



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Rafael Fernando Giaretta

**AVALIAÇÃO DO CUSTO-BENEFÍCIO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES DE SEGURANÇA PÚBLICA EM SANTA
CATARINA VISANDO RETROFIT PARA NZEB**

Florianópolis
2022

Rafael Fernando Giaretta

**AVALIAÇÃO DO CUSTO-BENEFÍCIO DE MEDIDAS DE EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES DE SEGURANÇA PÚBLICA EM SANTA
CATARINA VISANDO RETROFIT PARA NZEB**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo.
Orientadora: Prof.^a Michele Fossati, Dra.

Florianópolis

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Giaretta, Rafael Fernando

Avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações de segurança pública em Santa Catarina visando retrofit para NZEB / Rafael Fernando Giaretta ; orientadora, Michele Fossati, 2022.

150 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Florianópolis, 2022.

Inclui referências.

1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações. 3. Edificações de segurança pública. 4. Edificações de Energia Quase Zero (NZEB). I. Fossati, Michele. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Rafael Fernando Giaretta

Avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações de segurança pública em Santa Catarina visando retrofit para NZEB.

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Profa. Cláudia Naves David Amorim, Dra.
Universidade de Brasília

Maria Andrea Triana Montes, Dra.
Membro Externo

Prof. Roberto Lamberts, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Prof. Paolo Colosso, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

Profa. Michele Fossati, Dra.
Orientadora

Florianópolis, 2022.

Este trabalho é dedicado à minha mãe, irmãos, amigos e todos que de alguma forma me ajudaram a atingir este objetivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha mãe Oliria Mattana por todo o apoio ao me mostrar cotidianamente amor, força e resiliência. Ao meu irmão Rogério Junior por me inspirar desde sempre no caminho do desenvolvimento intelectual e amadurecimento como ser humano. A minha irmã Chana pela parceria incondicional sendo presença, suporte, incentivo e exemplo em momentos de responsabilidade e diversão. Também a toda a sociedade brasileira, que patrocina meus estudos através da educação pública e de qualidade desde a minha educação fundamental.

Meus mais sinceros agradecimentos à minha orientadora Michele Fossati pelo apoio, paciência e aprendizados compartilhados no caminho de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina, na figura do Diretor de Minas e Energia Cristiano Alencar, e da Polícia Civil de Santa Catarina, que permitiram a realização deste trabalho e forneceram acesso aos documentos, na figura do Delegado de Polícia Civil Gustavo Madeira da Silveira e ao Agente de Polícia Civil Paulo Victor da Silva em diversos momentos.

Ao PósARQ e à UFSC pelas oportunidades e toda a estrutura que me enche de orgulho. À Dra. Tatiana Paula Alves, pois através da sua Tese de Doutorado que pude aprofundar os estudos sobre potencial de economia de energia em edificações. Apesar de todos os desafios e ataques à sociedade brasileira a partir de 2019, a pesquisa científica brasileira em edificações avança por mais benefícios à sociedade e ao país!

As professoras Dra. Cláudia Naves David Amorim, Dra. Maria Andrea Triana e ao professor Roberto Lamberts, pesquisadores membros da banca que admiro muitíssimo, pelas discussões, correções e apontamentos para o aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos colegas do LabEEE UFSC por serem inspiração e suporte ao compartilhar conhecimento: Ana Paula, Renata, Greici, Luiza Castro, Mateus, Matheus, Lorrany e principalmente Artur Kamimura, Maíra André, Letícia Eli, Marcelo Olinger e Verônica Gnecco, que acompanharam e contribuíram muito neste trabalho.

Aos amigos Gustavo Appel, Mágat Junges, Rafael Daron, Renato Philippsen, Rodrigo Stüpp, a família CABUM, os membros do grupo “renegados” e todos que apoiaram e dividiram as ansiedades do período do mestrado em meio a uma pandemia.

A todos que de alguma forma contribuíram para que eu alcançasse mais este objetivo, meu muito obrigado!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“A Arquitetura, ou a arte de construir, já significa projetar edifícios que respiram, que não consumam muita energia, que sejam leves, que convivam com o meio ambiente como herança para o futuro.”

(Renzo Piano, 2020)

RESUMO

Este estudo desenvolve uma avaliação do custo-benefício de medidas de eficiência energética em Delegacias de Polícia de Santa Catarina visando retrofit para NZEB. Sessenta e duas edificações de segurança pública de propriedade do Estado foram avaliadas com base na aplicação de questionários visando compreender o consumo de energia, os equipamentos existentes e as características físicas das edificações. Com isso, desenvolveu-se um arquétipo representativo que foi avaliado pelo método de simulação computacional da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) para a localidade de Florianópolis-SC. Através do processo de simulação computacional no *EnergyPlus* com ar condicionado e ventilação natural, calculou-se a carga térmica anual de refrigeração da edificação e o percentual de fração de horas ocupadas em conforto térmico pelo método do conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55. Os sistemas avaliados foram a envoltória, o sistema de condicionamento de ar e iluminação. Através da comparação do percentual de redução de energia primária do arquétipo real com seu modelo de referência, a edificação obteve classificação B de eficiência energética. Em seguida, por meio de um processo de busca sequencial apoiado pela simulação de desempenho energético, o arquétipo foi otimizado com a redução da absorvância térmica da envoltória aplicando uma cor mais clara, lâmpadas LED para diminuir a densidade de potência de iluminação, a troca do equipamento de ar condicionado considerando um aparelho de alta eficiência energética inverter e, por último, a troca do vidro das aberturas por um vidro com fator solar mais baixo. Os parâmetros avaliados foram o potencial de economia de energia primária e a economia líquida a partir do custo do ciclo de vida em relação ao arquétipo para verificar o desempenho de cada conjunto de retrofit otimizado, bem como a diminuição da quantidade de módulos fotovoltaicos para geração de energia renovável. O ciclo de vida considerado foi de 25 anos. Os resultados mostraram que economias de 20,18% no desempenho energético podem ser atingidas com um conjunto de retrofit composto por absorvância solar menor e diminuição da densidade de potência com a troca das luminárias fluorescentes por lâmpadas LED. Este conjunto responde pelo cenário de melhor custo-benefício, com fluxo de caixa positivo a partir de 7,7 anos, retorno do investimento em 14,1 anos e taxa interna de retorno de 10,7. Por último, foi desenvolvida uma análise sobre a definição NZEB suprimindo 50% e 99,9% do consumo de energia da edificação. Verificou-se que optar por 99,9% é mais vantajoso, uma vez que o tempo de retorno do investimento é menor e a diferença do custo do ciclo de vida é de 6% ao final de 25 anos. Concluiu-se, portanto, que o retrofit através do investimento em eficiência energética primeiro com a aplicação de um conjunto de retrofit e inserção de geração de energia renovável no local para atingir o objetivo NZEB possui viabilidade técnica e financeira sendo mais econômico do que não efetuar nenhuma modificação no arquétipo estudado.

Palavras-chave: Custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações. Edificações de segurança pública. Edificações de Energia Quase Zero (NZEB).

ABSTRACT

This study develops a cost-benefit assessment of energy efficiency measures in Santa Catarina Police Stations aiming at retrofit to NZEB. Sixty-two public security buildings owned by the State were evaluated based on the application of questionnaires aimed at understanding energy consumption, existing equipment and the physical characteristics of the buildings. With this, a representative archetype was developed that was evaluated by the computational simulation method of the Inmetro Normative Instruction for the Energy Efficiency Classification of Commercial, Service and Public Buildings (INI-C) for the locality of Florianópolis-SC. Through the computational simulation process in EnergyPlus with air conditioning and natural ventilation, the annual thermal load for cooling the building and the percentage of fraction of hours occupied in thermal comfort were calculated using the adaptive comfort method of ASHRAE Standard 55. The systems evaluated were the wrap, the air conditioning system and lighting. By comparing the percentage of primary energy reduction of the real archetype with its reference model, the building obtained a B rating for energy efficiency. Then, through a sequential search process supported by the energy performance simulation, the archetype was optimized by reducing the thermal absorbance of the envelope by applying a lighter color, LED lamps to decrease the lighting power density, changing the air conditioning equipment considering a highly energy efficient inverter device and, finally, the replacement of the glass in the openings for a glass with a lower solar factor. The parameters evaluated were the potential for primary energy savings and the net savings from the life cycle cost in relation to the archetype to verify the performance of each optimized retrofit set, as well as the decrease in the number of photovoltaic modules for generating electricity. renewable energy. The life cycle considered was 25 years. The results showed that savings of 20.18% in energy performance can be achieved with a retrofit set consisting of lower solar absorbance and reduced power density with the replacement of fluorescent luminaires for LED lamps. This set accounts for the best cost-benefit scenario, with a positive cash flow from 7.7 years onwards, a return on investment of 14.1 years and an internal rate of return of 10.7. Finally, an analysis was developed on the NZEB definition supplying 50% and 99.9% of the building's energy consumption. It was found that opting for 99.9% is more advantageous, since the payback time is shorter and the life cycle cost difference is 6% at the end of 25 years. It was concluded, therefore, that ren through investment in energy efficiency first with the application of a set of retrofit and insertion of renewable energy generation on site to achieve the NZEB objective has technical and financial feasibility being more economical than not carrying out no modification in the studied archetype.

Keywords: Cost-effectiveness of energy efficiency measures in buildings. Public safety buildings. Nearly Zero Energy Buildings (NZEB).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais objetivos em uma otimização energética	17
Figura 2 - Hierarquia do projeto NZEB.....	21
Figura 3 - Metodologia geral para o estabelecimento de modelos de edifícios de referência no Projeto TABULA	30
Figura 4 – Média da irradiação horizontal global para Santa Catarina, no Brasil, e Alemanha, na Europa.....	42
Figura 5: Curva de custos globais.	46
Figura 6 – Processo básico de busca sequencial.....	49
Figura 7 - Método de pesquisa sequencial de quatro medidas de retrofit.	51
Figura 8 - Fluxograma resumo do método da pesquisa.....	54
Figura 9 - Estado de Santa Catarina com as edificações participantes do estudo	56
Figura 10 - Obtenção das informações das edificações.....	57
Figura 11 - Tabela de levantamento dos equipamentos das edificações	58
Figura 12 - Temperaturas externas da cidade de Florianópolis e limites de aceitabilidade.	63
Figura 13 – Processo de otimização para NZEB.....	70
Figura 14 - Esquema do caminho ideal de custo-benefício.....	75
Figura 15 – Tabela tipológica das edificações do estudo	80
Figura 16 - Síntese dos grupos tipológicos - dados medianos.....	81
Figura 17 – Valores medianos e desvios padrões.....	81
Figura 18 - Mediana do consumo mensal - kWh	82
Figura 19 – Ocupação e uso de iluminação e equipamentos da edificação em dias de semana.	82
Figura 20 – Planta baixa representativa da tipologia A.....	84
Figura 21 – Imagens do levantamento na 2º Delegacia de São José.....	85
Figura 22 - Comparação do consumo real com o consumo estimado.....	86
Figura 23 - Resumo dos usos finais para o consumo energético estimado	87
Figura 24 – Perspectiva e planta baixa do arquétipo desenvolvido.....	90
Figura 25 - Comparação de consumo mediano da planilha PCSC,.....	91
Figura 26 - Método de pesquisa sequencial dos conjuntos de retrofit.....	105
Figura 27 – Comparação dos custos do ciclo de vida para 99,9% e 50% NZEB.....	106
Figura 28 – Distribuição por usos finais e m ² módulos FV - IUE anual em EP (kWh)	108
Figura 29 – Evolução do consumo de energia em 25 anos com taxa de 5,44% a.a.	109

Figura 30 – Diminuição da necessidade de módulos FV para 99,9% NZEB.....	110
Figura 31 - Fluxos de caixa e retorno do investimento para o arquétipo 50% NZEB.....	111
Figura 32 - Fluxos de caixa e retorno do investimento para o arquétipo 99,9% NZEB.....	112
Figura 33 - Fluxos de caixa e retorno do investimento dos conjuntos de retrofit para 50% NZEB	113
Figura 34 – Fluxos de caixa e retorno do investimento dos conjuntos de retrofit para 99,9% NZEB.....	115
Figura 35 - Taxa interna de retorno e taxa mínima de atratividade para 99,9% e 50% NZEB.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estratégias bioclimáticas para as Zonas 1, 2, 3 e 5.....	36
Tabela 2 - Quadro resumo das medidas de eficiência energética e otimização para NZEB	39
Tabela 3 – Parâmetros medianos que foram reunidos para construção do modelo típico.....	60
Tabela 4 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética de acordo com o grupo climático do sistema de condicionamento de ar.....	66
Tabela 5 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação	66
Tabela 6 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral.....	68
Tabela 7 - Medidas de otimização selecionadas.....	69
Tabela 8 – Médias de irradiação global mensal (kWh)	73
Tabela 9 - Parâmetros econômicos.....	77
Tabela 10 – Pressupostos da pesquisa	78
Tabela 11 - Características visuais da volumetria das edificações	79
Tabela 12 – Lista de ambientes e resultado percentual de área das edificações.	88
Tabela 13 - Fonte e cruzamento final das características para construção do arquétipo.....	89
Tabela 14 - Valores de referência para edificações de escritório	92
Tabela 15 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética da envoltória .	93
Tabela 16 - Cálculo do percentual de redução de consumo para refrigeração	94
Tabela 17 – Cálculo das Potencias de Iluminação pelo método das atividades do edificio e do Consumo de iluminação anual.....	95
Tabela 18 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação	96
Tabela 19 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral.....	98
Tabela 20 - Desempenho energético de acordo com a INI-C.....	98
Tabela 21 – Ordem resultante da aplicação das MEE, eficiência energética e CCV.....	101
Tabela 22 – Classificação das edificações otimizadas segundo a INI-C.....	101
Tabela 23 – Custos de cada MEE e produção de energia renovável.....	103
Tabela 24 - Síntese das MEE e comparação dos valores adotados no processo de otimização	103
Tabela 25 - IUE, potencial de economia de energia, custos do ciclo de vida e economia líquida.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica
AVAC Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado
CCV Custo do Ciclo de Vida
COP Coeficiente de performance
CR Conjuntos de retrofit
CELESC Centrais Elétricas de Santa Catarina S.A.
DOE *United States Department of Energy*
EEP Edificação de Energia Positiva
EPBD *Energy Performance of Buildings Directive*
EPE Empresa de Pesquisa Energética
ER Energia renovável
FS Fator solar
FV Fotovoltaica
GBC *Green Building Council*
IEA *International Energy Agency*
INI-C Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviço e Públicas
IDRS Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal
IUE Intensidade de uso de energia
INMETRO Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED *Light Emitting Diode*
MEE Medidas de Eficiência Energética
NBR Norma Brasileira Registrada
nZEB *Net Zero Energy Building*
NZEB *Nearly Zero Energy Buildings* - Edificações de Energia Quase Zero
PBE Programa Brasileiro de Etiquetagem
PHOCT Percentual de horas ocupadas em conforto térmico
PCSC Polícia Civil do Estado de Santa Catarina
PROCEL Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SELIC – Sistema Especial de Liquidação e Custódia
TIR Taxa Interna de Retorno
TMA Taxa Mínima de Atratividade
TMY *Typical Meteorological Year*
VPL Valor Presente Líquido
ZEB *Zero Energy Building*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1	EDIFICAÇÕES DE ENERGIA QUASE ZERO.....	19
2.1.1	NZEB no Brasil.....	24
2.2	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES.....	27
2.2.1	Eficiência energética no Brasil	27
2.2.2	Edificações de referência (arquétipo)	29
2.2.3	Diagnóstico energético em edificações	31
2.2.4	Simulação computacional termo energética.....	33
2.2.5	Medidas de eficiência energética	34
2.2.6	Edificações de segurança pública	40
2.3	PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL	41
2.4	AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO DE EDIFICAÇÕES NZEB	44
2.4.1	Análise do custo do ciclo de vida	48
2.5	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO.....	52
3	METODOLOGIA.....	54
3.1	DEFINIÇÃO DO ARQUÉTIPO	55
3.1.1	Caracterização do estoque de edifícios	55
3.1.2	Levantamento de dados.....	56
3.1.3	Auditoria em uma edificação.....	58
3.1.4	Construção do arquétipo.....	59
3.2	CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO.....	61
3.2.1	Determinação da classificação da eficiência energética da envoltória.....	64

3.2.2	Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar	64
3.2.3	Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de iluminação	66
3.2.4	Classificação da eficiência energética geral do arquétipo desenvolvido.....	67
3.3	OTIMIZAÇÃO PARA NZEB	68
3.3.1	Simulação energética e renovação através da busca sequencial	70
3.3.2	Levantamento dos custos e entradas do ciclo de vida	72
3.3.3	Cálculo dos custos das medidas de eficiência energética	73
3.4	AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	78
4.1	DEFINIÇÃO DO ARQUÉTIPO	78
4.1.1	Levantamento das edificações via <i>Google Earth</i> e <i>Google Street View</i>	78
4.1.2	Resultado dos questionários e análise dos dados recebidos	80
4.1.3	Visita a uma edificação.....	84
4.1.4	Desenvolvimento do arquétipo	87
4.2	CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO.....	93
4.2.1	Determinação da classificação da eficiência energética da envoltória.....	93
4.2.2	Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar	94
4.2.3	Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de iluminação	95
4.2.4	Classificação da eficiência energética geral da edificação	97
4.3	OTIMIZAÇÃO PARA O OBJETIVO NZEB	99
4.3.1	Resultado da otimização com os custos e entradas do ciclo de vida	99
4.3.2	Cenários de renovação através da busca sequencial	103
4.4	AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO	105

4.4.1	Comparação dos custos do ciclo de vida.....	105
4.4.2	Consumo de energia por uso final.....	107
4.4.3	Consumo de energia na operação da edificação	108
4.4.4	Quantidade de módulos fotovoltaicos para geração de energia	109
4.4.5	Economia financeira e retorno do investimento	110
5	CONCLUSÕES.....	118
5.1	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	122
5.2	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	122
6	REFERÊNCIAS.....	123
	APÊNDICE A – Tabela tipológica das edificações do estudo	131
	APÊNDICE B – Questionário enviado para as unidades	141
	APÊNDICE C – Tabela de apoio ao levantamento dos equipamentos das edificações	144
	APÊNDICE D – Resumo dos dados de custo do ciclo de vida para nzeb 99,9% e 50%.	145
	APÊNDICE E – Tabela resumo dos resultados da pesquisa.....	147

1 INTRODUÇÃO

Os edifícios têm um impacto significativo no consumo de energia, sendo responsáveis por 30% do consumo mundial de energia, 55% da demanda e produzem cerca de 40% das emissões globais de dióxido de carbono (CRAWLEY et al, 2009; IEA, 2017). No Brasil, o parque edificado brasileiro é responsável por 51,9% do consumo de eletricidade segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) distribuídos entre residenciais (26,1%), comerciais (17,4%) e públicos (8,5%) (BRASIL, 2020a). Neste aspecto, os governos precisam adotar ações ambiciosas que contribuam para promover o desenvolvimento sustentável, mitigar as mudanças climáticas globais e encontrar soluções que diminuam o impacto ambiental, social e econômico das edificações no ambiente construído. Segundo Torcellini, Crawley (2006), deve ainda ser apoiado pelo desenvolvimento e integração de novas tecnologias nas edificações, além da produção de energia no local de consumo.

Assim, a partir de abordagens arquitetônicas passivas, implantação de estratégias ativas para alcançar eficiência energética e a integração de tecnologias para a produção de energia na edificação ou nos limites do terreno, torna-se possível o balanço energético da edificação chegar a zero ou quase zero. Quando são conectadas à rede elétrica, o balanço energético diz respeito à quantidade de energia que entra pela rede elétrica e o quanto é exportado para ela. Este objetivo pode ser alcançado com a implementação de Edificações de Energia Quase Zero (do inglês, *Nearly Zero Energy Building – NZEB*) e os Edifícios de Energia Positiva (EEP). Segundo Pacheco; Ghisi e Lamberts (2013), essas edificações devem ser promovidas no Brasil também pela sua capacidade de auxiliar em uma transição de matriz energética de sucesso, uma vez que sua produção de energia renovável deve ser no terreno ou próxima ao local de uso.

Ainda que seja comum encontrar na literatura abreviações como ZEB, nZEB, NetZEB, esta dissertação usará a sigla NZEB em conformidade com a última publicação da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais de Serviços e Públicas (INI-C) em fevereiro de 2021, que menciona e define a NZEB quando trata de geração local de energia renovável. Na INI-C as NZEB são definidas como edificações energeticamente eficientes, comprovadas pela obtenção da classificação A de eficiência energética, sem considerar o desconto da parcela referente à geração local de energia renovável, e devem ter 50% ou mais de sua demanda energética anual suprida por energia renovável gerada localmente (CB3E, 2020). Já as EEP, são caracterizadas como edificações energeticamente eficientes, comprovadas pela obtenção da classificação A de eficiência energética sem

considerar o desconto da parcela referente à geração local de energia renovável. Além disso, a EEP deve ter geração local de energia renovável superior à sua demanda anual de energia, com balanço energético positivo. Como resultado, a EEP recebe a classificação de eficiência energética A+ na ENCE geral (CB3E, 2020).

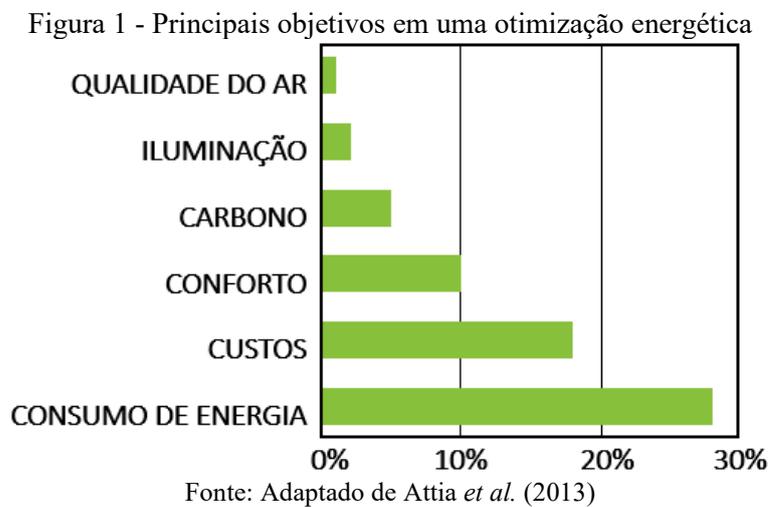
Em ambas definições, o princípio básico de primeiramente melhorar a eficiência energética de um edifício, além de reduzir o consumo global de energia da edificação com resfriamento, aquecimento e iluminação sem afetar a saúde e o conforto de seus ocupantes, ainda contribui diminuindo o pico de demanda de energia, o seu uso em geral e seu impacto no meio ambiente (KNEIFEL; WEBB, 2016).

