38 |
| Quadro 9 – Pacotes definidos para a renovação da envoltória | 41 |
| Quadro 10 – Especificações do painel utilizado como fonte de energia renovável | 44 |
| Quadro 11 – Pacotes de soluções definidas para o sistema de fornecimento de energia | 44 |
| Quadro 12 – Parâmetros para cálculo do consumo de energia elétrica para refrigeração e aquecimento..... | 50 |
| Quadro 13 – Adequação do estudo de caso aos critérios adotados para abordagem do projeto do anexo 75..... | 59 |
| Quadro 14 – Classificação dos edifícios do distrito de acordo com sua orientação espacial... | 59 |
| Quadro 15 – Classificação dos edifícios do distrito de acordo com suas dimensões | 61 |
| Quadro 16 – Parâmetros térmicos e energéticos dos componentes da envoltória dos edifícios do distrito..... | 63 |
| Quadro 17 – Faixas de temperaturas operativas para determinação do $PHFT_{APP}$ | 64 |
| Quadro 18 – Parâmetros térmicos e energéticos dos componentes da envoltória para os cenários P1 e P2..... | 72 |
| Quadro 19 – Planilha orçamentária com os custos de implantação das medidas de renovação | 86 |
| Quadro 20 – Composições de preços unitários | 87 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Consumo energético simulado de aquecimento, refrigeração e aquecimento doméstico de água (DHW) para o caso de referência | 33 |
| Tabela 2 – Evolução anual dos fatores de conversão de eletricidade e gás em energia primária – Brasil..... | 46 |
| Tabela 3 – Evolução dos fatores de emissão de CO ₂ para eletricidade (SIN) – Brasil | 47 |
| Tabela 4 – Custos de investimento considerados na análise do custo global de renovação..... | 53 |
| Tabela 5 – Custos com substituição e manutenção considerados para todo o distrito | 54 |
| Tabela 6 – PHFT _{UH} em cada apartamento do edifício tipo 2Q50-OR59 obtido na simulação preliminar, com destaque em vermelho para os valores abaixo do percentual mínimo de 90% do tempo dentro da faixa de conforto..... | 66 |
| Tabela 7 – Quantitativos para os serviços de renovação do distrito..... | 68 |
| Tabela 8 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento de cada configuração e orientação de edifício do distrito | 70 |
| Tabela 9 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento do distrito..... | 70 |
| Tabela 10 – Consumo de energia elétrica do distrito no caso de referência (indicadas as equações de cálculo)..... | 71 |
| Tabela 11 – Consumo de energia primária e emissão total de CO ₂ do caso de referência..... | 71 |
| Tabela 12 – Custo global de renovação para o caso de referência, por m ² de área condicionada do distrito..... | 71 |
| Tabela 13 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento por edifício para as envoltórias P1 e P2 | 73 |
| Tabela 14 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento do distrito..... | 73 |
| Tabela 15 – Consumo de energia elétrica do distrito nos cenários de envoltória P1 e P2 | 74 |
| Tabela 16 – Consumo anual de energia primária e emissão total de CO ₂ para o cenário de envoltória P1 e P2..... | 75 |
| Tabela 17 – Custo global de renovação para o cenário de envoltória P1, por m ² de área condicionada do distrito | 75 |
| Tabela 18 – Custo global de renovação para o cenário de envoltória P2, por m ² de área condicionada do distrito | 76 |
| Tabela 19 – Indicadores obtidos para cada combinação de cenários de renovação | 76 |
| Tabela 20 – Custos de substituição e valor residual ao fim do período de análise para cada sistema | 94 |
| Tabela 21 – Custos de manutenção anuais para cada sistema..... | 94 |
| Tabela 22 – Custos iniciais de energia para o caso de referência e cenários de renovação | 94 |
| Tabela 23 – Valor presente líquido dos custos para renovação do caso de referência..... | 95 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 24 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 1-Split | 96 |
| Tabela 25 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 2-VRF | 97 |
| Tabela 26 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 3-VRF+PV.. | 98 |
| Tabela 27 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 1-Split | 99 |
| Tabela 28 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 2-VRF | 100 |
| Tabela 29 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 3-VRF+PV | 101 |
| Tabela 30 – Padrões de ocupação diários dos APP | 105 |
| Tabela 31 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários | 105 |
| Tabela 32 – Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP | 106 |
| Tabela 33 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação | 106 |
| Tabela 34 – Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP | 106 |
| Tabela 35 – Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e APT..... | 107 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| APP | Ambiente de permanência prolongada |
| AZ | Azimute |
| BIPV | Painéis fotovoltaicos integrados à construção (<i>Building-integrated photovoltaics</i>) |
| BNH | Banco Nacional da Habitação |
| CB3E | Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações |
| CEP | Consumo de Energia Primária |
| COFINS | Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social |
| COHAB-ES | Companhia Habitacional do Espírito Santo |
| DER-ES | Departamento de Edificações e de Rodovias do Estado do Espírito Santo |
| EPS | Poliestireno Expandido (<i>Expanded polystyrene</i>) |
| ETICS | Sistema de Isolamento Térmico pelo Exterior (<i>External Thermal Insulation Composite System</i>) |
| GEE | Gases de Efeito Estufa |
| HVAC | Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado (<i>Heating, Ventilating and Air Conditioning</i>) |
| ICMS | Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação |
| IEA | Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency</i>) |
| IEA-EBC | Programa Energia em Edifícios e Comunidades da Agência Internacional de Energia (<i>International Energy Agency's Energy in Buildings and Communities Programme</i>) |
| INI-C | Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas |
| INI-R | Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais |
| INMET | Instituto Nacional de Meteorologia |
| KPI | Indicador-chave de desempenho (<i>Key Performance Indicator</i>) |

| | |
|---------------------|--|
| OCDE | Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico |
| PBE | Programa Brasileiro de Etiquetagem |
| PD&D | Pesquisa, desenvolvimento e demonstração |
| PHFT _{APP} | Percentual de horas de ocupação do ambiente de permanência prolongada dentro da faixa de temperatura operativa |
| PHFT _{UH} | Percentual de horas de ocupação da unidade habitacional dentro da faixa de temperatura operativa |
| PIS | Programa de Integração Social |
| PV | Painel fotovoltaico |
| RES | Fonte de energia renovável (<i>Renewable energy source</i>) |
| RTQ-C | Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos |
| RTQ-R | Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais |
| SINAPI | Sistema Nacional de Preços e Índices para a Construção Civil |
| TE | Tarifa de Energia |
| TUSD | Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição |
| UH | Unidade habitacional |
| VPL | Valor presente líquido |
| VRF | Fluxo de Refrigerante Variável (<i>Variable Refrigerant Flow</i>) |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 15 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 15 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 15 |
| 1.2 | JUSTIFICATIVA..... | 15 |
| 1.3 | ESTRUTURA DO TRABALHO..... | 16 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 17 |
| 2.1 | FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA | 17 |
| 2.2 | EFICIÊNCIA ENERGÉTICA..... | 20 |
| 2.2.1 | Tecnologias para a eficiência energética | 20 |
| 2.2.2 | Regulamentos para a eficiência energética em edificações..... | 21 |
| 2.2.3 | Eficiência energética em edifícios sob a perspectiva da Agência Internacional de Energia 22 | |
| 2.3 | RENOVAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS SEGUNDO O ANEXO 75 DO PROGRAMA IEA-EBC..... | 23 |
| 2.3.1 | Indicadores de desempenho para avaliação conforme o anexo 75 | 26 |
| 2.3.2 | Procedimento de avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência em edifícios conforme o anexo 75..... | 27 |
| 2.3.3 | Demonstração do procedimento de avaliação do anexo 75 | 31 |
| 3 | METODOLOGIA | 37 |
| 3.1 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 37 |
| 3.2 | LEVANTAMENTO DE DADOS DO ESTUDO DE CASO ESCOLHIDO..... | 37 |
| 3.3 | ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO ENERGÉTICA | 39 |
| 3.3.1 | Cálculo da demanda de energia do distrito..... | 44 |
| 3.3.2 | Cálculo do consumo de energia primária e das emissões de carbono | 46 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 3.3.3 | Cálculo dos custos globais para renovação | 51 |
| 3.4 | COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DEFINIÇÃO DO CENÁRIO COM MELHOR CUSTO-BENEFÍCIO | 55 |
| 4 | ESTUDO DE CASO | 57 |
| 4.1 | IMPLANTAÇÃO DAS MEDIDAS DE RENOVAÇÃO NO ESTUDO DE CASO | 67 |
| 5 | RESULTADOS | 69 |
| 5.1 | CASO DE REFERÊNCIA | 69 |
| 5.2 | CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO | 72 |
| 5.3 | COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO | 76 |
| 6 | CONCLUSÃO | 80 |
| | REFERÊNCIAS | 83 |
| | APÊNDICE A – PLANILHA ORÇAMENTÁRIA E COMPOSIÇÕES DE PREÇO UNITÁRIO PARA IMPLANTAÇÃO DAS MEDIDAS DE RENOVAÇÃO | 86 |
| | APÊNDICE B – CÁLCULO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO DOS CUSTOS | 94 |
| | ANEXO A – PLANTAS ARQUITETÔNICAS | 102 |
| | ANEXO B – PADRÕES DE OCUPAÇÃO E CARGAS INTERNAS CONSIDERADAS NAS SIMULAÇÕES | 105 |
| | ANEXO C – MODELAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO COM CARGAS IDEIAS..... | 107 |

1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas geradas pela emissão de gases poluentes nas atividades de transformação de energia, são a principal razão para que se pense cada vez mais em fontes de energia com menor impacto ambiental. Além disso, busca-se cada vez mais o desenvolvimento e adoção de tecnologias que visem a redução do consumo de energia em diversos contextos (indústrias, transportes, residências, agropecuária etc).

As edificações residenciais, comerciais e públicas correspondem a 48,4% do consumo mundial de energia elétrica de 2018 (IEA, 2020), o que corresponde a uma porcentagem significativa. Visando reduzir essa parcela de participação e a redução do consumo energético das edificações, atualmente busca-se a construção de novos edifícios com consumo energético quase nulo (*net zero energy buildings*). As regulamentações implementadas pelos governos de diversos países também têm contribuído para a construção mais direcionada à eficiência energética, por meio da seleção de materiais e sistemas que geram menor consumo.

Nesse contexto, uma dificuldade no âmbito das edificações é a grande quantidade de edifícios já existentes que não possuem desempenho energético satisfatório e, por isso, precisam sofrer intervenções para alcançar níveis menores de consumo. Uma vez que nesse tipo de intervenção muitas vezes o custo inicial é alto, e as modificações em edifícios existentes se tornam pouco atrativas para o proprietário. Porém, diante dos benefícios que são somados à redução de consumo, tais como a melhoria do conforto dos ambientes internos e a redução de gastos com energia elétrica, é possível superar a barreira econômica por meio da otimização do custo das reformas com medidas de redução de consumo energético e uso de energia renovável.

Assim, no presente trabalho pretende-se avaliar o custo-benefício da adoção de medidas de eficiência energética e de uso de energia renovável em edifícios para pessoas de baixa renda do município de Serra-ES, localizado na Região Metropolitana da Grande Vitória. Para isso, foi utilizada a metodologia proposta no projeto do Anexo 75 definido pela Agência Internacional de Energia (IEA-EBC), na qual foi levantado o custo da intervenção na envoltória e nos sistemas de fornecimento de energia em um conjunto de edificações e foi comparado com o mesmo conjunto, mas no caso, com o custo da reforma sem melhoria de desempenho energético.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo analisar o custo-benefício de medidas de eficiência energética e uso de energia renovável na reforma de um conjunto de edifícios de habitação de baixa renda localizado no município de Serra-ES.

1.1.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos deste projeto:

- Realizar uma revisão bibliográfica dos temas eficiência energética e fontes de energia renovável, com foco em renovações energéticas em edifícios;
- Adaptar a metodologia de avaliação de edifícios e conjuntos de edifícios (distritos) dos anexos 56 e 75 da Agência Internacional de Energia para aplicação em um estudo de caso localizado no município de Serra-ES;
- Definir diferentes cenários de reforma de edifício, em termos de modificação da envoltória e dos sistemas da edificação (refrigeração/aquecimento, fornecimento de energia e aquecimento de água doméstico);
- Avaliar por meio de indicadores chave de desempenho (KPIs) o consumo de energia primária, as emissões de gases de efeito estufa e custo total anual dos diferentes cenários de renovação energética no estudo de caso escolhido;
- Definir uma solução econômica de reforma do estudo de caso, que combine medidas de eficiência energética e uso de energia renovável.

1.2 JUSTIFICATIVA

A crise ambiental mundial que decorre das mudanças climáticas provocadas pela emissão de gases do efeito estufa (GEE) é um tema contemporâneo com discussão relativamente ampla, com projeção internacional em eventos como a conferência das partes (COP) “*United Nations Climate Change Conference*” (Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas), que ocorre anualmente. Dessa maneira, estudos voltados à redução do impacto ambiental provocado pelas emissões de GEE têm papel importante no enfrentamento dessa crise.

As edificações construídas podem desempenhar um papel relevante na minimização dos impactos ambientais causados pelo consumo energético, devido à possibilidade de consumirem menos energia. O presente trabalho se propõe a estudar uma metodologia para otimização de reformas de edificações existentes com foco na redução de consumo energético e das emissões de GEE, para que esse tipo de intervenção em edificações seja visto de maneira mais atrativa pelos proprietários. Assim, espera-se que a atratividade motivada por essa otimização dos custos das renovações possibilite a redução dos impactos ambientais das edificações existentes.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em seis capítulos, como segue:

- No primeiro capítulo é feita a introdução do tema do trabalho, os objetivos quais se pretende alcançar e a justificativa para escolha do tema do projeto.
- No segundo capítulo é apresentada a fundamentação teórica do trabalho, na qual são apresentados conceitos básicos a respeito de fontes de energia renovável e eficiência energética e, em seguida, os estudos relacionados a renovação energética de edificações.
- No terceiro capítulo é definida e apresentada a metodologia aplicada neste projeto para alcançar os objetivos propostos.
- No quarto capítulo é descrito o estudo de caso escolhido para o projeto, com as informações necessárias para a aplicação da metodologia do trabalho.
- No quinto capítulo são apresentados os resultados da aplicação da metodologia do trabalho no estudo de caso escolhido.
- No sexto capítulo são apresentadas as conclusões relevantes do projeto e as contribuições para trabalhos futuros.

Por fim serão apresentadas as Referências Bibliográficas, apêndices e os anexos deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Eficiência energética e uso de energia renovável são temas fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho. Por esse motivo, nas seções deste capítulo, serão apresentadas informações a respeito da geração e fontes renováveis de energia, seguidos de uma abordagem do conceito de eficiência energética e das regulamentações para redução do consumo de energia e, por fim, será apresentado o projeto da Agência Internacional de Energia, que considera medidas de eficiência energética e uso de energia renovável na reforma de distritos para redução do impacto ambiental de edificações existentes.

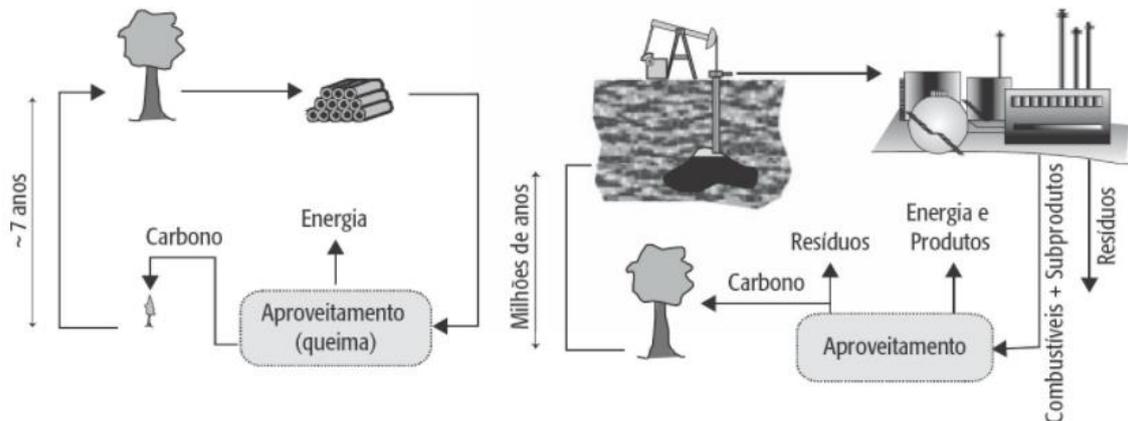
2.1 FONTES RENOVÁVEIS DE ENERGIA

Energia é o conceito físico utilizado para definir a capacidade de um corpo (recurso energético) de produzir movimento. Atualmente, existem diversas tecnologias capazes de aproveitar a energia armazenada nos recursos energéticos para utilização nos equipamentos, veículos e edificações. Essencialmente, a energia não pode ser gerada, apenas transformada (lei da conservação de energia de *Lavoisier*), de modo que todo recurso energético é um recurso natural, isto é, por si só já existem na natureza.

Um recurso natural é considerado renovável quando o tempo para que ele seja repostado pela natureza após a sua utilização é curto o suficiente para que seja atendida a demanda de consumo humano. Logo, um recurso não renovável é aquele em que o tempo entre utilização e renovação é tão longo que, mantendo-se a demanda por sua utilização, esgota-se antes mesmo de ser renovado (BIANCHI; LIMA; DIAS, 2016).

A Figura 1 apresenta os ciclos de utilização de dois recursos naturais, biomassa e petróleo. No ciclo da biomassa, após a utilização da matéria para fornecimento de energia, são gastos cerca de 7 anos para repor a árvore que deu origem à lenha, tempo suficiente para suprir as demandas de energia humanas. Em contrapartida, o tempo para reposição no ciclo do petróleo é da ordem de milhões de anos, tempo muito maior que o necessário para atender as demandas de consumo atuais (BIANCHI; LIMA; DIAS, 2016).

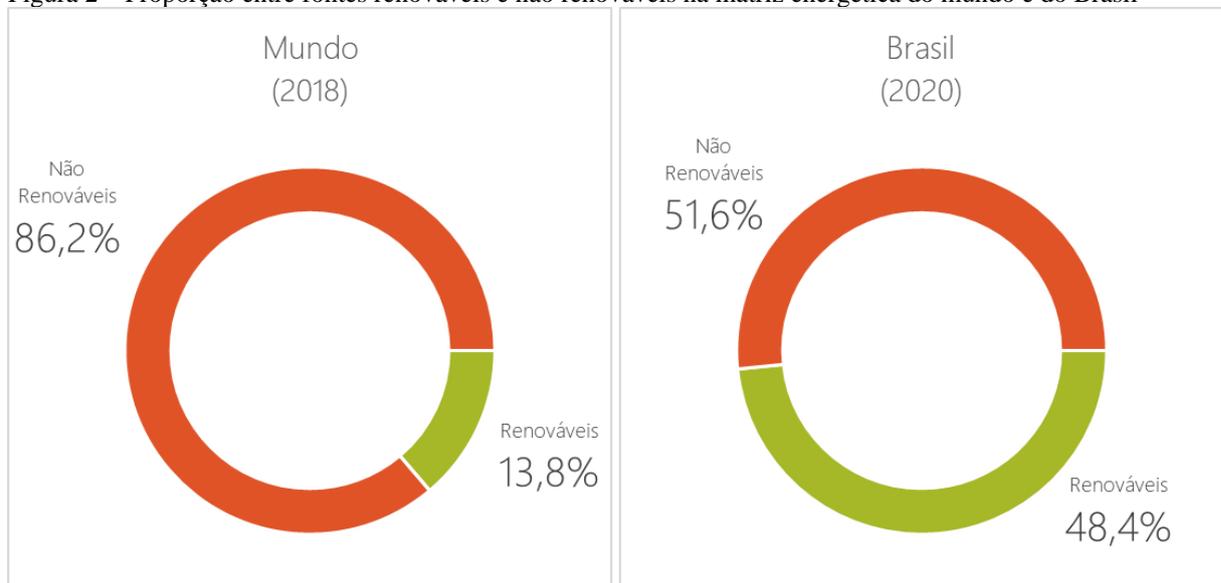
Figura 1 – Ciclo de utilização da biomassa (esquerda) e do petróleo (direita)



Fonte: Bianchi, Lima e Dias (2016).

A quantidade de recursos naturais ofertados para transformação em energia em uma região define a sua matriz energética. Recursos não renováveis são atualmente a maior fonte de energia no mundo, quando consideradas as ofertas de todos os países, representando 86,2% da matriz energética mundial (IEA, 2020). No Brasil, a participação dos recursos renováveis é maior, representando 48,4% da matriz energética do país (BRASIL, 2021). A Figura 2 apresenta a proporção entre fontes renováveis e não renováveis na matriz energética do mundo e do Brasil.

Figura 2 – Proporção entre fontes renováveis e não renováveis na matriz energética do mundo e do Brasil

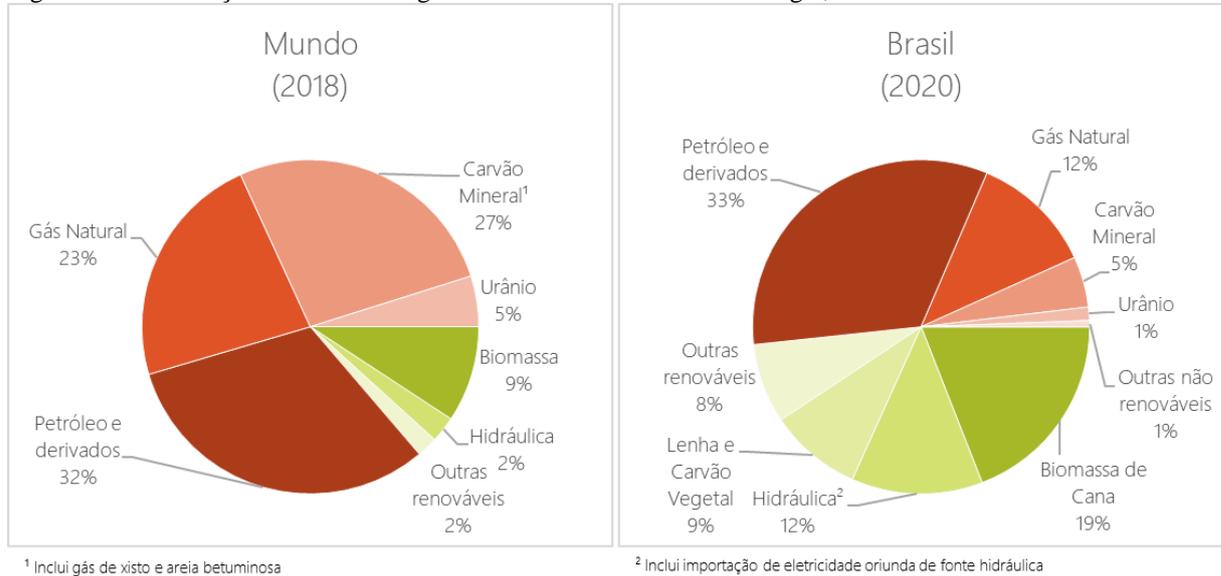


Fonte: Adaptado de IEA (2020) e Brasil (2021).

De acordo com os dados do Balanço Energético Nacional de 2020, há uma diferença significativa entre a matriz energética mundial e brasileira, em que se percebe a maior presença de recursos hídricos e de biomassas, como a cana-de-açúcar, que são renováveis (BRASIL, 2021). Em contrapartida, de acordo com o relatório de estatísticas da IEA (2020), os países em

geral dependem mais de recursos como petróleo e carvão mineral, que são recursos não renováveis. É o que mostra a Figura 3, que apresenta a matriz energética mundial e a do Brasil.

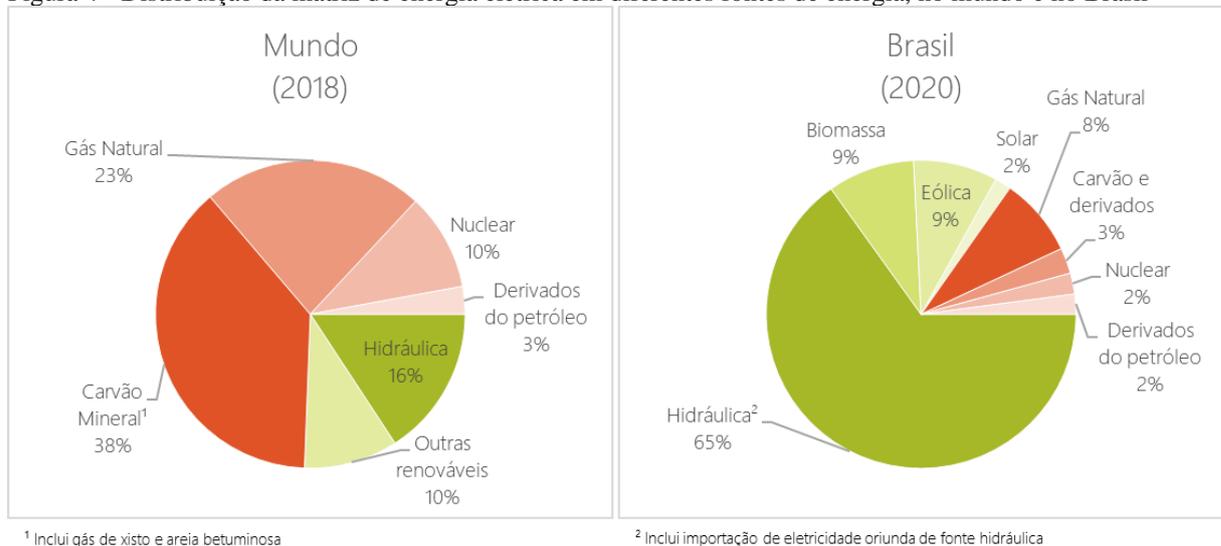
Figura 3 – Distribuição da matriz energética em diferentes fontes de energia, no mundo e no Brasil



Fonte: Adaptado de IEA (2020) e Brasil (2021).

Quando se trata especificamente de energia elétrica, que é o tipo de energia mais consumido no contexto de edificações no Brasil, a participação de recursos renováveis é ainda maior, quando comparada a matriz energética mundial, como mostra a Figura 4.

Figura 4 - Distribuição da matriz de energia elétrica em diferentes fontes de energia, no mundo e no Brasil



Fonte: Adaptado de IEA (2020) e Brasil (2021).

O gráfico da Figura 4 mostra que grande parte da oferta de energia elétrica tem como fonte a energia hidráulica. Embora seja um recurso renovável de energia, uma vez que o ciclo hídrico é relativamente curto na escala humana, a água em si é um recurso limitado e envolve diversas

outras questões ambientais. Por isso, mesmo no Brasil, busca-se a adoção de tecnologias para ampliar a participação de outros recursos renováveis na matriz energética.

A adoção de fontes de energia renováveis, embora ainda pouco expressiva a nível mundial (29% da matriz energética), vem sendo bastante discutida, uma vez que os recursos são repostos em uma velocidade mais próxima da necessária para acompanhar o crescimento da demanda humana por energia, quando comparados com recursos não renováveis. Essa discussão ganhou muita relevância com as crises de energia do final do século XX, momento no qual também entrou em pauta o tema de eficiência energética, conforme apresentado no item 2.2.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

A eficiência energética têm sido tema de discussão desde o início da década de 70, período em que as crises energéticas conhecidas como “Choque do petróleo” fizeram com que o acesso à energia fosse reduzido em diversos países. Diante da crise, começaram a ser aplicados em alguns países regulamentos com força de lei visando a redução do consumo energético em edifícios (ROMÉRO; REIS, 2012). A evolução dessas regulamentações, bem como as tecnologias para eficiência energética que nelas estão presentes, são apresentadas nos itens 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 Tecnologias para a eficiência energética

Embora os primeiros regulamentos para eficiência energética tenham surgido em decorrência da crise do petróleo, medidas a serem adotadas para o conforto ambiental das edificações, sem que houvesse consumo excessivo de energia, já eram propostas em cadernos técnicos de apoio aos projetistas que desejassem adotá-las voluntariamente ou por vontade do proprietário. Essas medidas propostas, já naquele momento, eram baseadas nos princípios da arquitetura bioclimática e, por esse motivo, muitas delas ainda são empregadas atualmente (ROMÉRO; REIS, 2012).