Aliado então ao potencial redutor do consumo de energia, projetos e políticas têm dado amplo estímulo à eficiência energética e geração de energia em edificações através de NZEB. Nos Estados Unidos, a Lei de Independência e Segurança Energética de 2007 estabelece a meta de energia zero líquida para todos os novos edifícios comerciais até 2030 (PANAGIOTIDOU; FULLER, 2013). Esta lei especifica ainda uma meta de energia zero para 50% dos edifícios comerciais dos EUA até 2040 e zero líquido para todos os edifícios comerciais dos EUA até 2050. Na Europa, a Diretiva de Desempenho Energético de Edifícios (EPBD), adotada em maio de 2010, estabeleceu diretrizes e delegou a cada Estado Membro a responsabilidade de adotar ações específicas para alcançar o potencial de economia de energia (EUROPEAN UNION, 2010). Neste contexto, a reformulação EU 244/2012 do EPBD, estabelece a avaliação dos custos relacionados ao desempenho energético das edificações (CEN, 2017; EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012) para a Europa.

No Brasil, a demanda energética também é crescente e o BP Energy Outlook (2020) estima que o consumo de energia primária se expanda entre 60% a 66% até 2050, com o uso de energia per capita aumentando em cerca de 50%. Dessa forma, é cada vez mais necessário encontrar alternativas para a redução do consumo de energia, além da geração de energia por fontes renováveis. Com este objetivo, o retrofit de edificações existentes para NZEB é um importante aliado para contribuir neste caminho. O termo retrofit é um processo de renovação da edificação através da melhoria do seu desempenho ambiental e energético por meio de intervenções técnicas (MAY; GRIFFITHS, 2015).

Embora diferentes estudos tenham destacado que alcançar a meta do NZEB é viável (CONGEDO *et al.*, 2015; PIKAS; THALFELDT; KURNITSKI, 2014; SUN; GOU; LAU, 2018) nem sempre é provado que as escolhas de projeto selecionadas são rentáveis do ponto de vista econômico (D'AGOSTINO; PARKER, 2018; HU, 2019). Somado a isso, equipes de

projeto e proprietários de edifícios geralmente citam os custos incrementais das medidas de eficiência energética ou da implantação de energias renováveis no local como uma barreira significativa para o projeto, obtenção e implantação das NZEBs (ATTIA et al., 2013; FERREIRA et al., 2016; SUN; GOU; LAU, 2018). Em entrevistas com cerca de 28 especialistas em otimização de edificações da Ásia, Europa e América do Norte, Attia et al. (2013) verificaram que os custos são apontados como o segundo parâmetro de projeto em uma edificação, tanto como objetivo de otimização, como também em elemento a não ser excedido conforme o que foi planejado (Figura 1).



Desse modo, um ponto chave emergente da investigação da literatura é que há uma forte necessidade de encontrar soluções viáveis de custo para alcançar edificações de energia quase zero. Porém, estudar os impactos econômicos de medidas de eficiência energética em edificações de energia quase zero não é apenas uma questão de custo, mas uma questão de entender o seu comportamento financeiro e auxiliar no conhecimento a respeito dos indicadores e parâmetros a tomar em projetos e retrofits. Segundo Marszal et al. (2011), na vida cotidiana de uma pessoa, os custos geralmente são a medida de tomada de decisão.

A partir da proposição de estratégias de baixo custo, Evola, Margani e Marletta (2014) defendem que é importante considerar os impactos ambientais e benefícios financeiros ao estudar a implantação de medidas de eficiência energética. Para Ferreira, Almeida e Rodrigues (2017) e Li et al. (2019) os retrofits de edificações não são estimulados devido ao alto investimento inicial e à falta de conhecimento sobre a relação custo-benefício da melhoria do desempenho energético e os benefícios adicionais que podem advir dessas intervenções. Já Sun, Gou e Lau (2018) apontam que uma das principais barreiras para a modernização de edifícios

existentes é o risco financeiro e a incerteza do retorno do investimento ao construir ou reformar uma edificação de energia quase zero.

No contexto brasileiro, pesquisas sobre edificações de energia quase zero (CHIARADIA, 2020; COSTA, 2018; SOUSA, 2019) apontam lacunas existentes a respeito da avaliação de custos de NZEB e a necessidade de se aprofundar as informações existentes. Além disso, preços de energia e taxa de juros de cada economia nacional são informações importantes que podem alterar o custo global e o custo-benefício de medidas de eficiência energética.

De forma a favorecer este objetivo e complementando a oferta de tecnologias mais consolidadas como a hidrelétrica, os custos das energias renováveis como solar e eólica continuam caindo. A energia solar fotovoltaica (PV) mostra a queda mais acentuada de custos em 2010-2019 com o índice de 82%, favorecendo o objetivo para alcance da meta NZEB (IRENA, 2020). Dentro desse quadro, a análise de viabilidade econômica pode ser ampliada introduzindo indicadores que relacionam os custos de investimentos com a energia economizada e o tempo de retorno do investimento de medidas de eficiência energética para descrever a eficácia da intervenção da modernização de edifícios existentes em um ponto de vista mais extenso.

Portanto, há a necessidade de mais pesquisas e informações para estimular não somente a difusão de NZEBs com efetivo custo-benefício no mercado, como também de edificações pertencentes ao governo, uma vez que têm impacto direto nos gastos públicos. Dentro da busca por maior eficiência energética e financeira em edificações brasileiras, é necessário pesquisar modelos próprios adaptados à realidade nacional, uma vez que o projeto de uma NZEB no Brasil lida com diferentes climas, matérias primas, fontes renováveis e uma economia com diferente comportamento de países do hemisfério norte.

Através de estudos de caso, a simulação de medidas de eficiência energética na economia de energia, a integração de tecnologias eficientes e a produção de energia renovável em edifícios a partir da ótica da análise de custos e viabilidade financeira figuram então como uma lacuna de pesquisa a ser estudada. A partir do contato com a Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Sustentável do Estado de Santa Catarina e a Gerência de Planejamento e Avaliação da Polícia Civil, constatou-se o objetivo comum de tornar as edificações existentes mais eficientes e menos custosas ao orçamento público.

1.1 OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo Geral

Avaliar o custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações de segurança pública do Estado de Santa Catarina visando retrofit para edificação de energia quase zero (NZEB).

1.2.2. Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo da pesquisa foram traçados os seguintes objetivos específicos:

1. Conhecer dados de consumo energético de um conjunto de edificações de segurança pública existentes;
2. Definir um arquétipo representativo para as edificações de segurança pública do estudo e avaliar a classificação da eficiência energética segundo a INI-C;
3. Propor a otimização do arquétipo através de medidas de eficiência energética e instalação de energia renovável para atingir o objetivo NZEB;
4. Avaliar as medidas de otimização da edificação pela análise do custo do ciclo de vida;
5. Analisar o custo-benefício das modificações propostas e a viabilidade para a meta NZEB da tipologia estudada.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O documento está organizado em cinco capítulos. No primeiro capítulo consta a introdução, problemática, justificativa e objetivos.

No segundo capítulo é desenvolvida a revisão de literatura, onde são apresentados conceitos a respeito do tema através de trabalhos e pesquisas internacionais e nacionais desenvolvidas na área de estudo que fornecem suporte a este trabalho. O capítulo 3 aborda a metodologia da pesquisa, onde o método e procedimentos da pesquisa são discutidos. Em seguida, o capítulo 4 apresenta os resultados. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da pesquisa. Por fim, as referências bibliográficas e apêndices.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EDIFICAÇÕES DE ENERGIA QUASE ZERO

O aumento do consumo de energia suscita a busca por novas abordagens arquitetônicas e tecnologias integradas às edificações. Uma das alternativas neste caminho são as Edificações de Energia Quase Zero (NZEBs). Os múltiplos benefícios desses edifícios precisam ser destacados e incluem impactos no conforto, saúde pública e satisfação do usuário, além da economia de custos operacionais (NADEL, 2020). Visto que as NZEBs são primeiramente edificações eficientes energeticamente, pode-se incluir também os benefícios em eficiência energética como a economia no consumo de energia, melhorar a segurança energética, além da criação de novos empregos e contribuição nos objetivos das políticas a respeito das mudanças climáticas (D'AGOSTINO; PARKER, 2018; PALLIS *et al.*, 2019). Na economia, Pacheco-Torgal *et al.* (2017) apontam que foram gerados 17 empregos a cada 1 milhão de euros em investimentos em modernização de edifícios por ano, além de que haveria um aumento de 32% de arrecadação tributária com o aumento de atividades relacionadas à renovação de edificações, o que significa que um investimento governamental da mesma quantia não teria custos para o governo.

Porém, a integração entre a implementação dos NZEBs e a avaliação da otimização de custos entre os climas e economias representa um dos principais desafios que os projetistas enfrentam (D'AGOSTINO; PARKER, 2018). O novo desafio do desempenho da NZEB é uma visão holística na qual o edifício é visto sob uma perspectiva energética, ambiental e econômica (IPEEC, 2015), em estreita conexão com o ambiente natural e construído e com os usuários finais (BELUSSI *et al.*, 2019).

Segundo Torcellini *et al.* (2006), as edificações de energia zero se caracterizam como edificações com consumos de energia minimizadas através da implementação de estratégias de eficiência energética e têm geração local por fonte renovável de igual ou mais energia do que aquela consumida no período de um ano. Em seus estudos, Feng *et al.* (2019), seguem a definição do Departamento de Energia dos EUA (DOE) de uma NZEB como “um edifício com eficiência energética em que, com base na fonte de energia, a energia fornecida anualmente real é menor ou igual à energia renovável produzida no local e exportada para a rede. Já Pacheco, Ghisi e Lamberts, (2013) resumem que um NZEB é essencialmente um balanço energético entre geração e consumo. Conforme relatado na introdução, nesta dissertação considera-se a definição utilizada na INI-C, sendo a NZEB com uso de energia conectado à rede como parte do desempenho energético da construção, uma vez que é relevante para os comportamentos do usuário e para a operação e gerenciamento do NZEB, além de abastecer a rede com energia produzida *in loco*.

No caminho para NZEB, Marszal et al. (2011) defendem que implementar estratégias para reduzir a demanda de energia são o grau zero da hierarquia e o ponto de partida para qualquer projeto NZEB. Lechner (2014) afirma que é possível desenvolver um projeto sustentável abordando três etapas iniciando na forma e implantação da edificação, explorando estratégias passivas e projetando um equipamento mecânico e elétrico para ser o mais eficiente possível. Esta abordagem pode reduzir o consumo de energia dos edifícios em até 80%. Belussi et al. (2019) e D’Agostino; Mazzarella (2019) também relatam consenso sobre as etapas de projeto que devem ser implementadas para alcançar edifícios de energia quase zero: em primeiro lugar, as estratégias de projeto passivo devem ser implementadas para reduzir o consumo de energia o máximo possível, uma vez que seus custos são relativamente baixos e podem ser inseridos durante o processo de projeto. Em seguida, devem ser empregadas tecnologias ativas através de sistemas e equipamentos eficientes, como iluminação com eficiência energética e sistemas de climatização de alto desempenho, bem como envelopes de construção de alto desempenho. Por último, após esgotadas as estratégias de projeto passivo e ativo, a inserção de fontes de energia renováveis deve ser efetuada. A Figura 2 apresenta uma hierarquia para o projeto NZEB adaptada de Lechner (2014).



Fonte: Adaptado de Lechner (2014)

Ainda que o desenvolvimento de um projeto sob esta hierarquia e a instalação tecnologias resulte em custos mais altos do que uma edificação comum, Aksamija (2016) defende que desenvolver este caminho contribui para reduzir o consumo de energia da edificação trazendo benefícios a longo prazo. Diante do desafio de compreender os custos e os

benefícios envolvidos, alguns países estão focados agora em avaliar viabilidade econômica de escolher este caminho.

Este é o caso de alguns estudos na Europa, onde o parque edificado existente é antigo, ineficiente e renovado em ritmo lento. A pesquisa de D'Agostino e Parker (2018a) avaliou a viabilidade de NZEBs localizados em 14 países da Europa, sendo o clima um fator chave para a variação dos resultados. A fim de construir diretrizes que abarquem essas diferenças, a União Europeia está focada em limitar o impacto ambiental e visa alcançar uma economia sustentável e competitiva por meio de financiamentos e políticas públicas (D'AGOSTINO; ZANGHERI; CASTELLAZZI, 2017). Segundo o BPIE (2013), investir na reforma de edifícios é um aspecto crucial não apenas pela sustentabilidade, mas também para outros benefícios relacionados, como a segurança energética, a criação de empregos, a saúde e conforto interno.

A reformulação da Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) (EUROPEAN UNION, 2010) estabelece os requisitos para alcançar economias de energia em edifícios. Em particular, o EPBD estabeleceu as NZEBs como uma primeira meta a ser alcançada para edifícios públicos ou ocupados por instituições públicas até 31 de dezembro de 2018 e, a partir de 31 de dezembro de 2020, para todos os novos edifícios. Essa diretiva define um NZEB como um edifício com um desempenho energético muito alto, sendo especificado a metodologia de cálculo do desempenho no Anexo I da Diretiva 2010/31/EU. As necessidades de energia quase nulas ou muito pequenas desta edificação deverão ser cobertas em grande parte por energia proveniente de fontes renováveis, incluindo energia proveniente de fontes renováveis produzida no local ou nas proximidades. Cada Estado-Membro tem a liberdade de definir alguns aspectos em torno dos NZEBs refletindo condições nacionais, regionais ou locais, mas deve incluir um indicador numérico de intensidade de uso de energia (IUE) primária expresso em kWh/m².ano para cada edificação (D'Agostino; Mazzarella, 2019).

Ao longo dos anos, os níveis a atingir estão sendo aumentados. A Diretiva 244/2012 (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012) estabeleceu a avaliação dos níveis ótimos de custo relacionados aos requisitos mínimos de desempenho energético levando aos menores custos de construção. Dessa forma, é necessário seguir uma metodologia para derivar a relação custo-benefício de uma perspectiva técnica e econômica. Isso introduziu, pela primeira vez, a necessidade de considerar o custo do ciclo de vida das edificações através de parâmetros, que por sua vez devem apresentar, com flexibilidade, edifícios padrão de referência, taxas, custos de energia, equipamentos, custos de manutenção e mão-de-obra, fatores de energia primária e ciclo de vida econômico estimado

(BPIE, 2013). A mais recente, intitulada Diretiva (UE) 2018/844 que entrou em vigor em 9 de julho de 2018, alterou o EPBD, introduzindo no Artigo 2A o objetivo de traçar estratégias NZEB, com prazo máximo até 2050, também para a reforma de edifícios existentes. Além disso, devem ser incentivadas e implementadas estratégias que façam uso de tecnologias de automação e controle predial, bem como a introdução de redes inteligentes para compartilhamento de energia (PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA, 2018).

Pikas, Thalfeldt e Kurnitski (2014) buscaram determinar soluções econômicas de envoltória e o custo adicional para atingir NZEB de acordo com o requisito EPBD na Estônia, norte da Europa. Evola; Margani; Marletta (2014) verificaram o custo-benefício de soluções de projeto para edificações de baixa altura no clima mediterrâneo da Itália. D'Agostino e Parker (2018a), efetuaram uma investigação consistente sobre como abordar edifícios existentes com o padrão NZEB de maneira econômica em vários climas da Europa.

Congedo et al. (2015) realizaram uma avaliação custo-benefício para um edifício de escritórios localizados em Lecce (sul da Itália). Para isso, avaliaram diferentes tipos de paredes, janelas e sistemas técnicos (aquecimento e refrigeração, ventilação, geração e painéis fotovoltaicos) para obter um conjunto de 256 combinações e verificar as diferenças de desempenho energético em termos de intensidade de uso de energia final no clima do sul da Itália. Os valores de desempenho foram convertidos para energia primária conforme fatores de conversão local. Também a partir do método de cálculo proposto pela EN 15459, os custos globais foram calculados considerando um período de 20 anos. A avaliação da demanda de energia do edifício de referência apresentou consumo de energia primária de 125,72 kWh/m².ano e custo global de 350,82 €/m². A combinação que apresentou desempenho energético mais eficiente foi a opção Combo C-246 e é composta por paredes externas com isolante térmico, janelas com caixilharia em madeira, bomba de calor com sondas geotérmicas, trocador de calor para aquecimento, arrefecimento e desumidificação, ventilação mecânica, painéis solares orientados para sul de acordo com hemisfério norte e módulos fotovoltaicos de maior potência comparados a outras opções. A implantação dessa combinação de medidas de eficiência energética resultou em consumo de energia primária de 76,47 kWh/m².ano e custo global de 289,83 €/m², o que representa 39,2% de redução de energia primária e 17,4% em termos financeiros.

Em Singapura, sudeste da Ásia, Sun, Gou e Lau, (2018) desenvolveram um estudo a respeito da avaliação do custo-benefício de estratégias ativas e passivas em escritórios para

climas tropicais. A estratégia ativa mais econômica foi a iluminação eficiente e sistemas de ar condicionado de alto desempenho em segundo lugar representando até 45% de economia e 18% dos custos, com 5,4 anos de período de retorno. No total, houve aumento de 33% no custo de renovação devido às novas características de eficiência (incluindo o sistema fotovoltaico).

Pesquisas assim reforçam os esforços para o avanço de políticas públicas e estudos de caso de análise financeira de NZEB na Europa a fim de diminuir a lacuna sobre o tema.

2.1.1 NZEB no Brasil

Como tema de vanguarda, o debate e as pesquisas a respeito das Edificações de Energia Quase Zero no Brasil vêm crescendo nos últimos anos, onde algumas pesquisas têm se dedicado ao tema. Pacheco, Ghisi e Lamberts (2013) apontam que, como um país tropical, o Brasil apresenta condições extremamente vantajosas para a geração renovável, que contribui para uma transição energética de sucesso e implementação de NZEBs.

Didoné, Wagner e Pereira (2014) avaliaram o potencial de transformação de edifícios de escritório brasileiros em edifícios de energia zero em diferentes climas. O estudo consistiu na avaliação de um edifício referencial de escritórios, seguido do desenvolvimento de um caso otimizado de acordo com o regulamento de eficiência energética brasileiro e aplicação de tecnologias solares na edificação. Os resultados mostraram que em climas quentes foi necessário a instalação de mais módulos fotovoltaicos em função do maior consumo com refrigeração. Além disso apresentou 50% de redução de consumo de energia e atingiu a classe mais eficiente do regulamento de eficiência nacional.

Costa, (2018) buscou definir diretrizes para retrofit de edifícios públicos de escritórios de quatro pavimentos com características NZEB considerando o contexto climático de Brasília usando o *EnergyPlus*. Seu estudo concluiu que as estratégias passivas de adotar um Percentual de Área Envidraçada entre 30% e 50%, vidro de Fator Solar 0,43, Transmissão Luminosa 0,32 e a adição de proteções solares foram responsáveis pela diminuição de 20% do consumo energético. Já as diretrizes para a eficiência energética de equipamentos foram sistemas de iluminação LED com DPI igual ou menor a 9W/m², ar-condicionado com COP igual a 4,5. Além disso, considerar a estratégia de ventilação de massa térmica (resfriamento das lajes entre os pavimentos) contemplando a ventilação noturna para resfriamento representou uma diminuição de 20% do consumo de ar-condicionado.

Trabalhos que relacionam NZEB e custos apontam que a viabilidade financeira ainda é um fator bastante inconstante na realidade brasileira. Pacheco e Lamberts (2013) realizaram um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica de conversão de edifícios residenciais unifamiliares no Brasil em NZEBs. Considerando uma taxa de juros menor ou igual a 6% e 8% para Florianópolis e Belo Horizonte respectivamente, os autores concluíram que há a viabilidade econômica para a instalação de equipamentos de produção de energia no local utilizando uma área de telhado com 40% e 36% para cada uma dessas cidades. Essa viabilidade foi alcançada de abril de 2012 a novembro de 2012 assumindo as tarifas elétricas residenciais daquele período e as condições financeiras dadas pelo governo brasileiro. No entanto, concluíram que a política energética brasileira que é o principal obstáculo para a viabilização da ZEB no Brasil na época.

Chiaradia (2020) realizou um estudo para mensurar o impacto da aplicação de conceitos de edifícios de energia zero residenciais de 12 pavimentos localizadas na região sudeste do Brasil. Por meio de simulações termo energéticas verificou que combinações de estratégias de projeto passivo e medidas de eficiência energética atingiram reduções no consumo de energia elétrica na faixa de 36,8 a 48,8% do caso base. Isso foi possível com a substituição dos vidros com melhores propriedades térmicas, uso de tinta de baixa absorvância nas paredes da envoltória e utilização de ventilação natural para estratégias de projeto passivo. Com a troca das luminárias para LED, obteve reduções de consumo anual de energia de 7,1%, enquanto a substituição de equipamentos de ar condicionado por modelos com a tecnologia inverter e COP acima de 4,5, representou até 28,6% de economia de energia. Com essa redução de consumo de energia e ocupando 86% da área do telhado, é possível gerar até 59,2% do consumo de energia de base do edifício. Isso demonstra, porém, que é bastante difícil atingir a meta de edificação de energia zero em edificações com mais de seis pavimentos utilizando somente a área de telhado.

Domingos (2020) efetuou uma análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em uma habitação de interesse social de 45m² em Florianópolis. Através da análise do custo do ciclo de vida para 25 anos, verificou que as medidas de eficiência energética de maior influência foram a modificação de sistemas construtivos das paredes, a orientação e a eficiência do ar condicionado, sendo a primeira de maior expressão nos custos e as duas últimas com valores próximos a 0,2% quando no impacto dos custos de construção. A avaliação de custos foi realizada por meio do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e o payback, sendo que o único cenário com

VPL positivo foi no cenário aonde a taxa de juros é baixa e o aumento da energia alto. A TIR demonstrou viabilidade das medidas de eficiência energética no cenário com aumento do preço da energia, enquanto o sistema fotovoltaico teve a TIR maior que a taxa mínima considerada em todos os cenários. Para todos os cenários, os períodos de retorno foram menores que 25 anos.

A partir de um caso base, Gnecco et al. (2020) avaliaram os custos da inserção de estratégias de eficiência energética e cálculo do retorno do investimento em uma edificação pública administrativa em Santa Catarina. As estratégias utilizadas foram cobertura de fibrocimento com isolante EPS de 20mm, vidro com fator solar de 39% e aplicação de pintura na cobertura com absorvância de 40%. A partir de simulações no *EnergyPlus*, foi calculado o valor economizado na redução da demanda energética da edificação pela tarifa de energia de maio de 2020. Os custos foram levantados através da tabela SINAPI para o mês de março de 2020. Os resultados apontaram que a modificação da absorvância da cobertura mostrou-se, isoladamente, como a alteração mais eficiente como medida de redução de consumo de energia, uma vez que reduziu 6,75% a um custo de investimento de R\$ 2.327,80 e tempo de payback de 5,65 anos. Ainda que a aplicação de isolante térmico na cobertura atingiu o menor custo de investimento com R\$ 1789,89, sua redução de consumo de energia foi de apenas 2,10%. A troca do vidro representou uma redução de consumo de energia de 3,18% e um custo de R\$ 2820,00. Ao buscar o objetivo NZEB, todas as alternativas foram incluídas no cálculo, além de um sistema fotovoltaico para produção de energia renovável no local. Dessa forma, os autores encontraram uma redução percentual de consumo de energia de 12,19% a um custo total de R\$ 43.320,77. Este valor representa 8,94% de aumento nos custos comparado ao custo do caso base, com um tempo de retorno do investimento de 9,31 anos.

Ainda tímidas, é possível destacar iniciativas que promovem as edificações NZEB no contexto brasileiro. Entre elas, podem ser citadas a certificação GBC Brasil Zero Energy e a chamada pública Procel Edifica - NZEB Brasil. A primeira tem o objetivo de garantir o cumprimento das metas do Acordo de Paris, acelerar a transformação do mercado nacional de eficiência energética e a geração de fontes de energia renováveis, desenvolver novas tecnologias, empregos e promover ambientes mais saudáveis, capazes de propiciar a melhoria do bem-estar dos ocupantes (GBC, 2020). A segunda é uma iniciativa da Eletrobrás no ano de 2019 e premiou instituições para execução de quatro edificações espalhadas pelo Brasil com o objetivo de fomentar o conhecimento, estudo e desenvolvimento de projetos, além de promover

a utilização dos novos métodos de etiquetagem de edificações e verificar a viabilidade técnica e financeira de construção e operação de edificações NZEB (ELETROBRAS, 2019).

Essas iniciativas mostram como o Brasil está desenvolvendo um caminho em direção a edificações mais eficientes e um futuro mais sustentável, uma vez que o desenvolvimento de metas para alcançar a classificação de Edificações de Energia Zero até 2050 apresenta-se como importante medida para a melhoria da indústria da construção da América Latina (IEA, 2020). Portanto, é papel de novas pesquisas e estudos darem suporte a informações e resultados que contribuam no entendimento e viabilidade de novas diretrizes e metas NZEB nacionais.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES

2.2.1 Eficiência energética no Brasil

A partir do racionamento de energia ocorrido em 2001, as iniciativas relacionadas à eficiência energética no Brasil tomaram força. A Lei nº10295/2001, chamada de Lei da Eficiência Energética, regulamentada pelo Decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001, que promulga a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia como responsabilidade da Política Energética Nacional e estabeleceu que deveria ser criada uma regulamentação específica com indicadores técnicos de eficiência energética e estabelecidos os níveis de eficiência energética no país. Esta lei atualizada pelo Decreto nº 9864 de 27 de junho de 2019, que dispõe sobre o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética.

Em 2003 foi instituído o Procel Edifica, com publicação em fevereiro de 2009 do Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) com o objetivo de criar condições para a etiquetagem do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos. Em 4 de junho de 2014, a Instrução Normativa 02, criou um fato concreto onde as edificações públicas federais, novas ou que passem por retrofit, aprimore também a sua classificação de eficiência energética e tenham obrigatoriamente a Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) na classificação “A” do Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Retrofit é o processo de modernização para renovação da edificação ou equipamentos com o intuito de gerar economia de energia (EPE, 2020). Isso serve para a compra de equipamentos também. A etiquetagem ainda é realizada de forma voluntária para edifícios residenciais, comerciais, de serviços e públicos, que não os definidos na IN02. Atualmente está sendo desenvolvida uma Análise de Impacto Regulatório, através da Nota Técnica EPE/DEA/SEE/007/2020 sobre

Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras, com prazo de finalização no primeiro semestre de 2022 onde será apresentada uma proposta de plano de compulsoriedade para implantação de ações de eficiência energética específicas para o setor brasileiro de edificações. Segundo tal documento, a previsão inicial de compulsoriedade da etiquetagem para as edificações públicas federais é o ano de 2025, depois 2030 para todas as edificações públicas e 2035 para todos os edifícios novos ou reformados (EPE, 2020).

Desde então a metodologia para avaliação e classificação de eficiência energética de edificações vêm sendo melhorada a fim de incentivar tais medidas de desempenho e aperfeiçoar a forma de mensurá-las. Em 2017 o RTQ-C recebeu uma proposta de atualização para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária (INMETRO, 2017), a Instrução Normativa Inmetro para Classe de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) culminando na publicação definitiva através da portaria nº 42, de 24 de fevereiro de 2021 (INMETRO, 2021). O novo método se baseou no consumo de energia primária comparando a edificação real a uma edificação na condição de referência através da avaliação dos sistemas de envoltória, condicionamento de ar, iluminação e aquecimento de água. Cada sistema recebe uma classificação específica que posteriormente dá origem a uma classificação geral de eficiência para a edificação. Com a inclusão de um anexo tratando de geração de energia local renovável, foram conceituadas as Edificações de Energia Quase Zero (NZEB). Essas edificações precisam ser classificadas como Classe A na etiqueta de eficiência geral da edificação, ao efetuar a comparação do edifício real com a referência, além de produzir mais de 50% da sua demanda energética anual por fonte renovável no local. Se a edificação obter a classificação A de eficiência energética e produzir mais que 100% de sua demanda anual por fontes renováveis no local, a edificação será considerada uma Edificação de Energia Positiva (EEP).

Estas iniciativas contribuem para estabelecer novos métodos de avaliação e classificação do desempenho de edificações, além de promover o desenvolvimento gradual em busca de um cenário com mais eficiência energética, integração de novas tecnologias nas edificações e produção de energia renovável no local de consumo. Avaliar a eficiência energética em edificações é um processo que envolve etapas iniciais. As seções abaixo trazem informações e estudos que exemplificam as etapas para criar edificações de referência (arquetipo), levantar dados para sua construção e o processo de simulação computacional.

2.2.2 Edificações de referência (arquétipo)

A definição de edificações de referência que representam as características de grupos de edifícios é uma questão crucial, a fim de avaliar os desempenhos energéticos reais e a economia de energia do parque edificado existente (ALVES, et al., 2018; BALLARINI; CORGNATI; CORRADO, 2014). Através do Regulamento 244/2012, que estabelece um quadro metodológico comparativo para o cálculo dos níveis ótimos de rentabilidade da Diretiva 2010/31 (EUROPEAN UNION, 2010), os países da União Europeia são exigidos a encontrar edificações de referência para utilizar no cálculo do custo ótimo a fim de alcançar as exigências mínimas relacionadas ao desempenho energético de edificações (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012).

Lara et al. (2015), Schaefer e Ghisi (2016) defendem que utilizar edificações de referência é uma vantagem na redução do número de análises de uma tipologia construtiva com características delimitadas. Porém, criar edifícios de referência não é uma tarefa simples e não existe um padrão para definir um edifício de referência, variando em função do nível de detalhamento almejado. Por exemplo, com base em características médias, o Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) definiu edifícios de referência ao analisar visualmente 16 tipologias em 16 locais e três períodos de construção dos EUA. O layout da planta baixa se baseou na experiência de profissionais e na análise exaustiva de projetos (CORGNATI *et al.*, 2013; DERU *et al.*, 2011). Neste estudo, Corgnati et al. (2013) definem quatro áreas para levantamento: primeiro é a forma, que diz respeito ao tipo de edificação, tamanho, orientação, geometria geral do edifício, fator de forma e sombreamentos. O segundo é a envoltória, relacionada às características termofísicas dos materiais que a compõem. Em terceiro, sistemas, que diz respeito aos sistemas de aquecimento, resfriamento, equipamentos de iluminação ou controle da luz diurna. Por último, a operação, relacionado a características de localização, densidades de iluminação, ventilação além de cronogramas de uso e operação da edificação.

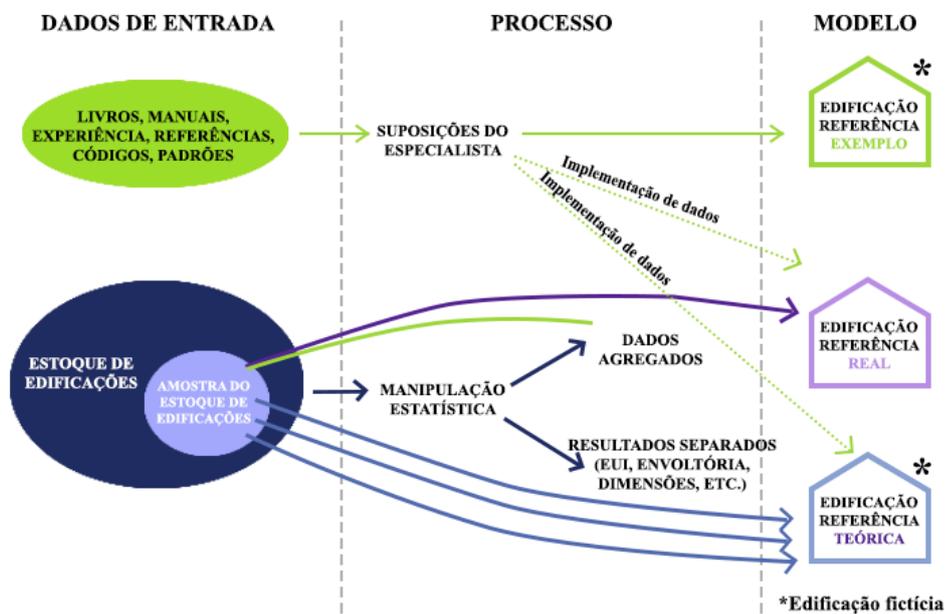
Outro projeto que também desenvolveu a busca por edificações de referência visando a criação de um procedimento para definir edifícios arquétipos foi o Projeto Europeu *TABULA*. Segundo Ballarini, Corgnati e Corrado (2014), o projeto teve o objetivo de estimar as necessidades de energia de edifícios residenciais a nível nacional, possibilitar a previsão do impacto de medidas de eficiência energética e selecionar estratégias eficazes para a modernização de edifícios. Através da formulação de uma Matriz Tipológica de Edifícios, o estudo desenvolveu 18 edificações referência e mostrou que existe um enorme potencial de

economia de energia com ações básicas para sistemas de aquecimento ambiental. A metodologia consiste em três abordagens metodológicas diferentes:

- *Example (Reference) Building (ReEx)*: um modelo exemplo é criado a partir de informações baseadas na experiência e pesquisas de especialistas, que são combinadas de maneira a fornecer um edifício que é o mais representativo de um grupo ao reunir várias características comuns de toda a amostra. É mais usado quando há falta de dados estatísticos;
- *Real (Reference) Building (ReAv)*: escolha de um edifício real existente na amostra, com características geométricas e construtivas baseadas em análises estatísticas a partir de uma grande quantidade de informações da amostra;
- *Theoretical (Reference) Building (SyAv)*: criação de um modelo teórico ao processar dados estatísticos para definir um edifício de referência. Ou seja, o edifício é desenvolvido com os materiais e sistemas mais comumente usados.

A Figura 3, adaptada de Corgnati et al. (2013) ilustra a metodologia geral para o estabelecimento de modelos de edifícios de referência no Projeto TABULA.

Figura 3 - Metodologia geral para o estabelecimento de modelos de edifícios de referência no Projeto TABULA



Fonte: Adaptado de Corgnati et al. (2013)

Congedo et al. (2015) optou pela abordagem de um edifício teórico para avaliar diferenças de desempenho energético em termos de intensidade de uso de energia final no clima do sul da Itália, uma vez que trabalhou com 256 combinações de paredes, janelas, sistemas de sistemas de aquecimento e refrigeração.

Já a segunda abordagem citada acima, de escolher um edifício real da amostra com características geométricas e construtivas baseadas em análises estatísticas e resultados agregados para desenvolver a edificação de referência, pode ser caracterizada como a aplicação da técnica de análise de clusters. Neste método, o modelo pode ser elaborado através da seleção de elementos representativos dentro da amostra analisada (LARA et al., 2015). Esta técnica foi utilizada por Schaefer e Ghisi (2016) para a obtenção de edifícios de referência para o conjunto habitacional de baixa renda de Florianópolis, no sul do Brasil. O objetivo foi encontrar subgrupos dentro de uma amostra usando técnicas estatísticas hierárquicas e não hierárquicas em combinação, de forma que os edifícios de referência considerados são as edificações mais próximas da média dos seus aglomerados.

Segundo Schaefer e Ghisi, (2016), a análise de cluster geralmente envolve três etapas: a primeira diz respeito a determinação de uma medida de semelhança ou associação entre os objetos (edificações) do estudo, de acordo com o conjunto de características ou variáveis escolhidas de cada edificação. A segunda etapa envolve a aplicação de algumas técnicas de partição, que estabelecem os critérios sob os quais os objetos se reunirão no mesmo cluster ou serão alocados em diferentes clusters. Por último, o perfil de cada cluster é analisado e descrito de acordo com suas características. Uma amostra de 120 edificações resultou em dois edifícios de referência. Utilizando essa metodologia, os pesquisadores apontam que os edifícios de referência encontrados podem representar seu cluster de forma adequada, uma vez que os valores de graus-hora obtidos para eles foram semelhantes à amostra da mediana habitacional (SCHAEFER; GHISI, 2016).

Portanto, a definição de edificações de referência é um passo para contribuir no desenvolvimento de um estudo energético em edificações de segurança pública.

2.2.3 Diagnóstico energético em edificações

Para atingir o objetivo de alcançar melhorias para uma edificação, a fim de entender o consumo de energia, é ideal fazer uma auditoria energética. Este processo consiste em identificar as principais fontes de consumo energético considerando a atividade dos usuários na edificação e os sistemas de energia que estão sendo utilizados (TESTI et al., 2013).

O processo de auditoria ou diagnóstico energético refere-se à análise técnica, sistemática e holística de um edifício a fim de identificar medidas para melhorar o seu desempenho energético mantendo ou melhorando os níveis de conforto térmico (CBCS;

MITSIDI; ELETROBRAS, 2016). Essas etapas envolvem a definição do escopo, análise de faturas, levantamento de equipamentos, balanço energético, cálculo de medidas e relatório final.

Tomazi, Rodrigues e Schneider (2018) realizaram uma auditoria energética em uma edificação pública com o intuito de avaliar a classificação da Etiqueta PBE e, ao final, propor melhorias para torná-la mais eficiente. As etapas de diagnóstico energético do trabalho consistiram em planejamento do diagnóstico energético delimitando o problema a ser analisado. Em seguida, a coleta de dados para análise das faturas de energia elétrica e perfil de uso da edificação. Uma visita *in loco* foi efetuada para averiguar e examinar os equipamentos e outros sistemas. A fase de análise e processamento de dados se deu a partir do *Software EnergyPlus* para entender os usos finais da edificação e direcionar ações para garantir a eficiência energética. Esse encadeamento de etapas permitiu avaliar alterações na iluminação, utilização de película nos vidros, pintura das paredes para cores mais claras e modernização do sistema de condicionamento de ar e concluir quais medidas que obtiveram o resultado mais expressivo de acordo com o objetivo do estudo.

Entretanto, ao fazer uma avaliação de um estoque de edificações, nem sempre é possível visitar todas as unidades devido a fatores como deslocamentos e gastos financeiros. Uma opção adotada é desenvolver um questionário onde um usuário responde questões formuladas pelo pesquisador a fim de obter um panorama abrangente do uso de energia de edifícios. Neste caminho, Geraldi e Ghisi, (2020) avaliaram as condições reais dos edifícios escolares no Brasil através de uma abordagem que cruzou informações de um questionário autoaplicável ao diretor da escola com informações de faturas de energia e características da edificação como ocupação, equipamentos e volumetria da edificação ao analisar um estoque de 419 edificações como parte de um estoque de 5321 edifícios escolares. Os dados foram reunidos através de dados disponibilizados pelo setor de Infraestrutura da Secretaria de Estado da Educação de 27 estados. Posteriormente os dados foram analisados e permitiram a construção de um modelo do estoque por meio de inferência estatística. Os pesquisadores mencionam que, a fim de ajustar o questionário e garantir a coerência das perguntas, é interessante realizar visitas *in loco* anteriores da organização do questionário sempre que possível. Isso foi solucionado aplicando o questionário ao diretor responsável pela edificação. Leaman e Bordass (2001) justificam esta abordagem supondo que uma pessoa chave responsável pela edificação tem uma percepção ampla e representativa do ambiente construído e dos ocupantes da mesma. A partir das análises, os resultados apontam que o estoque de edifícios escolares pode ser modelado considerando atributos adquiridos a partir de faturas de energia elétrica e questionários.

2.2.4 Simulação computacional termo energética

Através da representação de uma edificação de forma virtual por meio de modelos computacionais, é possível prever, investigar e compreender certos comportamentos de desempenho e características do objeto modelado (SOUSA, 2019). Corgnati et al. (2013) apontam que esse processo exige o conhecimento técnico de um especialista, pois os modelos detalhados que compõem as simulações termo energéticas dinâmicas enfrentam diversos problemas, associados principalmente a informações necessárias para dados de entrada.

Um dos programas de simulação termo energética citados pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) como o de maior relevância para temáticas relacionadas a edificações (DOE, 2016), é o *EnergyPlus*. Através de simulações termo energéticas neste *software*, Kurnitski et al. (2011) determinaram o custo ótimo e os níveis de desempenho energético de uma residência para a Estônia. A partir dos preços locais de investimento inicial, calculou-se os gastos com manutenção dos sistemas técnicos com base em uma porcentagem e especificações de norma europeia EN 15459, que estipula o método do valor presente líquido nos cálculos. Os preços locais foram listados e os gastos com manutenção dos sistemas técnicos foram estimados com base em uma porcentagem do aporte inicial de investimento na edificação. Nos custos com energia foram considerados os sistemas de refrigeração, aquecimento e ventilação dos ambientes. Também foi considerado o aquecimento de água e de iluminação, além dos consumos dos equipamentos. Os resultados mostraram que, uma vez que o requisito de desempenho mínimo da Estônia seja 180 kWh/m².ano, é possível atingir um custo ótimo de 110 kWh/m².ano através de um padrão melhor de construção que representa 20% a mais de custos.

Para analisar a relação entre a área de abertura e o fator solar frente ao ganho de calor no contexto brasileiro, Veiga et al. (2019) elaboraram um modelo base no *EnergyPlus* com informações de geometria, materiais e operação de cada ambiente. Utilizaram ainda um sistema de condicionamento de ar através de cargas ideais e tomaram cuidados em relação ao contato da edificação com o solo, além de efetuar uma simulação por períodos anuais, utilizando-se de dados climáticos das localizações escolhidas para análise.

De fato, conforme verificado em Alves *et al.* (2018), Costa, Amorim, Silva (2020), D'Agostino e Parker (2018a), o uso do *EnergyPlus* encontra respaldo como ferramenta para cálculo do desempenho energético de edificações em função da sua alta precisão e níveis de

detalhes para medir a eficiência energética de edificações. Neste *software* é possível estimar a intensidade do uso de energia de um modelo ao inserir parâmetros como a geometria e propriedade dos materiais, tipos de sistemas de ar-condicionado, densidade de potência de iluminação, densidade de ocupação, definir temperaturas de *set-point* do ar-condicionado, horários e cronogramas de funcionamento.

Quando é feita a avaliação de uma edificação existente, os resultados devem ser comparados com dados de consumo histórico da própria edificação. Dessa forma, é garantida a calibração do modelo.

2.2.5 Medidas de eficiência energética

Para cumprir o conceito de NZEB ao efetuar uma reforma, medidas de eficiência energética devem ser aplicadas de forma adequada com o objetivo de reduzir a sua necessidade de produção de energia (CONGEDO et al., 2015). Assim, sinergias devem ser exploradas de modo que a produção de energia renovável não deve ser utilizada de forma deliberada, senão que deve intervir apenas para equilibrar a demanda por energia residual, uma vez que todas as medidas de otimização do envelope de construção e equipamentos, viáveis do ponto de vista técnico-econômico, devem ser implementadas para reduzir a demanda de energia (MAGRINI et al., 2020).

A eficiência energética é definida pela ABNT NBR ISO 50.002 como a razão ou outra relação quantitativa entre uma saída de desempenho, serviços, produtos ou energia, e uma entrada de energia (ABNT, 2014). Já uma medida de eficiência energética pode ser caracterizada por uma alteração efetuada a um edifício que resulte numa redução das necessidades de energia primária do mesmo (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012).

Segundo Gielen et al. (2019), o aumento da eficiência energética atenua o crescimento da demanda de energia e, portanto, contribui na diminuição da participação das energias renováveis no consumo total de energia final. Dessa forma, se realizados em conjunto, os investimentos na envoltória do edifício resultam em economia nos custos de investimento para o sistema de energia renovável, uma vez que quanto mais eficiente for o edifício, menor será o tamanho dos sistemas de produção de energia renovável. Este sistema deve ser integrado durante o processo inicial de projeto como parte da edificação ou podem ser adicionados em um retrofit.

Como os NZEB têm balanço energético anual próximo ou igual a zero, antes da instalação de fontes renováveis de geração energética, são propostas alternativas para redução do consumo de energia. No que diz respeito aos métodos de reforma para o objetivo edificação de energia quase zero, o desempenho energético de um edifício pode ser melhorado pela aplicação de medidas de eficiência energética (MEE). A revisão proposta por Li, Yang e Lam (2013) aponta que as medidas de eficiência energética que têm influência significativa no consumo de energia em edifícios podem ser agrupadas em três categorias principais:

1. Envoltória da edificação: isolamento térmico, massa térmica, relação janela parede, característica dos vidros e telhados refletivos/verdes;
2. Condições internas: condições de projeto interno e cargas de calor internas;
3. Sistemas prediais: sistema de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar, serviços elétricos (incluindo iluminação) e transporte vertical (elevadores).

Belussi et al. (2019) apontam que o projeto da geometria e a morfologia (fator de forma, relação janela-parede) permite equilibrar os requisitos de energia (perdas térmicas e ganhos solares) e os níveis de conforto interno. Para climas quentes, a tendência é reduzir a relação janela-parede, uma vez que elas são responsáveis por aproximadamente 30 a 50% das perdas de transmissão através da envoltória e uma melhoria de seu desempenho energético leva a uma diminuição da demanda de energia do edifício (VAN DEN BERGH et al., 2013).

A energia térmica resultante da irradiação solar provoca um aquecimento em superfícies de acordo com sua absorvância térmica. No caso de paredes, o fenômeno da condução, afeta o balanço térmico e contribui para o aumento da temperatura de ambientes de modo que a diminuição da absorvância de paredes e coberturas pode reduzir a quantidade de calor e a demanda por ar condicionado em edificações. Empregar uma cobertura com elementos construtivos mais isolantes pode diminuir a transmitância térmica e reduzir a demanda por resfriamento da edificação (BELUSSI et al., 2019; FENG et al., 2019), que também pode acontecer considerando a sensibilidade térmica dos materiais a partir da diminuição da absorvância térmica das superfícies com o emprego de cores claras em áreas expostas (ALVES et al., 2018; BELUSSI et al., 2019; FENG et al., 2019). O clima onde a edificação está inserida, também contribuiu no desempenho energético e pode atingir valores mais altos ou baixos através do uso de isolantes térmicos. Medidas como melhorar o isolamento de envoltórias, uso de ventilação eficiente e uso de sistemas técnicos de tamanho adequado podem ajudar a obter economias de energia de 40 a 70% (FERREIRA; ALMEIDA; RODRIGUES, 2016).

As aberturas na envoltória podem ser responsáveis por uma grande parte do ganho e perda de calor em uma edificação através da radiação solar incidente ou trocas com o ar externo através de condução. O fator solar do vidro e sua transmitância térmica representam a capacidade que o material tem de permitir ou barrar essas trocas de calor impactando diretamente no consumo de energia de ar condicionado. Segundo Veiga et al. (2019) o método prescritivo do RTQ-C, que antecede a INI-C, considera que a edificação obterá a pior avaliação prevista pelo regulamento (classificação E) se apresentar área de abertura superior a 60% da fachada e fator solar superior a 0,61 em função das trocas de calor pela superfície.