Para a adoção de medidas de conforto ambiental e eficiência energética nas edificações são empregadas tecnologias classificadas em passivas, ativas ou proativas. As tecnologias passivas referem-se às soluções que se aproveitam das condições climáticas do local para o conforto ambiental da edificação. As tecnologias ativas, por sua vez, referem-se às soluções que geralmente são empregadas na ocasião da insuficiência das tecnologias passivas para obtenção do conforto e, para isso, consomem energia durante a implantação ou operação. Já as

tecnologias proativas são soluções que não necessariamente aproveitam as condições climáticas, mas ao invés de consumirem energia, são capazes de gerá-la (ROMÉRO; REIS, 2012). O Quadro 1 exemplifica tecnologias das três classificações.

Quadro 1 – Exemplos de tecnologias passivas, ativas e proativas consideradas como medidas de eficiência energética para edificações

| Classificação | Exemplos |
|-----------------------|--|
| Tecnologias Passivas | <ul style="list-style-type: none"> • Materiais de construção opacos e translúcidos escolhidos corretamente; • Protetores solares exteriores; • Captação de luz natural sem aumento excessivo da carga térmica. |
| Tecnologias Ativas | <ul style="list-style-type: none"> • Lâmpadas escolhidas adequadamente para os ambientes internos e externos; • Equipamentos de refrigeração escolhidos com potência mínima adequada; • Sensores de presença colocados em ambientes de permanência transitória. |
| Tecnologias Proativas | <ul style="list-style-type: none"> • Coletores solares, que geram calor (energia térmica) para aquecimento de água; • Painéis fotovoltaicos, que geram energia elétrica; • Turbinas eólicas de pequeno porte, que geram energia elétrica. |

Fonte: Adaptado de Roméro e Reis (2012).

A adoção das tecnologias do quadro, bem como de outras tecnologias que se enquadram na classificação apresentada, são fundamentais para adequação da edificação à níveis razoáveis de eficiência energética estabelecidos nas regulamentações.

2.2.2 Regulamentos para a eficiência energética em edificações

Um dos primeiros países a implantar uma regulamentação para eficiência energética após o choque do petróleo foi a França, em 1974 (BARBOSA; ALMEIDA, 2020). Na época, a regulamentação estabelecia os requisitos quanto às perdas de calor pelas envoltórias dos novos edifícios a serem construídos, assim propondo medidas para o conforto térmico e eficiência energética da edificação no inverno. Outro país que também estabeleceu regras para mitigar o impacto da crise foi os EUA, que estabeleceu no mesmo ano, medidas de aumento tarifário sobre o consumo de energia (ROMÉRO; REIS, 2012). Atualmente, os países da União Europeia têm avançado na definição de regulamentações para edificações com necessidades energéticas quase nulas (*net-zero energy buildings – nZEB*), conceito introduzido na Diretiva Europeia 2010/31/EU (BARBOSA; ALMEIDA, 2020).

No Brasil, o tema eficiência energética alcançou a esfera governamental em 1984, ano em que o Inmetro lançou um projeto para discutir com a sociedade sobre a conservação de energia, projeto que mais tarde se tornaria o Programa Brasileiro de Etiquetagem – PBE. Todavia, iniciativas regulamentares para eficiência energética ganharam maior visibilidade em 2001, ano

marcado pela crise do setor de energia elétrica do país (ROMÉRO; REIS, 2012). No ano em questão, foi homologada a lei da Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia que visa não só a alocação eficiente de recursos energéticos, como também a preservação do meio ambiente como um todo. Anos mais tarde, em 2009 e 2010, foram lançadas as primeiras versões dos Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) e do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (RTQ-R), que passaram a ser utilizados como referência na regulamentação da eficiência energética das edificações no Brasil (PBE EDIFICA, 2020). Já em 2021, foi publicada a Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) em substituição ao RTQ-C e está em fase de aprovação a INI-R para Edificações Residenciais.

2.2.3 Eficiência energética em edifícios sob a perspectiva da Agência Internacional de Energia

Em 1974, como resposta internacional à crise do petróleo, foi criada a *International Energy Agency (IEA)*, dentro da estrutura da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), para que fosse implementado um programa internacional de energia. Atualmente, um dos objetivos básicos da IEA é o aumento da segurança energética, por meio de pesquisa, desenvolvimento e demonstração (PD&D) nas áreas de tecnologia a respeito de eficiência energética e fontes de energia renováveis (MØRCK et al., 2020).

No que se refere ao uso de energia em edificações, a IEA desenvolve estratégias para eficiência e conservação de energia em edifícios por meio do programa *Energy in Buildings and Communities (EBC)*, cuja missão também abrange a sustentabilidade de comunidades como um todo. As estratégias desenvolvidas no programa IEA-EBC também têm por objetivo superar obstáculos técnicos que impedem a entrada de novas tecnologias de eficiência energética no mercado da construção civil, o que permite explorar melhor as tecnologias para redução do consumo de energia (MØRCK et al., 2020).

O programa EBC é baseado em um contrato com a IEA por meio de um acordo de implementação (*IEA-EBC Implementing Agreement*) e, por esse motivo, todos os projetos desenvolvidos no programa são legalmente estabelecidos como anexos a esse acordo. O projeto “*Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation*”,

(“Otimização rentável de energia e emissões de carbono na renovação de edifícios”, em tradução livre) finalizado em 2017, compõe o anexo 56 do programa e teve por objetivo estabelecer um padrão para otimização entre a redução de consumo de energia primária (e de emissões de carbono) e o custo global de implementação das medidas de eficiência energética no contexto de renovação energética da edificação, isto é, intervenções ou reformas na edificação visando a melhoria da eficiência energética (ALMEIDA et al., 2017).

Ainda em 2017, foram iniciados os trabalhos do projeto “*Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables*” (“Renovação rentável de edifícios em nível distrital, combinando eficiência energética & renováveis”, em tradução livre), que compõe o anexo 75 do IEA-EBC e que tem por objetivo estudar as estratégias de renovação energética em nível distrital com alto custo-benefício para redução das emissões de gases de efeito estufa e do uso de energia das edificações, combinando medidas de eficiência energética e uso de fontes de energia renovável. Dessa maneira, o projeto visa dar orientação a proprietários, políticos e empresários para possibilitar uma transformação econômica do uso de energia das cidades, por meio de soluções de baixa emissão e baixo consumo de energia a serem empregadas nos edifícios existentes (IEA EBC, 2022). Embora os objetivos do projeto “anexo 75” sejam semelhantes aos do projeto “anexo 56”, este último fica restrito às intervenções em uma única edificação. No caso do projeto “anexo 75”, faz-se uma abordagem distrital/urbana, isto é, são estudadas intervenções que envolvem um grupo de edificações que, não necessariamente correspondem à uma unidade administrativa ou jurídica, mas que possuem relação entre si.

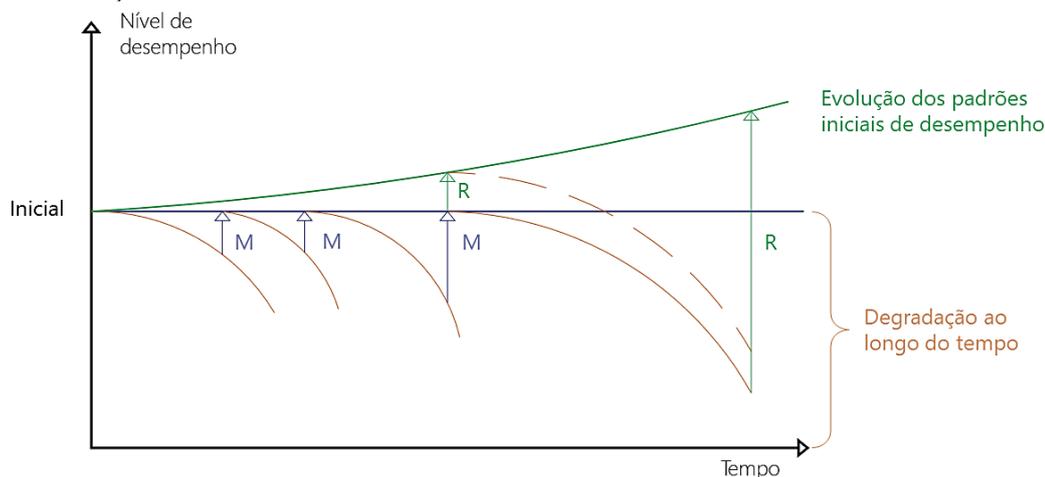
Essa abordagem distrital feita pelo projeto do anexo 75 foi a referência para a análise realizada no presente trabalho. Assim, a Seção 2.3 apresenta o procedimento de avaliação desenvolvido no projeto do anexo 75, que serviu de embasamento teórico para a metodologia proposta neste trabalho.

2.3 RENOVAÇÃO ENERGÉTICA DE EDIFÍCIOS SEGUNDO O ANEXO 75 DO PROGRAMA IEA-EBC

As edificações desde o seu primeiro dia de funcionamento estão sujeitas às ações do ambiente e, por isso, após um certo tempo, ficam com seu desempenho comprometido. Para aumentar o tempo de duração da edificação com padrões de desempenho iguais aos iniciais, isto é, sua vida útil, são necessárias manutenções periódicas. Porém, com o passar do tempo, os padrões de

desempenho das edificações evoluem e alcançam níveis mais exigentes e, é chegado o ponto em que são necessárias intervenções mais profundas. Essas intervenções com o objetivo de adequar a edificação aos níveis atuais de desempenho caracterizam uma renovação da edificação (ALMEIDA; FERREIRA; RODRIGUES, 2017). A Figura 5 ilustra algumas das intervenções que podem ser realizadas em uma edificação ao longo de seu ciclo de vida.

Figura 5 – Representação esquemática das intervenções em edificações, em que “M” representam as manutenções e “R” uma renovação



Fonte: Adaptado de Almeida, Ferreira e Rodrigues (2017).

No contexto do IEA-EBC, quando as intervenções são voltadas para melhorar o desempenho energético da edificação, mantendo-se os padrões de conforto térmico para os usuários, a renovação é chamada de “renovação energética”. Para a renovação energética de uma edificação, pode-se realizar intervenções tanto nos elementos da envoltória do edifício, quanto nos sistemas técnicos de ventilação, condicionamento de ar e aquecimento de água (ALMEIDA; FERREIRA; RODRIGUES, 2017).

A envoltória da edificação e os sistemas técnicos são determinantes para o consumo energético da edificação. No caso da envoltória, a escolha do material componente pode favorecer ou reduzir as trocas de calor entre o ambiente interno e externo, fazendo com que mais energia seja necessária para manter o conforto térmico por meio dos sistemas de aquecimento ou refrigeração, a depender das condições climáticas do local. Já no caso dos sistemas técnicos em si, para além da influência da envoltória, a escolha de tecnologias que não possuem eficiência energética razoável também implica em um aumento de consumo energético. Além disso, a renovação energética pode ocorrer também com intervenções no fornecimento de energia, seja por tecnologias que reduzam o consumo da energia das redes de distribuição ou por tecnologias

de fonte de energia renovável instalada na própria edificação (ALMEIDA; FERREIRA; RODRIGUES, 2017).

Em uma das entregas do projeto do anexo 75 do IEA-EBC, foram levantadas tecnologias que geralmente são empregadas no contexto da renovação energética de edifícios, incluindo soluções que podem ser aplicadas na escala urbana. O resultado do estudo, intitulado “*Technology overview*”, categoriza as tecnologias escolhidas em três grupos: tecnologias de redução de demanda ou economia de energia; sistemas de distribuição e fornecimento de energia; e sistemas de armazenamento de energia (MØRCK et al., 2020). O Quadro 2 apresenta um resumo de algumas das tecnologias apresentadas.

Quadro 2 – Exemplo de tecnologias que podem ser utilizadas para melhoria do desempenho energético de edificações, levantadas pelo projeto do anexo 75 do IEA-EBC

| Tecnologia | Descrição |
|---|--|
| Tecnologias de redução de demanda ou economia de energia | |
| Janelas com vidros quádruplos | As camadas de vidro extras reduzem o valor da transmitância térmica do elemento e, conseqüentemente, as trocas de calor através da janela, mantendo características semelhantes às outras janelas em relação à luz. |
| Sistema composto de isolamento térmico externo (ETICS) | Sistemas de isolamento de paredes externas constituídos de vários componentes, incluindo o material de isolamento (geralmente EPS ou lã mineral), fixações mecânicas, uma camada de tela estrutural e acabamento. |
| Fachada ventilada opaca | Método construtivo no qual uma separação física é criada entre o exterior da fachada e a parede interna da edificação, criando um vão que permite a troca de ar contido entre a parede e o revestimento externo. |
| Sistemas de distribuição e fornecimento de energia | |
| Refrigeradores | Equipamentos utilizados para refrigeração das edificações, de forma a garantir o conforto térmico. Geralmente são utilizados refrigeradores de compressão, mas também podem ser utilizados refrigeradores de absorção como alternativa. |
| Bombas de calor | Equipamentos que transferem calor de rochas ou do solo (bomba de calor geotérmica), de lagos, mar ou águas subterrâneas (bomba de calor de fonte de água) ou do ar (bomba de calor ar-água) e transfere para um aquecedor. |
| Painéis solares fotovoltaicos (PV) | Equipamentos que absorvem energia da luz solar e produzem eletricidade. São compostos por células fotovoltaicas de materiais semicondutores que produzem tensão e corrente específicas quando expostos à luz solar. São instalados geralmente em telhados, mas podem também ser integrados a fachada da edificação (BIPV). |
| Sistemas de armazenamento de energia | |
| Armazenamento de Energia Térmica (TES) | Tecnologia que armazena energia térmica através do aquecimento ou refrigeração de um meio de armazenamento de tal forma que a energia possa ser utilizada posteriormente para aquecimento, refrigeração ou geração. |
| Baterias | Equipamentos que armazenam energia elétrica. Baterias de estado sólido, diferentemente das baterias convencionais, são mais confiáveis e podem ter maior densidade de energia. Baterias de fluxo são úteis para armazenamento de longo prazo e podem ser utilizadas em conjunto com fontes renováveis. |

Fonte: Adaptado de Mørck et al. (2020).

Para análise de custo-benefício no investimento de medidas para melhorar a eficiência energética da edificação, a metodologia do anexo 75 do IEA-EBC considera diferentes cenários com “pacotes” de medidas para renovação energética e os compara com um caso de referência. Nesses pacotes, as medidas podem ser adotadas não só a nível de edifício (como no caso nas medidas que influenciam na envoltória), mas também a nível distrital (como no caso de sistemas centralizados de aquecimento/refrigeração).

O motivo para a abordagem distrital é poder analisar o custo-benefício de tecnologias que podem ser rentáveis se implementadas em várias edificações, apesar de não o serem a nível individual. Além disso, com essa abordagem é possível analisar as reduções de custo das intervenções em um grupo de edifícios, no que se refere à projeto, materiais e mão-de-obra. Também se considera em tal abordagem a possibilidade de compensar a dificuldade de realizar a renovação energética com a utilização de sistemas centralizados para fornecimento de energia renovável em escala urbana em regiões com edifícios históricos, por exemplo, nos quais a modificação da envoltória pode não ser possível (BARBOSA; ALMEIDA, 2020).

Para a avaliação do custo-benefício dos diferentes cenários, são definidos alguns indicadores de desempenho, que também são utilizados para avaliação do caso de referência, para posterior análise de resultados e definição de um cenário ideal otimizado. Os itens 2.3.1 e 2.3.2 abordam, respectivamente, a metodologia do projeto do anexo 75 para definição desses indicadores e o procedimento de avaliação empregado pelo projeto.

2.3.1 Indicadores de desempenho para avaliação conforme o anexo 75

Para mensuração do custo-benefício das renovações avaliadas na metodologia do projeto do anexo 75 são utilizados indicadores de desempenho (KPIs). A análise prevê o uso de três KPIs principais, anualizados e relativos à área total construída do distrito: o consumo de energia primária (CEP), quantificado em quilowatt-hora (kWh/m².ano); as emissões de gases do efeito estufa, quantificado em carbono equivalente (CO₂ eq/m².ano); e o custo total anualizado (\$/m².ano) (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

O cálculo do consumo de energia primária é dado por meio de simulações dinâmicas, podendo avaliar o sistema inteiro ou o lado da demanda e da oferta de energia separados. No lado da demanda, são calculados os consumos de energia necessários para o aquecimento e refrigeração em função das dimensões da construção e propriedades térmicas, e os consumos necessários de energia para aquecimento de água e eletricidade para iluminação e equipamentos de acordo

com os perfis padrão do país. No lado da oferta, os sistemas de fornecimento de energia são caracterizados de acordo com quatro parâmetros: custo, vida útil, eficiência de conversão de carga térmica em energia térmica ou elétrica do sistema e vetor energético (fonte de energia) associado. Com base nesses parâmetros, é possível calcular, conforme a energia demandada, o consumo de energia primária do distrito (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

As emissões de gases do efeito estufa são calculadas em função do consumo de energia primária, de acordo com fatores de conversão característicos da fonte de energia utilizada para o fornecimento (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020). As emissões de carbono incorporadas dos materiais e componentes utilizados para renovação também são consideradas, utilizando-se uma abordagem de análise de ciclo de vida (ACV), que também é utilizada para cálculo da energia primária incorporada nos materiais e componentes (OTT et al., 2017).

O cálculo dos custos envolvidos na renovação energética é feito também por meio de uma abordagem do ciclo de vida. De maneira geral, os custos envolvidos considerados são: custos de investimento inicial e custos de reposição; custos de energia (incluindo taxas existentes sobre a energia e emissão de CO₂); e custos de manutenção e custos operacionais. Para a realização da análise econômica das renovações, são então transformados todos os custos em custos anuais, considerando custos iniciais, taxa de juros e expectativa de vida útil típicos para as medidas de renovação consideradas (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

2.3.2 Procedimento de avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência em edifícios conforme o anexo 75

Para aplicação do procedimento de avaliação, é preciso ter bem definido o grupo de edificações a ser investigado. O projeto do anexo 75 tem seu foco em distritos residenciais, mas a metodologia também pode ser aplicada em distritos comerciais, desde que não seja suprido por sistemas HVAC complexos, pois são mais difíceis de serem modelados. A abordagem de distritos com edificações com diferentes usos (habitação, comércio, educação, etc.) é possível, mas também torna a análise mais complexa. De qualquer forma, não há limite de tamanho (área) para os distritos. O Quadro 3 resume algumas considerações para a escolha do distrito (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

Quadro 3 – Abordagem do projeto para diferentes questões relacionadas à tipologia

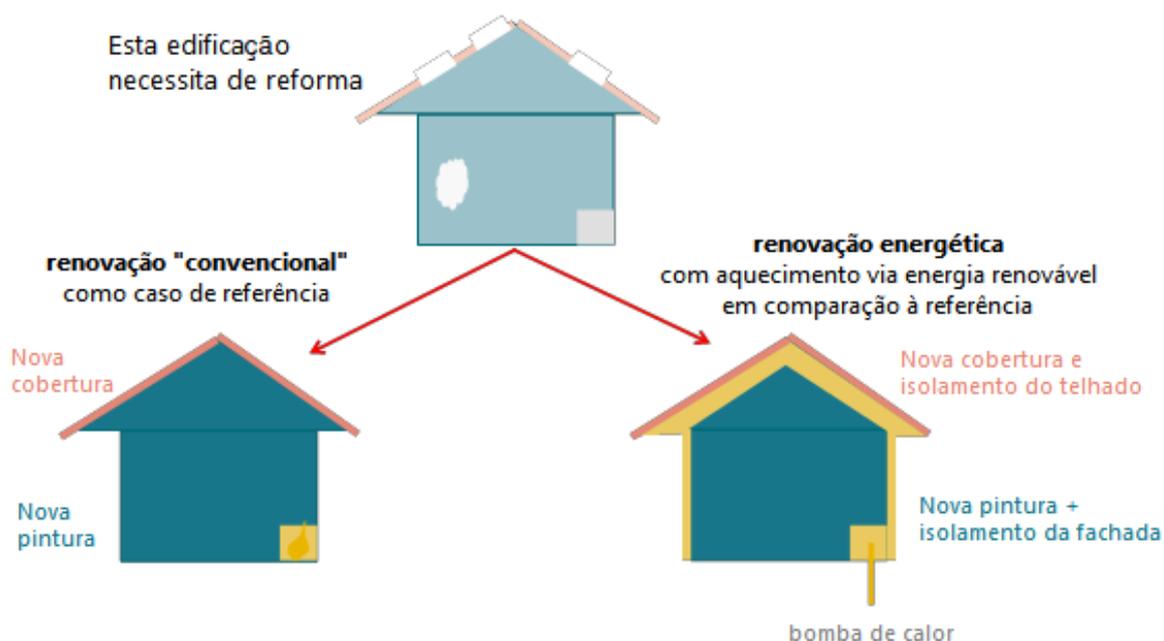
| Abordagem do projeto | |
|---|--|
| Ambiente (Urbano/ Suburbano/ Rural) | Foco em distritos urbanos e suburbanos, nos quais as densidades energéticas são mais altas do que em distritos rurais, o que torna as soluções baseadas em distritos mais atraentes. |
| Tamanho das edificações (Unifamiliar/Multifamiliar) | Foco em distritos que contenham edifícios residenciais multifamiliares, também por razões de potencial de atratividade para soluções distritais |
| Opções disponíveis de fonte de energia renovável (RES) | Foco em distritos onde um grande número de opções está disponível (tanto em termos de RES quanto em possibilidades de renovação da envoltória) para que seja possível a comparação de vários cenários. |
| Situação inicial | Foco em distritos atualmente aquecidos principalmente por combustíveis fósseis. |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Definido o distrito a ser avaliado, é então feita uma estimativa dos parâmetros físicos e térmicos das edificações. Como os valores são estimados, é possível utilizar valores padrão em função do período de construção ou última reforma da edificação (conforme padrões de construção utilizados na época). Segundo os autores, é possível também estimar esses parâmetros em função do consumo medido nas edificações (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

O passo seguinte do procedimento de avaliação é a definição e avaliação do caso de referência. Nesse caso de referência, são previstas intervenções na edificação que visam apenas restaurar a funcionalidade e aparência do edifício, que precisariam ser feitas de qualquer forma, sem a preocupação com os efeitos no desempenho energético da edificação (ALMEIDA; FERREIRA; RODRIGUES, 2017). A Figura 6 ilustra a comparação entre uma renovação energética com uma renovação “convencional”, característica do caso de referência.

Figura 6 – Comparação entre renovação “convencional” e renovação energética em uma edificação.



Fonte: Adaptado de Ott et al. (2017).

Quando uma renovação energética é feita quando uma renovação “convencional” é necessária, é possível que o investimento adicional para melhorar o desempenho energético da edificação seja mais fácil de ser compensado com os benefícios da maior eficiência energética resultante. De fato, algumas intervenções de renovação energética, como as realizadas na envoltória, compartilham muitos materiais e serviços em comum às intervenções de renovações que visam apenas restaurar a aparência da envoltória. Nada impede, porém, que as intervenções “convencionais” sejam suficientes para melhorar o desempenho energético da edificação, ainda que não fosse esse o objetivo (ALMEIDA; FERREIRA; RODRIGUES, 2017).

Por isso, para avaliar as relações de custo-benefício das renovações energéticas, a metodologia de análise do projeto do anexo 75 prevê a comparação da renovação “convencional” com a renovação energética. O procedimento de avaliação é feito considerando diferentes cenários de renovação, formados pela combinação de pacotes de medidas para o envelope das edificações e de medidas para os sistemas que envolvem a edificação (fornecimento de energia, aquecimento/refrigeração e aquecimento de água). A definição dos cenários é feita de modo que possibilite investigar diferentes níveis de eficiência energética do envelope das edificações, em combinação com vários tipos de sistemas (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

Para definição da renovação ideal, são então calculados os KPIs para todos os cenários definidos, inclusive o de referência. Para comparação entre os cenários, os resultados são analisados por meio de gráficos CEP *versus* custo e emissão *versus* custo. A Figura 7 apresenta

incertezas nos valores estimados, por exemplo, parâmetro que envolvem a previsão de custos futuros (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

Com o objetivo de apresentar uma aplicação da metodologia do projeto do anexo 75 do IEA-EBC, a seção 2.3.3 descreve um estudo de caso realizado em um distrito na região de Braga, em Portugal.

2.3.3 Demonstração do procedimento de avaliação do anexo 75

Uma análise de renovação distrital apresentada por Terés-Zubiaga et al. (2020) para demonstração da metodologia proposta no projeto do anexo 75 do IEA-EBC foi realizado no bairro Picoto, na região de Braga, no norte de Portugal. A Figura 8 apresenta uma vista aérea da área considerada para aplicação da metodologia, enquanto a Figura 9 apresenta uma visão geral do local.

Figura 8 – Vista aérea do Bairro Picoto



Fonte: Google Earth (2022).

Figura 9 – Vistas gerais dos edifícios do Bairro Picoto



Fonte: Terés-Zubiaga et al. (2020).

O clima da região é do tipo mediterrânico, com verões frescos e secos e invernos chuvosos, com classificação do tipo CSB no sistema de Köppen-Geiger. A temperatura média anual da região é de 14,2 °C, com variação de 8,4 °C a 20,3 °C do mês mais frio (janeiro) ao mais quente (julho) (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

O distrito estudado compreende 50 habitações unifamiliares de dois pavimentos, agrupadas em 7 blocos com orientações norte/sul ou leste/oeste, com área total condicionada de 1767 m². As edificações foram concebidas em 1990, com função de habitações de interesse social. Por serem construídas de forma a reduzir ao máximo o custo de construção, possuem baixa qualidade na construção, baixo desempenho energético e condições inadequadas de conforto térmico (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020). De maneira geral, as características da envoltória das edificações do bairro Picoto podem ser resumidas conforme Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades físicas dos elementos da envoltória das edificações de Picoto

| Elemento da envoltória | Características | Transmitância térmica – U (W/m ² K) |
|------------------------------------|--|--|
| Fachada do pavimento superior (F1) | Parede com 2 camadas de tijolos ocos (9 cm + 9 cm) | 1,10 |
| Fachada do pavimento inferior (F2) | Parede com camada única de blocos de concreto | 1,90 |
| Cobertura | Telha ondulada de amianto | 3,80 |
| Aberturas | Janelas de alumínio e vidro simples | 5,70 |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Quanto aos sistemas presentes nas edificações, para aquecimento do ambiente interno são utilizados aquecedores elétricos individualizados e para aquecimento doméstico de água são utilizadas caldeiras a gás em cada habitação. As rotinas de uso e ocupação das habitações são diversificadas e, por esse motivo, foram utilizados valores padrão conforme referências já bem estabelecidas no contexto português (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

Para análise do caso de referência, no qual é realizada uma renovação convencional em que é mantido o desempenho energético atual da edificação, foi utilizado o *software* EnergyPlus®. Por meio desse *software*, foram realizadas simulações para determinação das demandas de energia para aquecimento/refrigeração do ambiente e aquecimento doméstico de água (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020). Os resultados estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1 – Consumo energético simulado de aquecimento, refrigeração e aquecimento doméstico de água (DHW) para o caso de referência

| | Aquecimento | | Refrigeração | DHW |
|------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------|---------------------------|
| | (kWh/m ² .ano) | (kWh/ano) | (kWh/m ² .ano) | (kWh/m ² .ano) |
| Carga distrital | 164,31 | 290.335 | 7,33 | 26,16 |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Para análise das soluções para melhoria do desempenho energético do distrito, foram considerados cinco pacotes de medidas de renovação da envoltória (fachadas, cobertura e aberturas) e outros cinco pacotes de soluções de sistemas (fornecimento de energia, aquecimento, refrigeração, aquecimento doméstico de água e geração de energia renovável). As medidas foram escolhidas com base em estudos como o *Technology Overview* (MØRCK et al., 2020) que analisa tecnologias para melhoria do desempenho energético (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020). Os pacotes considerados estão apresentados, respectivamente, no Quadro 5 e Quadro 6.