Onde o consumo de energia relacionado à iluminação artificial atinge um peso relevante nas necessidades de iluminação ambiental, índices acima de 0,50 na relação janela-parede contribuem ao explorar a luz natural do dia e, em momentos de desconforto visual, podem ser controladas por sistemas de gerenciamento (SUN; GOU; LAU, 2018). Ambientes muito profundos com cobertura exposta para o exterior podem instalar dutos de luz na cobertura ou prateleiras solares nas janelas de forma a se beneficiar da iluminação externa diurna (ALVES et al., 2018; SUN; GOU; LAU, 2018).

Conforme a NBR 15220-3 (ABNT, 2005), que divide o Brasil em oito zonas bioclimáticas e estabelece estratégias passivas para residências em cada uma delas, a ventilação natural é uma importante aliada a ser explorada na zona bioclimática 3, onde Florianópolis está inserida. Dessa forma, permitir a ventilação natural através da abertura das janelas, quando a temperatura externa está em condições agradáveis, diminui o uso do ar condicionado (COSTA; AMORIM; SILVA, 2020; D'AGOSTINO; PARKER, 2018; SUN; GOU; LAU, 2018). A Tabela 1 mostra as estratégias para as zonas bioclimáticas 1, 2, 3 e 5, que cobrem o estado de Santa Catarina.

Tabela 1 – Estratégias bioclimáticas para as Zonas 1, 2, 3 e 5.

		Zona bioclimática 1	Zona bioclimática 2	Zona bioclimática 3	Zona bioclimática 5
Aberturas para ventilação		Sombreamento das aberturas	Sombreamento das aberturas	Sombreamento das aberturas	Sombreamento das aberturas
Tipos de vedações externas	Parede	Leve	Leve	Leve refletora	Leve refletora
	Cobertura	Leve isolada	Leve isolada	Leve isolada	Leve isolada
	Verão	-	Ventilação cruzada	Ventilação cruzada	Ventilação cruzada

Estratégias de condicionamento térmico passivo	Inverno	Aquecimento solar da edificação; vedações internas pesadas	Aquecimento solar da edificação; Inércia térmica	Aquecimento solar da edificação; Inércia térmica	Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Fonte: Adaptado de NBR15220-3 (ABNT, 2005)

Já nas soluções ativas, o sistema de iluminação é responsável pelo segundo maior consumo de energia em edifícios comerciais, de serviços e públicos, ficando atrás somente do sistema de ar-condicionado. É imperativo que um sistema de iluminação bem-sucedido deve garantir que os níveis de iluminância ideais sejam mantidos. A iluminância, segundo a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho, Parte 1, é definida como a razão do fluxo luminoso recebido pela superfície em torno de um ponto considerado, para a área da superfície quando esta tende para o zero (ABNT, 2013) e medida em lux. Este nível de iluminância recomendado varia de acordo com o tipo de tarefa realizada na sala. Para edificações de escritório, o mínimo indicado são 500 lux.

As lâmpadas LED são a tecnologia mais eficiente no que diz respeito aos aspectos de potência da iluminação (BELUSSI *et al.*, 2019). Neste aspecto, Wagiman *et al.* (2020) apontam três principais estratégias para retrofit em projetos de iluminação: a adaptação de luminárias existentes com luminárias de eficiência energética, como diodos emissores de luz (LEDs), redução do nível de iluminação de projeto e implementação de sistemas de controle de acordo com a ocupação ou iluminação natural. Dessa forma, Alazazmeh; Asif (2021), ao desenvolver propostas de melhorias de desempenho energético para um edifício comercial, encontrou que o sistema de iluminação fluorescente foi responsável por cerca de 20% do consumo de energia do edifício. Ao substituir lâmpadas fluorescentes por luzes de LED, encontrou uma redução de 7% no consumo de energia. Já Sun; Gou; Lau (2018) atingiu uma diminuição média de 53% ao trocar lâmpadas T5 fluorescentes por lâmpadas LED em todo um edifício de escritório, diminuindo a densidade de potência de iluminação média de 10 W/m² para 5,3W/m² e consumo de iluminação dos anteriores 176 kWh para 105 kWh.

Em abril de 2020, a Associação Brasileira de Fabricantes e Importadores de Produtos de Iluminação (ABILUMI, 2020), publicou uma tabela que informa uma equivalência entre uma lâmpada fluorescente compacta de 25 Watts e uma lâmpada LED de 15 Watts, mantendo-se os níveis de iluminância e fluxo luminoso de 1500 lúmens. Já uma lâmpada fluorescente tubular de 50 Watts tem equivalência com uma lâmpada tubular LED de 18 Watts, mantendo

um fluxo luminoso de 2000 lúmens. Respectivamente, essa comparação representa 40 e 64% de diminuição de potência da lâmpada fluorescente para LED.

Após a instalação de equipamento de iluminação mais eficientes, sistemas de gestão de edifícios (BMS - *Building Manager Systems*, na sigla em inglês) integrados ao sistema de iluminação podem ajudar a diminuir ainda mais o consumo de energia através de sensores que controlam as condições de ocupação e níveis de iluminação (D'AGOSTINO; PARKER, 2018; SUN; GOU; LAU, 2018). Ainda é possível propor a separação de circuitos elétricos de modo a permitir o controle separado das fileiras de luminárias mais próximo das janelas.

Por último, uma vez que sistemas de ar condicionado e iluminação são os maiores consumidores de eletricidade em prédios comerciais (KING; PERRY, 2017), Congedo et al. (2015) citam que economias no consumo de ar condicionado podem ser atingidas através de ajustes nas temperaturas de ar sem interferir nas condições de conforto interno. Cabe ressaltar também que a revisão dos níveis de eficiência energética da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia - ENCE do Programa Brasileiro de Etiquetagem (INMETRO) para equipamentos, bem como implementações de índices mínimos mais ambiciosos, podem acelerar o crescimento da eficiência energética desses equipamentos. É o caso da implementação da Portaria INMETRO N° 234 em 29 de junho de 2020, que torna mais rigoroso os critérios para classificar equipamentos de ar-condicionado como A (mais eficiente) ao estabelecer o Índice de Desempenho de Resfriamento Sazonal (IDRS) e a reclassificação das categorias de eficiência energética.

Reforçando sobre o estudo em Singapura, Sun, Gou e Lau (2018) encontraram uma economia de 64.000 kWh optando por um sistema de ar condicionado mais eficiente com ventilador de velocidade variável em uma edificação de 4502 m². Com essa e outras medidas onde este trabalho foi citado nos textos acima, a edificação em Singapura economiza 46% de energia. Em um estudo sobre o potencial de economia de energia do estoque de prédios de escritórios para Belo Horizonte, Alves et al., (2018) focou em medidas que deveriam ser promissoras em intervenções de retrofit de energia. Inicialmente, um total de sete medidas de retrofit foram selecionadas: (1) substituir os vidros das janelas para diminuir o fator solar; (2) alterar as cores externas para obter uma menor absorção da parede; (3) reduzir a infiltração pelas janelas e portas externas; (4) mudar o aparelho de ar condicionado para aumentar o coeficiente de desempenho (COP); (5) renovação de luminárias internas para reduzir a densidade de potência de iluminação (DPI); (6) adicionar um sistema de coleta de luz natural e (7) adicionar dispositivos de sombreamento de janela. Foi realizada uma análise de

sensibilidade para identificar o Coeficiente de Influência (CI) de cada uma dessas medidas em classes de edificações com 15 pavimentos de planta baixa compartimentada quadrada e a outra retangular. Para as duas classes, os quatro principais fatores foram a densidade de potência de iluminação (DPI), sistema de coleta de luz natural, diminuição do fator solar do vidro e aumentar o COP do sistema de ar condicionado. Os resultados mostraram que a utilização dessas medidas combinadas tem um potencial de economia de energia de até 54,3% em relação ao caso base. Já em relação a análise de custo-benefício, as medidas relacionadas a redução da intensidade do uso de energia de iluminação (redução da densidade de potência de iluminação somada ao sistema de coleta de luz natural) representaram uma iniciativa ideal e mais econômica no esforço de direcionar a redução do consumo de edifícios de escritórios atingindo o segundo maior potencial de economia líquida e até 41% de economia de energia.

A Tabela 2 elenca um resumo das medidas de eficiência energética e otimização para NZEB encontradas nas principais pesquisas da revisão bibliográfica:

Tabela 2 - Quadro resumo das medidas de eficiência energética e otimização para NZEB

Fator	Ítem	MEE	Fonte
Soluções passivas	Reduzir trocas de calor	Fator solar dos vidros	(1)(2)(3)(4)(5)(6)
		Filme solar	(2)(4)
		Brises	(1)(2)(3)(5)(6)
		Absortância térmica	(2)(3)(4)(5)
		Transmitância térmica (U)	(2)(4)(5)
		Iluminação diurna	Dutos de luz
		Prateleiras de luz	(2)(3)
	Ventilação noturna/diurna	Ventilação natural	(1)(2)(3)(4)(5)(6)
Soluções ativas	AVAC e ventilação mecânica	COP (W/W)	(1)(2)(3)(4)(5)(6)
		Sistema de ventilação pessoal	(2)(4)
	Iluminação	LED	(2)(4)(5)(6)
		DPI (W/m ²)	(1)(2)(3)(4)(6)
		Luz de tarefa	(2)(4)
		Separação de circuitos	(2)(3)(4)(6)
		Dimerização	(2)(4)
	Sistema de gestão da edificação	Sensores de ilum. e ocupação	(2)(4)
		BMS	(2)(4)(5)

(1) (D'Agostino; Parker (2018)

(4) Belussi et al. (2019)

(2) Sun, Gou e Lau (2018)

(3) Alves et al. (2018)

(5) Feng et al. (2019)

(6) Costa, Amorim e Silva (2020)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Visto os exemplos acima de aplicações de medidas de eficiência energética na busca por economias de energia, é importante salientar que a combinação linear de medidas de eficiência energética por si só não significa resultados maiores de economia de energia, uma vez que a eficácia de várias medidas juntas apresenta efeitos interativos (ALVES et al., 2018). De todo modo, os estudos acima mostram algumas ações voltadas para a redução da intensidade do uso de energia que podem representar iniciativas econômicas no esforço de direcionar a redução do consumo de edifícios públicos a partir de análises de custo-benefício, antes da instalação de energias renováveis em NZEBs.

2.2.6 Edificações de segurança pública

Segundo dados de 2019 presentes no Balanço Energético Nacional (BEN), as edificações públicas são responsáveis por 8,5% do consumo de eletricidade no Brasil (BRASIL, 2020a). Os grandes responsáveis pelos maiores consumos de energia elétrica neste setor são a iluminação e o ar condicionado (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Dessa forma, é necessário buscar melhorias que diminuam o consumo de energia de edificações públicas no parque edificado brasileiro.

As Delegacias de Polícia, que muitas vezes são vistas como um ambiente hostil e algumas até funcionam em edificações adaptadas, têm grande importância para a manutenção da segurança do Estado, contando com prevenção e investigação de crimes e acidentes, além de expedir documentos de identificação, como carteiras de identidade, habilitações e documentação de veículos (SILVA, 2019). A Polícia Civil do Estado de Santa Catarina, subordinada à Secretaria da Segurança Pública, desenvolve os serviços públicos da sua competência e conta com 459 unidades da Polícia Civil, organizadas em 30 Delegacias Regionais de Polícia e Capital. Essas estão distribuídas pelo território estadual e são, nas suas circunscrições, o centro das investigações e dos demais atos de Polícia Judiciária, além de servirem como pontos de atendimento e proteção à população (SANTA CATARINA, [s. d.]). O estoque de edificações é dividido em 255 edificações que são de propriedade do Estado de Santa Catarina, 52 que são locadas e as demais são cedidas por outros órgãos ou Prefeituras Municipais (POLÍCIA CIVIL, 2019).

Em 2019, através do Programa de Eficiência Energética da CELESC, a Polícia Civil já aplicou medidas de eficiência energética (MEE) em 15 edificações que apresentam o maior consumo em quilowatt/hora dentre todo o estoque em parceria com o Instituto de Estudos, Gestão e Inovação - INERGE. Estas edificações receberam a troca de lâmpadas fluorescentes por LED e instalação de equipamentos de ar condicionado nível A na classificação de 2018 do INMETRO, então não fazem parte das edificações avaliadas nesta pesquisa. Segundo a INERGE, a produção de energia renovável referente a essas edificações foi concentrada na cidade de Chapecó, em Santa Catarina, pois a cidade possui uma maior irradiação solar anual e assim aumenta a geração de energia renovável diminuindo custos de instalação de módulos fotovoltaicos. Ainda que algumas edificações da Polícia Civil tenham desconto do seu consumo de energia através da produção de energia renovável, elas não podem ser consideradas NZEB de acordo com a INI-C pois não possuem geração local de energia renovável.

Dessa forma, dada a enorme quantidade de edificações de segurança pública que compõem todo o estoque de edifícios da Polícia Civil do Estado de Santa Catarina, é interessante propor melhorias que contribuam para diminuir o consumo de outras edificações além de incentivar o uso de novas tecnologias de forma a contribuir na implementação de Edificações de Energia Quase Zero no setor público.

2.3 PRODUÇÃO DE ENERGIA RENOVÁVEL

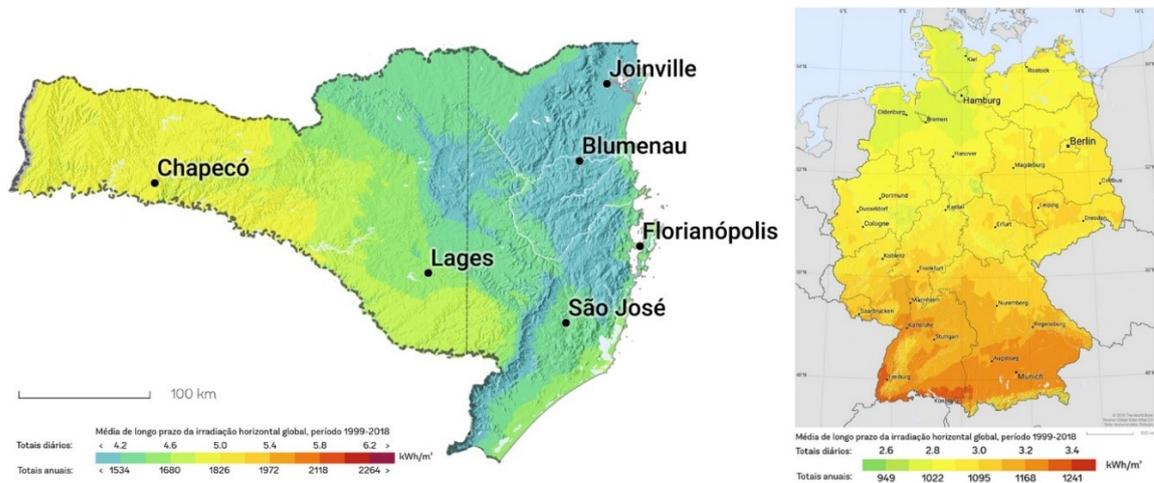
O aumento do consumo de energia e a busca por novas fontes menos poluidoras suscita a necessidade de uma transição energética para fontes renováveis. De forma a contribuir neste objetivo, D'Agostino e Parker, (2018); Marszal *et al.* (2011); Pacheco, M. T. G.; Ghisi; Lamberts (2013) defendem que a promoção de NZEBs apresenta uma oportunidade para aumentar a parcela de energia primária gerada por fontes renováveis.

Devido ao seu potencial hídrico, a participação das energias renováveis na matriz energética brasileira em 2019 foi de 46,1%, sendo a hidráulica responsável por 64,9% da oferta interna na matriz elétrica. Outras fontes renováveis, como a solar e a eólica, representam respectivamente 1% e 8,6% da matriz elétrica brasileira e vêm recebendo investimentos para aumentar sua participação (BRASIL, 2020a). Uma vez que o consumo final das edificações comerciais, de serviços e públicas foi de 92,3% em 2019 proveniente de fonte elétrica (EPE, 2020), a eletrificação através do uso de módulos fotovoltaicos surge então como uma área chave que oferece sinergias entre eficiência e energias renováveis para diversos setores.

De fato, por permitir a produção de energia no local de consumo, os módulos fotovoltaicos são a estratégia mais comum entre as energias renováveis disponíveis a partir de NZEBs, principalmente em áreas urbanas e pela facilidade de integrá-los nas edificações, além da radiação solar global horizontal média diária brasileira variar entre 3,50 e 6,25 kWh/m².dia (CABEZA; CHÀFER, 2020; PEREIRA et al., 2017; ZOMER; RÜTHER, 2017).

É importante pontuar, entretanto, que a geografia e o clima se mostram como fatores chave para análises e escolhas tecnológicas específicas. Embora algumas regiões do Estado de Santa Catarina tenham uma das menores taxas médias de incidência de irradiação solar do Brasil (1.534 kWh/m².ano) conforme a Figura 4, todas as suas regiões ainda recebem 40% a mais de irradiação que a melhor região da Alemanha, que possui sua maior taxa em 1241 kWh/m².ano e mesmo assim é um país de vanguarda no uso e aplicação de energia renovável através de módulos fotovoltaicos em edificações, conforme a Figura 4.

Figura 4 – Média da irradiação horizontal global para Santa Catarina, no Brasil, e Alemanha, na Europa.



Fonte: Adaptado de Global Solar Atlas (SOLARGIS, 2020)

Quando o sistema fotovoltaico é selecionado na análise, sua relação custo-benefício se torna o principal teste econômico para outras medidas concorrentes, que devem ser instaladas antes de o sistema fotovoltaico ser considerado (D'AGOSTINO; PARKER, 2018). Dessa forma, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a fim de permitir a produção de energia renovável de forma local no Brasil através de sistemas de microgeração e minigeração distribuída conectados à rede através de energia solar fotovoltaica, como também por biomassa, hidráulica, eólica, cogeração qualificada, lançou a Resolução Normativa N°482 de 2012, complementada pela Resolução Normativa N°687 de 2015. Esta última em vigor estabelece que

o balanço energético entre a energia exportada e a energia consumida seja feito mensalmente, de forma que o cálculo da energia exportada seja baseado a partir da fatura anterior.

A geração distribuída permite diminuir a carga da rede, reduzir as perdas na distribuição, produzir energia no local de consumo, diversificar a matriz energética do país e atrasar investimentos com o aumento de capacidade de subestações e linhas de transmissão (VILAÇA GOMES et al., 2018). O limite de produção de energia em até 75 kW para microgeração distribuída e limite de 5 MW para mini geração distribuída para sistemas de produção de energia elétrica de pequeno porte (ANEEL, 2015), de forma que a unidade consumidora cede a energia a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito de energia ativa a ser consumida em um prazo de 60 (sessenta) meses. Deste crédito também é possível abater o consumo de outras unidades consumidoras do mesmo titular ou, na forma de condomínio, distribuída com o compartilhamento dos percentuais da energia exportada entre os proprietários.

Ainda segundo a Resolução N°687 da ANEEL, para o caso de unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída, exceto para aquelas de que trata o inciso II do art. 6º, o faturamento deve considerar a energia consumida, deduzidos a energia injetada e eventual crédito de energia acumulado em ciclos de faturamentos anteriores, por posto tarifário, quando for o caso, sobre os quais deverão incidir todas as componentes da tarifa em R\$/MWh. O excedente de energia é a diferença positiva entre a energia injetada e a consumida.

Apesar da permissão da geração distribuída pela ANEEL, os altos custos tecnológicos dos módulos fotovoltaicos os colocam em desvantagem em uma análise de custo-benefício comparado às demais fontes de energia. Isso afeta a viabilidade de instalação e são a principal barreira para a instalação de fontes de energia renováveis em edificações, uma vez que o conjunto do sistema é composto pelo custo dos módulos, do inversor, do medidor bidirecional e da instalação dos cabos, de proteção e manutenção (VILAÇA GOMES et al., 2018).

Com os custos cada vez mais decrescentes da geração solar fotovoltaica, a avaliação econômica desta tecnologia de geração de energia renovável e benigna aponta para a competitividade econômica cada vez mais próxima (LACCHINI; ANTONIOLLI; RÜTHER, 2017). Dessa forma, a avaliação de custos do investimento fotovoltaico pode ser feita através da diferença entre o custo da eletricidade gerada pelos fluxos de caixa de despesas de manutenção e as receitas de produção de energia do sistema a ser instalado.

2.4 AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO DE EDIFICAÇÕES NZEB

Os edifícios são duráveis e as decisões de construção têm consequências a longo prazo. A NBR15575 estipula 50 anos como vida útil mínima de uma edificação residencial (ABNT, 2013b). Uma vez que não existe ainda uma norma de desempenho para as outras tipologias, o período de 50 anos de vida útil acaba se tornando a referência para demais edificações também.

Ao pensar a eficiência energética durante o processo de projeto, os proprietários ou investidores de edifícios concentram-se apenas no custo do investimento quando tomam decisões sobre o projeto, os equipamentos a serem instalados, os sistemas de energia e negligenciam totalmente os custos futuros de operação ou eventuais substituições (D'AGOSTINO; PARKER, 2018). Com essa prática, acabam não tendo visão holística do custo real de um edifício e isso pode resultar na aplicação de uma solução econômica errada para a edificação que terá impacto por longo prazo.

Segundo Sesana e Salvalai (2013), a análise econômica do custo do ciclo de vida de um projeto de construção permite avaliar a viabilidade dos recursos monetários aplicados, em termos de investimento e/ou custos futuros (operação, manutenção, etc.), considerando opções de responsabilidade igualmente técnica para a construção. Essa análise fornece ao investidor uma abordagem mais realista e abrangente sobre o investimento que ele está prestes a fazer e os resultados em termos de uso da construção uma vez que algumas soluções ainda estão longe de atingir soluções de ótimo custo-benefício, pois apresentam preço bastante elevado (Becchio et al., 2015).

Nesse caminho, a Europa desenvolveu a metodologia de estudo do custo-benefício a partir da otimização de custos. Ambos os conceitos (relação custo-benefício e otimização de custo) estão relacionados, mas têm suas diferenças, sendo este último um caso especial do primeiro. Os conceitos se baseiam na comparação de custos e economias (a partir dos preços) da introdução de um nível específico de requisitos mínimos de desempenho energético para edifícios (PACHECO-TORGAL et al., 2017). Dessa forma, uma medida ou pacote de medidas é rentável quando o custo de implementação é menor que o valor dos benefícios resultantes durante a vida útil da aplicação dessa medida (BPIE, 2013).

Segundo a reformulação EU 244/2012 da Diretiva Europeia de Desempenho de Edificações - EPBD (EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2012), o custo ótimo é o nível de desempenho energético que resulta no menor custo durante um determinado ciclo de vida econômico de uma edificação. Pallis et al.

(2019) citam ainda que, de acordo com o EPBD, devem ser considerados custos de investimento relacionados à energia, custos de manutenção e operação (incluindo custos e economias de energia com base na categoria do edifício considerado e ganhos com energia produzida) e custos de disposição, se aplicáveis.

Estudos que utilizam essa metodologia e focam nessa temática contribuem no objetivo de identificar soluções de custo-benefício de medidas de eficiência energética na renovação de edifícios. Além de possibilitar o conhecimento de alternativas com alto desempenho energético e custos viáveis em seus climas e cenários nacionais, orientam decisões de investimento no correto planejamento de uma NZEB.

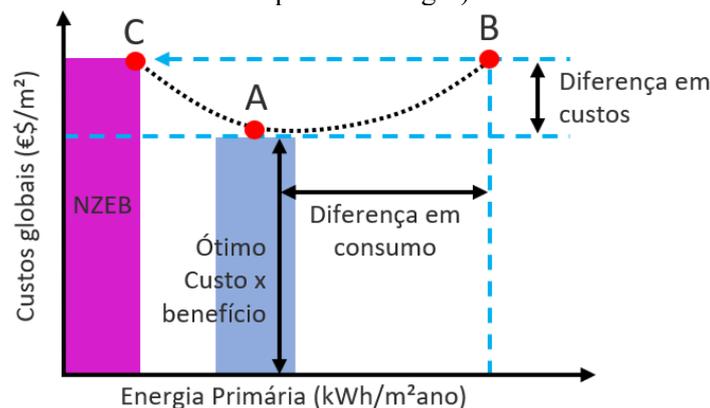
Ao efetuar uma análise do custo-benefício de estratégias em um NZEBs de escritórios no clima tropical de Singapura, Sun, Gou e Lau (2018) verificaram o custo-benefício de estratégias de projeto ativas e passivas para retrofit de edifícios existentes. A avaliação aplicou a metodologia do custo-benefício dividindo a economia anual dos custos de energia pelo custo incremental das estratégias escolhidas. Entretanto, não há menção sobre avaliação econômica dos custos ao longo do tempo. A estratégia passiva mais econômica foi instalar tubos de iluminação natural. Em segundo lugar ficaram os brises. É interessante ressaltar que as estratégias passivas tiveram uma contribuição de 5% na economia de energia, representando 21% dos custos, o que resultou em um período de retorno de mais de 100 anos. A estratégia ativa mais econômica foi a iluminação eficiente e sistemas de ar condicionado de alto desempenho em segundo lugar representando até 45% de economia e 18% dos custos, com 5,4 anos de período de retorno. Considerando as tarifas de Singapura, a economia total de energia chegou a 46,8% e o período de retorno com todas as estratégias passivas e ativas resultou em 40,9 anos. No total, o custo de construção unitário por metro quadrado resultou em US\$ 497/m². Outro ponto importante da pesquisa é que a intensidade de uso de energia (IUE) ficou em 55,2 kWh/m².ano, o que é muito menor do que o de um prédio de escritórios comum em Singapura (243 kWh/m².ano) de acordo com o relatório de *benchmarking* para este tipo de edificação no país. No total, houve aumento de 33% no custo de renovação devido às novas características de eficiência incluindo o sistema fotovoltaico.

Congedo et al. (2015) apresentam uma metodologia comparativa utilizada para o estabelecimento de otimização de custo através das seguintes etapas: (1) Definição de um edifício de referência a partir das características do estoque de edifícios a ser avaliado; (2) Identificação de medidas de eficiência energética a serem aplicadas; (3) Estabelecimento de variantes e combinações técnicas; (4) Avaliação do desempenho por meio de simulações termo

energéticas e dos custos globais com análise de sensibilidade entre as diferentes estratégias aplicadas. Nessa proposta, as alternativas de construção devem ser incluídas e comparadas em termos de custos e desempenho energético entre as soluções estudadas. Ou seja, após combinar edifícios de referência com diferentes pacotes de medidas, o cálculo se divide em dois: o cálculo do desempenho energético e o cálculo do desempenho financeiro das diferentes combinações de medidas de eficiência energética.

Para isso, uma curva de custo mostra as combinações avaliadas de desempenho energético (eixo x) e desempenho financeiro (eixo y). A configuração com ótimo custo-benefício apresenta os custos mais baixos, mantendo alto desempenho. Essa configuração otimizada pode ser identificada na parte inferior da curva que informa os custos globais (€/m²) e o consumo de energia (kWh/m².ano) como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Curva de custos globais.
(A = ótimo custo x benefício, B = requisitos em vigor, C = custo neutro em comparação com o requisito em vigor).



Fonte: CONGEDO et al., (2015, traduzido pelo autor)

Os cálculos de desempenho energético foram executados com a ajuda das 31 normas CEN18 que foram desenvolvidas para apoiar a implementação do EPBD. Para isso é utilizado um software de simulação computacional que estima os valores de intensidade de uso de energia por meio de simulações termo energéticas. Para avaliar o desempenho financeiro das combinações escolhidas, Regulamento delegado 244/2012 (EUROPEAN UNION, 2012) sugere o cálculo por meio do método do Valor Presente Líquido (VPL) para um período de cálculo de 20 anos para os edifícios comerciais e não residenciais.

O Valor Presente Líquido é um indicador que determina o valor atual dos fluxos de caixa líquidos que são gerados pelo projeto durante a sua vida útil descontados de um investimento inicial com base em uma taxa de retorno. Este indicador leva em consideração a

vida útil do equipamentos, o risco do investimento e quando a economia de energia será entregue (ISO, 2019). Segundo a ISO/TS 50044, o cálculo do Valor Presente Líquido é um dos indicadores preferidos para avaliar um Projeto de Economia de Energia PEE. Este indicador fornece ao usuário um "sim" ou "não" para a decisão de investimento e leva em consideração a vida útil do equipamento, o risco do investimento e quando a economia de energia será entregue (ISO, 2019). Através dessa análise, os custos durante o período definido são relacionados a um valor presente no momento do investimento inicial, inserindo os custos que ocorrerão em uma data posterior, não como seu valor nominal, mas como a soma que teria a reservar no momento presente a fim de obter o montante efetivamente mais demorado por meio da aplicação de uma taxa de juro prefixada (DOMINGOS, 2020).

Outros dois indicadores de viabilidade econômica são a Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). A TIR é uma medida que corresponde a rentabilidade de um investimento em um período de tempo. A TIR deve ser igual ou maior que a TMA para um empreendimento ser rentável. Já a TMA representa um critério de investimento, um pré requisito como o mínimo que um investidor se propõe a ganhar quando faz um investimento. Para ser rentável em um PEE, a TMA deve ser maior do que se o investidor aportasse a mesma quantia em um outro investimento financeiro. Dessa forma, a TMA básica adotada é a taxa do Sistema Especial de Liquidação e de Custódia (SELIC), que é calculada mensalmente pelo Banco Central do Brasil. Essa taxa é definida pelo Comitê de Política Monetária (Copom) e publicada diretamente no sítio eletrônico do Banco Central do Brasil cujo valor correspondente a dezembro de 2020 foi de 2%. Entretanto, na nota técnica PR07/18 sobre Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no horizonte 2050 (EPE, 2018), a EPE sugere a quantia de 8% para a taxa de desconto (Taxa Selic), valor que será considerado neste estudo.

No Brasil, a Resolução Normativa N° 300 da ANEEL de 12 de fevereiro de 2008 estabelece critérios para aplicação de recursos em Programas de Eficiência Energética (PEE). Essa resolução possui um Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética. O Procedimento do Programa de Eficiência Energética – PROPEE, através da versão revisada e aprovada pela Resolução Normativa n° 892 de 11 de agosto de 2020 é a regulamentação atual e vigente que consta no site da ANEEL. O módulo 7 do PROPEE sobre Cálculo da Viabilidade trata dos diferentes fatores e formas de cálculo da viabilidade econômica de um projeto realizado no âmbito do PEE com objetivo de estabelecer as diretrizes e procedimentos para o cálculo da viabilidade econômica dos projetos do PEE. O principal critério para avaliação da viabilidade econômica de um projeto do PEE é a relação custo-benefício (RCB) que ele

proporciona. O benefício considerado é a valoração da energia economizada e da redução da demanda na ponta durante a vida útil do projeto para o sistema elétrico (ANEEL, 2018a). Os custos são os aportes feitos para a sua realização (do PEE, do consumidor ou de terceiros).

Porém, a partir de 2019, a ISO/TS 50044 - *Energy saving projects (EnSPs) - Guidelines for economic and financial evaluation* (Projetos de economia de energia – Guia para avaliação econômica e financeira, tradução nossa) fornece diretrizes sobre como comparar e priorizar Projetos de Economia de Energia - PEE (EnSPs - *Energy Saving Projects*, na sigla em inglês) antes da implementação desses projetos usando avaliação econômica e financeira e inclui um conjunto comum de princípios (ISO, 2019).

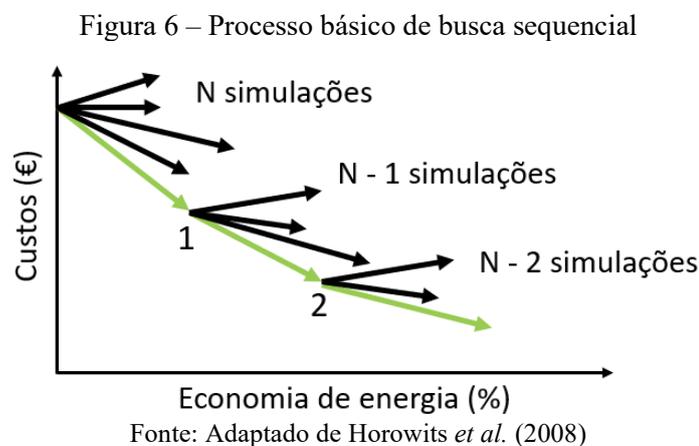
Dessa forma, para desenvolver um PEE, a análise de custo-benefício precisa considerar o conceito de valor do dinheiro no tempo, ou seja, as entradas e saídas de caixa não podem ser simplesmente adicionadas ou subtraídas. Essa análise é usada para priorizar medidas de eficiência energéticas identificadas através de indicadores econômicos. Para auxiliar na tomada de decisões sobre investimentos em projetos, a maior parte das análises econômicas se baseia em métodos matemáticos clássicos como o valor presente líquido, a relação custo-benefício, a taxa interna de retorno, a taxa mínima de atratividade e o retorno do investimento (ALVES, 2017), que também serão avaliados neste estudo.

2.4.1 Análise do custo do ciclo de vida

Dentre as análises econômicas, a análise do Custo do Ciclo de Vida - CCV (LCC, na sigla em inglês para *Life Cycle Cost*) é apontada como particularmente adequada para avaliar alternativas de medidas de retrofit de edifícios (ALVES, 2017; D'AGOSTINO; PARKER, 2018). O CCV é uma técnica que permite que avaliações comparativas de custos sejam feitas em um período de tempo específico levando em consideração fatores econômicos relevantes em termos de custos iniciais e custos operacionais futuros (ISO, 2019).

Retomando as diretrizes de avaliações de custo da Europa, através de uma análise de custo do ciclo de vida, D'Agostino e Parker (2018) combinaram simulações de energia e custo usando uma técnica de pesquisa sequencial para encontrar a combinação mais eficaz de eficiência energética e medidas de energia renovável a partir de um caso base em climas representativos na Europa. Um banco de dados de custos e uma biblioteca de medidas potenciais, relacionadas ao envelope, aparelhos e sistemas, foram estabelecidos e usados dentro do processo de otimização. Os benefícios da inserção de cada combinação de medidas de

eficiência energética foram comparados através da diferença entre a intensidade de uso de energia do caso base e a intensidade de uso energia do modelo com medida de eficiência energética. A intensidade de uso de energia resultante de cada combinação de medidas de eficiência energética (MEE) juntamente com os dados de custo é utilizada para analisar a relação custo-benefício, que é obtido estimando o Valor Presente Líquido dos custos de cada MEE ao longo da vida do edifício. Para desenvolver a análise de custo do ciclo de vida, uma busca sequencial otimizada ilustrada na Figura 6 foi utilizada para definir os pacotes de eficiência energética mais econômicos para retrofit de edifícios.



No processo de busca sequencial cada medida de eficiência energética é adicionada ao edifício básico de forma separada. Uma das MEE vai apresentar a solução ideal (seta verde) e as demais vão apresentar as demais opções de economia (setas pretas). Através de uma relação do custo do ciclo de vida com a economia de energia, a MEE que apresenta a inclinação mais acentuada (seta verde) se apresenta como a opção otimizada. O processo segue então para a próxima etapa ao incorporar essa MEE ao edifício básico e simular novamente as medidas restantes para encontrar a próxima opção otimizada. Este processo é repetido até que a solução de melhor custo-benefício seja alcançada. Na Figura 6, os números 1 e 2 representam o número de MEE combinadas em um Pacote de Retrofit de Energia (PRE). Segundo D'Agostino e Parker (2018) essa técnica permite que as medidas de eficiência energética sejam avaliadas separadamente, além de localizar pontos ótimos intermediários e alternativos ao longo do caminho de otimização, uma vez que soluções parecidas podem estar próximas do melhor nível, mas os custos sejam incertos ou variáveis entre elas.

As informações sobre a vida útil estimada dos elementos de construção utilizada no estudo seguiram o que é determinado pelas orientações que complementam a Diretiva 31/2010 UE baseados na EN 15459, que estipula o prazo de 30 anos para as análises de custo de ciclo de vida. Os parâmetros econômicos assumidos foram uma taxa de inflação geral de 2%, taxa de inflação do preço da energia de 3%, taxa de juros do financiamento e taxa de desconto de 5%.

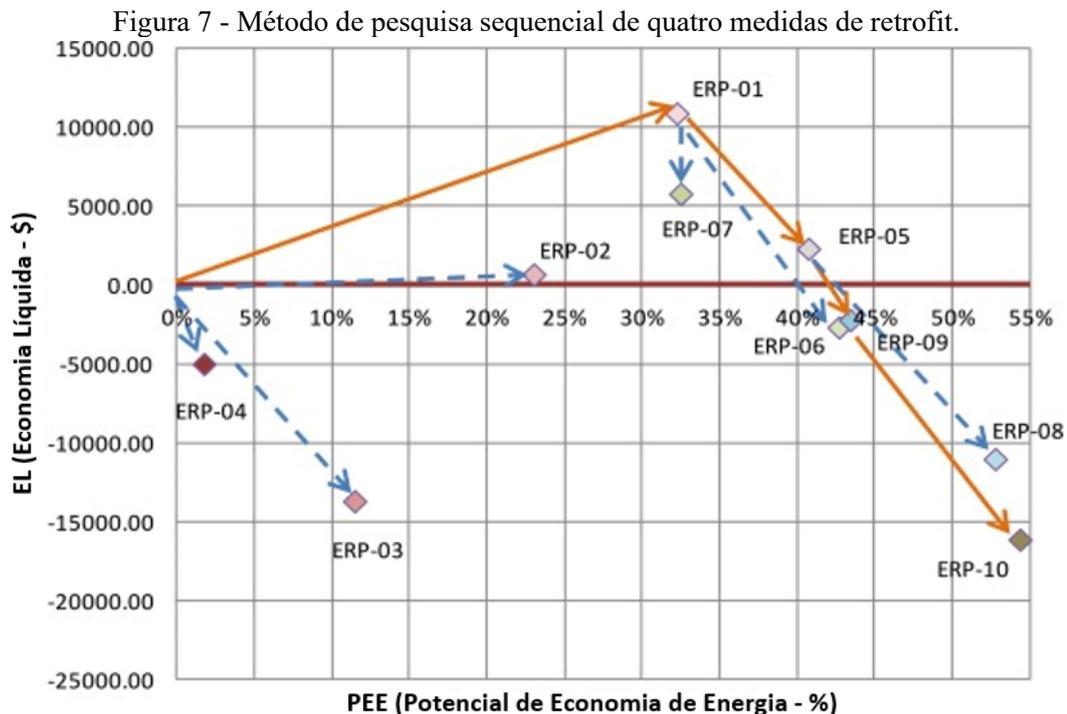
Os resultados demonstram que é possível alcançar economia de energia superior a 90% em comparação com o caso base. A aplicação da metodologia de busca sequencial seguida de uma análise do custo do ciclo de vida contribui e fornece uma estrutura abrangente para NZEBs com ótimo custo-benefício. Em locais mais quentes e ensolarados, medidas de eficiência dos equipamentos e as superfícies de cores mais claras devem ser inseridas primeiramente, pois as cargas de resfriamento podem ser reduzidas e seus valores financeiros são menores dentro da metodologia proposta. Comparado ao caso base com consumo de 32,5 kWh/m², a aplicação de todas as medidas de eficiência energética resultou em um consumo de 20,9 kWh/m² e um custo incremental total de € 25.781 para um período de cálculo de 30 anos.

Após efetuar uma análise de sensibilidade em sete medidas de eficiência energética em edificações comerciais em Belo Horizonte, Alves *et al.* (2018) encontrou as quatro principais medidas de maior influência que foram a densidade de potência de iluminação (DPI), sistema de coleta de luz natural, diminuição do fator solar do vidro e aumentar o COP do sistema de ar condicionado. Os custos dessas MEE foram levantados na tabela SINAPI. O SINAPI é um banco de dados de composições de preço unitário de serviços da construção civil gerenciado de forma compartilhada pela Caixa Econômica Federal e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (BRASIL [s.d.]). Em 2009, deu-se início a publicação do Banco Referencial na internet, onde seus dados advêm de instituições públicas e são atualizados mensalmente. A partir disso, a plataforma se tornou a fonte mais consultada da construção civil (FREITAS, 2017).

De posse desses dados, foi utilizada a metodologia de busca sequencial para identificar a via de custo ótimo para implementação dessas quatro medidas de eficiência energética a fim de desenvolver uma análise de custo do ciclo de vida para 20 anos. O caso base simulado no *Software EnergyPlus* apontou uma intensidade de uso de energia de 90,1 kWh/m².ano e, na primeira busca sequencial, recebeu cada uma das quatro medidas de eficiência energética separadamente gerando assim as novas alternativas de edificações. Cada caso simulado recebeu um número e é chamado de *Energy Retrofit Package* (ERP), que pode

ser traduzido para Conjunto de Retrofit de Energia. As medidas de eficiência energética propostas foram diminuir a densidade de potência de iluminação (ERP01) de 19,04 W/m² para 8,1 W/m², instalar um sistema de captação de luz natural (ERP02), modificar o fator solar dos vidros (ERP03) de 0,81 para 0,34 e, por último, instalar aparelhos de ar-condicionado com coeficiente de performance mais eficiente (ERP04) de 2,94 w/w para 3,28 W/W. Os modelos foram novamente simulados no *EnergyPlus* e as informações sobre os valores de intensidade de uso de energia (IUE), Potencial de Economia de Energia (PEE), custo do ciclo de vida (CCV) e Economia Líquida (EL) resultantes durante o processo de busca sequencial foram levantados. Os resultados de IUE foram ERP01 com 62,29 kWh/m².ano, ERP02 com 69,36 kWh/m².ano, ERP03 com 79,75 kWh/m².ano e ERP04 com 88,50 kWh/m².ano.

Por meio de um gráfico onde o eixo x é o PEE e o eixo y é a EL, os resultados foram comparados ao caso base, que se encontra no ponto zero para x e zero para y da Figura 7. A inclinação mais íngreme do gráfico que apresente o maior valor positivo de Economia Líquida é escolhida como o ponto ideal de custo-benefício.



Fonte: Adaptado de Alves *et al.* (2018)

Os resultados mostraram que a ERP01 representou um potencial de economia de energia de 32,2% e uma economia líquida de US\$ 10.871,30 comparados ao caso base durante os 20 anos estabelecidos no estudo. Em segundo lugar ficou a ERP02 com 23% de PEE e US\$

700,90 de EL. Em terceiro, a ERP03 com 11,5% de PEE e US\$ -13.656,70 de EL. Por último, a ERP04 com 1,8% de PEE e US\$ -5.013,40 de EL. A densidade de potência de iluminação (ERP-01) apresenta a linha mais íngreme para cima no gráfico (linha cheia) e se mostra como a opção de melhor custo-benefício na primeira etapa. Ela passa a ser primordial e as medidas de eficiência energética restantes são simuladas na presença deste novo ponto ótimo. Assim o processo iterativo é repetido resultando no melhor conjunto de medidas.

Na segunda etapa, a ERP05 com diminuição da densidade de potência de iluminação e sistema de captação de luz natural obteve o melhor custo-benefício com 40,7% de PEE e US\$ 2.366,4 de EL frente a diminuição da densidade de potência de iluminação mais o fator solar dos vidros (ERP06) ou a diminuição da densidade de potência de iluminação mais a instalação de aparelho de ar-condicionado com coeficiente de performance mais eficiente (ERP07). É interessante notar que o ERP07 foi o pacote mais econômico seguido pelo ERP-05. Entretanto, o ERP-05 apresentou maior economia de energia e foi escolhido como o novo ponto ótimo no estudo. Na terceira etapa, a ERP08 ficou com 46,99% de PEE e US\$ -16.034,50 de EL pela diminuição da densidade de potência de iluminação, sistema de captação de luz natural e fator solar dos vidros frente a instalação de aparelho de ar-condicionado com coeficiente de performance mais eficiente (ERP09). Na quarta e última etapa, a ERP10 com 45,3% de PEE e US\$ -20.739,03 de EL somando todas as medidas de eficiência energética. Destaca-se a ERP01 como opção de ótimo custo-benefício por apresentar a maior economia líquida, a ERP05 como a de melhor custo-benefício por apresentar a maior economia de energia tendo ainda uma economia líquida positiva ao caso base. Ainda que tenha uma economia líquida negativa em relação ao caso base, a ERP10 é a opção mais eficiente por apresentar a maior economia de energia dentre todos os cenários. Assim é demonstrada uma busca sequencial com medidas de eficiência energética.

2.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CAPÍTULO

O elevado consumo de energia em edificações mostrou a busca por novas abordagens arquitetônicas e tecnológicas para diminuir o consumo e produzir energia renovável para as necessidades de energia da edificação. Primar pelas economias que podem ser atingidas através de estratégias passivas e eficiência energética em edificações antes de considerar a oferta de energias renováveis no local é o caminho correto para o objetivo de Edificações de Energia Quase Zero.

Conforme verificado, diversos países possuem políticas públicas e estudos de custo-benefício para fomentar a reforma e a construção de edificações deste tipo. Algumas pesquisas demonstram a viabilidade do NZEB no âmbito internacional e também para os climas do Brasil. Isso se mostra interessante também em edificações de segurança pública pois investir em edificações mais eficientes é um aspecto crucial não apenas pela sustentabilidade, mas também por benefícios como a economia com recursos públicos, a segurança energética, a criação de empregos, a saúde, o conforto interno dos ocupantes e um exemplo para a sociedade. No caso de edificações da Polícia Civil, como o investimento é feito pelo Governo do Estado, os recursos para ampliações e reformas muitas vezes são escassos então precisam ser bem planejados e investidos.

No Brasil, onde as edificações públicas correspondem por 8,5% do consumo de energia, a nova metodologia de avaliação da INI-C apresenta os critérios para classificação de eficiência energética em edificações e dá um importante passo ao possibilitar a avaliação de NZEB e EEP na sua reformulação publicada em fevereiro de 2021. Além do importante passo rumo a transições energéticas bem sucedidas, o incentivo no uso de energias renováveis em edificações no Brasil tem um enorme potencial a ser explorado devido a quantidade de radiação solar disponível para gerar energia fotovoltaica. Somado a incentivos públicos e custos dos sistemas fotovoltaicos caindo em escala global, depois de aplicadas estratégias passivas e ativas de economia de energia, a integração de módulos fotovoltaicos é uma forma bastante prática de produzir energia renovável no local de consumo.