Quadro 5 – Pacotes de reforma para melhoria da envoltória das edificações

| | Fachadas | Cobertura | Aberturas |
|---|--|----------------------------|---|
| P1 | ETICS MW 80 mm (F1 e F2) | Painel sanduíche PUR 30 mm | Janela de PVC e vidro duplo de baixa emissividade ($U=1,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) com proteção solar ($g=0,20$) |
| P2 | ETICS EPS 80 mm (F1 e F2) | Painel sanduíche MW 30 mm | Janela de alumínio e vidro duplo ($U=3,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $g=0,76$) |
| P3 | ETICS EPS 80 mm (F1 e F2) | Painel sanduíche PUR 30 mm | Janela de alumínio e vidro duplo ($U=3,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $g=0,76$) |
| P4 | ETICS EPS 80 mm (F1) e ETICS EPS 120 mm (F2) | Painel sanduíche MW 100 mm | Janela de alumínio e vidro duplo ($U=3,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $g=0,76$) |
| P5 | ETICS MW 160 mm (F1) e ETICS MW 200 mm (F2) | Painel sanduíche MW 100 mm | Janela de PVC e vidro duplo de baixa emissividade ($U=1,40 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$) com proteção solar ($g=0,20$) |
| ETICS – Sistema Composto de Isolamento Térmico Externo; MW – Lã Mineral; EPS – Poliestireno expandido; PUR – Espuma de poliuretano; PVC – Cloreto de polivinil; F1 – Fachada Tipo 1 (pavimento superior); F2 – Fachada Tipo 2 (pavimento inferior); g – Fator Solar | | | |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Quadro 6 – Pacotes de soluções de sistema de fornecimento de energia

| Sistema de fornecimento de energia (ESS) | Aquecimento | Refrigeração | Aquecimento doméstico de água (DHW) | Fonte de energia renovável |
|---|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|
| 1: Convencional descentralizado | Aquecedor elétrico $h=1$ | Multi-split EER=3 | Aquecedor de gás natural $h=0,71$ | - |
| 2: Bomba de calor centralizada | Bomba de calor COP/SCOP=4,06/3,77 | Bomba de calor EER/SEER=3,97/8,41 | Bomba de calor COP=4,10 | - |
| 3: Bomba de calor centralizada + ST | Bomba de calor COP/SCOP=4,06/3,77 | Bomba de calor EER/SEER=3,97/8,41 | Bomba de calor COP=4,10 | ST (DHW) |
| 4: Bomba de calor centralizada + PV | Bomba de calor COP/SCOP=4,06/3,77 | Bomba de calor EER/SEER=3,97/8,41 | Bomba de calor COP=4,10 | PV |
| 5: Caldeira de biomassa centralizada | Caldeira de biomassa $h=1,07$ | (zero) | Caldeira de biomassa $h=1,07$ | - |
| ST – Painéis solares térmicos; PV – Painéis fotovoltaicos; EER – Índice de eficiência energética (<i>Energy efficiency ratio</i>); SEER – Índice de eficiência energética sazonal (<i>Seasonal energy efficiency ratio</i>); COP – Coeficiente de desempenho (<i>Coefficient of performance</i>); Coeficiente de desempenho sazonal (<i>Seasonal Coefficient of Performance</i>); | | | | |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

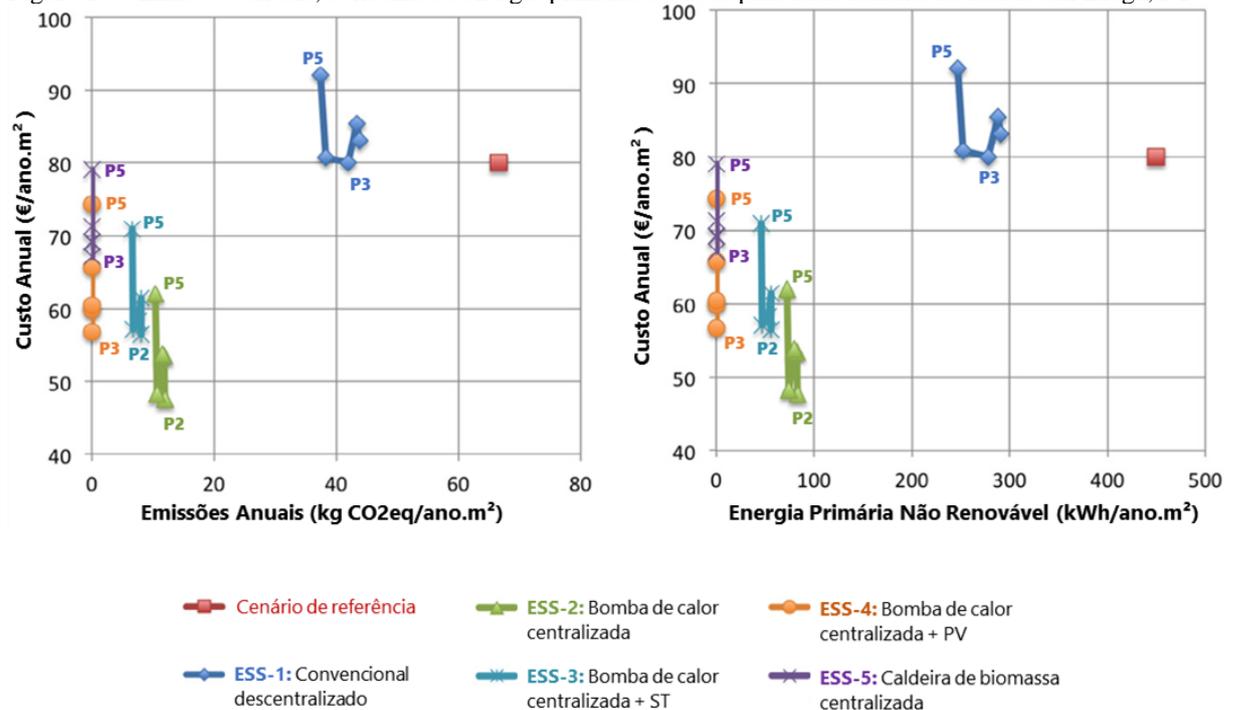
As simulações dos possíveis cenários de reforma foram também feitas no *software EnergyPlus®*, no qual foram consideradas, para cada solução de sistema, as cinco possibilidades

de reforma da envoltória. Os sistemas centralizados foram projetados para atender totalmente as demandas de aquecimento/refrigeração e aquecimento doméstico de água, com exceção do sistema de caldeira de biomassa, que não atende às demandas de refrigeração. Para cada sistema de bomba de calor, foi considerado um sistema de geração de energia renovável: um sistema de painéis solares térmicos, dimensionado para compensar as demandas de aquecimento doméstico de água, e um sistema fotovoltaico para compensar as demandas totais de energia primária (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

No que se refere à análise econômica, o custo de investimento para implantação das medidas de renovação da envoltória e dos sistemas (incluindo todos os custos para implantação da infraestrutura das redes de fornecimento) foi levantado por meio de fornecedores do mercado português e de bases de custos utilizadas pelos profissionais da Construção Civil em Portugal. Os custos de energia considerados, conforme valores de referência portugueses, foram de 0,21 €/kWh para eletricidade e 0,06 €/kWh para gás natural. Por fim, para análise da evolução dos custos, foi considerada uma taxa de juros de 5% ao ano (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

Uma vez obtidos os resultados nos estudos dos cenários, foi então dispostos em dois gráficos as emissões anuais de gases de efeito estufa e o consumo de energia primária não renovável, cada um deles comparados com os custos de cada cenário, conforme Figura 10.

Figura 10 – Emissões anuais, consumo de energia primária e custos para cada cenário do estudo em Braga, PT



Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Os cenários com menores custos de implementação foram aqueles cujo pacote de sistemas considerado foi o ESS-2, nos quais os custos variaram entre 47,60 €/ano.m² e 62,05 €/ano.m² em função do pacote de reforma da envoltória adotado. No que se refere ao desempenho energético, os cenários que tiveram melhores resultados foram os referentes aos pacotes de sistemas ESS-4 e ESS-5, que resultaram em um distrito com emissão zero de gases do efeito estufa (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020). No que se refere ao custo-benefício das medidas para envoltória, o pacote com custo ideal é P3, quando usados os sistemas ESS-1, ESS-4 e ESS-5, ou P2, quando usados os sistemas ESS-2 e ESS-3 (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

De maneira geral, quando comparadas ao caso de referência, todas as abordagens centralizadas se mostraram econômicas, enquanto as medidas com sistemas descentralizados apresentaram custo mais elevado. Por fim, a intervenção que apresentou o custo ideal para o bairro Picoto foi a resultante da combinação entre os pacotes P2 e ESS-2 (TERÉS-ZUBIAGA et al., 2020).

3 METODOLOGIA

Para a análise dos diferentes cenários de renovação energética com uso de fontes de energia renovável e definir uma solução de reforma mais econômica, adotou-se no presente trabalho a metodologia com as seguintes etapas:

1. Revisão Bibliográfica;
2. Levantamento de dados do estudo de caso escolhido;
3. Análise dos cenários de renovação energética dos edifícios;
4. Comparação dos resultados e definição do cenário com melhor custo-benefício.

Cada uma das etapas acima listadas está detalhada no presente capítulo.

3.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etapa de revisão bibliográfica compreendeu o estudo aprofundado dos conceitos que envolvem os temas de eficiência energética e fontes de energia renovável. Além disso, também foram estudadas as regulamentações de avaliação de eficiência energética no mundo e no Brasil, com ênfase maior nas regulamentações da Agência Internacional de Energia (IEA).

Dentre as regulamentações da IEA, a revisão bibliográfica foi direcionada no estudo das publicações a respeito do projeto do anexo 75 do programa IEA-EBC, em especial o artigo de Terés-Zubiaga et al. (2020), que descreve a metodologia do projeto. Para informações complementares do projeto do anexo 75, foram revisadas também as publicações a respeito do projeto do anexo 56, dentre elas os textos de Almeida et al (2017).

3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS DO ESTUDO DE CASO ESCOLHIDO

O estudo de caso escolhido foi um distrito formado pelos edifícios multifamiliares do bairro André Carloni, no município de Serra/ES. O objeto de estudo foi selecionado de acordo com a abordagem proposta na metodologia do anexo 75, como apresentado no Quadro 3 apresentado no Capítulo 2.

Nesta etapa da metodologia, foram levantados os dados climáticos do local, as disposições construtivas gerais dos edifícios e os parâmetros térmicos e energéticos dos componentes das edificações que compõem o distrito. Um resumo com todos os dados necessários para o estudo de caso encontra-se identificado no Quadro 7.

Quadro 7 - Dados necessários para análise do estudo de caso

| Grupo | Dados necessários |
|-----------------------------------|--|
| Dados climáticos | Classificação do clima |
| | Temperatura média anual |
| | Temperatura média mensal do mês mais quente |
| | Temperatura média mensal do mês mais frio |
| Disposições construtivas | Número de edifícios e número de apartamentos no distrito |
| | Posição e orientação de cada edifício do distrito |
| | Dimensões externas e internas dos edifícios |
| | Área total construída e área total dos ambientes de permanência prolongada |
| | Materiais construtivos empregados na envoltória dos edifícios |
| Parâmetros térmicos e energéticos | Absortância solar (adimensional) |
| | Capacidade térmica (kJ/m ² K) |
| | Fator solar, para materiais envidraçados (adimensional) |
| | Transmitância térmica (W/m ² K) |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os dados climáticos para caracterização do clima do local foram coletados da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As disposições construtivas do distrito, por sua vez, foram obtidas por meio dos projetos arquitetônicos e de implantação dos edifícios. Por fim, os parâmetros térmicos e energéticos dos componentes da envoltória que possuem influência direta no desempenho energético do edifício foram obtidos conforme a norma ABNT NBR 15.575:2021.

Além desses dados, nesta etapa também foram coletadas as características e parâmetros de desempenho/eficiência dos sistemas de aquecimento/refrigeração do ambiente interno e aquecimento doméstico de água das edificações do distrito. Tais parâmetros são necessários para o cálculo do consumo de energia dos respectivos sistemas, como detalhado na seção 3.3. Os parâmetros utilizados para os diferentes sistemas estão dispostos no Quadro 8.

Quadro 8 – Parâmetros utilizados para os diferentes sistemas da edificação

| Característica do sistema | Parâmetro |
|--|--|
| Sistema de refrigeração/aquecimento descentralizados de velocidade fixa, com potência inferior a 60.000 BTU/h (ar condicionado de janela e <i>split</i>) | Coeficiente de performance – COP |
| Sistema de refrigeração/aquecimento descentralizados de velocidade variável, com potência inferior a 60.000 BTU/h (ar condicionado <i>split inverter</i>) | Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal – IDRS |
| Sistema de refrigeração/aquecimento central, com potência superior a 60.000 BTU/h | <i>System part-load value</i> – SPLV (valor de carga parcial do sistema) |
| Sistema de aquecimento doméstico de água | Coeficiente de rendimento do equipamento |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

3.3 ANÁLISE DOS CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO ENERGÉTICA

Para a avaliação das alternativas de renovação energética do distrito, foram definidos pacotes de reforma para melhoria da envoltória dos edifícios e pacotes de soluções de sistema de fornecimento de energia, de maneira similar ao que foi proposto para o estudo de caso do bairro Picoto, apresentado no Capítulo 2. Os pacotes foram definidos com base não só nas tecnologias apresentadas no documento *Technology Overview* (MØRCK et al., 2020), do anexo 75, como também em tecnologias adaptadas às condições climáticas e ao mercado brasileiro.

Para a renovação da envoltória, foi definida a instalação nas paredes de um sistema de isolamento térmico externo (ETICS) em EPS, com placas isolantes com espessura de 25 mm. Tal sistema foi escolhido para análise por se tratar de uma tecnologia apresentada no *Technology Overview* do Anexo 75 com disponibilidade no mercado brasileiro, além de já ter sido aplicada no estudo de Teréz-Zubiaga et al. (2020), porém com espessura diferente. A espessura de 25 mm definida é a menor disponível pelo fabricante e foi escolhida dessa maneira por se tratar de um estudo inicial. A escolha do núcleo em EPS deve-se à disponibilidade do mercado, uma vez que não foram encontradas referências de preço de sistema ETICS com outro material isolante no Brasil. Como referência para o isolamento térmico externo, foi utilizada as especificações do sistema StoTherm Classic, da marca Sto, com acabamento na cor branca. A Figura 11 mostra os componentes desse sistema.

Figura 11 – Sistema de isolamento térmico externo StoTherm

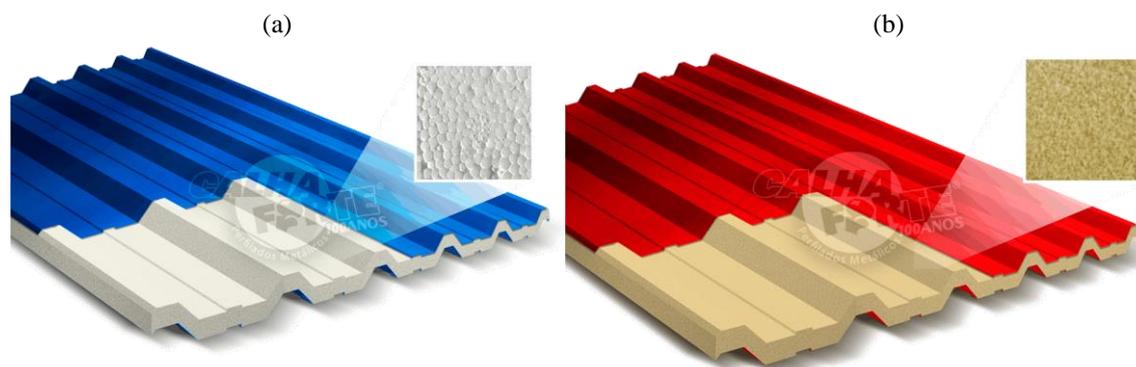


Fonte: Sto Brasil (2022).

Para a cobertura, foi definida a instalação de telhas termoacústicas, no primeiro cenário com núcleo em poliuretano e no segundo cenário com núcleo em EPS, em ambos os casos com núcleo isolante com espessura de 30 mm. A escolha da telha com núcleo em poliuretano foi motivada pela sua aplicação no estudo de Teréz-Zubiaga et al. (2020), enquanto a escolha da

telha com núcleo em EPS deve-se à possibilidade de utilização do mesmo material isolante aplicado nas paredes pelo uso do sistema ETICS. A referência utilizada para a cobertura foram as telhas da marca Calha Forte, com chapas de aço galvanizado trapezoidal com altura de 40 mm e pintura eletrostática na cor branca. A Figura 12 exemplifica os modelos de telha com essas especificações.

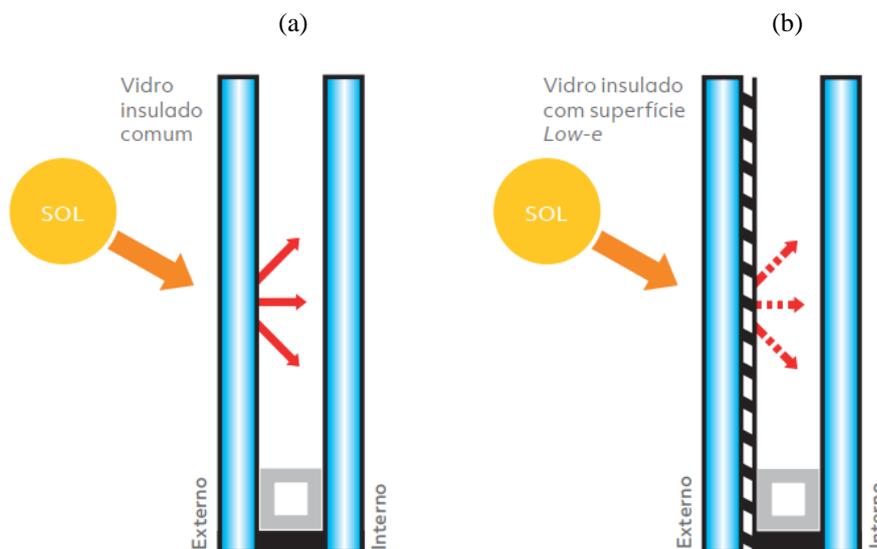
Figura 12 – Telhas termoacústicas da Calha Forte, com núcleo em (a) EPS e (b) poliuretano



Fonte: Calha Forte (2022).

Para as aberturas, foi proposta a instalação de esquadrias de alumínio e vidro duplo (insulado). No primeiro cenário, foi considerado o uso de duas camadas de vidros com espessura de 6 mm, separadas por uma câmara de ar de 12,5 mm. A escolha dessas tecnologias deve-se a sua aplicação no estudo de Teréz-Zubiaga et al. (2020), além de serem opções disponíveis no mercado. Como referência, foram utilizadas as especificações do vidro monolítico *incolor* da marca Cebrace. No segundo cenário, foi considerado o uso de uma camada interna com o mesmo vidro monolítico *incolor* e outra externa com vidro de proteção solar da família *Cool Lite* – Linha K neutro (K164), da marca Cebrace, que possui uma superfície (película) de proteção de baixa emissividade (*low-e*). A Figura 13 ilustra o funcionamento dos vidros de cada cenário.

Figura 13 – Esquema do funcionamento do vidro insulado do (a) primeiro e (b) segundo cenário



Fonte: Westphal (2016).

Os pacotes definidos para análise dos cenários de renovação da envoltória estão dispostos no Quadro 9.

Quadro 9 – Pacotes definidos para a renovação da envoltória

| | Fachadas | Cobertura | Aberturas |
|----|--|---|---|
| P1 | Sistema de Isolamento Térmico Externo (ETICS) em EPS, com esp. = 25 mm | Telhas termoacústicas com núcleo em poliuretano, com esp. = 30 mm | Janelas de alumínio e vidro duplo |
| P2 | Sistema de Isolamento Térmico Externo (ETICS) em EPS, com esp. = 25 mm | Telhas termoacústicas com núcleo em EPS, com esp. = 30 mm | Janelas de alumínio e vidro duplo com película <i>low-e</i> |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Para os sistemas de fornecimento de energia, foram definidas para o aquecimento/refrigeração do ambiente duas soluções, uma delas centralizada e outra descentralizada. No caso da solução descentralizada, foi adotada para cada ambiente de permanência prolongada das unidades habitacionais a instalação de um aparelho *split inverter*, que possui maior eficiência do que aparelhos *split* convencionais (*on/off*). A escolha de um sistema descentralizado foi motivada pela possibilidade de comparação com sistemas centralizados, que são objeto de estudo do Anexo 75. O modelo *inverter* foi escolhido para que houvesse melhoria no desempenho energético em relação ao modelo convencional de *split*, que é menos eficiente. Como referência, foi utilizado o aparelho Springer Split Hi Wall inverter quente/frio 18.000 BTU/h da marca Midea. A capacidade do aparelho foi adotada com valor superior ao maior valor de carga

térmica obtido nas simulações dos edifícios estudados (ver item 3.3.1). A Figura 14 apresenta os principais componentes desse sistema.

Figura 14 – Unidade evaporadora e condensadora do sistema *split inverter* (sem escala)



Fonte: Adaptado de Midea (2022a).

Para a solução centralizada, por sua vez, foi adotada a instalação de aparelhos VRF (*Variable refrigerant flow*), sistema no qual uma unidade condensadora externa atende um conjunto de unidades evaporadoras internas. Para a análise dessa solução, foi considerada a instalação de uma unidade condensadora para atender 16 a 24 unidades evaporadoras, localizadas nos ambientes de permanência prolongada de 8 unidades habitacionais. A escolha da tecnologia VRF deve-se à similaridade com a tecnologia *split* no que se refere à instalação em edificações existentes, uma vez que não requer intervenções severas na estrutura do edifício em que é instalado. Como referência, foi utilizado o aparelho VRF inverter Midea V6 quente/frio, com condensadora 18 HP 172.800 BTU/h e evaporadoras Hi Wall HP 9.600 BTU/h da marca Midea. A capacidade do aparelho foi adotada com valor superior ao maior valor de carga térmica obtido nas simulações dos edifícios estudados (ver item 3.3.1). A Figura 15 apresenta os principais componentes desse sistema.

Figura 15 – Unidades evaporadoras e unidade condensadora do sistema VRF (sem escala)



Fonte: Adaptado de Midea (2022b).

Um outro cenário foi proposto considerando o uso de painéis fotovoltaicos como fonte de energia renovável com a solução centralizada para o condicionamento do ar. Os painéis fotovoltaicos foram adotados por serem uma opção apresentada no *Technology Overview* com aplicação no Brasil. Como referência, foram utilizados os painéis fotovoltaicos da marca Sunova Solar, apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Kit de painéis fotovoltaicos



Fonte: NeoSolar (2022).

Os painéis utilizados para a análise estão especificados no Quadro 10.

Quadro 10 – Especificações do painel utilizado como fonte de energia renovável

| Modelo do painel | Rendimento (Potência/m ²) | Dimensões | Potência |
|---|---------------------------------------|---------------------|----------|
| Painel Sunova Solar Células 144 Si-Monocristalino | 21,28% | 2279 x 1134 x 40 mm | 550 Wp |

Fonte: NeoSolar (2022).

Os pacotes definidos para análise dos cenários de renovação dos sistemas estão dispostos no Quadro 11.

Quadro 11 – Pacotes de soluções definidas para o sistema de fornecimento de energia

| Sistema de fornecimento de energia (ESS) | Aquecimento / Refrigeração | Aquecimento doméstico de água (DHW) | Fonte de energia renovável |
|--|--|-------------------------------------|----------------------------|
| 1: Sistema comum descentralizado | Sistema de refrigeração/aquecimento por aparelho <i>split inverter</i> , em cada unidade | Chuveiro elétrico | - |
| 2: Sistema centralizado com VRF | Sistema de refrigeração/aquecimento central do tipo VRF (fluxo de refrigerante variável) | Chuveiro elétrico | - |
| 3: Sistema centralizado com VRF + PV | Sistema de refrigeração/aquecimento central do tipo VRF (fluxo de refrigerante variável) | Chuveiro elétrico | Painéis fotovoltaicos |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

Não foram consideradas soluções centralizadas para o aquecimento de água, pois acarretaria em intervenções mais severas nos edifícios, o que tornaria a análise muito mais complexa. Também não foram adotadas as soluções *district heating* e *district cooling*, pois são soluções com pouca aplicação no Brasil, de forma que sua adoção teria resultados um pouco fora da realidade.

A análise dos cenários de renovação, bem como do caso de referência, foi realizada conforme procedimento estabelecido por Terés-Zubiaga, Bolliger et al. (2020), cujas etapas estão listadas nos itens 3.3.1 a 3.3.3.

3.3.1 Cálculo da demanda de energia do distrito

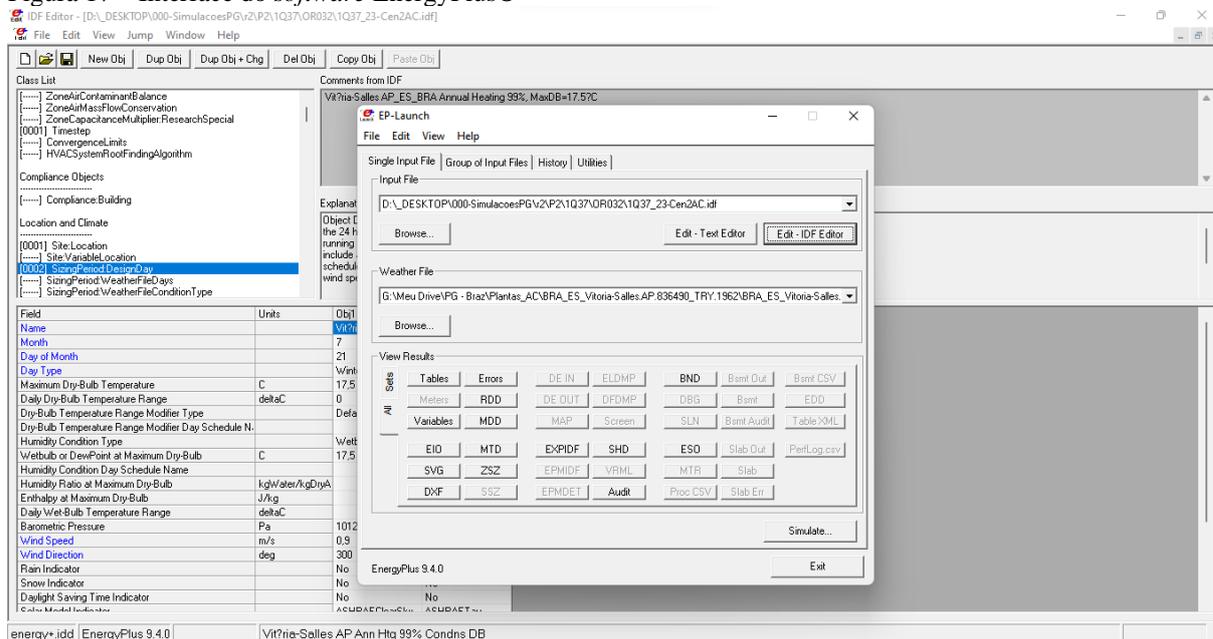
O primeiro passo para a análise dos cenários de renovação energética do edifício foi o cálculo da sua demanda energética para o aquecimento e refrigeração do ambiente interno. Nesta etapa, foram consideradas as condições climáticas, definidas de acordo com os dados climáticos

coletados na etapa anterior, e o desempenho da envoltória, variável em função dos pacotes definidos, para análise dos ganhos e perdas de calor do ambiente interno e respectiva demanda energética em função da variação de calor no ambiente interno.