Ainda que a inserção de medidas de eficiência energética proporcione benefícios no desempenho energético, os proprietários ou investidores de edifícios concentram-se apenas no custo do investimento quando tomam decisões sobre a arquitetura, materiais, equipamentos e sistemas a serem instalados. Apontada como adequada para avaliar alternativas de medidas de retrofit de edifícios, a análise do custo de ciclo de vida é uma técnica que permite que avaliações comparativas de custo-benefício levando em consideração fatores econômicos relevantes em termos de custos iniciais e custos operacionais futuros. Para que mais pessoas aceitem o desafio de construir edificações NZEB, é preciso reunir informações que proporcionem um benefício para o proprietário do edifício ou para o investidor desde o início do processo de renovação com viabilidade técnica e financeira para o investimento se torna mais compreensível.

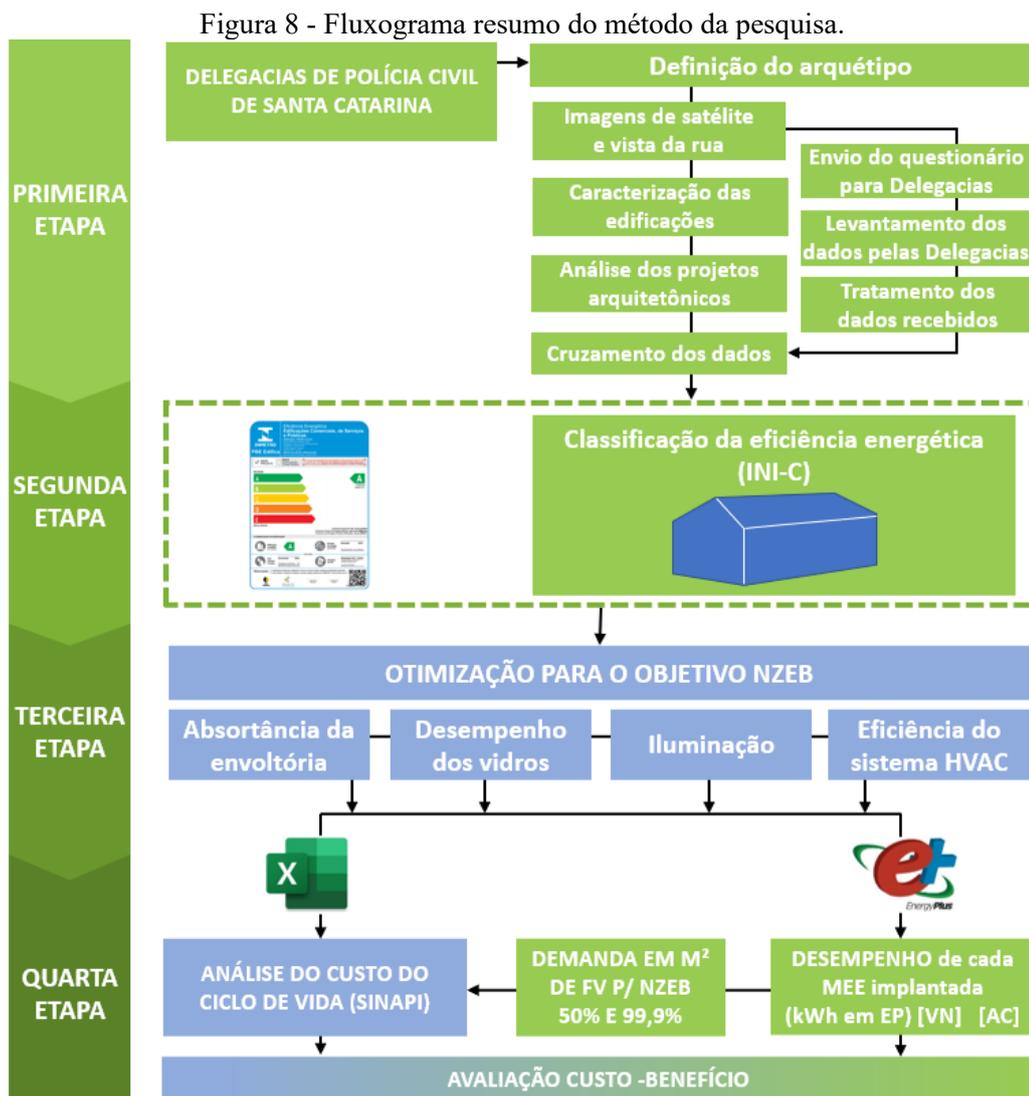
A partir das informações reunidas na revisão de literatura frente a necessidade de aprofundar uma análise de custo-benefício de medidas de eficiência energética e produção de

energia renovável em edificações públicas, o próximo capítulo aborda a metodologia desta pesquisa.

3 METODOLOGIA

A partir das referências apresentadas na revisão da literatura, o capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa, onde estão definidos os passos a serem executados no desenvolvimento deste estudo esta dividida em quatro etapas principais: (i) definição do arquétipo da tipologia estudada, (ii) avaliação da eficiência energética da edificação, (iii) otimização para o objetivo NZEB e (iv) avaliação de custo-benefício.

As etapas estão detalhadas conforme o fluxograma da Figura 8:



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nos próximos tópicos são descritas as atividades apresentadas em cada etapa do fluxograma acima caracterizando o desenvolvimento de cada etapa.

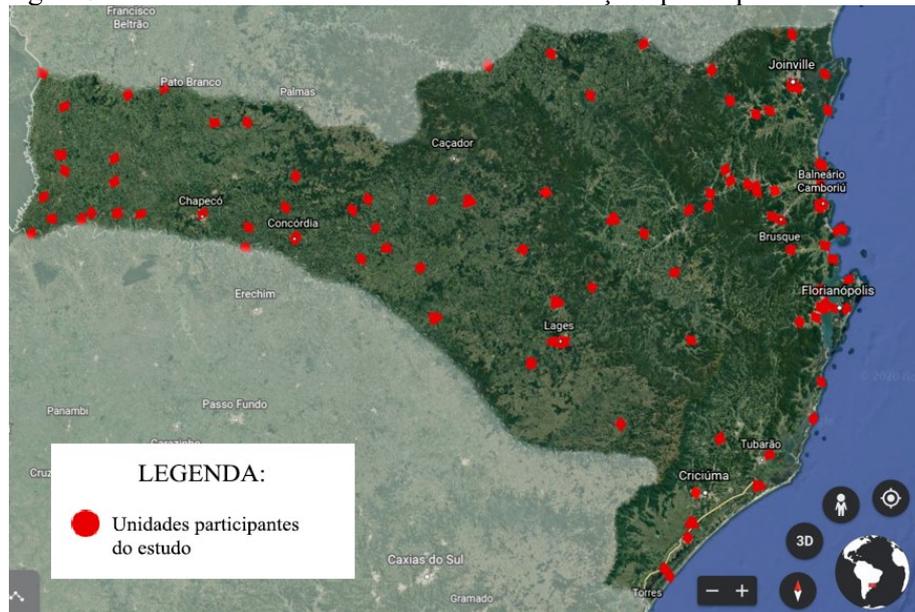
3.1 DEFINIÇÃO DO ARQUÉTIPO

Na primeira etapa, para elaboração do estudo, é importante conhecer o estoque de edificações de segurança pública da Polícia Civil de Santa Catarina. Foi avaliado o estoque de edificações de segurança pública através dos dados disponibilizados pela Gerência de Edificações com as informações sobre consumo energético mensal, endereço e propriedade de cada imóvel. O objetivo desta etapa é reunir informações para definir um arquétipo para posterior avaliação de eficiência energética e otimização para o objetivo NZEB.

3.1.1 Caracterização do estoque de edifícios

A planilha da Gerência de Edificações da Polícia Civil de Santa Catarina contendo as informações sobre a base de dados de endereço e consumo de energia das edificações apontou 358 edificações entre alugadas, cedidas por algum outro órgão público ou de propriedade do Estado de Santa Catarina. Como recorte inicial do trabalho, foram filtradas somente as edificações de propriedade do Estado de Santa Catarina, uma vez que a possibilidade de posterior intervenção é mais facilitada. Assim restaram 254 edificações na lista. Em seguida, como segundo recorte do estudo, foi efetuada a organização por consumo em quilowatt-hora/ano e então foi realizada uma busca das 100 edificações com maior consumo de energia dessa lista através dos *Softwares Google Earth e Google Street View*. O *Google Earth* é um software que mostra imagens de satélite e serviu para levantar informações como localização da unidade, zona bioclimática segundo a NBR 15220-3, área, perímetro e tipo de telhado. A Figura 9 mostra a localização das 100 edificações da Polícia Civil de Santa Catarina com maior consumo de energia em quilowatt-hora/ano e de propriedade do Estado de Santa Catarina.

Figura 9 - Estado de Santa Catarina com as edificações participantes do estudo



Fonte: Adaptado de Google Earth (2021)

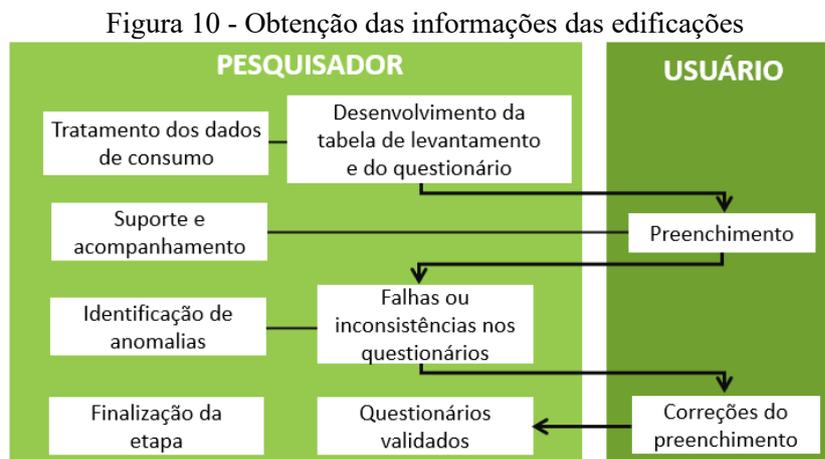
Já o *Google Street View* é uma biblioteca virtual composta de milhões de imagens panorâmicas do ambiente que nos cerca e mostra imagens captadas no nível da rua que serviram para levantar informações como número de pavimentos e assim permitir estimar a área total da edificação, o material e cor da envoltória e tipologia das aberturas. Essas informações compuseram a tabela tipológica inicial APÊNDICE A – Tabela tipológica das edificações do estudo e serviram para efetuar um primeiro agrupamento das edificações a partir da sua volumetria com base na experiência visual do pesquisador, da mesma forma como efetuado por Ballarini; Corgnati; Corrado, (2014). As informações faltantes na tabela completa foram solicitadas à gerência de edificações da Polícia Civil. No caso das edificações que não dispunham de imagens do *Google Street View*, foi solicitado uma vista da rua através do email da unidade policial.

3.1.2 Levantamento de dados

Com o objetivo de obter uma caracterização abrangente das edificações da Polícia Civil, um questionário foi desenvolvido e contou com as respostas de um agente de polícia usuário da edificação. Devido à localização distribuída pelo Estado de Santa Catarina, a quantidade de edificações e respeitando as medidas de distanciamento social em função da pandemia de COVID-19, não foi possível realizar auditorias energéticas ou visita às edificações para levantamento de dados. Para tanto, foi elaborado um questionário em Microsoft Excel a ser

aplicado nas 100 edificações participantes do estudo, que buscou reunir informações sobre suas características construtivas, o padrão de uso, os equipamentos e sistemas de energia que estão sendo utilizados e assim entender as principais fontes de consumo energético considerando a atividade dos usuários na edificação. O questionário completo pode ser verificado no APÊNDICE B – Questionário enviado para as unidades.

Enviado por email e assistido pelo pesquisador responsável de forma remota para esclarecer dúvidas que os usuários viessem a encontrar, o preenchimento contou com a participação ativa dos usuários *in loco* além do apoio e supervisão no rigor das informações pela gerência de edificações da PCSC. A Figura 10 mostra como se deu o processo, o suporte do pesquisador responsável e o levantamento dos usuários.



Fonte: Adaptado de Ortiz e Batista (2020)

Os usuários foram solicitados a efetuarem um levantamento de todos os equipamentos que compõem a edificação anotando as informações solicitadas. Na parte superior da tabela, foram inseridas informações com figuras a respeito do tipo de lâmpada ou ar condicionado que pode estar instalado na edificação. Em seguida consta uma tabela com colunas para levantamento do ambiente, tipo de equipamento e características sobre a potência, consumo de energia, modelo e frequência de uso. As linhas são para preenchimento das informações dos respectivos equipamentos presentes em cada ambiente. Um resumo da planilha de levantamento pode ser verificado na Figura 11 e de forma completa no APÊNDICE C – Tabela de apoio ao levantamento dos equipamentos das edificações:

Figura 11 - Tabela de levantamento dos equipamentos das edificações

Lâmpadas	LED	Fluorescente de bulbo	Fluorescente tubular	Incandescente	Ar condicionado	Split	Janela
							

													
Ar condicionado	Lâmpadas	Computador	Notebook	Impressora	Televisor	Ventilador	Geladeira	Cafeteira	Micro-ondas	Bombas d'água	Chuveiro	Projetor	Outro equip. energia elétrica

Em cada sala, comece anotando as informações sobre as lâmpadas e depois dos equipamentos.

NOME DO AMBIENTE	EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	POTÊNCIA UNITÁRIA (W)	CONSUMO DE ENERGIA / ETIQUETA	MODELO/TIPO <i>Quando não encontrar a potência, informações sobre o modelo são muito importantes.</i>	FREQUÊNCIA DE USO	
						Tempo	Frequência

Fonte: Elaborado pelo autor (2020)

O questionário possui também 14 perguntas divididas em 5 seções. As perguntas consistiram em quantificar o número de usuários da edificação, informações sobre o horário de funcionamento em dias de semana e finais de semana, a quantificação da ocupação em determinados horários do dia, sobre os períodos de uso do ar condicionado, da iluminação e também sobre características dos materiais da envoltória como cor, tipos de aberturas e ventilação dos ambientes. Para tabulação dos dados recebidos, foi utilizada uma planilha onde foi comparado o consumo real aproximado pelo uso relatado pelos usuários com o consumo energético verificado nas planilhas de dados da Polícia Civil. Essas informações contribuíram para compreender melhor o comportamento das edificações e deixar mais robusto o modelo arquetipo de simulação termo energético.

3.1.3 Auditoria em uma edificação

Para aprofundar o conhecimento sobre o comportamento cotidiano de uma Delegacia de Polícia com os gestores e usuários e levantar informações mais detalhadas para a construção do modelo arquetipo de simulação, foi efetuada uma visita em uma unidade representativa da amostra localizada na Rua Fúlvio Vieira da Rosa, na cidade de São José, SC, que compreende a 2ª Delegacia de Polícia de São José e também a Central de Plantão Policial. O processo conduzido pelo pesquisador responsável consistiu no levantamento da planta baixa da edificação, coleta de dados e medição das características e consumo de alguns equipamentos. As informações coletadas compuseram o questionário da unidade que integra a planilha com as respostas dos questionários.

Os dados da tabela de levantamento com as características da edificação e os equipamentos existentes foram tabulados de forma a compreender a divisão do consumo por uso final e a densidade de equipamentos em cada ambiente. As informações foram submetidas a uma análise de inconsistências ou falhas a respeito de alguns dados. Assim foi possível identificar e conhecer as características predominantes das edificações de segurança pública analisadas como densidade de potência de iluminação, a carga interna aproximada de equipamentos de cada ambiente e da edificação, características da envoltória, horários de uso, mapear e entender o comportamento do consumo histórico da edificação. Na última tarefa desta etapa foi desenvolvido o modelo arquétipo.

3.1.4 Construção do arquétipo

Na última etapa, ainda durante o período de levantamento de dados, a Gerência de Edificações da Polícia Civil disponibilizou o arquivo do projeto arquitetônico de três edificações. Sendo elas, o arquivo DWG com a planta baixa da unidade da Delegacia Regional de São Miguel do Oeste, referente a tipologia C, a planta baixa em PDF da Delegacia Regional de Joaçaba, referente a tipologia A e o arquivo RVT da unidade de São José do Cedro, referente a tipologia B3. Com essas informações, o pesquisador desenvolveu a modelagem 3D das quatro edificações no *Software Trimble SketchUp*, de forma a reunir informações médias sobre a área das edificações e dos ambientes internos, além da média do percentual de abertura da fachada dos arquivos recebidos. A dimensão das aberturas externas das celas foi dimensionada a partir da zona bioclimática, segundo o caderno de Diretrizes Básicas para Arquitetura Penal do Ministério da Justiça (BRASIL, 2011). Para a zona bioclimática 3, as aberturas devem ter 16% a 25% da área do piso.

A partir do recebimento dos projetos arquitetônicos e do cruzamento das informações presentes no levantamento das edificações por meio dos questionários preenchidos pelos usuários, foi modelado o arquétipo a ser simulado no *Software EnergyPlus V.9.4* com o apoio do *Software Trimble SketchUp* além do *plugin* do *OpenStudio V.1.1.0*. O modelo foi chamado de arquétipo e suas características inseridas conforme a Tabela 3 para representar a edificação real a partir dos dados médios recebidos e levantados na etapa anterior. Com relação às características da envoltória como parede e telhado, as premissas do sistema foram levantadas com base na planta baixa dos arquivos DWG recebidos.

Tabela 3 – Parâmetros medianos que foram reunidos para construção do modelo típico

Sistema	Informações para construção do modelo típico	Fonte dos dados
Paredes	U - Transmitância térmica (W/m ² K) CT - Capacidade térmica (kJ/m ² K)	Arquivos DWG e catálogo de propriedades térmicas (BRASIL, 2017)
Cobertura	U - Transmitância térmica (W/m ² K) CT - Capacidade térmica (kJ/m ² K)	
Percentual de abertura janela-parede	%	Arquivos DWG da Gerência de Edificações PC
Vidro - Fator solar e cor	Tipo de vidro - FS	
Área da edificação	m ²	Medições via Google Earth
Absortância a Radiação Solar (ARS) paredes	α - absortância	Dados medianos do questionário de levantamento pelos usuários (BRASIL, 2017; DORNELLES, 2021)
Absortância a Radiação Solar (ARS) cobertura	α - absortância	
Densidade de potência de iluminação DPI	(W/m ²)	
Classificação de eficiência dos aparelhos de ar condicionado	(COP)	Dados medianos do questionário de levantamento pelos usuários
Taxa de ocupação	Pessoas/m ²	
Horas de operação	Horas/dia	

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É importante ressaltar que não foi modelado o entorno da edificação, uma vez que a edificação se refere a um arquétipo representativo de todas as existentes, as quais estão inseridas em diversos entornos. Conforme D'Agostino e Parker (2018), em função da dificuldade de representar todos os contextos, esta pesquisa dará prioridade de avaliação e otimização apenas da edificação representativa levantada nos questionários, de forma que cada contexto pode ser inserido posteriormente conforme sua localização para um resultado mais particular.

Em seguida, todos os parâmetros relacionados com a construção como material, ocupação, equipamento, iluminação e uso foram configurados no programa *EnergyPlus V.9.4* para representar um projeto e operação característicos das informações levantadas nos questionários preenchidos pela Polícia Civil de SC.

O modelo arquétipo construído nessa etapa foi o modelo real que foi então avaliado para encontrar a sua classificação de eficiência energética segundo o método da INI-C para a cidade de Florianópolis e onde as medidas de eficiência energética foram aplicadas durante o processo de otimização para NZEB. Também é com este modelo base que as diferenças de

desempenho energético, bem como os custos dos modelos otimizados foram comparados para desenvolvimento da avaliação de custo-benefício.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO

Conforme relatado na revisão bibliográfica, para uma edificação ser considerada NZEB, primeiro ela precisa atingir a classificação “A” de eficiência energética segundo a Portaria nº42, de 24 de fevereiro de 2021, que especifica os critérios e os métodos para a classificação de edificações comerciais, de serviços e públicas. Dessa forma, o arquétipo foi avaliado segundo o procedimento para a determinação da classificação de eficiência energética presente na Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C).

Os sistemas avaliados foram a envoltória, o sistema de condicionamento de ar e de iluminação da edificação. O sistema de aquecimento de água é um dos sistemas avaliados no método da INI-C. Contudo, ele não foi avaliado nesta pesquisa uma vez que o uso deste equipamento foi relatado como muito raro em diversos questionários recebidos e não ser representativo nas edificações. Em função da edificação já apresentar classificação A de eficiência energética no sistema de iluminação pelo método das atividades do edifício, também não foi considerado o entorno da edificação, uma vez que este levantamento demandaria uma coleta de informações e tempo ainda maior, bem como o aproveitamento energético da integração da iluminação natural com a iluminação artificial. Conforme a INI-C determina, foi desconsiderado a ocorrência de precipitação de chuva na condição real e na condição de referência. Ao classificar a eficiência energética do modelo arquétipo, é possível realizar as análises de maneira mais ordenada e identificar quais estratégias são mais indicadas para a redução do consumo energético da edificação.

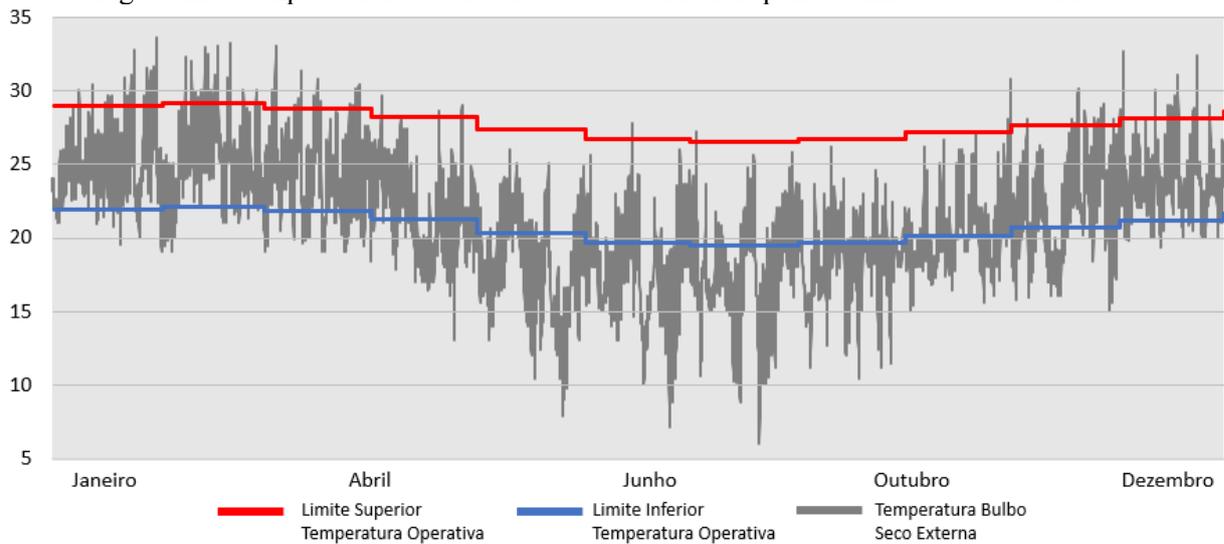
A avaliação foi executada segundo o método de simulação computacional termo energética no *EnergyPlus V.9.4* com o apoio de planilhas Excel onde a classificação de eficiência energética de cada um dos sistemas foi avaliada separadamente. Para as simulações de desempenho energético foi utilizado o mesmo arquivo climático TMYx.2004-2018 (sigla para Typical Meteorological Year) (CLIMATE.ONEBUILDING.ORG, 2021) com dados para o ano todo (8760 horas) disponível da cidade de Florianópolis. Foi considerado o contato com o solo através do objeto *Ground Temperature* com as temperaturas médias do solo extraídas do arquivo climático.

Para a edificação na condição de referência, foi calculado somente a carga térmica de refrigeração anual total adotando um sistema de ar condicionado de carga ideal através dos objetos relacionados ao *Ideal Loads Air System*, que calculou a quantidade de carga térmica a ser retirada do ambiente de acordo com a temperatura do termostato de 24°C.

Para a edificação real e edificações otimizadas, foram simulados dois modelos separadamente considerando ambientes com ar condicionado e ventilados naturalmente. Para o modelo com ar condicionado, foi adotado um sistema de condicionamento de ar ideal igual a edificação de referência através dos objetos do *Ideal Loads Air System* e a temperatura do termostato em 24°C. Para o modelo ventilado naturalmente, a simulação foi efetuada a partir do objeto *Air Flow Network*, uma vez que a ventilação natural contribui na diminuição do consumo de energia para resfriamento contribuindo para o objetivo NZEB. No objeto *AirflowNetwork:MultiZone:Component:DetailedOpening* foram modelados elementos de ligação como janelas externas e portas entre os ambientes para permitir as trocas de ar. O processo de cálculo consistiu em comprovar que os ambientes internos proporcionam temperaturas operativas dentro da zona de conforto durante um percentual de horas ocupadas através da classe de objetos *AirFlowNetwork:Multizone:Surface* e o método adaptativo relativo aos limites da zona de conforto térmico da ASHRAE Standard 55 (2017) como modo de controle da ventilação considerando a sua relação com a temperatura do ar externo.

Segundo Eli (2020), as temperaturas operativas de acionamento do cálculo da carga térmica do cruzamento dos modelos são referentes à zona de adaptação apresentada por De Vecchi *et al.* (2015), onde os ocupantes podem ajustar sua vestimenta para se adaptar ao clima e manter a temperatura em uma faixa de conforto. Com o arquivo climático de Florianópolis, a Figura 12 apresenta as temperaturas externas com suas médias mensais e os limites de temperatura pelo método de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2017) para 80% de aceitabilidade entre os ocupantes.

Figura 12 - Temperaturas externas da cidade de Florianópolis e limites de aceitabilidade.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Neste método, se a temperatura operativa do ambiente for maior ou igual a temperatura superior de conforto (linha vermelha na Figura 12) e o ambiente estiver ocupado, o cálculo da carga térmica de refrigeração é iniciado para reduzir a temperatura do ar. Isso foi efetuado através de um processo de cálculo no *Software Excel* cruzando os dados do percentual de horas ocupadas em conforto térmico (PHOCT) do resultado da ventilação natural e do consumo de energia da edificação para as horas não atendidas de conforto com os critérios de ocupação e o uso do sistema de ar condicionado e respectivo coeficiente de eficiência energética para refrigeração.

Para obter o consumo de iluminação e equipamentos, foi solicitando os resultados mensais das variáveis *Zone Lights Electricity Energy* e *Zone Electric Equipment Electricity Energy* respectivamente. Essas variáveis fornecem o consumo de energia a partir das informações de densidade de potência por metro quadrado inseridas nos objetos *Light* e *ElectricEquipment* e calculadas através do *Design Level Calculation Method*. Estes resultados de saída foram transformados de *Joule (J)* para quilowatt hora (kWh) os multiplicando por $2,7 \times 10^{-7}$.

Para a edificação ser elegível à classificação geral A de eficiência energética, primeiro ela deve atender as condições de elegibilidade dos sistemas individuais. Inicialmente, adotou-se que o arquétipo cumpre as condições de elegibilidade para a classificação A do tópico 7 da referida portaria para os sistemas de condicionamento de ar com aparelhos split inverter, o sistema de iluminação e de aquecimento de água. Em seguida, é detalhado o processo de

avaliação dos sistemas individuais. Os percentuais de economia de uma classificação para outra variam conforme a tipologia da edificação, de acordo com seu fator de forma e grupo climático no qual a edificação se insere.

3.2.1 Determinação da classificação da eficiência energética da envoltória

Inicialmente, calcula-se o fator de forma do edifício (FF) a partir da Equação 1, que representa a razão entre a área da envolvente do edifício e o volume do mesmo. Onde A_{env} é a área do envelope do edifício (a área em contato com o ambiente externo) e o V_{tot} é o volume total do edifício.

$$FF = \frac{A_{env}}{V_{tot}} \quad \text{Equação 1}$$

Com o resultado do fator de forma, através da Equação 2 calcula-se o coeficiente “i”, que tem a função de definir as faixas dos limites para cada classe de eficiência energética. Para a cidade de Florianópolis, grupo climático 1-B, e fator de forma 0,56 resulta em um coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação D para a A de 0,27.

$$i = \frac{(CgTT_{ref} \cdot CRCgTT_{D-A})}{3} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

i = coeficiente que representa os intervalos entre as classes;

$CgTT_{ref}$ é a carga térmica total da edificação em sua condição de referência (kWh/ano);

$CRCgTT_{D-A}$ é o coeficiente de redução de carga térmica total anual da classificação D para a A.

3.2.2 Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar

Através do método de simulação computacional, a classificação de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar baseia-se no percentual de redução de consumo para refrigeração ($RedC_R$), que é calculado a partir dos valores do consumo de refrigeração do

sistema de ar condicionado da edificação na sua condição real ($C_{R,real}$) e condição de referência ($C_{R,ref}$). Para a modelagem da edificação e do condicionamento de ar, foram utilizados os valores de referência de acordo com a tipologia da edificação fornecidos no anexo A além das recomendações do método de simulação computacional presentes no anexo C.I da INI-C.

O aparelho de ar condicionado adotado nesta pesquisa para a edificação real levou em conta a mediana dos valores encontrados a partir da marca e modelo dos aparelhos relatados nos questionários recebidos das edificações da PCSC. Alguns dos modelos descritos não foram encontrados em uma busca na internet. Durante a visita a edificação da 2ª Delegacia de São José, foi observado a instalação de equipamentos antigos. Em diversas salas, os usuários relataram que não recordavam quando o equipamento havia sido instalado ou recebido manutenção. Dessa forma, foi adotado nesta pesquisa aparelhos de ar condicionado split de velocidade fixa com COP 2,8. Este sistema deve incluir também os requisitos de qualidade de ar interior de conforto térmico da NBR16401. Nos processos de simulação computacional das edificações desta pesquisa, considerou-se então que os sistemas de condicionamento de ar proporcionam adequada qualidade do ar interior através de uma taxa de fluxo de ar externo por pessoa de 0,0075 metros cúbicos por segundo.

A partir do *Software EnergyPlus*, determina-se então o consumo de refrigeração para a edificação real e de referência. Como foi considerado o aproveitamento da ventilação natural, a carga térmica total anual da edificação real ($C_{gTT_{real}}$) foi calculada a partir do somatório das cargas térmicas de refrigeração anual ($C_{gTR_{real}}$ em kWh/ano) multiplicado pela fração de horas de desconforto por calor em relação às horas de ocupação levando em conta os limites de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55, conforme explicado anteriormente. Assim, o consumo de refrigeração do sistema de ar condicionado da edificação na sua condição real ($C_{R,real}$) foi calculado dividindo a carga térmica total anual da edificação real ($C_{gTT_{real}}$) pelo coeficiente de eficiência energética do sistema de condicionamento de ar para refrigeração (CEE_R). Este foi obtido multiplicando o COP médio de 2,8 dos questionários por 1,062 resultando no valor de $CEER = 2,974$, conforme a INI-C determina para sistemas com capacidade igual ou inferior a 17,6 kW. Já o consumo de refrigeração da condição de referência ($C_{R,ref}$), foi calculado a partir da carga térmica total anual de referência ($C_{gTT_{ref}}$) dividido por 2,6.

Em seguida, compara-se o percentual de redução de consumo para refrigeração ($RedC_R$) encontrado com os limites dos intervalos das classificações de eficiência energética de acordo com o grupo climático 1b para Florianópolis da Tabela 4.

Tabela 4 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética de acordo com o grupo climático do sistema de condicionamento de ar.

Grupo climático (GC)	A	B	C	D
Florianópolis - 1b	$\text{RedCr} > 51$	$51 \geq \text{RedCr} > 34$	$34 \geq \text{RedCr} > 17$	$\text{RedCr} \leq 17$

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

3.2.3 Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de iluminação

Para a classificação do sistema de iluminação artificial, é necessário determinar a potência de iluminação total da edificação real (PI_T), a potência de iluminação limite para a classificação A (PI_{LA}) e para a condição de referência para classificação D (PI_{LD}). Foi considerado o método das atividades do edifício, onde cada ambiente é classificado conforme a sua atividade presente na tabela B.III.3 da INI-C para a Densidade de Potência de Iluminação Limite DPI_L para classificação A e classificação D.

De posse dos valores totais de Potência de Iluminação instalada, com o objetivo de encontrar a escala relativa à classificação de eficiência energética do sistema de iluminação “i”, executa-se o cálculo da potência de iluminação limite para a classe de referência para a classe A e classe D (PI_{LD}). No caso da edificação real e de referência simuladas no *EnergyPlus*, o resultado de saída através da variável *Zone Lights Electricity Energy* fornece o consumo mensal do sistema de iluminação. Então, o cálculo da potência instalada será o resultado do consumo em kWh dividido pelos dias de ocupação e as horas de uso da edificação. Para edificações de escritório, considera-se 260 dias de ocupação ao ano e 10 horas de uso da edificação por dia.

Com o valor de “i” deve-se preencher a Tabela 5. A classificação de eficiência energética do sistema de iluminação é feita a partir da comparação entre o valor da potência instalada total da edificação real com a escala resultante.

Tabela 5 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> PI_{LD} - 3i$	$> PI_{LD} - 2i$	$> PI_{LD} - i$	$> PI_{LD}$
Limite inferior	$\leq PI_{LD} - 3i$	$\leq PI_{LD} - 2i$	$\leq PI_{LD} - i$	$\leq PI_{LD}$	-

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

3.2.4 Classificação da eficiência energética geral do arquétipo desenvolvido

A classificação geral da edificação, e dos sistemas individuais, foi realizada por meio da comparação entre o percentual de redução do consumo estimado de energia elétrica transformado em energia primária ($RedC_{ep}$), comparando-se a edificação real com a edificação em sua condição de referência, equivalente à classificação D, através dos intervalos calculados a partir dos limites das classificações de eficiência energética geral.

O consumo de energia primária da edificação real ($C_{EP,real}$) e sua condição de referência ($C_{EP,ref}$) foram efetuados através da Equação 3 e Equação 4, respectivamente. Para obter o consumo total de energia elétrica (C_{EE}) da edificação real e referência, é somado o consumo de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar, de iluminação, equipamentos e multiplicado pelo fator de conversão de energia primária para eletricidade adotado de 1,6. (KAMIMURA *et al.*, 2020).

$$C_{EPT,real} = (C_{EE,real} \cdot f_{cE}) \quad \text{Equação 3}$$

$$C_{EP,ref} = (C_{EE,ref} \cdot f_{cE}) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$C_{EPT,real}$ é o consumo de energia primária total da edificação real, sem a parcela relativa à geração de energia renovável (kWh/ano);

$C_{EE,real}$ é o consumo total de energia elétrica da edificação real (kWh/ano);

$C_{EP,ref}$ é o consumo de energia primária da edificação na condição de referência (kWh/ano);

$C_{EE,ref}$ é o consumo total de energia elétrica da edificação na condição de referência (kWh/ano);

f_{cE} é o fator de conversão de energia elétrica em energia primária;

Com o resultado do cálculo do fator de forma, obtém-se o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para a classificação A (CRC_{EPD-A}) e executa-se o cálculo dos intervalos de classificação do consumo de energia primária a partir da variável “i” determinada pela Equação 5.

$$i = \frac{C_{EP,ref} \cdot CRC_{EPD-A}}{3} \quad \text{Equação 5}$$

A classificação geral da edificação é determinada comparando o valor de consumo de energia primária da edificação real e os intervalos calculados conforme a Tabela 6.

Tabela 6 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	$> C_{EP,ref} - 3i$	$> C_{EP,ref} - 2i$	$> C_{EP,ref} - i$	$> C_{EP,ref}$
Limite inferior	$\leq C_{EP,ref} - 3i$	$\leq C_{EP,ref} - 2i$	$\leq C_{EP,ref} - i$	$\leq C_{EP,ref}$	-

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

3.3 OTIMIZAÇÃO PARA NZEB

Na terceira etapa, um grupo de medidas de eficiência energética (MEE) foi definido como conjuntos de retrofit (CR) a serem aplicados no modelo arquétipo desenvolvido nas etapas anteriores e assim otimizando a edificação para o objetivo NZEB. Na hipótese da edificação anteriormente avaliada pela INI-C não ser classificada como Classe “A” de eficiência energética, as modificações necessárias para atingir a classificação A inicialmente seriam efetuadas como início do processo de otimização.

Cumprindo o requisito de ser Classe “A” de eficiência energética, os cenários foram então aplicados e comparados tomando a edificação típica como caso base, de forma a efetuar uma análise de custo-benefício em um plano cartesiano de eixo X e Y, onde X corresponde ao potencial de economia de energia em porcentagem e Y corresponde ao custo do ciclo de vida para o vigésimo quinto ano em valor presente líquido. Conforme Domingos (2020), este estudo se baseia em um ciclo de vida de 25 anos, uma vez que é o período de vida útil dos módulos fotovoltaicos. As equações e os parâmetros para o cálculo do potencial de economia de energia e do custo do ciclo de vida estão melhor detalhados nas etapas 3.3.1 e 3.3.2 deste trabalho.

Na escolha das medidas de eficiência energética, é importante salientar que se tomou por objetivo aquelas modificações possíveis de serem executadas sem que interfiram nas vedações verticais ou horizontais de forma a gerar intervenções muito profundas como adição ou subtração de sistemas construtivos como vedações em tijolos e emboço. Como o parque edificado é de propriedade pública estadual, a ocorrência de intervenções deste tipo demandaria maiores procedimentos e traria prejuízos operacionais para os usuários das edificações. Dessa

forma, optou-se por focar em medidas passivas e ativas que sejam de baixa intervenção como aplicar uma tinta de cor mais clara nas superfícies externas de forma a diminuir a absorvância térmica das superfícies, trocar os vidros das aberturas por outros de melhor desempenho, trocar as luminárias por equipamentos que consumam menos energia, bem como um sistema de condicionadores de ar com aparelhos mais eficientes. A Tabela 7 traz as medidas de eficiência energética sugeridas na otimização para o objetivo NZEB. Cada medida de eficiência energética, sozinha ou combinada com outra medida de eficiência energética, compôs um conjunto de retrofit (CR) e seus resultados foram apresentados em função do seu desempenho durante a avaliação de custo-benefício desenvolvida através de uma busca sequencial.

Tabela 7 - Medidas de otimização selecionadas

Tipo	Sistema	Conjunto de retrofit (CR)	Item	Medida de eficiência energética (MEE)	Objetivo
Soluções passivas	Envoltória	1	Paredes e cobertura	Aplicar pintura com absorvância térmica menor	Diminuir a absorvância térmica
		2	Aberturas	Fator Solar dos vidros	Diminuir as trocas de calor com o ambiente externo.
Soluções ativas	Iluminação	3	Lâmpadas LED	DPI dos ambientes	Diminuir a potência instalada
	Equipamentos	4	AVAC	Condicionadores de ar com maior eficiência energética (IDRS)	Diminuir o consumo de energia para refrigeração

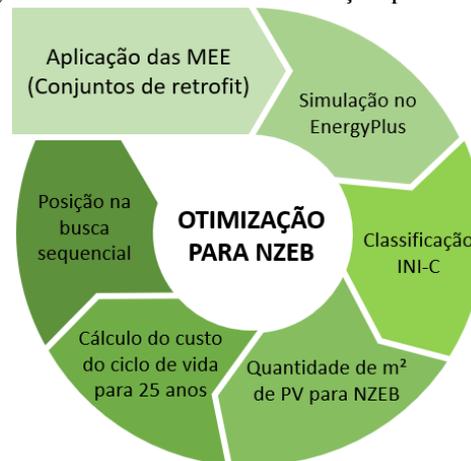
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É possível que o desempenho resultante das medidas de eficiência energética mude a ordem de aplicação inicialmente passiva e em seguida ativa no momento da avaliação da eficiência energética ou análise do custo do ciclo de vida. Dessa forma, a nomenclatura dos conjuntos de retrofit vai seguir ordem referente ao menor valor do custo do ciclo de vida e que resulte no caminho de ótimo custo-benefício. Na primeira etapa, isso deve resultar em CR01 (MEE01), CR02 (MEE02), CR03 (MEE03) e CR04 (MEE04). Na segunda etapa, CR05 será a MEE com melhor desempenho na primeira etapa + MEE02, CR06 será a MEE com melhor desempenho na primeira etapa + MEE03 e CR07 a MEE com melhor desempenho na primeira etapa + MEE04 e assim sucessivamente com CR08, CR09 e finalmente CR10.

Para cumprir o requisito de uma NZEB gerar energia renovável no local, também será implantado um sistema de geração de energia composto por módulos fotovoltaicos. O sistema

foi dimensionado para suprir as situações de 50% e 99,9% do consumo de energia da edificação, que correspondem aos limites para atingir a definição NZEB pela definição da INI-C. A Figura 13 resume o processo de otimização em cada uma das etapas da busca sequencial.

Figura 13 – Processo de otimização para NZEB.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

3.3.1 Simulação energética e renovação através da busca sequencial

Uma vez que a edificação tenha atingido a classificação “A” na classificação de eficiência energética do método da INI-C, a edificação será então submetida ao processo de otimização também pelo método de simulação utilizando o mesmo arquivo climático TMYx.2004-2018 (CLIMATE.ONEBUILDING.ORG, 2021). O objetivo das simulações de otimização foi mensurar a variação da intensidade de uso de energia (IUE) anual do modelo a cada nova MEE inserida na edificação. Para isso, foi solicitado no *EnergyPlus* o consumo por uso final dos sistemas individuais em energia elétrica em quilowatt-hora (kWh). Uma vez que a edificação de energia quase zero se beneficia de um sistema que utilize a ventilação natural para economizar no consumo do condicionamento artificial (SUN; GOU; LAU, 2018), o arquétipo desenvolvido e o arquétipo com os conjuntos de retrofit foram simulados conforme preconizado pela INI-C para a classificação de eficiência energética preconizada detalhada no tópico 3.2. Após a simulação no *EnergyPlus*, os resultados do consumo de energia final anual da edificação simulados em cada conjunto de retrofit foram convertidos para energia primária seguindo a consideração da INI-C de implementar um indicador que considera a integração de diferentes fontes de energia para melhorar a análise e comparação do desempenho energético

de edificações. O fator de conversão considerado foi de 1,6 para eletricidade (KAMIMURA *et al.*, 2020). Não há energia térmica na edificação avaliada.

Em seguida, o cálculo da porcentagem de economia de energia em relação ao arquétipo foi desenvolvido compondo assim o primeiro parâmetro do estudo, onde foi possível obter informações sobre a otimização do desempenho energético através da variação da IUE em kWh para o respectivo conjunto de retrofit. Este resultado também será dividido pela área da edificação a fim de comparar as informações de consumo em quilowatt-hora por metro quadrado anual (kWh/m².ano). O processo seguiu o método de busca sequencial apoiado nas pesquisas de Alves *et al.* (2018) e D'Agostino e Parker (2018) para encontrar o caminho de custo-benefício aplicando os conjuntos de retrofit.

As informações sobre o custo do ciclo de vida de cada conjunto de retrofit (CR) e o Potencial de Economia de Energia (PEE) a partir do comportamento positivo ou negativo da variação da intensidade de uso de energia (IUE) foram levantados. O resultado do Potencial de Economia de Energia em porcentagem foi obtido através da divisão entre a IUE com a aplicação do Conjunto de Retrofit (CR) pela IUE do arquétipo, conforme a Equação 6:

$$PEE = \left(\frac{IUE_{CR}}{IUE_{ARQUÉTIP0}} - 1 \right) \cdot 100 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

PEE = Potencial de economia de energia;

EUI_{CR} = Intensidade do uso de energia da aplicação do conjunto de retrofit;

$EUI_{ARQUÉTIP0}$ = Intensidade do uso de energia do arquétipo.

Em seguida, foi feito o cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para atender as situações limites de 50% e 99,9% da quantidade de energia consumida pelo arquétipo e das edificações com os conjuntos de retrofit (CR). Assim, as edificações terão produção de energia renovável no local diminuindo o balanço energético necessário para suprir seu consumo atingindo a meta NZEB. Os módulos fotovoltaicos e demais equipamentos utilizados foram pesquisados conforme disponibilidade com fornecedores e escolhidos os que apresentem eficiência e rendimento compatíveis com as boas práticas disponíveis no mercado. O dimensionamento do sistema fotovoltaico foi realizado através do *Software PVSyst V.7.1.1*. Dentro deste software podem ser encontrados os valores das médias mensais do total diário de

radiação solar em kWh/m².mês com a utilização do mesmo arquivo climático da cidade onde o estudo está sendo desenvolvido, onde são lidos pelo programa *Meteonorm V.7.3*. A inclinação dos módulos seguirá a inclinação da latitude de 27,5° para a cidade de Florianópolis.

3.3.2 Levantamento dos custos e entradas do ciclo de vida

Para a avaliação do custo do ciclo de vida, foram levantados os parâmetros e informações a respeito do custo do investimento inicial, os custos e períodos de reposição e manutenção de acordo com o período de estudo. Os custos de investimentos para materiais mais mão de obra foram obtidos pelo Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil – SINAPI (BRASIL, 2020b) para o mês de dezembro de 2020 ou cotação com fornecedores locais. O período de estudo avaliado refere-se a 25 anos, tomando como parâmetro a vida útil dos módulos fotovoltaicos.

Os custos de reposição e o momento das substituições de capital foram estimados com base na vida útil dos componentes. As taxas de depreciação utilizadas neste estudo foram estimadas com base na instrução normativa IN SRF n° 1700 Anexo III – Taxas anuais de depreciação (DOU, 2017) que estima a vida útil e os percentuais de depreciação para fins contábeis. Dessa forma, foi considerado taxa de 10% anual do custo inicial para a manutenção dos quatro sistemas relacionados a cada conjunto de retrofit.

O ciclo de vida considerado para as lâmpadas LED foi 13,8 anos conforme a indicação do fabricante de 40.000 horas, representando 8 horas ao dia e 2.880 horas ao ano (BECK, 2016). Para os demais sistemas, foram considerados 7 anos para a pintura, 30 anos para os vidros, 10 anos para os equipamentos de refrigeração a partir das informações da ABNT NBR 15575-1, uma vez que é a maior referência para edificações.

O valor residual de um sistema ou componente é o valor restante no final do estudo ou no momento da substituição durante o período de estudo. O método utilizado para estimar o valor remanescente é o método de depreciação do saldo decrescente que envolve a aplicação da taxa de depreciação contra o saldo não depreciado baseado na IN SRF n° 1700 Anexo III (DOU, 2017).