Para o cálculo da demanda energética para aquecimento no inverno, em que as temperaturas externas podem ser inferiores à necessária para o conforto, a variação de calor foi obtida por meio do cálculo das perdas de calor pela envoltória, descontadas do ganho de calor pelo uso e ocupação do ambiente interno. Já para o cálculo da demanda energética para refrigeração no verão, em que as temperaturas externas podem ser superiores à necessária para o conforto, a variação de calor foi obtida por meio do cálculo do ganho de calor pela envoltória, acrescido dos ganhos de calor pelo uso e ocupação do ambiente interno.

Para o cálculo da demanda energética para aquecimento e refrigeração, foi utilizado o *software* de simulações dinâmicas *EnergyPlus®*, que possibilita a entrada de parâmetros climáticos e propriedades da envoltória para determinação do consumo de energia da edificação. A interface desse *software* é apresentada na Figura 17.

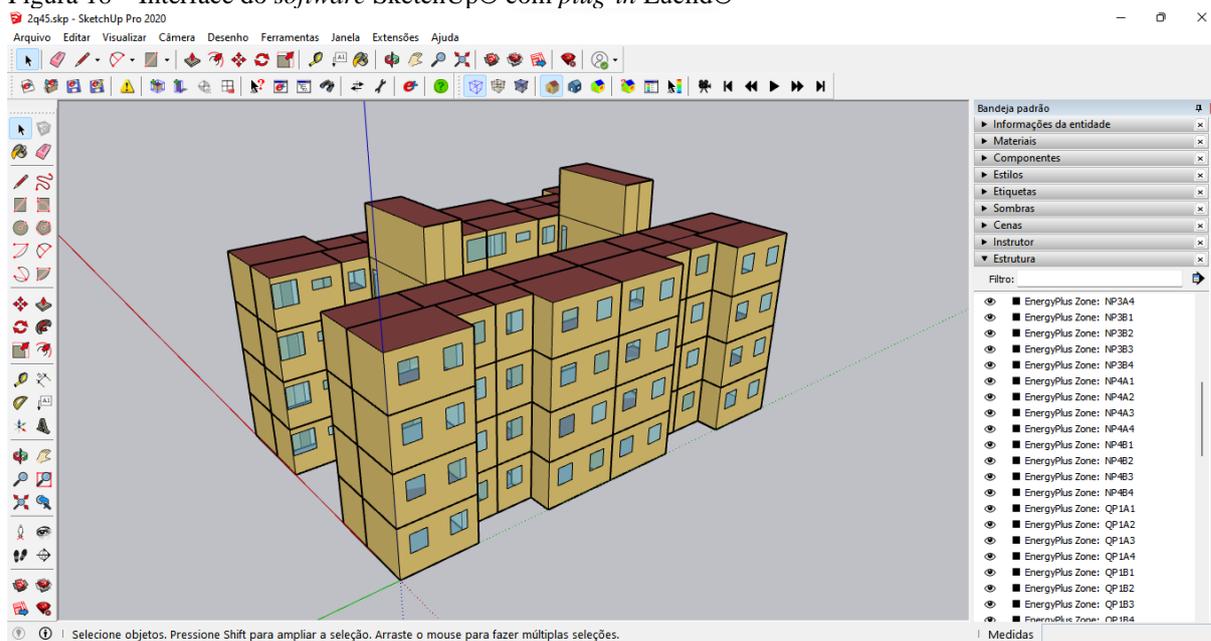
Figura 17 – Interface do *software* EnergyPlus®



Fonte: EnergyPlus® (2022).

Para a inserção dos dados para a simulação no EnergyPlus®, além da interface do próprio *software*, foi utilizado para definição das propriedades geométricas dos edifícios o *plug-in* Euclid® para o *software* SketchUp® de modelagem 3D. A Figura 18 apresenta a interface do SketchUp® com modelo de edifício obtido com o uso do *plug-in* Euclid®.

Figura 18 – Interface do *software* SketchUp® com *plug-in* Euclid®



Fonte: SketchUp® (2022).

Os edifícios foram agrupados de acordo com sua orientação espacial e dimensões, e para cada grupo de edifícios, foi simulado um representante separadamente. Na modelagem 3D dos edifícios, foi considerada em cada arquivo de simulação apenas a geometria do próprio edifício simulado, isto é, neste trabalho não foi considerada a influência do sombreamento de edifícios vizinhos no desempenho energético. A demanda energética total do distrito foi obtida por meio da soma dos resultados obtidos nas simulações individuais.

3.3.2 Cálculo do consumo de energia primária e das emissões de carbono

De posse da demanda energética para aquecimento e refrigeração do distrito, o próximo passo para análise dos cenários foi a determinação do consumo de energia primária do edifício, isto é, a quantidade de energia fornecida ao distrito para atender a sua demanda total de energia, e o total de emissões de carbono do distrito. Para determinação do consumo de energia primária e das emissões de carbono, foram utilizados fatores de conversão nacionais médios, fornecidos pelo Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E), conforme disposto na Tabela 2 e Tabela 3.

Tabela 2 – Evolução anual dos fatores de conversão de eletricidade e gás em energia primária – Brasil

| Energia/Ano | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | Média |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|
| Eletricidade | 1,7048 | 1,5724 | 1,5850 | 1,5323 | 1,5411 | 1,6 |
| Gás | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 | 1,1 |

Fonte: Kamimura et al. (2020).

Tabela 3 – Evolução dos fatores de emissão de CO₂ para eletricidade (SIN) – Brasil

| Ano | Fator de emissão de CO ₂ (tCO ₂ /MWh) | Média últimos 5 anos |
|------|--|----------------------|
| 2007 | 0,0293 | - |
| 2008 | 0,0484 | - |
| 2009 | 0,0246 | - |
| 2010 | 0,0512 | - |
| 2011 | 0,0292 | 0,037 |
| 2012 | 0,0653 | 0,044 |
| 2013 | 0,096 | 0,053 |
| 2014 | 0,1315 | 0,075 |
| 2015 | 0,1244 | 0,090 |
| 2016 | 0,0817 | 0,101 |
| 2017 | 0,0927 | 0,106 |
| 2018 | 0,074 | 0,102 |
| 2019 | 0,075 | 0,090 |

Fonte: Kamimura et al. (2020).

A metodologia de cálculo do consumo de energia primária e das emissões de carbono é a mesma utilizada pela Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais (INI-R). Para o cálculo do consumo de energia primária foi utilizada a Equação (1), apresentada na INI-R, que considera, além da demanda de energia para aquecimento e refrigeração, a energia necessária para o aquecimento de água doméstica, ventilação, iluminação e sistemas técnicos integrados que influenciam no desempenho energético da edificação. A energia gerada por fontes de energia renováveis, quando presente no cenário avaliado, foi subtraída do total de energia primária consumida.

$$C_{EP} = C_{EE} \cdot fc_E + C_{ET} \cdot fc_T - G_{EE} \cdot fc_E \quad (1)$$

Onde:

- C_{EP} : Consumo total de energia primária (kWh/ano);
- C_{EE} : Consumo total de energia elétrica (kWh/ano);
- C_{ET} : Consumo total de energia térmica (kWh/ano);
- G_{EE} : Energia gerada por fontes locais de energia renovável (kWh/ano);
- fc_E : Fator de conversão de energia elétrica em energia primária;
- fc_T : Fator de conversão de energia térmica em energia primária.

A da energia gerada por fontes locais de energia renovável foi calculada em função das especificações dos painéis fotovoltaicos e do número de horas de sol pleno (HSP) médio da região da Grande Vitória, por meio da Equação (2). Para simplificar a obtenção da quantidade de energia gerada, foi considerada apenas a equação e, desse modo, não foram realizadas simulações em diferentes orientações e declividades da cobertura. Para o cálculo do consumo, foi considerado um percentual de 20% para perdas técnicas na geração de energia, que corresponde a uma eficiência $\eta = 0,8$.

$$G_{EE} = HSP \cdot N_{PV} \cdot P_{PV} \cdot \eta \cdot N_{dias} \quad (2)$$

Onde:

- G_{EE} : Energia gerada por fontes locais de energia renovável (kWh/ano);
 HSP : Número de horas de sol pleno (irradiância solar igual a 1000 W/m²) (horas/dia);
 N_{PV} : Número de painéis fotovoltaicos instalados;
 P_{PV} : Potência de cada painel fotovoltaico (kWp);
 η : Eficiência de cada painel fotovoltaico;
 N_{dias} : Número de dias no ano.

Como nenhum dos cenários explora o uso direto de energia térmica, os cálculos necessários para o cálculo de C_{ET} definidos pela INI-R não serão apresentados neste trabalho. Para o cálculo do consumo de energia elétrica C_{EE} foi utilizada a Equação (3), que considera parcelas de consumo para refrigeração, aquecimento do ambiente, aquecimento de água e equipamentos.

$$C_{EE} = C_R + C_A + C_{AAE} + C_{EQ} \quad (3)$$

Onde:

- C_{EE} : Consumo total de energia elétrica (kWh/ano);
 C_R : Consumo de energia elétrica para refrigeração (kWh/ano);
 C_A : Consumo de energia elétrica para aquecimento (kWh/ano);
 C_{AAE} : Consumo do sistema de aquecimento de água proveniente de fontes de energia elétrica (kWh/ano);
 C_{EQ} : Consumo médio estimado de energia elétrica dos equipamentos (kWh/ano).

Cada uma das parcelas de consumo foi calculada por meio de outra equação definida pela INI-R. Para o cálculo do consumo de energia para refrigeração e aquecimento, a Equação (4) e a Equação (5), respectivamente, consideram a carga térmica obtida pela simulação e a eficiência do sistema para converter energia elétrica em calor.

$$C_R = \frac{CgT_R}{CEE_R} \quad (4)$$

Onde:

- C_R : Consumo de energia elétrica para refrigeração (kWh/ano);
 CgT_R : Carga térmica de refrigeração (kWh/ano);
 CEE_R : Coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (W/W).

$$C_A = \frac{CgT_A}{CEE_A} \quad (5)$$

Onde:

- C_A : Consumo de energia elétrica para aquecimento (kWh/ano);
 CgT_A : Carga térmica de aquecimento (kWh/ano);
 CEE_A : Coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para aquecimento (W/W).

Conforme recomendação da INI-R, para o sistema de condicionamento operando para aquecimento, foi adotado $CEE_A = 3,0$ para o aparelho *split* do caso de referência e, para os demais cenários, o valor fornecido pelo fabricante. Para o sistema operando para refrigeração, por sua vez, o valor de CEE_R foi adotado de acordo com os parâmetros do Quadro 8, em função das características do sistema. Para os sistemas centralizados (cenários 2 e 3) foi calculado o valor de SPLV, para o sistema descentralizado *split* (caso de referência), foi obtido o COP_R do fabricante e utilizada a relação $CEE_R = 1,062 \cdot COP_R$ definida pela INI-R, e para o sistema descentralizado *split inverter* (cenário 1), foi obtido do Inmetro, através do endereço eletrônico indicado na INI-R, o valor de IDRS e utilizada a relação apresentada na Equação (6).

$$CEE_R = \frac{CgT_R}{(CgT_R/IDRS) + Wvent} \quad (6)$$

Onde:

- CEE_R : Coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (W/W);
 CgT_R : Carga térmica de refrigeração (kWh/ano);
 $IDRS$: Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (Wh/Wh);
 $Wvent$: Potência do equipamento de renovação de ar (kW).

A renovação de ar dos ambientes condicionados por sistemas *split* e central foi considerada por meio de aparelhos dedicados, cuja potência é fornecida pelo fabricante. Os modelos considerados, bem como as respectivas informações de desempenho, dos aparelhos utilizados no caso de referência e nos cenários analisados estão listados no Quadro 12.

Quadro 12 – Parâmetros para cálculo do consumo de energia elétrica para refrigeração e aquecimento.

| Sistema | Modelo adotado | Parâmetros de eficiência | CEE _R (W/W) | CEE _A (W/W) |
|---------------------------|--|---|---------------------------|---------------------------|
| <i>Split convencional</i> | Springer Midea AirVolution 18.000 BTU/h quente/frio | COP _R =3,24 W/W | 3,44 | 3,00 |
| <i>Split inverter</i> | Springer Midea Split Hi Wall inverter quente/frio 18.000 BTU/h | IDRS = 6,00 Wh/Wh W _{vent} = 0,046 kW | 6,00 | 6,00 |
| VRF | VRF Inverter Midea V6 quente/frio – Condensadora 18 HP 172.800 BTU/h e evaporadoras Hi Wall 1 HP 9.600 BTU/h | SPLV = 8,01 W/W COP=4,75 W/W | 8,01 | 4,75 |

Fonte: Adaptado de Midea (2022a, 2022b, 2022c) e INMETRO (2022).

A parcela de consumo necessário para o aquecimento de água foi obtida em função da quantidade de calor necessário para aquecer um volume estimado de água a ser consumida pela população atendida das edificações. Foi utilizada para o cálculo a Equação (7), que simplifica a metodologia de cálculo apresentada pela INI-R para o contexto deste trabalho.

$$C_{AAE} = N_{ano} \cdot \left(\frac{\rho \cdot C_p \cdot V_{dia,E} \cdot (\theta_{A,uso} - \theta_{A,0})}{3600} \right) \cdot \frac{1}{r_{aq,e}} \quad (7)$$

Onde:

C_{AAE} : Consumo do sistema de aquecimento de água proveniente de fontes de energia elétrica (kWh/ano);

N_{ano} : Número de dias de ocupação ao ano;

ρ : Massa específica da água (kg/L);

C_p : Calor específico da água (kJ/g.°C);

$V_{dia,E}$: Volume diário de consumo de água quente em sistemas elétricos (m³/dia);

$\theta_{A,uso}$: Temperatura de uso da água (°C);

$\theta_{A,0}$: Temperatura da água fria (°C).

Os valores de massa específica e calor específico da água adotados foram, respectivamente, 1,00 kg/L e 4.180 kJ/g.°C. Quanto a temperatura da água, com base nas informações fornecidas pela INI-R, foi adotado o valor mínimo estabelecido na INI-R de 40 °C para a temperatura de uso da água e o valor estabelecido na INI-R de 24,4 °C para a temperatura de água fria, correspondente a média anual de temperatura de bulbo seco em Vitória/ES. Para o cálculo do volume diário de consumo, foi considerado o índice mínimo de 50 L/pessoa/dia estabelecido na INI-R.

A parcela de consumo médio estimado dos equipamentos elétricos das edificações foi calculada em função do número de pessoas atendidas, de acordo com a Equação (8) apresentada na INI-R.

$$C_{EQ} = (44,6 + 26,6 \cdot N_{hab}) \cdot 12 \quad (8)$$

Onde:

C_{EQ} : Consumo médio estimado de energia elétrica dos equipamentos (kWh/ano);

N_{hab} : Número de habitantes.

Para o cálculo da emissão total de dióxido de carbono, em função do consumo de energia elétrica, foi utilizado o fator da Tabela 3 referente ao ano de 2019 (0,09 tCO₂/MWh) na Equação (9) apresentada na INI-R. Como nenhum dos cenários explora o uso direto de energia térmica, não foi considerada a parcela de contribuição de energia térmica e o respectivo fator de conversão.

$$E_{CO_2} = \frac{C_{EE} \cdot fe_E + C_{ET} \cdot fe_T - G_{EE} \cdot fe_E}{1000} \quad (9)$$

Onde:

E_{CO_2} : Emissão total de dióxido de carbono (tCO₂/MWh);

C_{EE} : Consumo total de energia elétrica (kWh/ano);

C_{ET} : Consumo total de energia térmica (kWh/ano);

G_{EE} : Energia gerada por fontes locais de energia renovável (kWh/ano);

fe_E : Fator de emissão de dióxido de carbono na geração de energia elétrica (kg.CO₂/kWh);

fe_T : Fator de emissão de dióxido de carbono na queima de combustível (kg.CO₂/kWh).

Como explicado por Kamimura et al. (2020), ainda não existem dados suficientes para mensurar a emissão dos outros gases do efeito estufa além do CO₂ nos processos de geração de energia no Brasil e, assim, determinar os fatores de emissão em CO₂ eq, indicador mais utilizado internacionalmente. Por isso, os resultados foram limitados à valores de tCO₂.

3.3.3 Cálculo dos custos globais para renovação

Para avaliação do custo-benefício dos cenários de renovação, foi utilizado como parâmetro um custo global para renovação, que inclui:

- a) Custos de investimento inicial, referente aos custos necessários para planejamento e construção, custo com mão-de-obra, impostos, dentre outros custos despendidos até o momento da execução da renovação;
- b) Custos de substituições ao longo da vida útil das edificações, referentes aos custos de substituição periódica de elementos construtivos ao fim de sua vida útil, e valor residual de elementos substituídos;

- c) Custos operacionais, referentes às tarifas de energia, custos de manutenção e demais custos operacionais das edificações.

Para determinação dos custos de investimento inicial, foram elaboradas composições de preços unitários dos serviços necessários para a execução da renovação da envoltória e dos sistemas. O custo de execução do sistema ETICS foi estimado por meio da empresa Mares Soluções Construtivas, que é representante da marca Sto e executa a solução StoTherm® de isolamento externo. Os custos dos sistemas de condicionamento de ar foram estimados por meio da empresa Frigelar, que fornece tanto a tecnologia *Split* quanto a de VRF. No caso dos sistemas de condicionamento de ar, foram também coletados com os fornecedores informações como valor médio de manutenção e vida útil desses sistemas. Os custos da instalação dos painéis fotovoltaicos, por sua vez, foram estimados por meio da empresa NeoSolar. Todos esses custos foram valores médios estimados pelos representantes comerciais dessas empresas, uma vez que os valores reais só poderiam ser obtidos com base em projetos executivos, cuja elaboração não era o foco do presente trabalho.

As composições dos demais serviços foram baseadas nas planilhas de referência do Departamento de Edificações e de Rodovias do Estado do Espírito Santo (DER-ES) e do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI). Sobre os custos de execução dos serviços das intervenções, foi aplicada a taxa de 30,9% de BDI (benefícios e despesas indiretas), recomendada pelo DER-ES para obras em edificações, para que fossem consideradas as despesas indiretas no custo de investimento. Para obtenção do custo total de execução de cada serviço, foram levantados os quantitativos para todo o distrito e multiplicados os valores obtidos pelo preço unitário do serviço.

Com base nas composições de custo assim obtidas e nos quantitativos levantados para o distrito, a Tabela 4 apresenta os custos de investimento considerados na análise dos custos globais de renovação. O Apêndice A apresenta as composições de preços unitários consideradas.

Tabela 4 – Custos de investimento considerados na análise do custo global de renovação

| Descrição | Und. | Qtd. | Preço Unitário (R\$) | Preço Total (R\$) | Preço Total (R\$/m ²) ¹ |
|---|----------------|-----------|----------------------|-------------------|--|
| Envoltória | | | | | |
| Sistema de isolamento térmico externo (ETICS) em EPS, com esp. 80mm | m ² | 85.284,48 | 379,61 | 32.374.841,45 | 721,09 |
| Pintura de fachada com selador + tinta acrílica - inclui lixamento preliminar em toda a área e reboco + emassamento em 5% da área. Ref.: DER/LABOR | m ² | 85.284,48 | 44,88 | 3.827.599,36 | 85,25 |
| Telha termoacústica PU - aço galv trapezoidal 40, e=40mm, pintura branca duas faces, incluindo acessórios. núcleo PU esp. 30 mm | m ² | 17.229,15 | 437,90 | 7.544.577,71 | 168,04 |
| Telha termoacústica EPS - aço galv trapezoidal 40, e=40mm, pintura branca duas faces, incluindo acessórios. núcleo EPS esp. 30 mm | m ² | 17.229,15 | 315,53 | 5.436.345,52 | 121,08 |
| Cobertura nova de telhas onduladas de fibrocimento 8.0mm, inclusive cumeeiras e acessórios de fixação. Ref.: DER/LABOR - 090203 | m ² | 17.229,15 | 104,30 | 1.797.019,64 | 40,03 |
| Janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25. Vidro comum 3mm | m ² | 7.557,12 | 881,47 | 6.661.355,75 | 148,37 |
| janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25. Vidro duplo 6mm + 6mm | m ² | 7.557,12 | 1.451,41 | 10.968.489,71 | 244,30 |
| janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25. Vidro duplo 6mm low-e + 6mm | m ² | 7.557,12 | 1.567,68 | 11.847.151,81 | 263,87 |
| Sistemas | | | | | |
| Ar condicionado split on/off quente/frio - 18.000 btu/h | un | 3.744,00 | 4.433,36 | 16.598.507,82 | 369,70 |
| Ar condicionado split inverter quente/frio - 18.000 btu/h | un | 3.744,00 | 5.229,73 | 19.580.114,93 | 436,11 |
| Ar condicionado central em sistema VRF p/ edifícios com 1Q+S - 4 condensadoras VRF/64 evaporadoras | un | 24,00 | 958.165,87 | 22.995.980,84 | 512,19 |
| Ar condicionado central em sistema VRF p/ edifícios com 2Q+S - 4 condensadoras VRF/96 evaporadoras | un | 23,00 | 1.354.159,53 | 31.145.669,13 | 693,71 |
| Geração de Energia Renovável | | | | | |
| Instalação de painéis fotovoltaicos | m ² | 11.405,24 | 1.713,82 | 19.546.584,90 | 435,37 |

¹Custo por m² de área condicionada no distrito

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Foram considerado custos com substituições e manutenção apenas dos sistemas de condicionamento de ar. As substituições foram consideradas após o fim da vida útil estimada do sistema e o custo de investimento para a troca foi considerado igual ao investimento da primeira instalação. Além disso, nos casos em que o equipamento após a substituição possuía vida útil superior ao do edifício, foi considerado um valor residual obtido por depreciação linear. Os custos de manutenção, por sua vez, foram considerados com base em valores médios anuais e referem-se a valores de manutenção preventiva, de modo que custos excepcionais de

manutenção corretiva não foram levados em conta. Os custos com substituições e manutenção considerados para todo o distrito estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Custos com substituição e manutenção considerados para todo o distrito

| Sistema | Vida útil | Custo de substituição ao fim da vida útil | Custo de manutenção anual |
|---------------------------|-----------|---|---|
| <i>Split</i> convencional | 15 anos | R\$ 16.598.507,82 | R\$ 350,00 / apartamento |
| <i>Split</i> inverter | 15 anos | R\$ 19.580.114,93 | R\$ 350,00 / apartamento |
| VRF | 20 anos | R\$ 54.141.649,97 | R\$ 1.400,00 / condensadora + R\$ 280,00 / evaporadora |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o cálculo dos custos de energia no período de análise, foi utilizado como base a tarifa praticada pela empresa de distribuição de energia na região da Grande Vitória, acrescida de um ajuste para cobrir a incidência dos impostos, de acordo com a Equação (10).

$$t_{ee} = \frac{TUSD}{1 - (PIS + COFINS)} + \frac{TE}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \quad (10)$$

Onde:

t_{ee} : Tarifa de energia ajustada de forma a cobrir os impostos (R\$/kWh);

$TUSD$: Tarifa de uso do sistema de distribuição (R\$/kWh);

TE : Tarifa de energia (R\$/kWh);

PIS : Programa de Integração Social (%);

$COFINS$: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (%);

$ICMS$: Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias (%);

De acordo com a equação, o valor utilizado de tarifa de energia foi de 0,69025 R\$/kWh. O valor considera a tarifa do uso do sistema de distribuição ($TUSD$) e a tarifa de energia (TE) fixadas pela EDP Espírito Santo para o Grupo Residencial (B1), ambas as tarifas ajustadas de forma a cobrir os impostos federais PIS (0,53%) e COFINS (2,43%), que incidem sobre o total da fatura, e o imposto estadual ICMS (17%), que incide apenas sobre o fornecimento de energia.

A evolução da tarifa nos anos seguintes ao da implantação dos cenários foi predita com base no histórico dos anos entre 2010 e 2019, com ajuste anual médio calculado em 5,36%, de acordo com os dados coletados pelo Instituto Acende Brasil (2020). Dessa forma, durante o período de análise de 30 anos, foi considerado que a cada ano a tarifa aumentou 5,36% em relação ao valor do ano anterior.

Para determinação do custo global, foi considerado o período de 30 anos como o tempo de vida útil restante para as edificações no momento da renovação, conforme indicado na metodologia do projeto do Anexo 75. Para a avaliação dos custos ao longo do ciclo de vida da edificação, foi utilizado o método indicado pelo Anexo 75 como valor presente líquido (VPL), que considera a aplicação de taxas de desconto de 6% em custos futuros para determinação do valor equivalente a esses custos no presente. O método VPL foi utilizado para o cálculo do valor equivalente dos custos futuros componentes do custo global no momento da renovação. A Equação (11) foi utilizada como referência para o cálculo do custo global.

$$C_g(t) = C_l + \sum_k \left[\sum_{j=1}^t \left(C_{a,j}(k) \cdot \left(\frac{1}{1 + \frac{r}{100}} \right)^j \right) - V_{f,t}(k) \right] \quad (11)$$

Onde:

t : Período de cálculo;

$C_g(t)$: Custo global (com início no ano t_0) ao longo do período de cálculo;

C_l : Custos de investimento inicial para o conjunto de k medições;

$C_{a,j}(k)$: Custo anual no ano j para o conjunto de k medições;

r : Taxa de desconto;

$V_{f,t}(k)$: Valor residual do conjunto das k medições no fim do período de cálculo (descontado do ano inicial t_0).

O conjunto de medições as quais a Equação (11) se refere são os diferentes tipos de custos futuros envolvidos (custo de substituição, custo de manutenção e custo de energia). Dessa forma, são calculados os valores presentes líquidos (indicados na Equação (11) pelo somatório de variável j) de cada um desses custos e, em seguida, somados ao custo de investimento inicial. A parcela de valor residual só foi considerada no custo de substituição, que foi subtraída do custo de investimento inicial. Diante disso, ressalta-se que o cálculo do VPL para determinação do custo global da renovação de acordo com o Anexo 75 não considera a existência de receitas futuras e, por esse motivo, a metodologia deste trabalho não envolve análises de retorno de investimento (*payback*), uma vez que serão avaliados apenas custos.

3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS E DEFINIÇÃO DO CENÁRIO COM MELHOR CUSTO-BENEFÍCIO

A última etapa da metodologia aplicada no presente trabalho consistiu na comparação dos resultados obtidos na análise dos cenários para definição do cenário com melhor custo-benefício.

Para a comparação dos resultados, foi realizada uma representação gráfica dos resultados obtidos para os KPIs utilizados na metodologia apresentada: consumo de energia primária não renovável, total de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e custos globais da renovação. Os resultados de cada cenário foram plotados em um gráfico de custos globais por consumo de energia e em outro gráfico de custos globais por emissão de GEE.

O indicador-chave utilizado como decisivo na definição do cenário com melhor custo-benefício foi, além do custo global da renovação, o consumo de energia primária não renovável. Dessa forma, foi escolhido o cenário de renovação que apresentou o menor custo global dentre os cenários com maior redução do consumo de energia primária.

4 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso escolhido para aplicação da metodologia compreende o agrupamento de edifícios multifamiliares do bairro André Carloni, localizado no município da Serra-ES. O bairro André Carloni surgiu em 1983, inicialmente como um conjunto habitacional produzido pela Companhia Habitacional do Estado do Espírito Santo (COHAB-ES). Nessa época, vários conjuntos foram construídos no município, principalmente na região de Carapina, para suprir o déficit habitacional existente na região de Vitória. A Figura 19 apresenta uma vista do bairro.

Figura 19 – Vista do bairro André Carloni



Fonte: Google (2022).

O bairro fica localizado entre os principais eixos viários da Serra, ao norte da rodovia do Contorno e a leste da BR-101, como indicado na Figura 20. O clima da região é tropical, com verão chuvoso e inverno seco, classificado como “Aw” no sistema climático de Köppen e Geiger. De acordo com os dados meteorológicos da cidade de Vitória, que faz divisa com Serra, a temperatura média anual é de 23,5 °C. Além disso, a temperatura média do mês mais quente (fevereiro) é de 31,9 °C, enquanto a do mais frio (julho) é 19,3 °C (ESPÍRITO SANTO, 2022).

Figura 20 – Localização do bairro André Carloni



Fonte: Adaptado de Google (2022).

O bairro André Carloni é caracterizado pela presença de uma região de edificações unifamiliares, localizada mais ao norte do bairro, e outra de edifícios multifamiliares, localizada mais ao sul do bairro. Dessa forma, os edifícios escolhidos são localizados relativamente próximos entre si e possuem as mesmas características técnicas, de tal forma que podem ser considerados como parte de um mesmo distrito. A relação entre os edifícios pode ser observada na Figura 21, que mostra uma vista aérea da área que compreende o distrito.

Figura 21 – Delimitação da área considerada como o distrito do estudo de caso, com indicação das configurações e orientação espacial dos edifícios



Fonte: Adaptado de Google Earth (2022).

A escolha do distrito foi baseada nos critérios adotados para abordagem do projeto do anexo 75, referentes ao ambiente, tamanho das edificações, opções disponíveis de fonte de energia renovável e situação inicial. O Quadro 13 indica a adequação do estudo de caso a tais critérios.

Quadro 13 – Adequação do estudo de caso aos critérios adotados para abordagem do projeto do anexo 75

| Critério | Recomendação | Estudo de caso |
|---|--|---|
| Ambiente (Urbano/ Suburbano/ Rural) | Foco em distritos urbanos e suburbanos, nos quais as densidades energéticas são mais altas do que em distritos rurais, o que torna as soluções baseadas em distritos mais atraentes. | O ambiente é suburbano, faz parte da RMGV e é localizado relativamente próximo à capital do ES. |
| Tamanho das edificações (Unifamiliar/Multifamiliar) | Foco em distritos que contenham edifícios residenciais multifamiliares, também por razões de potencial de atratividade para soluções distritais | As edificações escolhidas são edifícios residenciais multifamiliares. |
| Opções disponíveis de fonte de energia renovável (RES) | Foco em distritos onde um grande número de opções está disponível (tanto em termos de RES quanto em possibilidades de renovação da envoltória) para que seja possível a comparação de vários cenários. | Uma vez que o distrito está localizado na RMGV, pode ser atendido por diversas tecnologias de energia renovável e soluções para envoltória. |
| Situação inicial | Foco em distritos atualmente aquecidos principalmente por combustíveis fósseis. | O condicionamento das edificações brasileiras com uso de combustíveis fósseis é pouco comum, portanto, nesse caso, não se aplica. |

Fonte: Adaptado de Terés-Zubiaga et al. (2020).

O distrito é formado por 47 edifícios multifamiliares de 4 pavimentos, cada edifício com 32 apartamentos, totalizando 1.504 unidades habitacionais. Os edifícios estão distribuídos em uma área urbana de 111.950 m² (delimitada pelo polígono de cor azul na Figura 21), que compreende também alguns equipamentos comunitários como praça, quadra poliesportiva e escola. Os prédios possuem orientações diversas, embora predominem as orientações nordeste/sudoeste e noroeste/sudeste das fachadas principais (paralelas aos eixos longitudinais dos edifícios). O Quadro 14 categoriza os edifícios do distrito de acordo com sua orientação espacial.

Quadro 14 – Classificação dos edifícios do distrito de acordo com sua orientação espacial

| Categoria | Orientação da fachada principal | Nº de edifícios |
|------------------|--|------------------------|
| OR0 | Norte/sul (AZ=0°) | 3 |
| OR32 | Nordeste/sudoeste (AZ=32°) | 20 |
| OR48 | Nordeste/sudoeste (AZ=48°) | 5 |
| OR59 | Nordeste/sudoeste (AZ=59°) | 4 |
| OR121 | Noroeste/sudeste (AZ=121°) | 15 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Existem também três configurações de edifícios no distrito, definidas de acordo com as suas respectivas dimensões em planta: “2Q50”, “2Q45” e “1Q37”. Nas duas primeiras

configurações, os edifícios possuem comprimento de 31 m e largura de 19 m, embora as dimensões internas variem de uma configuração para outra. Na terceira configuração, por sua vez, o comprimento dos edifícios é de 23 m e a largura é de 18 m (ver Figura 20).

Figura 22 – Vista de exemplos de edifícios com configurações (a) 2Q50, (b) 2Q45 e (c) 1Q37

(a)



(b)



(c)



Fonte: Google (2022).

A identificação de cada configuração se dá de maneira similar ao padrão definido pela COHAB-ES para categorizar os apartamentos dos respectivos edifícios, em que “2Q” e “1Q” indicam o número de quartos e os números “50”, “45” e “37” indicam a área total de cada apartamento. A planta tipo dos pavimentos de cada configuração são apresentadas no Anexo A. O Quadro 15 categoriza os edifícios do distrito de acordo com suas dimensões.

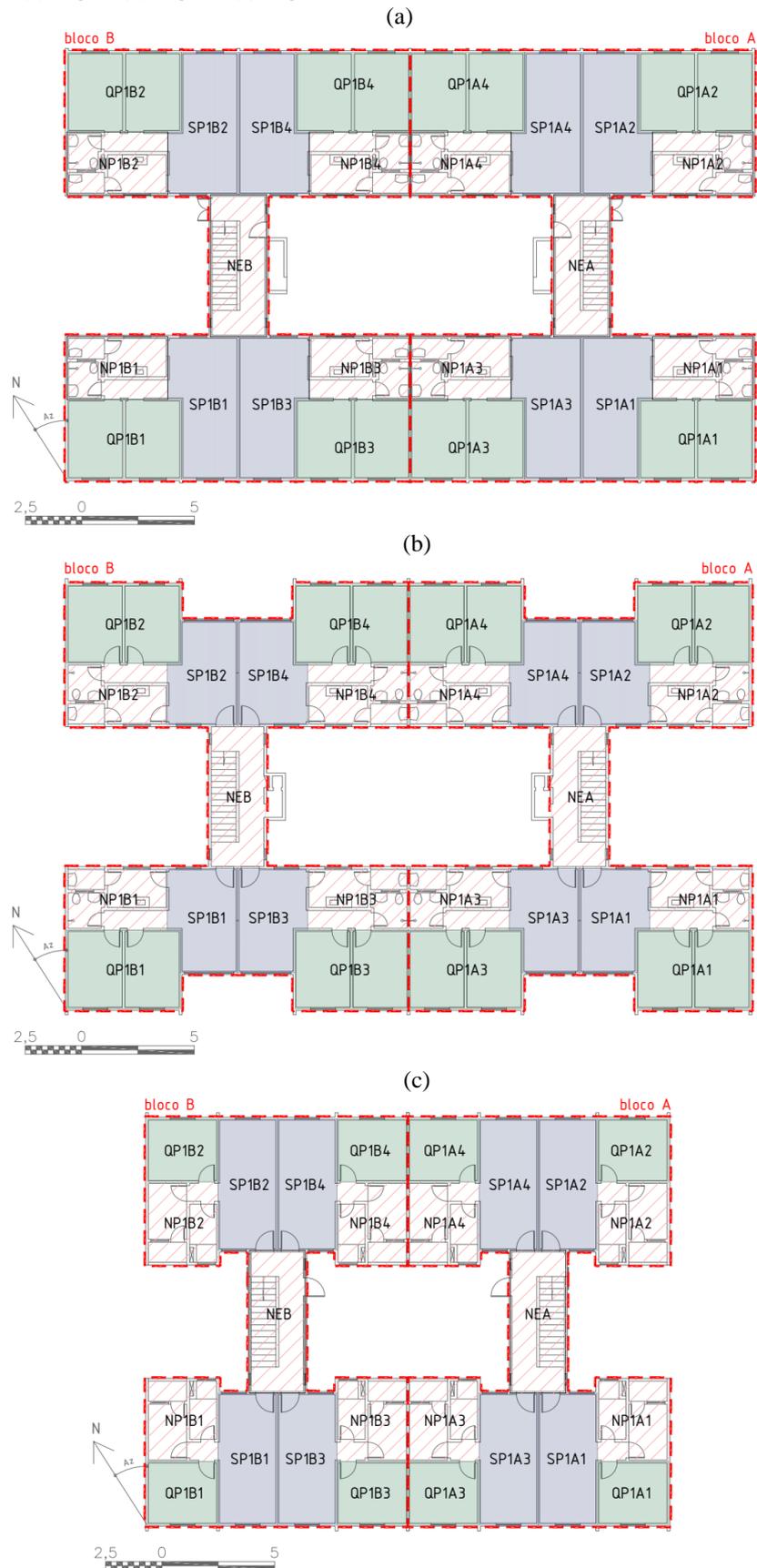
Quadro 15 – Classificação dos edifícios do distrito de acordo com suas dimensões

| Id. | Nº de edifícios | Dimensões externas | Ambientes internos | Área útil/ apartamento | Área APP¹/ apartamento |
|--|------------------------|---------------------------|--|-------------------------------|--|
| 2Q50 | 21 | 30,62 m x 19,40 m | 2 quartos, sala, cozinha, banheiro e área de serviço | 43,52 m ² | 35,91 m ² |
| 2Q45 | 2 | 30,49 m x 19,09 m | 2 quartos, sala, cozinha, banheiro e área de serviço | 39,30 m ² | 31,30 m ² |
| 1Q37 | 24 | 23,29 m x 18,29 m | 1 quarto, sala, cozinha, banheiro e área de serviço | 32,54 m ² | 24,43 m ² |
| ¹ APP: Ambiente de permanência prolongada | | | | | |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De maneira geral, a área total construída do distrito é de 72.249 m², dos quais 44.896 m² são referentes a ambientes de permanência prolongada (APP). Cada unidade habitacional (apartamento) dos edifícios do distrito pode ser dividida em três zonas térmicas, com padrões de uso e ocupação distintos: uma zona térmica contendo os ambientes de permanência transitória, identificada por “NPxyz”; uma zona térmica contendo o(s) quarto(s), identificada por “QPxyz”; e uma zona térmica contendo a sala de estar, identificada por “SPxyz”. Na identificação das zonas, a letra “x” indica o número do pavimento em que se encontra a zona (varia de 1 a 4), a letra “y” indica o bloco em que se encontra a zona (A ou B) e a letra “z” indica o número do apartamento (varia de 1 a 4). A divisão das zonas em planta pode ser visualizada na Figura 23.

Figura 23 – Divisão das zonas térmicas “NPxyz” (hachurado), “QPxyz” (verde) e “SPxyz” (azul) nos edifícios com configurações (a) 2Q50, (b) 2Q45 e (c) 1Q37



Fonte: Adaptado de COHAB (1979a, 1979b, 1983).

Os materiais empregados na envoltória dos edifícios foram determinados segundo os padrões da Caixa Econômica Federal para edificações multifamiliares de padrão baixo, que se assemelha ao padrão do antigo BNH e corresponde à maioria das edificações populares brasileiras. As paredes externas são em alvenaria de blocos de concreto, revestidos com reboco e gesso desempenado. A cobertura é em telha de fibrocimento sobre a laje de cobertura do último pavimento, construída em concreto maciço. As esquadrias da fachada são constituídas por caixilho de alumínio e vidro comum. Os parâmetros térmicos e energéticos dos componentes construtivos da envoltória, de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 15.575:2021, estão dispostos no Quadro 16.

Quadro 16 – Parâmetros térmicos e energéticos dos componentes da envoltória dos edifícios do distrito

| Componente construtivo | Materiais | Absortância solar ¹ | Capacidade térmica (kJ/m ² K) | Transmitância térmica (W/m ² K) | Fator solar |
|------------------------|---|--------------------------------|--|--|-------------|
| Paredes externas | Argamassa interna e externa 2.5 cm Bloco concreto 9x19x39 cm | 0,4 (reboco claro) | 183 | 2,79 | - |
| Cobertura | Laje maciça 10 cm Câmara de ar (> 5.0 cm) Telha fibrocimento 0.8 cm | 0,725 (fibrocim.) | 233 | 2,06 | - |
| Esquadrias | Alumínio e Vidro simples incolor 3mm | - | - | 5,70 | 0,87 |

¹ Absortâncias de acordo com a norma ABNT NBR 15.220-1 (2005).

Fonte: ProjetEEE (2022).

Com exceção do chuveiro elétrico, não há nenhum outro equipamento de aquecimento doméstico de água nas unidades habitacionais do distrito. Além disso, embora em algumas unidades habitacionais exista sistema de climatização por meio de aparelho de ar-condicionado de janela ou *split*, as residências do distrito não foram concebidas com sistema de condicionamento de ar quando foram implantadas em 1983, de modo que as demandas de conforto térmico deveriam ser supridas pela ventilação natural.

Uma análise do desempenho térmico de um edifício representativo operando apenas com ventilação natural nas condições climáticas atuais mostra, porém, que essa estratégia não é capaz de manter a temperatura operativa dos edifícios projetados em uma faixa de conforto. Os dados a seguir foram obtidos de uma simulação preliminar de um edifício com configuração 2Q50-OR59, de acordo com as recomendações da NBR 15.575-1 para avaliação do percentual de horas de ocupação dentro da faixa de temperatura operativa de cada ambiente de

permanência prolongada ($PHFT_{APP}$) e da unidade habitacional ($PHFT_{UH}$) estabelecida pela norma e apresentada no Quadro 17.

Quadro 17 – Faixas de temperaturas operativas para determinação do $PHFT_{APP}$

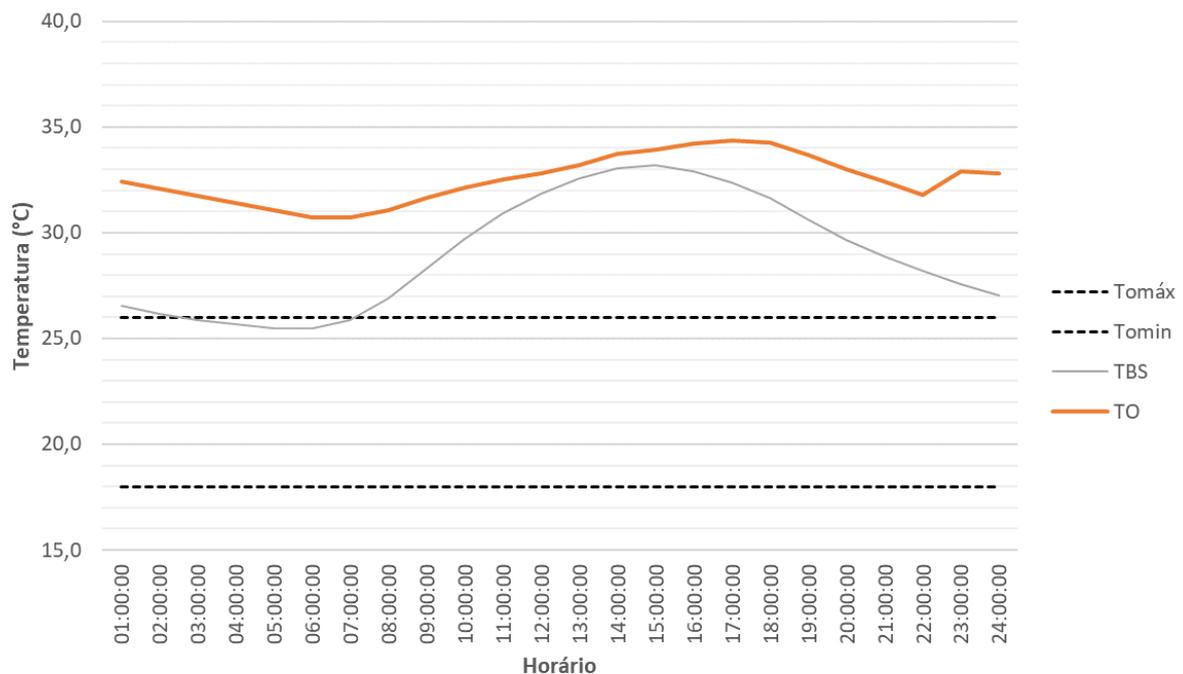
| Intervalos de temperaturas externas | Média anual da temperatura externa de bulbo seco (TBS_m) | Faixa de To_{APP}^1 a ser considerada |
|-------------------------------------|--|--|
| Intervalo 1 | $TBS_m < 25,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $18,0 \text{ } ^\circ\text{C} < To_{APP} < 26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| Intervalo 2 | $25,0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq TBS_m < 27,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $To_{APP} < 28,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ |
| Intervalo 3 | $TBS_m \geq 27,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ | $To_{APP} < 30,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ |

¹ To_{APP} : Temperatura operativa do ambiente de permanência prolongada

Fonte: Adaptado de ABNT (2021).

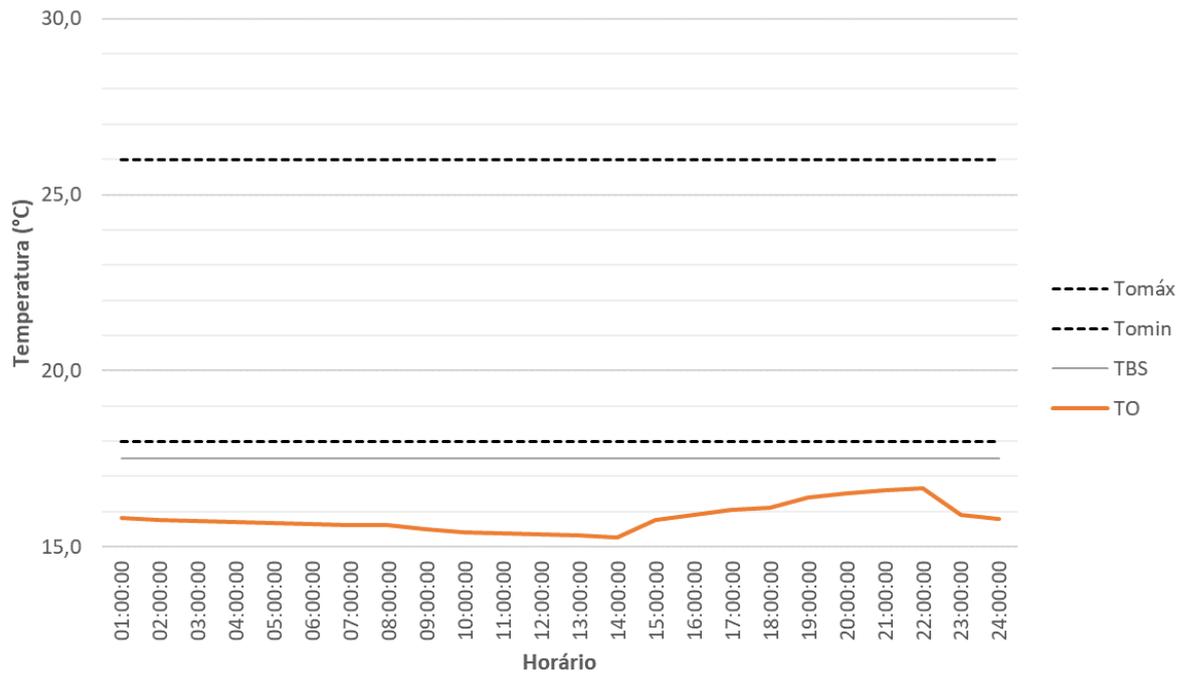
No caso do distrito em estudo, a média anual de temperatura externa de bulbo seco é de $23 \text{ } ^\circ\text{C}$, de modo que a temperatura operativa dos ambientes internos de permanência prolongada, quando ocupados, deve variar entre $18,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (To_{min}) e $26,0 \text{ } ^\circ\text{C}$ (To_{max}). Os resultados da simulação preliminar mostram que em alguns ambientes a temperatura ficou fora dessa faixa, tanto em dias quentes, quanto nos dias frios. Os gráficos da Figura 24 e da Figura 25 exemplificam esse fato.

Figura 24 – Temperatura operativa do ambiente sala, localizado no 4º pavimento, bloco B e apartamento 3 (SP4B3) em um dia quente (21/02)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Figura 25 – Temperatura operativa do ambiente sala, localizado no 4º pavimento do edifício, bloco B, apartamento 3 (SP4B3) em um dia frio (21/07)



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De modo mais abrangente, o valor de $PHFT_{UH}$ de cada apartamento do edifício variou entre 48,2% a 94,8%, porém, apenas 4 dos 32 apartamentos do edifício apresentaram valores acima de 90% (ou seja, apenas 4 apartamentos tiveram 90% do tempo dentro da faixa de conforto, entre 18° e 26°), que corresponde ao percentual mínimo exigido pela ABNT NBR 15.575-1 para dispensar o uso de condicionamento artificial. Os valores de $PHFT_{UH}$ em cada apartamento estão listados na Tabela 6.

Tabela 6 – PHFT_{UH} em cada apartamento do edifício tipo 2Q50-OR59 obtido na simulação preliminar, com destaque em vermelho para os valores abaixo do percentual mínimo de 90% do tempo dentro da faixa de conforto.

| UH | APP | PHFT _{APP} | APP | PHFT _{APP} | PHFT _{UH} |
|------|-------|---------------------|-------|---------------------|--------------------|
| P1A1 | QP1A1 | 97,3% | SP1A1 | 79,0% | 88,1% |
| P1A2 | QP1A2 | 99,8% | SP1A2 | 88,9% | 94,3% |
| P1A3 | QP1A3 | 97,6% | SP1A3 | 81,4% | 89,5% |
| P1A4 | QP1A4 | 99,8% | SP1A4 | 89,0% | 94,4% |
| P1B1 | QP1B1 | 97,8% | SP1B1 | 79,8% | 88,8% |
| P1B2 | QP1B2 | 99,0% | SP1B2 | 81,9% | 90,5% |
| P1B3 | QP1B3 | 97,4% | SP1B3 | 81,3% | 89,3% |
| P1B4 | QP1B4 | 99,9% | SP1B4 | 89,8% | 94,8% |
| P2A1 | QP2A1 | 69,5% | SP2A1 | 52,1% | 60,8% |
| P2A2 | QP2A2 | 76,0% | SP2A2 | 55,1% | 65,6% |
| P2A3 | QP2A3 | 65,0% | SP2A3 | 51,8% | 58,4% |
| P2A4 | QP2A4 | 69,8% | SP2A4 | 54,0% | 61,9% |
| P2B1 | QP2B1 | 70,3% | SP2B1 | 51,7% | 61,0% |
| P2B2 | QP2B2 | 71,3% | SP2B2 | 51,2% | 61,2% |
| P2B3 | QP2B3 | 64,8% | SP2B3 | 52,1% | 58,4% |
| P2B4 | QP2B4 | 70,4% | SP2B4 | 54,2% | 62,3% |
| P3A1 | QP3A1 | 62,2% | SP3A1 | 48,5% | 55,3% |
| P3A2 | QP3A2 | 66,3% | SP3A2 | 50,8% | 58,6% |
| P3A3 | QP3A3 | 56,8% | SP3A3 | 47,4% | 52,1% |
| P3A4 | QP3A4 | 59,6% | SP3A4 | 48,6% | 54,1% |
| P3B1 | QP3B1 | 62,4% | SP3B1 | 47,9% | 55,1% |
| P3B2 | QP3B2 | 62,9% | SP3B2 | 47,5% | 55,2% |
| P3B3 | QP3B3 | 56,6% | SP3B3 | 47,9% | 52,3% |
| P3B4 | QP3B4 | 60,0% | SP3B4 | 49,3% | 54,7% |
| P4A1 | QP4A1 | 60,1% | SP4A1 | 42,8% | 51,4% |
| P4A2 | QP4A2 | 63,2% | SP4A2 | 44,7% | 53,9% |
| P4A3 | QP4A3 | 54,5% | SP4A3 | 41,9% | 48,2% |
| P4A4 | QP4A4 | 55,9% | SP4A4 | 42,1% | 49,0% |
| P4B1 | QP4B1 | 60,2% | SP4B1 | 42,3% | 51,2% |
| P4B2 | QP4B2 | 60,7% | SP4B2 | 41,9% | 51,3% |
| P4B3 | QP4B3 | 54,3% | SP4B3 | 42,0% | 48,2% |
| P4B4 | QP4B4 | 56,6% | SP4B4 | 43,6% | 50,1% |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

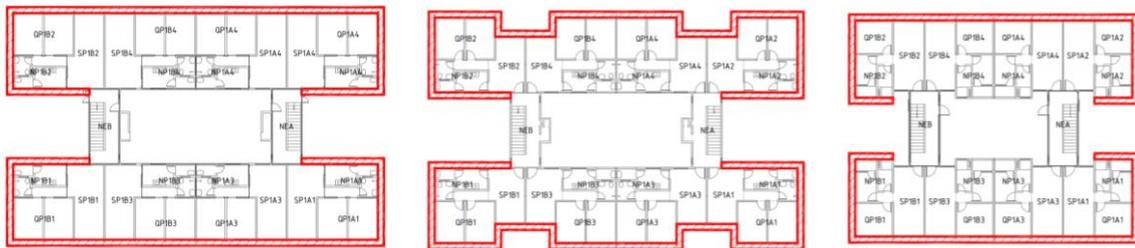
Com base nas informações coletadas nessa simulação preliminar, para aplicação da metodologia proposta, foi considerada para o caso de referência e para os demais cenários de renovação a instalação de aparelhos de ar-condicionado em todas as unidades habitacionais.

4.1 IMPLANTAÇÃO DAS MEDIDAS DE RENOVAÇÃO NO ESTUDO DE CASO

Para a análise da renovação energética do distrito, como apresentado no Capítulo 3 (Metodologia) foram propostos dois pacotes de medidas para a envoltória e três pacotes de medidas para os sistemas de condicionamento de ar, um deles com geração de energia renovável.

Na análise dos cenários, o sistema de isolamento externo (ETICS) proposto nas paredes foi considerado em todas as paredes das fachadas dos edifícios, além de parte das paredes próximas as escadas. Nas demais paredes, foi considerada apenas a recomposição da pintura. A Figura 26 identifica as paredes que foram estudadas com a aplicação do ETICS.

Figura 26 – Paredes com sistema de isolamento térmico exterior (ETICS) em cada configuração de edifício

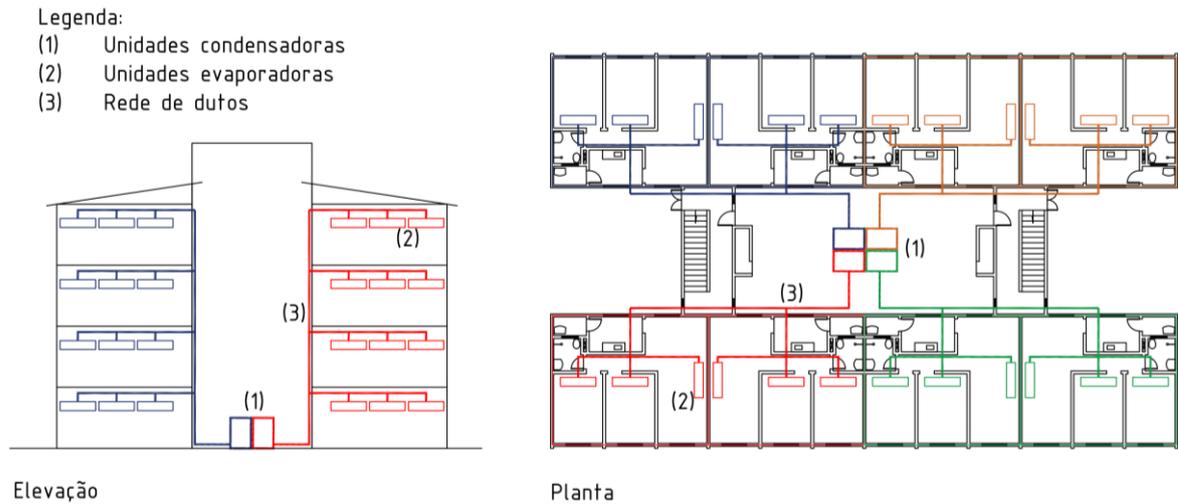


Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Além disso, na renovação da envoltória, a substituição da cobertura foi considerada em toda a área coberta de todos os edifícios e a troca das esquadrias foi considerada apenas nas janelas dos ambientes de permanência prolongada (sala e quarto).

No que se refere aos sistemas, para o sistema descentralizado *split* foi considerada a instalação de um conjunto de evaporadora e condensadora para cada ambiente de permanência prolongada. Para o sistema centralizado VRF, por sua vez, também foi considerada a instalação de uma unidade evaporadora em cada ambiente de permanência prolongada, mas com unidades condensadoras que atendem as evaporadoras de 8 apartamentos adjacentes. A Figura 27 apresenta um esquema da instalação proposta para esse sistema.

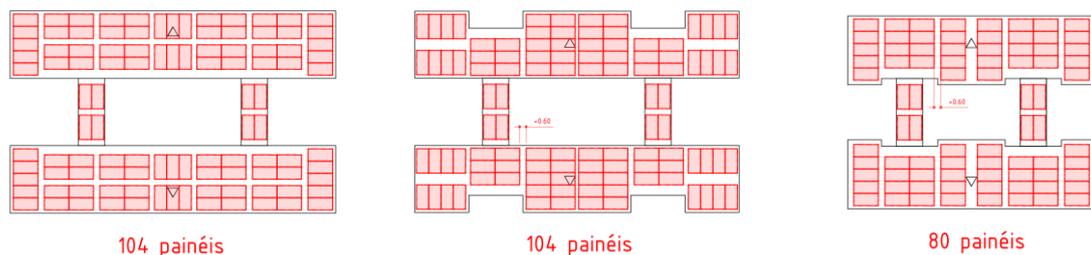
Figura 27 – Proposta de instalação do sistema VRF



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a análise da geração de energia por meio de painéis fotovoltaicos, foi considerado o aproveitamento máximo da área da cobertura dos edifícios. A Figura 28 apresenta as plantas simplificadas das coberturas com os painéis nas dimensões disponibilizadas pelo fabricante.

Figura 28 – Painéis fotovoltaicos instalados nas coberturas dos edifícios



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os quantitativos necessários para a execução dos serviços para a renovação do distrito, de acordo com essas considerações, estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Quantitativos para os serviços de renovação do distrito

| Descrição | Unidade | Ed. 1Q37 | Ed. 2Q45 | Ed. 2Q50 | Total |
|--------------------------|----------------|----------|----------|----------|-----------|
| Quantidade de edifícios | | 24 | 2 | 21 | 47 |
| Envoltória | | | | | |
| ETICS | m ² | 769,92 | 1.337,28 | 1.190,88 | 46.161,12 |
| Pintura | m ² | 899,04 | 764,64 | 762,72 | 39.123,36 |
| Aberturas | m ² | 138,24 | 184,32 | 184,32 | 7.557,12 |
| Cobertura | m ² | 319,4 | 380,7 | 419,15 | 17.229,15 |
| Sistemas | | | | | |
| Split (conj. evap+cond.) | un | 64 | 96 | 96 | 3.744 |
| VRF – evaporadoras | un | 64 | 96 | 96 | 3.744 |
| VRF – condensadoras | un | 4 | 4 | 4 | 188 |
| Painéis fotovoltaicos | un | 80 | 104 | 104 | 4.312 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

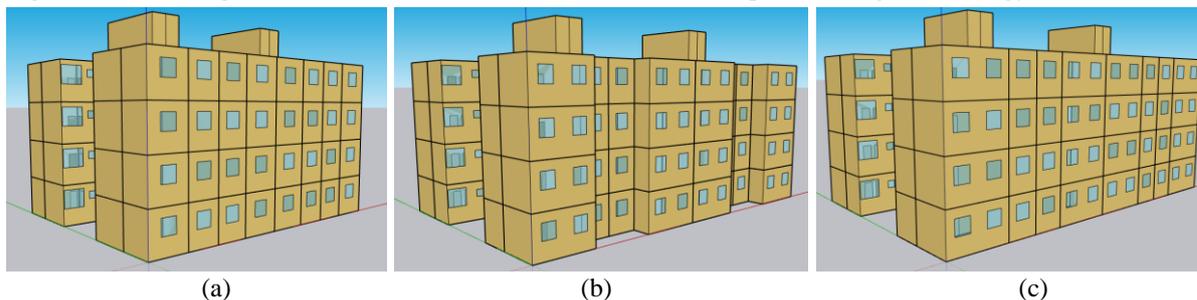
5 RESULTADOS

Neste capítulo estão dispostos os resultados obtidos na análise do distrito, de acordo com a metodologia proposta. Inicialmente, serão apresentados os resultados referentes à análise do caso de referência, e em seguida serão apresentados os cenários de renovação propostos. Por fim, os resultados serão comparados para identificação do cenário de renovação ideal.

5.1 CASO DE REFERÊNCIA

A demanda de energia do distrito para o caso de referência foi obtida por meio de simulação no *software* EnergyPlus®. As condições climáticas foram obtidas do arquivo climático “BRA_ES_Vitoria-Salles.AP.836490_TRY.1962” disponibilizadas no site do *software*. A envoltória dos edifícios foi modelada de acordo com os parâmetros do Quadro 16 apresentado no item 4 (capítulo Estudo de caso). A Figura 29 apresenta uma vista dos modelos obtidos para os edifícios por meio do *plug-in* Euclid para o *software* SketchUp.

Figura 29 – Modelagem dos edifícios (a) 1Q37, (b) 2Q45 e (c) 2Q50 para simulação no EnergyPlus®



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A modelagem da ocupação e das cargas internas foi feita com base nos padrões estabelecidos no item 11.4.7.3 da NBR 15.575 (ver Anexo B). Para o cálculo da demanda de aquecimento e refrigeração, foi considerado um sistema de carga ideal (*ideal loads*), que opera sem perdas de energia, conforme recomendações do item 11.4.7.4 da NBR 15.575 (ver Anexo C). Os resultados obtidos para cada categoria de edifício estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento de cada configuração e orientação de edifício do distrito

| Tipologia do edifício | Carga térmica de refrigeração (kWh/ano) | Carga térmica de aquecimento (kWh/ano) | Quantidade de edifícios |
|-----------------------|---|--|-------------------------|
| 2Q50-OR32 | 272.847,25 | 131,85 | 8 |
| 2Q50-OR48 | 280.477,55 | 127,41 | 2 |
| 2Q50-OR59 | 284.682,60 | 118,33 | 2 |
| 2Q50-OR121 | 285.654,26 | 92,03 | 9 |
| 2Q45-OR59 | 263.718,02 | 200,12 | 2 |
| 1Q37-OR0 | 168.555,38 | 98,57 | 3 |
| 1Q37-OR32 | 174.450,70 | 123,41 | 12 |
| 1Q37-OR48 | 179.952,31 | 121,12 | 3 |
| 1Q37-OR121 | 183.272,00 | 95,86 | 6 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para a determinação da demanda nas diferentes configurações, foram modeladas as três configurações apresentadas no Quadro 15 (Capítulo 4 - Estudo de caso) e, para cada uma delas, foram simulados diferentes modelos, de modo a considerar os diferentes valores de azimute presentes no Quadro 14 (Capítulo 4 - Estudo de caso), de modo a abranger todos os tipos de edifício do distrito. A demanda total do distrito, obtida pela soma aritmética da demanda de cada edifício, está disposta na Tabela 9.

Tabela 9 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento do distrito

| | Carga térmica de refrigeração (kWh/ano) | Carga térmica de aquecimento (kWh/ano) |
|-----------------|---|--|
| Carga distrital | 10.649.986,15 | 5.489,94 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para o cálculo do consumo de energia para refrigeração e aquecimento, foram considerados os parâmetros de eficiência do sistema *split* convencional do Quadro 12. O número de habitantes estimado foi obtido considerando-se 2 habitantes por apartamento na configuração 1Q37 e 4 habitantes por apartamento nas configurações 2Q45 e 2Q50, resultando em 1.536 e 2.944 pessoas para cada configuração, respectivamente. Com base nessa quantidade de pessoas, foi obtido o volume diário de consumo de água quente para todo o distrito, bem como o consumo estimado de energia pelos equipamentos, calculado para cada uma das configurações. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Consumo de energia elétrica do distrito no caso de referência (indicadas as equações de cálculo)

| Consumo refrigeração (kWh/ano) | Consumo aquecimento (kWh/ano) | Consumo aquecimento de água (kWh/ano) | Consumo equipamentos (kWh/ano) | Consumo total de energia elétrica (kWh/ano) |
|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| <i>Equação (4)</i> | <i>Equação (5)</i> | <i>Equação (7)</i> | <i>Equação (8)</i> | <i>Equação (3)</i> |
| 3.095.134,43 | 1.829,98 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 6.086.941,47 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com base nos fatores de conversão do consumo de energia elétrica em energia primária ($fc_E = 1,6$) e em emissões de CO_2 ($fe_E = 0,09 \text{ kg.CO}_2/\text{kWh}$), tais indicadores foram calculados em função do consumo total obtido, de acordo com as Equações (1) e (9), respectivamente. Os valores obtidos para o caso de referência estão listados na Tabela 11.

Tabela 11 – Consumo de energia primária e emissão total de CO_2 do caso de referência

| Consumo anual de energia primária | | | Emissão total de CO_2 |
|-----------------------------------|------------------|--------------|-------------------------|
| (kWh/m ² .ano) | (kWh/pessoa.ano) | (kWh/ano) | (t CO_2 /ano) |
| 216,92 | 2.173,91 | 9.739.106,36 | 547,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os custos de investimento para as intervenções na envoltória e no sistema de ar condicionado foram obtidos com base nos valores da Tabela 4. Foi também considerado para o sistema *split* a substituição do sistema no fim de sua vida útil e o custo de manutenção anual de acordo com a Tabela 5. Além disso, os custos anuais de energia foram calculados considerando-se o reajuste de 5,36% ao ano. Para o cálculo do valor presente líquido, foi considerado taxa de desconto de 6% e período de análise de 30 anos. Os resultados obtidos para cada um dos custos estão listados na Tabela 12. O cálculo do VPL desses custos está detalhado no Apêndice B.

Tabela 12 – Custo global de renovação para o caso de referência, por m² de área condicionada do distrito

| Custos | Valor presente líquido – VPL (R\$/m ²) |
|---|--|
| Custos de investimento | |
| Custo das intervenções na envoltória | 273,65 |
| Custo das intervenções no sistema de ar | 369,70 |
| Custo de renovação do sistema ao longo do período de análise e valor residual | 154,26 |
| Composição do Custo Global | |
| Total dos custos de investimento | 797,61 |
| Custo de manutenção do sistema ao longo do período de análise | 161,39 |
| Custo da energia elétrica ao longo do período de análise | 2.429,22 |
| Custo global | 3.388,22 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.2 CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO

A demanda de energia do distrito para os cenários de renovação foi também obtida por meio de simulação no *software* EnergyPlus®, como no caso de referência, ajustando-se os parâmetros dos componentes para cada pacote de renovação da envoltória, de acordo com o Quadro 18.

Quadro 18 – Parâmetros térmicos e energéticos dos componentes da envoltória para os cenários P1 e P2

| Componente construtivo | Materiais | Absortância solar ¹ | Capacidade térmica (kJ/m ² K) | Transmitância térmica (W/m ² K) | Fator solar |
|-----------------------------|---|--------------------------------|--|--|-------------|
| <i>Envoltória P1</i> | | | | | |
| Paredes externas | Parede existente + ETICS | 0,20 (pintura branca) | 148 | 1,020 | - |
| Cobertura | Telha termoacústica com núcleo PUR | 0,25 (aço galvanizado) | 230 | 0,552 | - |
| Esquadrias | Janela de alumínio e vidro duplo | - | - | 2,804 | 0,718 |
| <i>Envoltória P2</i> | | | | | |
| Paredes externas | Parede existente + ETICS | 0,20 (pintura branca) | 148 | 1,020 | - |
| Cobertura | Telha termoacústica com núcleo EPS | 0,25 (aço galvanizado) | 229 | 0,677 | - |
| Esquadrias | Janela de alumínio e vidro duplo <i>low-e</i> | - | - | 2,804 | 0,478 |

¹ Absortâncias de acordo com a norma ABNT NBR 15.220-1 (2005).

Fonte: Adaptado de Weber (2018).

As condições climáticas, dias de projeto, ocupação e cargas internas foram todos modelados como no caso de referência. Para o cálculo da demanda de aquecimento e refrigeração, também foi considerado um sistema de carga ideal (*ideal loads*). Os resultados obtidos para cada categoria de edifício estão dispostos na Tabela 13.

Tabela 13 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento por edifício para as envoltórias P1 e P2

| Tipologia do edifício | Carga térmica de refrigeração (kWh/ano) | Carga térmica de aquecimento (kWh/ano) | Quantidade de edifícios |
|-----------------------|---|--|-------------------------|
| <i>Envoltória P1</i> | | | |
| 2Q50-OR32 | 256.240,07 | 1,79 | 8 |
| 2Q50-OR48 | 263.348,66 | 1,23 | 2 |
| 2Q50-OR59 | 267.675,43 | 0,73 | 2 |
| 2Q50-OR121 | 269.362,89 | 0,52 | 9 |
| 2Q45-OR59 | 251.870,02 | 3,79 | 2 |
| 1Q37-OR0 | 154.652,35 | 1,57 | 3 |
| 1Q37-OR32 | 159.246,90 | 3,10 | 12 |
| 1Q37-OR48 | 164.155,71 | 2,80 | 3 |
| 1Q37-OR121 | 167.495,16 | 1,25 | 6 |
| <i>Envoltória P2</i> | | | |
| 2Q50-OR32 | 234.257,42 | 9,73 | 8 |
| 2Q50-OR48 | 239.406,71 | 9,02 | 2 |
| 2Q50-OR59 | 242.448,62 | 7,52 | 2 |
| 2Q50-OR121 | 243.467,36 | 4,36 | 9 |
| 2Q45-OR59 | 230.198,90 | 16,05 | 2 |
| 1Q37-OR0 | 141.608,85 | 6,44 | 3 |
| 1Q37-OR32 | 145.054,40 | 10,01 | 12 |
| 1Q37-OR48 | 148.554,15 | 9,68 | 3 |
| 1Q37-OR121 | 150.512,99 | 5,47 | 6 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

A demanda total do distrito para cada cenário de renovação da envoltória, obtida pela soma da demanda de cada edifício, está disposta na Tabela 14.

Tabela 14 – Demanda de energia para refrigeração e aquecimento do distrito

| | Carga térmica de refrigeração (kWh/ano) | Carga térmica de aquecimento (kWh/ano) |
|--------------------------------------|---|--|
| Carga distrital – envoltória P1 | 9.912.332,73 | 88,31 |
| Carga distrital – envoltória P2 | 9.003.593,80 | 383,56 |
| Carga distrital – caso de referência | 10.649.986,15 | 5.489,94 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

O cálculo do consumo de energia para refrigeração e aquecimento foi feito para cada cenário de renovação de sistema de ar condicionado. Foram considerados os parâmetros de eficiência do sistema de acordo com o Quadro 12. O volume diário de consumo de água quente, bem como o consumo estimado de energia pelos equipamentos, calculado para cada uma das configurações, foi o mesmo calculado para o caso de referência. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 15.

Tabela 15 – Consumo de energia elétrica do distrito nos cenários de envoltória P1 e P2

| Cenário de renovação do sistema | Consumo refrigeração (kWh/ano) | Consumo aquecimento (kWh/ano) | Consumo aquecimento de água (kWh/ano) | Consumo equipamentos (kWh/ano) | Consumo total de energia elétrica (kWh/ano) |
|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|---|
| | <i>Equação (4)</i> | <i>Equação (5)</i> | <i>Equação (7)</i> | <i>Equação (8)</i> | <i>Equação (3)</i> |
| <i>Envoltória P1</i> | | | | | |
| 1 – Split | 1.652.055,50 | 14,72 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.642.047,29 |
| 2 – VRF | 1.237.494,72 | 18,59 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.227.490,38 |
| 3 – VRF+PV | 1.237.494,72 | 18,59 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.227.490,38 |
| <i>Envoltória P2</i> | | | | | |
| 1 – Split | 1.500.599,01 | 63,93 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.490.640,01 |
| 2 – VRF | 1.124.044,17 | 80,75 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.114.101,99 |
| 3 – VRF+PV | 1.124.044,17 | 80,75 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 4.114.101,99 |
| Caso de referência | 3.095.134,43 | 1.829,98 | 1.558.890,67 | 1.431.086,40 | 6.086.941,47 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

De acordo com a Equação (3), o valor obtido para o consumo total de energia elétrica é o mesmo para os cenários com os sistemas 2 e 3, uma vez que a diferença entre eles é o uso de painéis fotovoltaicos para a geração de energia renovável. Desse modo, a geração de energia apenas foi considerada mais adiante no cálculo do consumo de energia primária, feito de acordo com a Equação (1). Entretanto, para o cálculo dos custos de energia, foi considerado que apenas o consumo excedente ao total de energia gerado foi tarifado.

Com a área disponível na cobertura dos edifícios, foi calculada a quantidade de 4.312 painéis fotovoltaicos com as especificações indicadas no Quadro 10. Assim, para uma média de 5,17 horas de sol pleno na região da Grande Vitória e eficiência de geração de energia de 0,80, o potencial de energia renovável calculado para o cenário 3 foi de 3.580,26 MWh/ano.

Os valores de consumo anual de energia primária e emissão total de CO₂ obtidos com base, respectivamente, nas Equações (1) e (9), para os cenários de renovação com envoltória P1 e com envoltória P2, estão listados na Tabela 16.

Tabela 16 – Consumo anual de energia primária e emissão total de CO₂ para o cenário de envoltória P1 e P2

| Cenário de renovação do sistema | Consumo anual de energia primária | | | Emissão total de CO ₂ |
|---------------------------------|-----------------------------------|------------------|--------------|----------------------------------|
| | (kWh/m ² .ano) | (kWh/pessoa.ano) | (kWh/ano) | (tCO ₂ /ano) |
| Envoltória P1 | | | | |
| 1 – Split | 165,43 | 1.657,87 | 7.427.275,66 | 417,78 |
| 2 – VRF | 150,66 | 1.509,82 | 6.763.984,61 | 380,47 |
| 3 – VRF+PV | 23,07 | 231,15 | 1.035.565,05 | 58,25 |
| Envoltória P2 | | | | |
| 1 – Split | 160,03 | 1.603,80 | 7.185.024,01 | 404,16 |
| 2 – VRF | 146,61 | 1.469,32 | 6.582.563,18 | 370,27 |
| 3 – VRF+PV | 19,02 | 190,66 | 854.143,62 | 48,05 |
| Caso de referência | 216,92 | 2.173,91 | 9.739.106,36 | 547,82 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Assim como no caso de referência, os custos de investimento para as intervenções na envoltória e no sistema de ar condicionado foram obtidos com base nos valores da Tabela 4, e a substituição do sistema no fim de sua vida útil e o custo de manutenção anual de acordo com a Tabela 5. Os resultados obtidos para cada um dos custos para os cenários com a envoltória P1 estão listados na Tabela 17. O cálculo do VPL desses custos está detalhado no Apêndice B.

Tabela 17 – Custo global de renovação para o cenário de envoltória P1, por m² de área condicionada do distrito

| Custos | Valor presente líquido – VPL (R\$/m ²) | | |
|---|--|-----------------|-----------------|
| | 1 – Split | 2 – VRF | 3 – VRF + PV |
| Custos de investimento | | | |
| Custo das intervenções na envoltória | 841,75 | 841,75 | 841,75 |
| Custo das intervenções no sistema de ar | 436,11 | 1.205,91 | 1.641,27 |
| Custo de renovação do sistema ao longo do período de análise e valor residual | 181,97 | 271,03 | 271,03 |
| Composição do Custo Global | | | |
| Total dos custos de investimento | 1.459,83 | 2.318,69 | 2.754,05 |
| Custo de manutenção do sistema ao longo do período de análise | 161,39 | 402,10 | 402,10 |
| Custo da energia elétrica ao longo do período de análise | 1.852,58 | 1.687,14 | 258,30 |
| Custo global | 3.473,80 | 4.407,92 | 3.414,44 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os resultados obtidos para cada um dos custos para os cenários com a envoltória P2 estão listados na Tabela 18. O cálculo do VPL desses custos está detalhado no Apêndice B.

Tabela 18 – Custo global de renovação para o cenário de envoltória P2, por m² de área condicionada do distrito

| Custos | Valor presente líquido – VPL (R\$/m ²) | | |
|---|--|-----------------|-----------------|
| | 1 – Split | 2 – VRF | 3 – VRF + PV |
| Custos de investimento | | | |
| Custo das intervenções na envoltória | 814,37 | 814,37 | 814,37 |
| Custo das intervenções no sistema de ar | 436,11 | 1.205,91 | 1.641,27 |
| Custo de renovação do sistema ao longo do período de análise e valor residual | 181,97 | 271,03 | 271,03 |
| Composição do Custo Global | | | |
| Total do Custos de investimento | 1.432,45 | 2.291,31 | 2.726,67 |
| Custo de manutenção do sistema ao longo do período de análise | 161,39 | 402,10 | 402,10 |
| Custo da energia elétrica ao longo do período de análise | 1.792,16 | 1.641,89 | 213,05 |
| Custo global | 3.386,00 | 4.335,29 | 3.341,81 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

5.3 COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS DE RENOVAÇÃO

Com base nos resultados apresentados no item 5.2, foi possível realizar uma análise comparativa dos indicadores de consumo de energia primária, emissões de CO₂ e custo global, considerando as seis possíveis combinações de cenários de renovação de envoltória e de sistemas. Para simplificação da análise, os indicadores foram calculados por área condicionada do distrito. A Tabela 19 resume os resultados obtidos para esses indicadores.

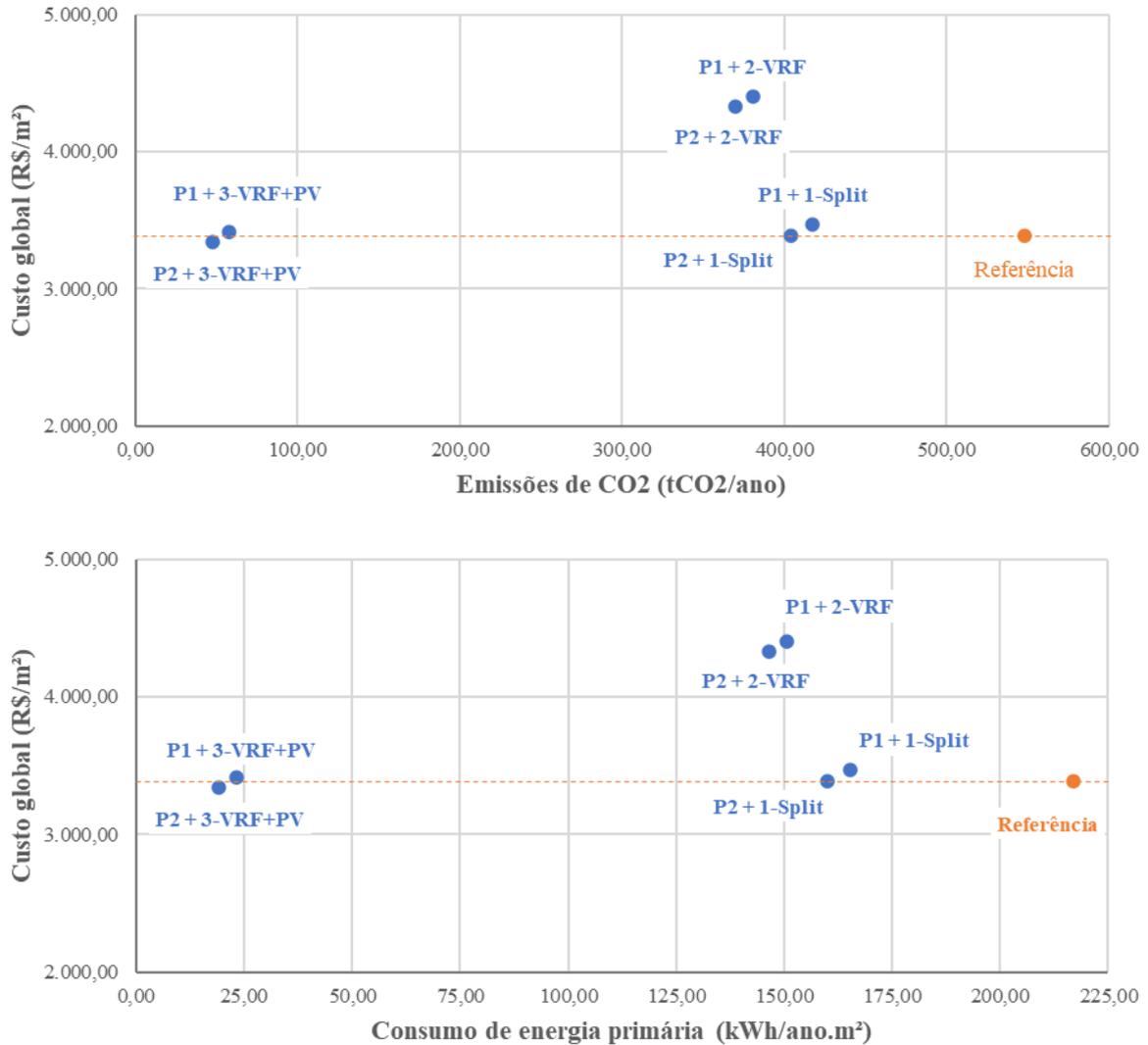
Tabela 19 – Indicadores obtidos para cada combinação de cenários de renovação

| Combinação de cenários | Indicadores | | |
|------------------------|---|---|------------------------------------|
| | Consumo de energia primária (kWh/ano.m ²) | Emissões de CO ₂ (tCO ₂ /ano) | Custo global (R\$/m ²) |
| P1 + 1-Split | 165,43 | 417,78 | 3.473,80 |
| P1 + 2-VRF | 150,66 | 380,47 | 4.407,92 |
| P1 + 3-VRF+PV | 23,07 | 58,25 | 3.414,44 |
| P2 + 1-Split | 160,03 | 404,16 | 3.386,00 |
| P2 + 2-VRF | 146,61 | 370,27 | 4.335,29 |
| P2 + 3-VRF+PV | 19,02 | 48,05 | 3.341,81 |
| Referência | 216,92 | 547,82 | 3.388,22 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Para uma visualização comparativa dos resultados, estes foram plotados em dois gráficos de consumo de energia primária e emissões de CO₂ em função do custo do respectivo cenário. Os gráficos obtidos são mostrados na Figura 30.

Figura 30 – Emissões anuais, consumo de energia primária e custos para cada cenário



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Pela análise dos resultados, verifica-se que a envoltória do cenário P2 teve melhor desempenho energético, atingindo menores valores de consumo de energia primária e, conseqüente, menores índices de emissão de CO₂. Além disso, do ponto de vista dos sistemas de ar condicionado, verifica-se que o melhor desempenho energético foi obtido com as propostas do cenário 3, com uso de VRF e painéis fotovoltaicos.

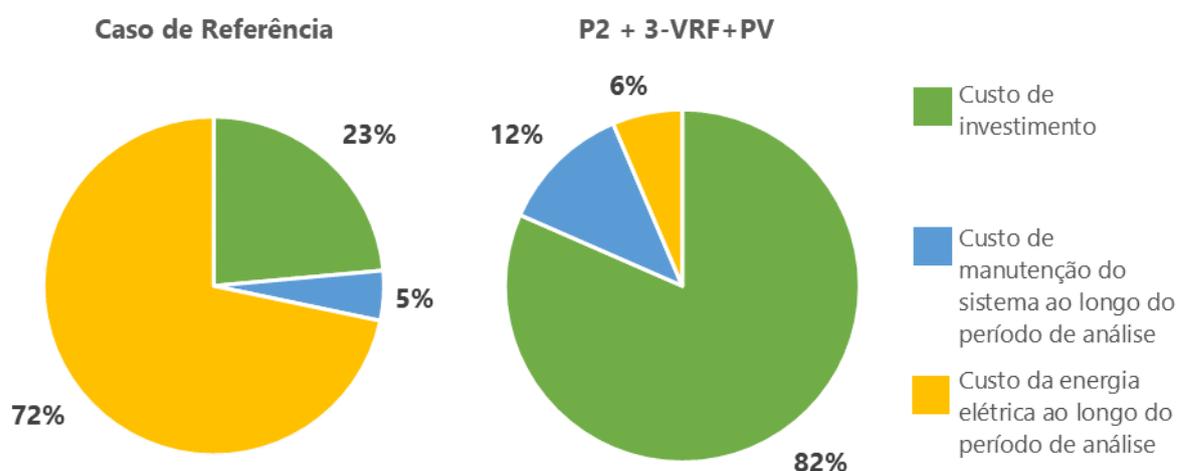
De maneira geral, o melhor custo-benefício para a renovação do distrito, dentre os cenários propostos, foi obtido com a escolha do pacote P2 para a envoltória com uso do sistema VRF para condicionamento do ar e painéis fotovoltaicos para geração de energia renovável. Para

essa combinação de renovação, o consumo de energia primária foi de 19,02 kWh/ano.m², contra 216,92 kWh/ano.m² do caso de referência, o que corresponde a uma redução de 91,23% no consumo. Nessa mesma combinação de cenários, as emissões foram estimadas em 48,05 tCO₂/ano.m², contra 547,82 tCO₂/ano.m² do caso de referência, o que corresponde a uma redução de emissões de carbono de aproximadamente 91%. Porém, para a combinação de melhor custo dentre os cenários propostos, o custo global estimado foi de R\$ 3.341,81/m², contra R\$ 3.388,22/m² para o caso de referência, o que representa uma redução de apenas 1,37% no custo global da renovação do distrito.

É notável que nenhum dos cenários propostos alcançou redução de custos significativa em relação ao caso de referência, nem mesmo aqueles com uso de painéis fotovoltaicos. Isso se deve ao fato de que as intervenções na envoltória, que representam até 25% dos custos de renovação, tiveram resultados insuficientes no que se refere à carga térmica de resfriamento. De fato, com as intervenções na envoltória, a expectativa era que as cargas térmicas de resfriamento tivessem redução significativa, porém, a carga térmica reduziu 15,5%, no caso da envoltória P2, e apenas 6,9% no caso da envoltória P1.

A redução de consumo de energia percebida deve-se, assim, principalmente pelo aumento da eficiência dos sistemas, o que resultou na redução dos custos de energia após a renovação. Porém, a redução dos custos de energia não foi capaz de compensar o aumento dos custos com investimentos. A Figura 31 apresenta uma comparação da composição dos custos globais de renovação do caso de referência e do cenário P2+3-VRF+PV.

Figura 31 – Custos da renovação do caso de referência e do cenário P2 + 3-VRF+PV



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Com base nos gráficos da Figura 31, pode-se perceber que a redução do consumo de energia primária devido a geração de energia renovável resultou em uma diminuição considerável nos custos de energia (72% para 6% do custo global da renovação). Todavia, os custos de investimento para implantação das medidas de renovação aumentaram também de maneira significativa (23% para 82%). Com isso, a redução do custo global do cenário P2 + 3-VRF+PV não acompanhou de maneira proporcional a redução do consumo de energia primária.

Mesmo com a pequena redução do custo global da renovação, destaca-se que a redução dos impactos ambientais percebida é suficiente para que o cenário de renovação P2+VRF+PV seja escolhido como a melhor opção de renovação.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho possibilitou a revisão bibliográfica e aplicação da metodologia do projeto do Anexo 75 do IEA-EBC para análise da renovação energética dos edifícios multifamiliares localizados no bairro André Carloni, em Serra/ES. Isso foi possível por meio da adaptação da metodologia estudada à realidade brasileira, com base em outras normativas, em especial, a INI-R.

Por meio da definição de possíveis cenários de renovação energética dos edifícios, foi possível analisar as implicações da escolha dos materiais da envoltória na eficiência energética da edificação. Os resultados obtidos para os indicadores de consumo de energia primária, emissões de CO₂ e custo global evidenciaram que certas opções construtivas, em especial aqueles referentes aos sistemas de ar condicionado de alta eficiência, resultam em edifícios mais eficientes e de menor impacto ambiental.

Com a adaptação da metodologia no presente trabalho, foi verificado que um possível cenário de renovação em que se utiliza o sistema de isolamento externo em EPS, cobertura em telhas termoacústicas com núcleo em EPS e janelas com vidro duplo baixo emissivo na envoltória, sistema VRF para o ar condicionado e painéis fotovoltaicos para a geração de energia renovável possui o melhor custo-benefício dentro dos cenários avaliados. Para essa combinação de renovação, o consumo de energia primária reduziu 91,23% em relação ao caso de referência, em que não há melhoria da eficiência energética. Além disso, a redução estimada das emissões anuais de CO₂ foram de 91% em relação ao caso de referência. Porém, o custo global foi apenas 1,37% menor do que o estimado para o caso de referência, devido à escolha dos componentes da envoltória na renovação, que não contribuíram significativamente para a redução da carga térmica, em relação ao seu custo.

Os resultados obtidos no presente trabalho não esgotaram as possibilidades de renovação energética do distrito, de tal modo que ficou limitado à cenários mais simplificados, principalmente no que se refere a renovação dos sistemas de fornecimento de energia. Para trabalhos futuros, sugere-se que:

- Sejam analisados outros cenários de intervenção na envoltória, com base em simulações preliminares das propriedades térmicas do material (transmitância e capacidade térmica) e no efeito dessas propriedades na redução da carga térmica dos edifícios, uma vez que

os materiais escolhidos neste trabalho apresentaram resultados pouco significativos na redução da carga térmica, embora tenham elevado custo de implantação;

- Seja avaliada, com base em uma amostragem de valores de transmitância e capacidade térmica, a efetividade da alteração das propriedades da envoltória na redução da carga térmica para o clima estudado, uma vez que não ficou claro neste trabalho se os materiais escolhidos foram tecnicamente insuficientes para obtenção de reduções mais significativas de carga térmica, ou se o efeito obtido é, de fato, mínimo para qualquer escolha de transmitância e capacidade térmica, no contexto do clima em estudo;
- Seja analisada a influência do sombreamento na redução da carga térmica, tanto o sombreamento dos edifícios vizinhos, quanto o sombreamento obtido pela adoção de tecnologias como brises, que são tecnologias presentes no mercado e podem apresentar resultados mais significativos na redução de carga térmica com custo menor do que os sistemas adotados neste trabalho;
- Sejam analisados cenários com uso de painéis fotovoltaicos aliados a sistemas de ar condicionado com menor custo de investimento, para que este tenha seu valor reduzido, uma vez que, neste trabalho, os painéis fotovoltaicos foram utilizados juntos ao sistema com o maior custo de investimento (VRF);
- Sejam analisados cenários considerando a intervenção no fornecimento de água quente nas edificações, que corresponde a uma parcela significativa no consumo de energia elétrica quando considerado sistema descentralizado com aquecimento instantâneo (chuveiro elétrico), mas que requer análises mais detalhadas dos impactos estruturais na modificação do sistema de distribuição de água potável dos edifícios;
- Seja realizada a análise considerando cenários de renovação com sistema de ar condicionado do tipo *district heating/cooling*, que são sistemas centralizados a nível totalmente distrital com alta eficiência energética, o que vai ao encontro da proposta do Anexo 75 do IEA-EBC, mas que requer uma análise mais aprofundada, uma vez que não são sistemas comumente aplicados no Brasil;
- Seja feita uma análise de ciclo de vida completa dos componentes construtivos e sistemas de fornecimento de energia, de acordo com o que propõe o projeto do Anexo

75, incluindo as parcelas de energia incorporada dos materiais no cálculo do consumo de energia primária.

Ressalta-se que os resultados de custos obtidos neste trabalho sugerem que intervenções como as apresentadas possuem valores de investimento inicial superiores aos de reformas comuns. Por se tratar de edifícios voltados para população de baixa renda, a participação do Estado é fundamental para que sejam realizadas as renovações energéticas na região escolhida como estudo de caso. Para isso, é necessário que se trabalhe com programas de incentivo à adoção de medidas de eficiência energética e uso de energia renovável, com disponibilização de linhas de crédito especiais ou financiamentos acessíveis à faixa de renda da população.

REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.220 - Desempenho térmico de edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575 - Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 1: Requisitos Gerais**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2021.
- ALMEIDA, M. D.; FERREIRA, M.; RODRIGUES, A. **Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56) - Guidebook for Professional Home Owners**. Braga (PT): Universidade do Minho, 2017. Disponível em: <<http://www.iea-annex56.org/index.aspx?MenuID=4&SubMenuID=33>>. Acesso em: 27 jan. 2022.
- ALMEIDA, M. G. et al. **Tools and procedures to support decision making for cost-effective energy and carbon emissions optimization in building renovation (Annex 56)**. Braga (PT): Universidade do Minho, 2017. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/46098>>. Acesso em: 16 jan. 2022.
- BARBOSA, R. M. M.; ALMEIDA, M. G. D. Eficiência energética e rentabilidade nas intervenções de reabilitação nZEB à escala do bairro. **Revista Materiais de Construção**, Porto (PT), n. 193, p. 60-64, Setembro 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1822/71959>>. Acesso em: 28 nov. 2021.
- BIANCHI, A. L.; LIMA, A. A. M. D.; DIAS, S. S. Recursos Naturais, Cadeias e Setores Energéticos. In: JUNIOR, A. P.; REIS, L. B. D. **Energia e Sustentabilidade**. 1ª. ed. Barueri, SP: Manole, 2016. Cap. 2, p. 47-84. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9786555761313>>. Acesso em: 22 jan. 2022.
- BRASIL. Balanço Energético Nacional. **Relatório Síntese 2021 - Ano base 2020**, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_S%C3%ADntese_2021_PT.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2022.
- CALHA FORTE. Telhas termoacústicas, 2022. Disponível em: <<https://www.calhaforte.com.br/telhas-termoacusticas>>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- COHAB-ES - COMPANHIA HABITACIONAL DO ESPÍRITO SANTO. Pavimento tipo - ES-A-2/45, 1979a.
- COHAB-ES - COMPANHIA HABITACIONAL DO ESPÍRITO SANTO. Pavimento térreo - ES-A-1/37, 1979b.
- COHAB-ES - COMPANHIA HABITACIONAL DO ESPÍRITO SANTO. Pavimento térreo - ES-A-2/50, 1983.
- ENERGYPLUS. [S.l.]: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 01 ago. 2022.
- ESPÍRITO SANTO. Secretaria de Estado da Agricultura, Abastecimento, Aquicultura e Pesca. Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural. **Gráficos da Série Histórica - Vitória/ES**, 2022. Disponível em: <<https://meteorologia.incaper.es.gov.br/graficos-da-serie-historica-vitoria>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GOOGLE. Google Maps, 2022. Disponível em: <<https://www.google.com/maps>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro**, 2022. Disponível em: <<https://earth.google.com>>. Acesso em: 07 mai. 2022.

IEA. Key World Energy Statistics 2020, Paris (FR), 2020. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020>>. Acesso em: 23 jan. 2022.

IEA EBC. About Annex 75, 2022. Disponível em: <<https://annex75.iea-ebc.org/about>>. Acesso em: 16 jan. 2022.

INMETRO. INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. PROGRAMA BRASILEIRO DE ETIQUETAGEM - PBE. Tipo de Equipamento: Condicionadores de Ar, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/inmetro/pt-br/assuntos/avaliacao-da-conformidade/programa-brasileiro-de-etiquetagem/tabelas-de-eficiencia-energetica/condicionadores-de-ar/condicionadores-de-ar-indices-novos-idrs.pdf/view>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

INSTITUTO ACENDE BRASIL. Evolução das Tarifas de Energia Elétrica e a Formulação de Políticas Públicas. **White Paper 22**, São Paulo, 2020. 28 p. Disponível em: <https://acendebrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/WP22_WEB.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2022.

KAMIMURA, A. M. et al. CB3E - Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações. **Fatores de conversão de energia elétrica e térmica em energia primária e em emissões de dióxido de carbono a serem usados na etiquetagem de nível de eficiência energética de edificações**, Florianópolis, p. 30, 2020. Disponível em: <[https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI/Relatorio-atualizado-fatores_energia-primaria_CO2_28_11_2020%20\(1\).pdf](https://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/INI/Relatorio-atualizado-fatores_energia-primaria_CO2_28_11_2020%20(1).pdf)>. Acesso em: 07 mai. 2022.

MIDEA. MProj. Unidades Centrais Midea V6 220V - E - 09/21, 2022b. Disponível em: <<https://carrierdobrasil.com.br/wp-content/uploads/2021/09/MProj.-Unidades-Centraiz-Midea-V6-220V-E-09-21-view.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MIDEA. Ar-condicionado Springer Midea AirVolution, 2022c. Disponível em: <<http://www.leverosintegra.com.br/download/manuais/SpringerMidea/Catalogo-Springer-Midea-AirVolution.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

MØRCK, O. C. et al. **Annex 75 | Cost-effective Building Renovation at District Level Combining Energy Efficiency & Renewables - Subtask A: Technology overview**. International Energy Agency. [S.l.]. 2020.

NEOSOLAR. PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO - SUNOVA SOLAR, 2022. Disponível em: <<https://www.neosolar.com.br/loja/painel-solar-fotovoltaico-sunova>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

OTT, W. et al. **Methodology for Cost-Effective Energy and Carbon Emissions Optimization in Building Renovation (Annex 56)**. Braga (PT): Universidade do Minho, 2017. Disponível em: <<http://www.iea-annex56.org/index.aspx?MenuID=4&SubMenuID=33>>. Acesso em: 28 jan. 2022.

PBE EDIFICA. Sobre o PBE Edifica, 2020. Disponível em: <<https://www.pbeedifica.com.br/sobre>>. Acesso em: 13 dez. 2021.

PROJETEEEE. Componentes Construtivos, 2022. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/projeteee/componentes-construtivos/>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

ROMÉRO, M. D. A.; REIS, L. B. D. **Eficiência Energética em Edifícios**. 1ª. ed. Barueri, SP: Editora Manole, 2012. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520444580/>>. Acesso em: 28 nov. 2021.

ROMÉRO, M. D. A.; REIS, L. B. D. **Eficiência Energética em Edifícios**. 1ª. ed. Barueri, SP: Editora Manole, 2012. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788520444580/>>. Acesso em: 28 Nov 2021.

SKETCHUP. [S.l.]: [s.n.], 2022. Disponível em: <<https://www.sketchup.com>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

STO BRASIL. Sistemas de Isolamento Térmico - StoTherm, 2022. Disponível em: <<https://stobrasil.com.br/produtos/sistemas-de-isolamento-termico-stotherm>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

TERÉS-ZUBIAGA, J. et al. Cost-effective building renovation at district level combining energy efficiency & renewables – Methodology assessment proposed in IEA EBC Annex 75 and a demonstration case study. **Energy and Buildings**, v. 224, p. 110280, out. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778820310562>>. Acesso em: 13 fev 2022.

WEBER, F. D. S. **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**. Florianópolis: [s.n.], 2018.

WESTPHAL, F. S. **Manual técnico do vidro plano para edificações**. São Paulo: Abividro, 2016. 190 p. Disponível em: <<https://abividro.org.br/2018/07/20/manual-de-vidro-plano-para-edificacoes-por-fernando-simon-westphal/>>. Acesso em: 01 ago. 2022.

APÊNDICE A – PLANILHA ORÇAMENTÁRIA E COMPOSIÇÕES DE PREÇO UNITÁRIO PARA IMPLANTAÇÃO DAS MEDIDAS DE RENOVAÇÃO

Quadro 19 – Planilha orçamentária com os custos de implantação das medidas de renovação

| PREÇOS DOS SERVIÇOS NECESSÁRIOS PARA IMPLANTAÇÃO DAS MEDIDAS DE RENOVAÇÃO NOS EDIFÍCIOS | | | | | | | |
|---|---|------------------------|----------|------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| Área total condicionada (m2) = 44.896,96 | | Data base: agosto/2022 | | BDI = 30,90% | | LS = 157,27% | |
| Item | Descrição | Unid | Qtd. | Preço Unitário | Preço Total | Preço Total c/BDI | Preço/m ² (c/BDI) |
| 1 Envolatória | | | | | | | |
| 1.1 | Sistema de isolamento térmico externo (ETICS) em EPS, com esp. = 80mm | m ² | 46161,12 | R\$ 290,00 | R\$ 13.386.724,80 | R\$ 17.523.222,76 | R\$ 390,30 |
| 1.2a | Pintura de fachada com selador + tinta acrílica – p/demais paredes externas s/isolamento externo. ref.: DER/LABOR | m ² | 39123,36 | R\$ 34,29 | R\$ 1.341.383,52 | R\$ 1.755.871,03 | R\$ 39,11 |
| 1.2b | Pintura de fachada com selador + tinta acrílica - inclui lixamento preliminar em toda a área e reboco+emassamento em 5% da área. Ref.: DER/LABOR | m ² | 85284,48 | R\$ 34,29 | R\$ 2.924.063,68 | R\$ 3.827.599,36 | R\$ 85,25 |
| 1.3 | Telha termoacústica pu - aço galv trapezoidal 40, e=40mm, pintura branca duas faces, incluindo acessórios. Núcleo pu esp. 30 mm | m ² | 17229,15 | R\$ 334,53 | R\$ 5.763.619,33 | R\$ 7.544.577,71 | R\$ 168,04 |
| 1.4 | Telha termoacústica EPS - aço galv trapezoidal 40, e=40mm, pintura branca duas faces, incluindo acessórios. Núcleo EPS esp. 30 mm | m ² | 17229,15 | R\$ 241,05 | R\$ 4.153.052,35 | R\$ 5.436.345,52 | R\$ 121,08 |
| 1.5 | Cobertura nova de telhas onduladas de fibrocimento 8.0mm, inclusive cumeeiras e acessórios de fixação. Ref.: DER/LABOR - 090203 | m ² | 17229,15 | R\$ 79,68 | R\$ 1.372.818,67 | R\$ 1.797.019,64 | R\$ 40,03 |
| 1.6 | Janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. Puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco. Janela com vidro comum 3mm | m ² | 7557,12 | R\$ 673,39 | R\$ 5.088.889,04 | R\$ 6.661.355,75 | R\$ 148,37 |
| 1.7 | Janela correr vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. Puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco. Janela vidro duplo 6mm + 6mm | m ² | 7557,12 | R\$ 1.108,79 | R\$ 8.379.289,31 | R\$ 10.968.489,71 | R\$ 244,30 |
| 1.8 | Janela correr vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. Puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco. Janela vidro duplo 6mm low-e + 6mm | m ² | 7557,12 | R\$ 1.197,62 | R\$ 9.050.536,14 | R\$ 11.847.151,81 | R\$ 263,87 |
| 2 Sistemas | | | | | | | |
| 2.1 | Ar condicionado split on/off quente/frio - 18.000 btu/h | un | 3744,00 | R\$ 3.386,83 | R\$ 12.680.296,27 | R\$ 16.598.507,82 | R\$ 369,70 |
| 2.2 | Ar condicionado split inverter quente/frio - 18.000 btu/h | un | 3744,00 | R\$ 3.995,21 | R\$ 14.958.070,99 | R\$ 19.580.114,93 | R\$ 436,11 |
| 2.3 | Ar condicionado central em sistema VRF p/ edifícios com 1q+s - 4 condensadoras VRF/64 evaporadoras | un | 24,00 | R\$ 731.983,09 | R\$ 17.567.594,23 | R\$ 22.995.980,84 | R\$ 512,19 |
| 2.4 | Ar condicionado central em sistema VRF p/ edifícios com 2q+s - 4 condensadoras VRF/96 evaporadoras | un | 23,00 | R\$ 1.034.499,26 | R\$ 23.793.482,91 | R\$ 31.145.669,13 | R\$ 693,71 |
| 3 Geração de energia renovável | | | | | | | |
| 3.1 | Instalação de painéis fotovoltaicos | m ² | 11405,24 | R\$ 1.309,26 | R\$ 14.932.456,00 | R\$ 19.546.584,90 | R\$ 435,37 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|----------|---|---------|----------|----------------|-------------|
| 1.1 | SISTEMA DE ISOLAMENTO TÉRMICO EXTERNO (ETICS) EM EPS, COM ESP. = 80MM | m² | R\$ 0,00 | R\$ 290,00 | R\$ 290,00 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 | MÃO DE OBRA | | | | |
| 1.1 | Mão de obra terceirizada para execução de sistema ETICS, treinada pela Sto - ref.: Mares Soluções Construtivas | m² | 1,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| 2 | MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | |
| 2.1 | Fornecimento de material para execução de sistema ETICS, incluindo MO - ref. StoTherm / Mares Soluções Construtivas | m² | 1,00 | R\$ 290,00 | R\$ 290,00 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|----------|---|---------|----------|----------------|-------------|
| 1.2 | PINTURA DE FACHADA COM SELADOR + TINTA ACRÍLICA - INLUI LIXAMENTO PRELIMINAR EM TODA A ÁREA E REBOCO+EMASSAMENTO EM 5% DA ÁREA. REF.: DER/LABOR | m² | R\$ 0,00 | R\$ 34,29 | R\$ 34,29 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 2 | MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | |
| 2.1 | Retirada de revestimento antigo em reboco. Ref.: DER/LABOR-10208 | m2 | 0,05 | R\$ 8,99 | R\$ 0,45 |
| 2.2 | Reboco tipo paulista de argamassa de cimento, cal hidratada CH1 e areia média ou grossa lavada no traço 1:0.5:6, espessura 25 mm. Ref.: DER/LABOR | m2 | 0,05 | R\$ 53,41 | R\$ 2,67 |
| 2.3 | Emassamento de paredes e forros, com duas demãos de massa acrílica, marcas de referência Suvinil, Coral ou Metalatex. Ref: DER/LABOR-190103 | m2 | 0,05 | R\$ 17,72 | R\$ 0,89 |
| 2.4 | Lixamento de parede com pintura antiga PVA para recebimento de nova camada de tinta. Ref.: DER/LABOR-10246 | m2 | 1,00 | R\$ 3,40 | R\$ 3,40 |
| 2.5 | Pintura com tinta acrílica, marcas de referência Suvinil, Coral ou Metalatex, inclusive selador acrílico, em paredes e forros, a três demãos. Ref: DER/LABOR-190106 | m2 | 1,05 | R\$ 25,60 | R\$ 26,88 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|----------|--|---------|----------|----------------|-------------|
| 1.3 | TELHA TERMOACÚSTICA PU - AÇO GALV TRAPEZOIDAL 40, E=40MM, PINTURA BRANCA DUAS FACES, INCLUINDO ACESSÓRIOS. NÚCLEO PU ESP. 30 MM | m² | R\$ 9,13 | R\$ 311,03 | R\$ 334,53 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 | MÃO DE OBRA | | | | |
| '010101 | AJUDANTE (AJUDANTE PRATICO - SINDUSCON) (LABOR) | H | 0,23 | R\$ 18,01 | R\$ 4,18 |
| '010150 | TELHADISTA - (OFICIAL - SINDUSCON) (LABOR) | H | 0,23 | R\$ 21,35 | R\$ 4,95 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
|----------------------|--|----|------|------------|------------|
| '40740 | TELHA GALVALUME COM ISOLAMENTO TERMOACUSTICO EM ESPUMA RIGIDA DE POLIURETANO (PU) INJETADO, ESPESSURA DE 30 MM, DENSIDADE DE 35 KG/M3, REVESTIMENTO EM TELHA TRAPEZOIDAL NAS DUAS FACES COM ESPESSURA DE 0,50 MM CADA, ACABAMENTO NATURAL (NAO INCLUI ACESSORIOS DE FIXACAO) - REF. SINAPI | M2 | 1,30 | R\$ 236,77 | R\$ 308,27 |
| '026610 | CONJUNTO FIXACAO P/ TELHA DE ALUMINIO TRAPEZOIDAL (LABOR) | UN | 4,00 | R\$ 0,69 | R\$ 2,76 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|---|---------|----------|----------------|-------------|
| 1.4 | TELHA TERMOACÚSTICA EPS - AÇO GALV TRAPEZOIDAL 40, E=40MM, PINTURA BRANCA DUAS FACES, INCLUINDO ACESSÓRIOS. NÚCLEO EPS ESP. 30 MM | m² | R\$ 9,13 | R\$ 217,56 | R\$ 241,05 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 MÃO DE OBRA | | | | | |
| '010101 | AJUDANTE (AJUDANTE PRATICO - SINDUSCON) (LABOR) | H | 0,23 | R\$ 18,01 | R\$ 4,18 |
| '010150 | TELHADISTA - (OFICIAL - SINDUSCON) (LABOR) | H | 0,23 | R\$ 21,35 | R\$ 4,95 |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| MERCADO | Telha Metálica Sanduíche Trapezoidal 2 Faces TR40 3x1,04m Branco Calha Forte | UN | 0,35 | R\$ 619,90 | R\$ 214,80 |
| '026610 | CONJUNTO FIXACAO P/ TELHA DE ALUMINIO TRAPEZOIDAL (LABOR) | UN | 4,00 | R\$ 0,69 | R\$ 2,76 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|---|---------|----------|----------------|-------------|
| 1.6 | JANELA DE CORRER PARA VIDRO EM ALUMÍNIO ANODIZADO COR NATURAL, LINHA 25, COMPLETA, INCL. PUXADOR COM TRANCA, ALIZAR, CAIXILHO E CONTRAMARCO. JANELA COM VIDRO COMUM 3MM | m² | R\$ 0,00 | R\$ 673,39 | R\$ 673,39 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 071701-2 | Janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco, exclusive vidro. REF.: DER/LABOR | m2 | 1,00 | R\$ 516,64 | R\$ 516,64 |
| 10490 | VIDRO LISO INCOLOR 2 A 3 MM - SEM COLOCACAO. REF.: SINAPI | m2 | 0,95 | R\$ 165,00 | R\$ 156,75 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|---|---------|----------|----------------|--------------|
| 1.7 | JANELA DE CORRER PARA VIDRO EM ALUMÍNIO ANODIZADO COR NATURAL, LINHA 25, COMPLETA, INCL. PUXADOR COM TRANCA, ALIZAR, CAIXILHO E CONTRAMARCO. JANELA VIDRO DUPLO 6MM + 6MM | m² | R\$ 0,00 | R\$ 1.108,79 | R\$ 1.108,79 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 071701-2 | Janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco, exclusive vidro. REF.: DER/LABOR | m2 | 1,00 | R\$ 516,64 | R\$ 516,64 |
| 10491 | VIDRO LISO INCOLOR 6 MM - SEM COLOCACAO. REF.: SINAPI | m2 | 1,90 | R\$ 311,66 | R\$ 592,15 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|---|---------|----------|----------------|--------------|
| 1.8 | JANELA DE CORRER PARA VIDRO EM ALUMÍNIO ANODIZADO COR NATURAL, LINHA 25, COMPLETA, INCL. PUXADOR COM TRANCA, ALIZAR, CAIXILHO E CONTRAMARCO. JANELA VIDRO DUPLO 6MM LOW-E + 6MM | m² | R\$ 0,00 | R\$ 1.197,62 | R\$ 1.197,62 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 071701-2 | Janela de correr para vidro em alumínio anodizado cor natural, linha 25, completa, incl. puxador com tranca, alizar, caixilho e contramarco, exclusive vidro. REF.: DER/LABOR | m2 | 1,00 | R\$ 516,64 | R\$ 516,64 |
| 10491 | VIDRO LISO INCOLOR 6 MM - SEM COLOCACAO. REF.: SINAPI | m2 | 2,19 | R\$ 311,66 | R\$ 680,98 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|--|---------|------------|----------------|--------------|
| 2.1 | AR CONDICIONADO SPLIT ON/OFF QUENTE/FRIO - 18.000 BTU/h | un | R\$ 123,47 | R\$ 3.069,18 | R\$ 3.386,83 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 MÃO DE OBRA | | | | | |
| '010101 | AJUDANTE (AJUDANTE PRATICO - SINDUSCON) (LABOR) | H | 3,00 | R\$ 18,01 | R\$ 54,03 |
| '010281 | MECANICO DE REFRIGERACAO - (SINDIFER) (LABOR) | H | 3,00 | R\$ 18,34 | R\$ 55,02 |
| '010282 | TECNICO DE REFRIGERACAO - (SINDIFER) (LABOR) | H | 0,50 | R\$ 28,84 | R\$ 14,42 |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 2.1 | CONJ A/C SPLIT HIWALL EVAP+COND 18000BTU - CICLO FRIO - CLASSIFICACAO A (SELO PROCEL) 220V | UN | 1,00 | R\$ 2.951,10 | R\$ 2.951,10 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| | | | | | |
|---------|--|----|------|-----------|------------|
| '078898 | AMORTECEDOR VIBRACAO TRAD MICRO III VIBRASTOP 3/8" - ATE 100KG (LABOR) | UN | 4,00 | R\$ 29,52 | R\$ 118,08 |
|---------|--|----|------|-----------|------------|

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|---|---------|------------|----------------|--------------|
| 2.2 | AR CONDICIONADO SPLIT INVERTER QUENTE/FRIO - 18.000 BTU/h | un | R\$ 123,47 | R\$ 3.677,56 | R\$ 3.995,21 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 MÃO DE OBRA | | | | | |
| '010101 | AJUDANTE (AJUDANTE PRATICO - SINDUSCON) (LABOR) | H | 3,00 | R\$ 18,01 | R\$ 54,03 |
| '010281 | MECANICO DE REFRIGERACAO - (SINDIFER) (LABOR) | H | 3,00 | R\$ 18,34 | R\$ 55,02 |
| '010282 | TECNICO DE REFRIGERACAO - (SINDIFER) (LABOR) | H | 0,50 | R\$ 28,84 | R\$ 14,42 |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 2.1 | CONJ A/C SPLIT HIWALL EVAP+COND INVERTER 18000BTU - CICLO FRIO - CLASSIFICACAO A (SELO PROCEL) 220V | UN | 1,00 | R\$ 3.559,48 | R\$ 3.559,48 |
| '078898 | AMORTECEDOR VIBRACAO TRAD MICRO III VIBRASTOP 3/8" - ATE 100KG (LABOR) | UN | 4,00 | R\$ 29,52 | R\$ 118,08 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-----------------------------|--|---------|---------------|----------------|----------------|
| 2.3 | AR CONDICIONADO CENTRAL EM SISTEMA VRF P/ EDIFICIOS COM 1Q+S - 4 CONDENADORAS VRF/64 EVAPORADORAS | un | R\$ 32.146,09 | R\$ 649.280,85 | R\$ 731.983,09 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 MÃO DE OBRA | | | | | |
| | <u>Montagem das unidades evaporadoras</u> | unid. | 64,00 | | |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 176,00 | R\$ 25,71 | R\$ 4.524,96 |
| 6130-SINAPI | Ajudante instalador hidráulico | h | 176,00 | R\$ 20,23 | R\$ 3.560,48 |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 176,00 | R\$ 20,23 | R\$ 3.560,48 |
| | <u>Rede de dutos PVC</u> | m | 68,00 | | |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 187,00 | R\$ 20,23 | R\$ 3.783,01 |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 187,00 | R\$ 25,71 | R\$ 4.807,77 |
| | <u>Rede de dutos de cobre 1 1/8"</u> | m | 68,00 | | |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 51,00 | R\$ 20,23 | R\$ 1.031,73 |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 34,00 | R\$ 25,71 | R\$ 874,14 |
| | <u>Derivações de cobre</u> | un | 64,00 | | |
| 2701-SINAPI | Montador (tubo aço/equipamentos) | h | 96,00 | R\$ 22,72 | R\$ 2.181,12 |
| 242/SINAPI | Ajudante especializado | h | 96,00 | R\$ 20,23 | R\$ 1.942,08 |
| | <u>Configuração do conjunto cond/evaps</u> | un | 64,00 | | |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 128,00 | R\$ 25,71 | R\$ 3.290,88 |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 128,00 | R\$ 20,23 | R\$ 2.589,44 |
| 2 MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | | |
| 2.1 | <u>Instalação das unidades evaporadoras com válvula de controle e de bloqueio e carga de gás refrigerante, conforme especificação.</u> | un | 64,00 | R\$ 1.293,99 | R\$ 82.815,43 |
| | Unidades evaporadoras - 9.600 BTU/h | un | 64,00 | R\$ 2.327,00 | R\$ 148.928,00 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| | | | | | |
|----------------|--|----|-------|----------------|----------------|
| | Unidades condensadoras - 172.800 BTU/h (18HP) | un | 4,00 | R\$ 42.482,10 | R\$ 169.928,40 |
| 2.2 | <u>Fornecimento de rede de dutos em PVC 250mm isolados com manta elastomérica e instalação do sistema de distribuição de ar e filtragem, conforme especificação.</u> | | | | |
| | TUBO PVC TIPO LEVE PBL DN 250MM PARA VENTILAÇÃO / EXAUSTÃO | m | 68,00 | R\$ 100,34 | R\$ 6.823,12 |
| | Isolamento Termico, esp. 25 mm, crescente tipo Elastomerico da Armaflex. | m | 68,00 | R\$ 52,38 | R\$ 3.561,84 |
| | Adesivo Armaflex 520 lata com 900ml | lt | 0,68 | R\$ 125,31 | R\$ 85,21 |
| 2.3 | <u>Fornecimento e instalação de tubo de cobre Ø 1 1/8" com isolamento térmico borracha elastomérica e conexões, conforme especificação</u> | | | | |
| | Tubo de cobre rígido Ø 1 1/8" | m | 68,00 | R\$ 69,32 | R\$ 4.713,76 |
| | Tubo de borracha elastomérica M-35 | m | 81,60 | R\$ 14,27 | R\$ 1.164,43 |
| | Adesivo Armaflex 520 lata com 900ml | lt | 0,68 | R\$ 125,31 | R\$ 85,21 |
| 12732/SINAPI | Solda p/ tubo e conexões de cobre – tubo 500g | un | 7,14 | R\$ 311,06 | R\$ 2.220,97 |
| 03335/SINAPI | Máquina p/ solda - incluso na solda | h | 68,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| 393/SINAPI | Abracadeira tipo D 1" c/ parafuso" | un | 68,00 | R\$ 2,33 | R\$ 158,44 |
| | Tirante com fixação - não está considerado fixação horizontal (interna ao apartamento) | m | 34,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| | Gás nitrogênio para limpeza - considerado 30% do preço do tubo | m³ | 6,80 | R\$ 20,80 | R\$ 141,41 |
| 2.4 | <u>Derivação de cobre</u> | un | 64,00 | | |
| | Derivação de cobre | un | 64,00 | R\$ 289,94 | R\$ 18.556,16 |
| | Placa ou manta elastomérica marca Armacell Class I Armaflex e=1,3cm ou equivalente | m² | 32,00 | R\$ 109,90 | R\$ 3.516,80 |
| 92986 / SINAPI | Alimentação elétrica em cabo de cobre isolamento temoplástico 0,6/1KV anti-chama - Fornecimento e Instalação - 3 FASES #35MM2 | m | 66,00 | R\$ 32,63 | R\$ 2.153,58 |
| 3 | VERBAS | | | | |
| | Equipamentos complementares, acessórios e componentes do sistema, incluindo instalação do sistema de automação e acessórios - considerando 30% do preço total | vb | 1,00 | R\$ 204.428,08 | R\$ 204.428,08 |

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|-------------|--|---------|---------------|----------------|------------------|
| 2.4 | AR CONDICIONADO CENTRAL EM SISTEMA VRF P/ EDIFICIOS COM 2Q+S - 4 CONDENSADORAS VRF/96 EVAPORADORAS | un | R\$ 42.970,81 | R\$ 923.948,25 | R\$ 1.034.499,26 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 1 | MÃO DE OBRA | | | | |
| | <u>Montagem das unidades evaporadoras</u> | unid. | 96,00 | | |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 264,00 | R\$ 25,71 | R\$ 6.787,44 |
| 6130-SINAPI | Ajudante instalador hidráulico | h | 264,00 | R\$ 20,23 | R\$ 5.340,72 |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 264,00 | R\$ 20,23 | R\$ 5.340,72 |
| | <u>Rede de dutos PVC</u> | m | 68,00 | | |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 187,00 | R\$ 20,23 | R\$ 3.783,01 |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 187,00 | R\$ 25,71 | R\$ 4.807,77 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| | | | | | |
|----------------|--|----|--------|----------------|----------------|
| | Rede de dutos de cobre 1 1/8" | m | 68,00 | | |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 51,00 | R\$ 20,23 | R\$ 1.031,73 |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 34,00 | R\$ 25,71 | R\$ 874,14 |
| | <u>Derivações de cobre</u> | un | 96,00 | | |
| 2701-SINAPI | Montador (tubo aço/equipamentos) | h | 144,00 | R\$ 22,72 | R\$ 3.271,68 |
| 242/SINAPI | Ajudante especializado | h | 144,00 | R\$ 20,23 | R\$ 2.913,12 |
| | <u>Configuração do conjunto cond/evaps</u> | un | 96,00 | | |
| 2437-SINAPI | Montador eletromecânico | h | 192,00 | R\$ 25,71 | R\$ 4.936,32 |
| 242-SINAPI | Ajudante especializado | h | 192,00 | R\$ 20,23 | R\$ 3.884,16 |
| 2 | MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | |
| 2.1 | <u>Instalação das unidades evaporadoras com válvula de controle e de bloqueio e carga de gás refrigerante, conforme especificação.</u> | un | 96,00 | R\$ 1.940,99 | R\$ 186.334,72 |
| | Unidades evaporadoras - 9.600 BTU/h | un | 96,00 | R\$ 2.327,00 | R\$ 223.392,00 |
| | Unidades condensadoras - 172.800 BTU/h (18HP) | un | 4,00 | R\$ 42.482,10 | R\$ 169.928,40 |
| 2.2 | <u>Fornecimento de rede de dutos em PVC 250mm isolados com manta elastomérica e instalação do sistema de distribuição de ar e filtragem, conforme especificação.</u> | | | | |
| | TUBO PVC TIPO LEVE PBL DN 250MM PARA VENTILAÇÃO / EXAUSTÃO | m | 68,00 | R\$ 100,34 | R\$ 6.823,12 |
| | Isolamento Termico, esp. 25 mm, crescente tipo Elastomerico da Armaflex. | m | 68,00 | R\$ 52,38 | R\$ 3.561,84 |
| | Adesivo Armaflex 520 lata com 900ml | lt | 0,68 | R\$ 125,31 | R\$ 85,21 |
| 2.3 | <u>Fornecimento e instalação de tubo de cobre Ø 1 1/8" com isolamento térmico borracha elastomérica e conexões, conforme especificação</u> | | | | |
| | Tubo de cobre rígido Ø 1 1/8" | m | 68,00 | R\$ 69,32 | R\$ 4.713,76 |
| | Tubo de borracha elastomérica M-35 | m | 81,60 | R\$ 14,27 | R\$ 1.164,43 |
| | Adesivo Armaflex 520 lata com 900ml | lt | 0,68 | R\$ 125,31 | R\$ 85,21 |
| 12732/SINAPI | Solda p/ tubo e conexões de cobre – tubo 500g | un | 7,14 | R\$ 311,06 | R\$ 2.220,97 |
| 03335/SINAPI | Máquina p/ solda - incluso na solda | h | 68,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| 393/SINAPI | Abraçadeira tipo D 1" c/ parafuso" | un | 68,00 | R\$ 2,33 | R\$ 158,44 |
| | Tirante com fixação - não está considerado fixação horizontal (interna ao apartamento) | m | 34,00 | R\$ 0,00 | R\$ 0,00 |
| | Gás nitrogênio para limpeza - considerado 30% do preço do tubo | m³ | 6,80 | R\$ 20,80 | R\$ 141,41 |
| 2.4 | <u>Derivação de cobre</u> | un | 96,00 | | |
| | Derivação de cobre | un | 96,00 | R\$ 289,94 | R\$ 27.834,24 |
| | Placa ou manta elastomérica marca Armacell Class I Armaflex e=1,3cm ou equivalente | m² | 48,00 | R\$ 109,90 | R\$ 5.275,20 |
| 92986 / SINAPI | Alimentação elétrica em cabo de cobre isolamento termoplástico 0,6/1KV anti-chama - Fornecimento e Instalação - 3 FASES #35MM2 | m | 66,00 | R\$ 32,63 | R\$ 2.153,58 |
| 3 | VERBAS | | | | |
| | Equipamentos complementares, acessórios e componentes do sistema, incluindo instalação do sistema de automação e acessórios - considerando 30% do preço total | vb | 1,00 | R\$ 290.075,72 | R\$ 290.075,72 |

Quadro 20 – Composições de preços unitários

(continua)

| Serv. | Composição de Preços Unitários | Unid. | Total MO | Total Mat+Eq | Preço unit. |
|----------|---|----------------|----------|----------------|--------------|
| 3.1 | INSTALAÇÃO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS | m ² | R\$ 0,00 | R\$ 1.309,26 | R\$ 1.309,26 |
| Item | Descrição | Unidade | Coef. | Preço Unitário | Total |
| 2 | MATERIAIS/SERVIÇOS | | | | |
| 2.1 | Kit Gerador Energia Solar 2,20 kWp - Microinversor Deye c/ Wifi SUN1600 - Paineis Sunova | UN | 0,09 | R\$ 10.389,00 | R\$ 981,95 |
| 3 | VERBAS | | | | |
| 3.1 | Instalação dos paineis, incluindo elétrica e aterramento - considerado 25% do valor total | VB | 1,00 | R\$ 327,32 | R\$ 327,32 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

APÊNDICE B – CÁLCULO DO VALOR PRESENTE LÍQUIDO DOS CUSTOS

Neste apêndice, serão apresentadas as planilhas com fluxo de caixa para cálculo do valor presente líquido (VPL) dos custos envolvidos na renovação do edifício ao longo do período de análise de 30 anos, com uma taxa de desconto de 6%.

Os custos de substituição considerados no fluxo de caixa estão explicitados na Tabela 20.

Tabela 20 – Custos de substituição e valor residual ao fim do período de análise para cada sistema

| Sistema | Custo de substituição (R\$/m ²) | Tempo de vida útil | Número de substituições | Valor residual (R\$/m ²) |
|----------------|---|--------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| Split | 369,70 | 15 | 1 | 0,00 |
| Split inverter | 436,11 | 15 | 1 | 0,00 |
| VRF | 1.205,91 | 20 | 1 | 602,96 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os custos de manutenção considerados no fluxo de caixa estão explicitados na Tabela 21.

Tabela 21 – Custos de manutenção anuais para cada sistema

| Sistema | Custo de manutenção | Referência | Quantidade | Total (R\$) | Total (R\$/m ²) |
|----------------------|---------------------|--------------------------------|------------|-------------|-----------------------------|
| Split/Split inverter | 350,00 | Qtd. de apartamentos | 1504 | 526400,00 | 11,72 |
| VRF - condens. | 1400,00 | Qtd. de unidades condensadoras | 188 | 263200,00 | 5,86 |
| VRF - evap. | 280,00 | Qtd. de unidades evaporadoras | 3744 | 1048320,00 | 23,35 |
| VRF - total | | | | | 29,21 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Os custos iniciais de energia considerados no fluxo de caixa estão explicitados na Tabela 22.

Tabela 22 – Custos iniciais de energia para o caso de referência e cenários de renovação

| Cenário | Consumo líquido ¹ (kWh/ano) | Tarifa (R\$/kWh) | Custo total no 1º ano | Custo/m ² no 1º ano |
|--------------------|--|------------------|-----------------------|--------------------------------|
| Caso de referência | 6.086.941,47 | 0,69025 | R\$ 4.201.539,54 | R\$ 93,58 |
| P1+1-Split | 4.642.047,29 | 0,69025 | R\$ 3.204.194,63 | R\$ 71,37 |
| P1+2-VRF | 4.227.490,38 | 0,69025 | R\$ 2.918.044,81 | R\$ 64,99 |
| P1+3-VRF+PV | 647.228,16 | 0,69025 | R\$ 446.752,23 | R\$ 9,95 |
| P2+1-Split | 4.490.640,01 | 0,69025 | R\$ 3.099.685,06 | R\$ 69,04 |
| P2+2-VRF | 4.114.101,99 | 0,69025 | R\$ 2.839.777,95 | R\$ 63,25 |
| P2+3-VRF+PV | 533.839,76 | 0,69025 | R\$ 368.485,37 | R\$ 8,21 |

¹ Descontado da energia gerada

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

As tabelas a seguir detalham o cálculo do VPL para cada cenário de renovação.

Tabela 23 – Valor presente líquido dos custos para renovação do caso de referência

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 273,65 | 369,70 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 93,58 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 98,60 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 103,88 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 109,45 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 115,32 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 121,50 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 128,01 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 134,87 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 142,10 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 149,72 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 157,74 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 166,20 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 175,11 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 184,49 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 369,70 | 11,72 | 194,38 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 204,80 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 215,78 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 227,34 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 239,53 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 252,37 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 265,89 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 280,14 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 295,16 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 310,98 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 327,65 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 345,21 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 363,72 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 383,21 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 403,75 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 425,39 |
| VPL | | 273,65 | 369,70 | 154,26 | 161,39 | 2429,22 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 24 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 1-Split

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 841,75 | 436,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 71,37 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 75,19 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 79,22 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 83,47 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 87,94 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 92,66 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 97,62 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 102,86 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 108,37 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 114,18 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 120,30 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 126,75 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 133,54 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 140,70 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 436,11 | 11,72 | 148,24 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 156,18 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 164,56 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 173,38 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 182,67 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 192,46 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 202,78 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 213,65 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 225,10 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 237,16 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 249,87 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 263,27 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 277,38 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 292,25 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 307,91 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 324,41 |
| VPL | | 841,75 | 436,11 | 181,97 | 161,39 | 1852,58 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 25 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 2-VRF

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 841,75 | 1205,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 64,99 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 68,48 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 72,15 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 76,02 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 80,09 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 84,38 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 88,91 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 93,67 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 98,69 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 103,98 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 109,56 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 115,43 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 121,61 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 128,13 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 135,00 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 142,24 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 149,86 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 157,89 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 166,36 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 1205,91 | 29,21 | 175,27 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 184,67 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 194,57 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 204,99 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 215,98 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 227,56 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 239,76 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 252,61 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 266,15 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 280,41 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | -602,96 | 29,21 | 295,44 |
| VPL | | 841,75 | 1205,91 | 271,03 | 402,10 | 1687,14 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 26 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P1 + 3-VRF+PV

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 841,75 | 1641,27 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 9,95 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 10,48 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 11,05 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 11,64 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 12,26 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 12,92 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 13,61 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 14,34 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 15,11 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 15,92 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 16,77 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 17,67 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 18,62 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 19,62 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 20,67 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 21,78 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 22,94 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 24,17 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 25,47 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 1205,91 | 29,21 | 26,83 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 28,27 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 29,79 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 31,38 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 33,07 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 34,84 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 36,71 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 38,67 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 40,75 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 42,93 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | -602,96 | 29,21 | 45,23 |
| VPL | | 841,75 | 1641,27 | 271,03 | 402,10 | 258,30 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 27 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 1-Split

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 814,37 | 436,11 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 69,04 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 72,74 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 76,64 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 80,75 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 85,08 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 89,64 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 94,44 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 99,50 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 104,84 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 110,45 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 116,37 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 122,61 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 129,18 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 136,11 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 436,11 | 11,72 | 143,40 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 151,09 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 159,19 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 167,72 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 176,71 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 186,18 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 196,16 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 206,68 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 217,75 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 229,43 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 241,72 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 254,68 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 268,33 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 282,71 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 297,87 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 11,72 | 313,83 |
| VPL | | 814,37 | 436,11 | 181,97 | 161,39 | 1792,16 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 28 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 2-VRF

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 814,37 | 1205,91 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 63,25 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 66,64 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 70,21 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 73,98 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 77,94 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 82,12 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 86,52 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 91,16 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 96,04 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 101,19 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 106,62 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 112,33 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 118,35 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 124,70 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 131,38 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 138,42 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 145,84 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 153,66 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 161,89 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 1205,91 | 29,21 | 170,57 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 179,71 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 189,35 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 199,50 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 210,19 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 221,46 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 233,33 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 245,83 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 259,01 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 272,89 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | -602,96 | 29,21 | 287,52 |
| VPL | | 814,37 | 1205,91 | 271,03 | 402,10 | 1641,89 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

Tabela 29 – Valor presente líquido dos custos para renovação do cenário P2 + 3-VRF+PV

| Ano | $1/((1+r)^t)$ | Envoltória (R\$/m ²) | Sistemas (R\$/m ²) | Substituição (R\$/m ²) | Manutenção (R\$/m ²) | Energia (R\$/m ²) |
|------------|---------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 0 | 1,0000 | 814,37 | 1641,27 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 1 | 0,9434 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 8,21 |
| 2 | 0,8900 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 8,65 |
| 3 | 0,8396 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 9,11 |
| 4 | 0,7921 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 9,60 |
| 5 | 0,7473 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 10,11 |
| 6 | 0,7050 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 10,66 |
| 7 | 0,6651 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 11,23 |
| 8 | 0,6274 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 11,83 |
| 9 | 0,5919 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 12,46 |
| 10 | 0,5584 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 13,13 |
| 11 | 0,5268 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 13,83 |
| 12 | 0,4970 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 14,58 |
| 13 | 0,4688 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 15,36 |
| 14 | 0,4423 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 16,18 |
| 15 | 0,4173 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 17,05 |
| 16 | 0,3936 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 17,96 |
| 17 | 0,3714 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 18,92 |
| 18 | 0,3503 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 19,94 |
| 19 | 0,3305 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 21,01 |
| 20 | 0,3118 | 0,00 | 0,00 | 1205,91 | 29,21 | 22,13 |
| 21 | 0,2942 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 23,32 |
| 22 | 0,2775 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 24,57 |
| 23 | 0,2618 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 25,89 |
| 24 | 0,2470 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 27,27 |
| 25 | 0,2330 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 28,74 |
| 26 | 0,2198 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 30,28 |
| 27 | 0,2074 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 31,90 |
| 28 | 0,1956 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 33,61 |
| 29 | 0,1846 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 29,21 | 35,41 |
| 30 | 0,1741 | 0,00 | 0,00 | -602,96 | 29,21 | 37,31 |
| VPL | | 814,37 | 1641,27 | 271,03 | 402,10 | 213,05 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

ANEXO B – PADRÕES DE OCUPAÇÃO E CARGAS INTERNAS CONSIDERADAS NAS SIMULAÇÕES

A ABNT NBR 15.575-1 apresenta no item 11.4.7.3 os parâmetros adotados na modelagem da ocupação e das cargas internas das edificações residenciais simuladas. A quantidade de pessoas por habitacional se dá pela taxa de dois ocupantes por dormitório existente, excluindo-se as dependências de empregados. A norma define padrões de ocupação para ambientes do tipo dormitório, sala ou uso misto de dormitório/sala, conforme Tabela 30.

Tabela 30 – Padrões de ocupação diários dos APP

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

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

A carga térmica associada ao calor produzido pela atividade metabólica dos ocupantes é estabelecida pela norma de acordo com a Tabela 31 e deve ser adotada apenas nos APP.

Tabela 31 – Taxa metabólica e fração radiante para os usuários

| Ambiente | Período de uso | Atividade realizada | Calor produzido por área de superfície corporal W/m ² | Calor produzido por uma pessoa com 1,80 m ² de área de superfície corporal W | Fração radiante |
|------------|-------------------------------|--------------------------|--|---|-----------------|
| Dormitório | 00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59 | Dormindo ou descansando | 45 | 81 | 0,30 |
| Sala | 14:00 – 21:59 | Sentado ou assistindo TV | 60 | 108 | 0,30 |
| Uso misto | 00:00 – 07:59 e 22:00 – 23:59 | Dormindo ou descansando | 45 | 81 | 0,30 |
| | 14:00 – 21:59 | Sentado ou assistindo TV | 60 | 108 | 0,30 |

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

O padrão de uso da iluminação artificial a ser considerado nos APP é estabelecido pela norma de acordo com a Tabela 32.

Tabela 32 – Padrões de uso do sistema de iluminação artificial dos APP

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

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

A densidade de potência de iluminação a ser adotada nos APP é estabelecida pela norma de acordo com a Tabela 33.

Tabela 33 – Densidade de potência instalada, fração radiante e fração visível para o sistema de iluminação

| Ambiente | DPI W/m ² | Fração radiante | Fração visível |
|------------|-------------------------|-----------------|----------------|
| Dormitório | 5,00 | 0,32 | 0,23 |
| Sala | 5,00 | 0,32 | 0,23 |
| Uso misto | 5,00 | 0,32 | 0,23 |

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

O padrão de uso e potência de equipamentos a ser adotada nas salas é estabelecida pela norma de acordo com a Tabela 34.

Tabela 34 – Período de uso, densidade de cargas internas e fração radiante para equipamentos dos APP

| Ambiente | Período de uso | Potência W | Fração radiante |
|-----------|----------------|---------------|-----------------|
| Sala | 14:00 – 21:59 | 120 | 0,30 |
| Uso misto | 14:00 – 21:59 | 120 | 0,30 |

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

ANEXO C – MODELAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E AQUECIMENTO COM CARGAS IDEIAS

A ABNT NBR 15.575-1 apresenta no item 11.4.7.4 os parâmetros adotados na modelagem do sistema de refrigeração e aquecimento das edificações residenciais simuladas. A norma estabelece que os modelos simulados devem utilizar sistema de cálculo de carga térmica que seja considerado ideal (*ideal loads*). Para a modelagem conforme a norma, devem ser observadas as seguintes recomendações:

- Manter todas as portas e janelas fechadas durante todo o ano, com exceção da janela do banheiro, que deve ser mantida sempre aberta;
- Considerar nas portas e janelas a infiltração de ar pelas frestas, considerando os coeficientes da Tabela 35;

Tabela 35 – Descrição dos parâmetros da ventilação natural para portas e janelas nos APP e APT

| Parâmetros | Portas | Janelas |
|---|---------|----------|
| Coefficiente de fluxo de ar por frestas, quando a abertura está fechada kg/(s.m) | 0,002 4 | 0,000 63 |
| Expoente de fluxo de ar por frestas quando a abertura está fechada (adimensional) | 0,59 | 0,63 |
| Coefficiente de descarga (C_d) da abertura (adimensional) | 0,60 | 0,60 |

Fonte: NBR 15.575-1 (2021)

- Deve ser adotado *setpoint* de 23 °C para refrigeração e, no caso em que $TBSm < 25$ °C, adotado *setpoint* de 21 °C para aquecimento;
- Deve ser considerado acionamento do sistema de aquecimento e refrigeração apenas se o APP estiver ocupado;

A norma ainda especifica que a simulação deve solicitar como *output* as cargas térmicas de refrigeração e aquecimento de cada APP (variável de saída horária).