O custo da energia estimada para cada alternativa foi baseado na multiplicação do consumo de energia elétrica total de cada alternativa pelo valor do kWh da tarifa de energia elétrica B3 Demais Classes (R\$ 0,62813/kWh) da CELESC em dezembro de 2020. Durante o ciclo de vida, considerou-se uma escalada do preço da eletricidade igual à inflação.

A simulação do potencial de geração de energia renovável foi desenvolvida com apoio do Software *PVSyst* e resultou em médias mensais conforme a Tabela 8. O resultado da irradiação global foi somado resultando em 1550,80 kWh/m²ano e então dividido pelos 365 dias do ano resultando em uma irradiação global média anual diária no plano inclinado de 4,24 kWh/m².dia. O rendimento do sistema considerado foi de 82,90% e 21% da eficiência do módulo fotovoltaico de 360 Watts de potência.

Tabela 8 – Médias de irradiação global mensal (kWh)

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Total
165,9	142,1	136,6	114,2	93,5	80,1	89,4	112,2	122,9	149,3	168,6	175,9	1550,8

Fonte: Software *PVSyst V.7.1.1*

Segundo a Resolução 414/2010 da ANEEL, atualizada pela Resolução 823/2018, as concessionárias de energia podem cobrar dos consumidores o custo de disponibilidade de energia, quando estes possuem geração própria de energia e conexão à rede elétrica da concessionária. Esta é uma taxa que contempla o custo do fornecimento da infraestrutura para assegurar que o serviço de eletricidade seja disponibilizado aos usuários de um determinado local e varia conforme o tipo de fornecimento de energia. Foi considerado um fornecimento do tipo bifásico, onde a tarifa mínima considerada é referente a 50 kWh (ANEEL, 2018b). De acordo com a tarifa “B3 Demais Classes” considerada, os R\$ 0,62813/kWh foram multiplicados por 50 kWh e resultou em um custo mensal de R\$ 31,41 e anual de R\$ 376,88. Dessa forma, para cada caso, o custo da instalação do sistema de geração de energia foi atingido multiplicando a área necessária para suprir as situações limites de 50% e 99,9% do consumo de energia pelo respectivo custo de instalação descontando então tarifa do custo mensal de disponibilidade de energia elétrica de R\$ 376,88. Este valor foi diminuído da geração de energia renovável anual, que posteriormente foi descontada do custo do ciclo de vida para atender ao objetivo NZEB e assim efetuado o cálculo do retorno do investimento.

Para o cálculo do custo do ciclo de vida dos módulos fotovoltaicos, foi considerado 1% do custo inicial por ano para operação e manutenção (LACCHINI; RÜTHER, 2015), substituição dos inversores a cada 10 anos (INSTITUTO IDEAL; AHK, 2019) e 1% de taxa de degradação da geração fotovoltaica do módulo (SOLÍS-ALEMÁN et al., 2019).

3.3.3 Cálculo dos custos das medidas de eficiência energética

De posse da síntese dos custos e entradas do custo do ciclo de vida das medidas de eficiência energética implantadas e da quantidade de módulos fotovoltaicos para atingir a meta NZEB, foi efetuado o cálculo do Custo do Ciclo de Vida (CCV) e a Economia Líquida (EL), que foram os métodos econômicos usados para avaliar a relação custo-benefício de cada conjunto de retrofit (CR). O CCV foi calculado pela Equação 7 com base em Alves (2017):

$$CCV = CI + Rep - Res + E + OM\&R \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

CCV = Custo do Ciclo de Vida total em valor presente do arquétipo ou de um determinado conjunto de retrofit;

CI = Custos de investimento em valor presente;

Rep = Custos de reposição de capital em valor presente;

Res = valor residual em valor presente;

E = Custos de energia em valor presente;

$OM\&R$ = custos manutenção em valor presente.

A economia líquida (EL) para um Conjunto de Retrofit (CR), em relação ao arquétipo, pode ser calculada a partir da diferença entre o CCV do respectivo Conjunto de Retrofit e do CCV do arquétipo, conforme a Equação 8:

$$EL = (CCV_{ARQUÉTIPO} - CCV_{CR_x}) \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

EL : Economia líquida, que é a medida da diferença entre o custo do ciclo de vida do arquétipo e o custo do ciclo de vida do arquétipo com aplicação do Conjunto de Retrofit “x”;

$CCV_{ARQUÉTIPO}$: Custo do ciclo de vida do arquétipo;

CCV_{CR_x} : Custo do ciclo de vida do arquétipo com aplicação do Conjunto de Retrofit “x”.

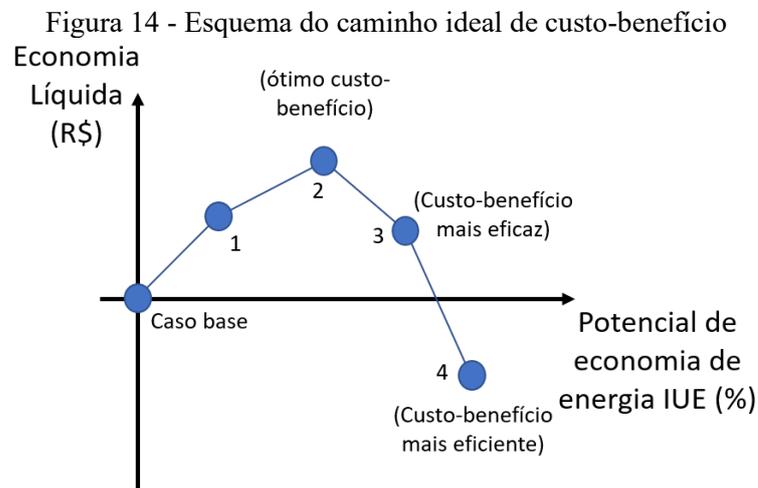
Todos os valores estão em Valor Presente (VP).

O Conjunto de Retrofit foi considerado econômico em relação ao arquétipo se o potencial de economia de Energia Líquida foi maior que zero. Os custos foram calculados

através do uso de planilhas Excel. Adotou-se o custo unitário por metro quadrado dos elementos construtivos para a edificação de referência e de acordo com os encontrados na base de dados SINAPI e pesquisa com fornecedores locais para as medidas de eficiência energética.

A partir da metodologia explicitada acima, para cada cenário de retrofit, o desempenho de cada medida de MEE em consumo de energia primária (EP) e o custo do ciclo de vida (CCV) para 25 anos foram avaliados. A solução de melhor custo benefício foi identificada por meio de um gráfico onde X é o potencial de economia de energia (PEE) e Y é a economia líquida do custo de cada conjunto de retrofit aplicado no arquétipo, ambos para o vigésimo quinto ano. Os resultados são comparados com o modelo arquétipo sem nenhum conjunto de retrofit, que se encontra no ponto zero para X e zero para Y.

Conforme a Figura 14, a abordagem de busca sequencial fornece também o caminho de custo-benefício. A inclinação mais íngreme do gráfico que apresente o maior valor positivo de economia líquida será definida como o ponto de ótimo custo-benefício. O ponto que possuir o conjunto de retrofit com o maior potencial de economia e também economia líquida positiva é o ponto de custo-benefício mais eficaz ou de melhor custo-benefício. Já o ponto mais eficiente é aquele de maior potencial de economia de energia independente da economia líquida.



Fonte: Adaptado de Alves, *et al.* (2018)

3.4 AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO

Na quarta etapa, para uma correta compreensão do comportamento dos investimentos efetuados, foi desenvolvido o cálculo do custo-benefício através de parâmetros econômicos. Isso foi desenvolvido com o uso de tabelas no *Software Excel* para avaliar a viabilidade financeira de cada medida de eficiência energética através dos indicadores de Valor Presente Líquido, além da Taxa Mínima de Atratividade (TMA) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

Os valores de custo inicial das MEE são transformados inicialmente em valor futuro (CF), corrigido com a inflação e depois descontados a valor presente, empregando a taxa de desconto conforme a Equação 9:

$$CF = VP \cdot (1 + f)^n \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

CF = custo futuro;

VP = Valor presente;

f = Taxa de inflação em decimal;

n = Tempo de vida do sistema, em anos.

Em seguida, é efetuado o cálculo do VPL através da Equação 10:

$$VPL = \sum_0^n \frac{CF}{(1 + i)^n} \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

VPL = Valor presente líquido;

n = Tempo de vida do sistema, em anos;

CF = Fluxo de caixa ao longo do tempo de vida;

i = Taxa mínima de atratividade ou taxa de desconto.

Para a taxa de inflação, foi utilizada 5,44%, que é a média acumulada dos últimos 5 anos para o mês de dezembro de 2020, tomando como base o Índice Nacional de Custos da Construção (INCC-DI). Concebido com a finalidade de aferir a evolução dos custos de construções, o INCC é calculado mensalmente pelo Instituto Brasileiro de Economia (IBRE) e configurou-se como o primeiro índice oficial de custo da construção civil no país. Sobre a taxa

mínima de atratividade ou taxa de desconto, os relatórios da Empresa de Pesquisas Energéticas usam taxa de 8% ao ano (EPE, 2018), que também foi adotada como taxa de juros ou Selic.

A Tabela 9 mostra os parâmetros econômicos que foram utilizados no estudo.

Tabela 9 - Parâmetros econômicos.

Categoria	Taxa
Taxa de desconto (Selic)	8% ¹
Taxa Mínima de Atratividade	8% ¹
Taxa de inflação (INCC-DI)	5,44% ²
Reajuste de eletricidade (considerada igual inflação)	5,44% ²

Fonte: ¹EPE (2018) e ²FGV/IBRE (2020) média dos últimos 5 anos.

Os resultados ainda serão avaliados pela Taxa Interna de Retorno (TIR), um indicador de viabilidade econômica que demonstra o quanto um investimento é rentável durante um período de tempo, que neste trabalho seguirá o trabalho de Domingos (2020) que foi de 25 anos, uma vez que se baseou no período de vida útil dos módulos fotovoltaicos. Um investimento é rentável quando a TIR é igual ou maior que a TMA.

Por último, através da Equação 11 será efetuado o cálculo do retorno do investimento através do Fluxo de Caixa Descontado (FCD), para verificar qual o tempo de retorno do investimento referente a cada Conjunto de Retrofit aplicado além da aplicação dos módulos fotovoltaicos para produção de energia renovável no local. Este cálculo leva em consideração a taxa de juros Selic para calcular o período de tempo para recuperar um investimento baseado nos fluxos de caixa descontados do investimento.

$$FCD_n = \sum_{t=1}^{t=n} \frac{FC^t}{(1+r^t)} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

FCD_n = Fluxo de caixa descontado no ano n;

FC^t = Fluxo de caixa ao longo do tempo de vida;

r^t = Taxa de desconto estimada dos fluxos de caixa;

n = Tempo de vida do sistema, em anos.

De modo geral, juntamente com a Tabela 9, a Tabela 10 apresenta as principais informações definidas na metodologia e os pressupostos que serão adotados neste trabalho.

Tabela 10 – Pressupostos da pesquisa

Área de aplicação	Edificações de segurança pública existentes
Tipologia da edificação	Delegacias de polícia (escritório)
Condições climáticas	Zona bioclimática 3
Opções de MEE	Absortância das superfícies externas, densidade de potência de iluminação, vidros com fator solar de alto desempenho, ar condicionado eficiente.
Produção de energia renovável	Módulos fotovoltaicos
Vida útil da aplicação	25 anos conforme a vida útil de módulos fotovoltaicos (DOMINGOS, 2020)
Cálculo das necessidades energéticas	Simulações de desempenho energético de acordo com INI-C com EnergyPlus em kWh/m ² .ano
Análise dos resultados	Microsoft Excel
Usos de energia	Usos finais para refrigeração, iluminação e equipamentos
Custos	Investimento, reposição, residual, consumo de energia e manutenção.
Tarifa de energia considerada	CELESC B3 Demais Classes: R\$ 0,62813/kWh em Dezembro/2020 (R\$ 0,53224 + 12% de ICMS, 5,89% COFINS e 1,28% PIS)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO DO ARQUÉTIPO

4.1.1 Levantamento das edificações via *Google Earth* e *Google Street View*

Conforme o tópico 3.1.1 da metodologia, a tabela recebida da Polícia Civil continha algumas informações das edificações. As sete informações que foram utilizadas neste estudo foram o tipo de unidade e a jurisdição regional, o município, o consumo anual total de energia elétrica em quilowatts e em Reais, endereço e propriedade do imóvel.

Então foi efetuado o recorte das 100 edificações de propriedade do Estado de Santa Catarina e com maior consumo de energia. Em seguida, a partir de um levantamento visual com a ajuda do *Software Google Earth* e *Google Street View*, reuniu-se também outras onze informações para caracterizar as edificações presentes no estoque da Polícia Civil: área de projeção, número de pavimentos, perímetro, imagem no nível da rua, vista de topo, forma, zona bioclimática, absortância das paredes externas, tipo de cobertura, tipo de janela e tipo de telhado. As últimas oito características elencadas receberam um número de acordo com uma faixa mínima e máxima dentre a característica encontrada, que depois foi compilada para melhor organização de cada grupo e classificou-se estas 100 edificações em oito grupos

tipológicos estabelecendo uma primeira classificação visual resultando também na quantidade de cada grupo conforme a Tabela 11.

Tabela 11 - Características visuais da volumetria das edificações

Nº de pavimentos	Volumetria	Tipo de telha	Área de abertura de vidro	Classificação	Quantidade
2	retangular	Fibrocimento	2 folhas	A	6
1	retangular	Cerâmica	4 folhas	B1	7
1	quadrada	Cerâmica	2 ou 4 folhas	B2	18
1	quadrada com anexo	Cerâmica	3 folhas	B3	19
1	retangular	Fibrocimento	3 ou 4 folhas	B4	18
2	Projeto Padrão da Polícia Civil ou próximo			C	8
1 ou 2	Volumetria sem características parecidas com outras edificações			X	15
Sem informação	Edificações que o endereço da planilha não correspondia a uma edificação no Google Earth e/ou não exista imagens no Google Street View			Falta info	9

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Por último, cruzando as informações de consumo de energia disponíveis na tabela da PCSC com as respectivas características encontradas foi possível estimar a área total, através da multiplicação da área de projeção pelo número de pavimentos e o consumo em quilowatt-hora/m².ano ao dividir a quantidade de quilowatt-hora/ano pela área total.

Todas essas vinte e uma informações foram organizadas em uma tabela tipológica no Microsoft Excel, conforme resumo na Figura 15 e de forma completa no APÊNDICE A – Tabela tipológica das edificações do estudo. Assim foi possível efetuar uma descrição das edificações como uma primeira organização geral e conhecer o estoque de edificações a ser trabalhado por tipologias.

Figura 15 – Tabela tipológica das edificações do estudo

DRP	Município	Área Projec	Pvtos	Área	Perímetro	kWh/ ano	kWh/ ano/m ²	R\$/ano	Unid.	Tipologia	Descrição	Vista da rua	Vista de topo	Forma	Zona Blocl	Absort	Tipo cobert	Tipo Janela	Tipo Telha	Endereço	Propriedade do Imóvel
11ª	Joaçaba	915	2	1830	131	49652	27,1322	R\$ 30.519,39	DRP	A	Volumétrica sem características parecidas com			2	2	2	2	2	1	Rua Tiradentes	de propriedade do Estado de Santa Catarina
20ª	Ituporanga	450	2	900	103	45520	50,5778	R\$ 25.254,98	DRP	C	Tipologia: forma retangular, telha fibroc duas águas, eiz: r: p:lv, quadrado			7	2	1	2	3	2	Rua Vereador	de propriedade do Estado de Santa Catarina
17ª	São João Batista	420	1	420	110	20110	47,88	R\$ 18.346,08	DPCo	B3	Tipologia: cerâmica, janela 2 ou 4 folhas de			4	3	2	4	3	1	Rua Marechal	de propriedade do Estado de Santa Catarina

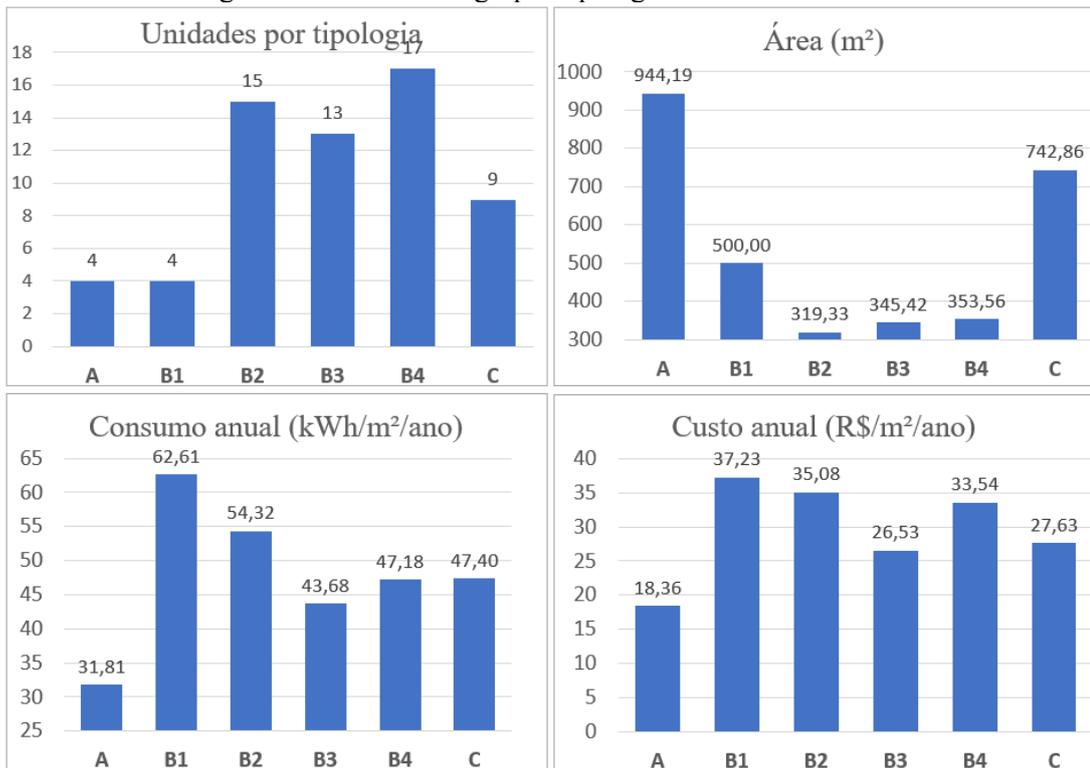
Fonte: Adaptado de (POLÍCIA CIVIL, 2019)

4.1.2 Resultado dos questionários e análise dos dados recebidos

A partir da organização da tabela tipológica do APÊNDICE A, foi elaborado o questionário presente no APÊNDICE B – Questionário enviado para as unidades e enviado para as 100 edificações através de email com ajuda da Gerência de Edificações da PCSC. O questionário foi enviado em outubro de 2020 e o levantamento das informações se estendeu até fevereiro de 2021. Durante o período, o pesquisador recebeu apenas três dúvidas de preenchimento do questionário, as quais foram dirimidas sem dificuldades. A primeira, a respeito do tipo de lâmpada existente na edificação. A segunda, sobre a cor da edificação e a terceira sobre como considerar a área total. Foram recebidos 72 questionários preenchidos, sendo que 10 tiveram que ser descartados por estarem incompletos restando 62 questionários completos. Através deles foi possível desenvolver uma comparação síntese em unidades por tipologia, mediana das áreas em metros quadrados, mediana de consumo em kWh/m².ano e mediana de custo em R\$/m².ano, conforme a Figura 16.

Destaca-se que as tipologias classificadas como B foram as que mais enviaram questionários preenchidos. Essas também são as que têm menor área, então a área mediana resultante foi 395,25 m². De forma mediana entre as 62 edificações, o consumo de eletricidade resultou em 17.010,50 kWh/ano, com desvio padrão de ±9.701,88 kWh/ano. Em reais, de R\$ 10.941,21, com desvio padrão de R\$ ±5.415,40. Isso representa 46,85 kWh/m².ano, com desvio padrão de ±21,71 kWh/m².ano e R\$ 29,44 R\$/m².ano, com desvio padrão de R\$ ±13,60 R\$/m².ano.

Figura 16 - Síntese dos grupos tipológicos - dados medianos

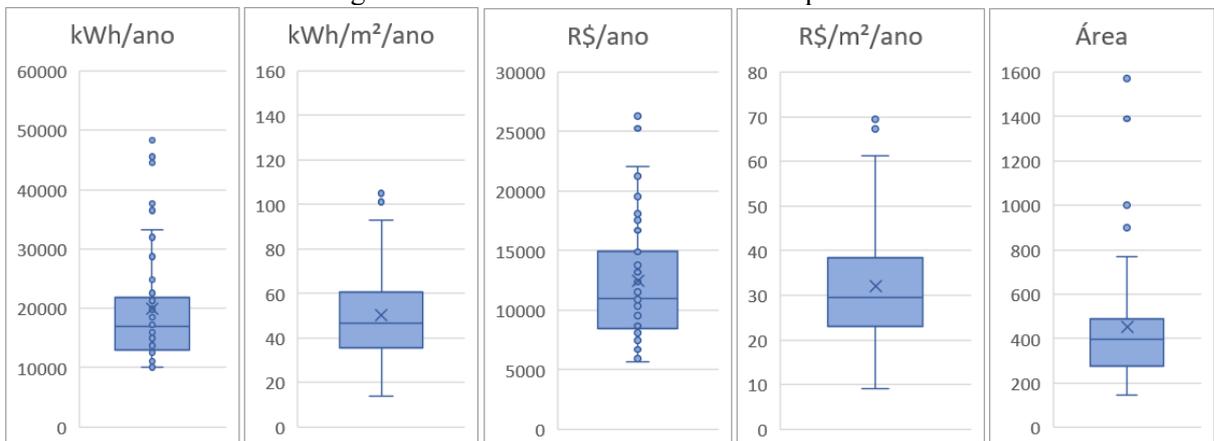


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Compreende-se que esses dados formam um conjunto de informações e suas particularidades suscitam pesquisas futuras, que permitam um estudo mais aprofundado em cada edificação com maiores informações das mesmas. A principal informação encontrada e utilizada para construção do arquétipo com estes dados foram os 395,25 m² de área.

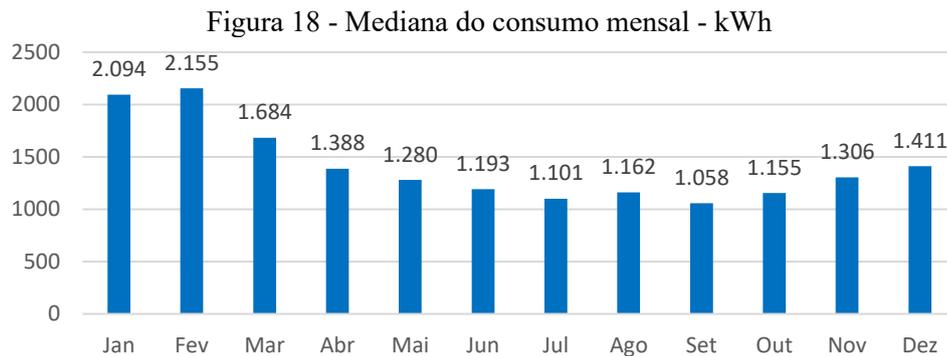
Os desvios padrão podem ser verificados nos gráficos de caixa da Figura 17.

Figura 17 – Valores medianos e desvios padrões



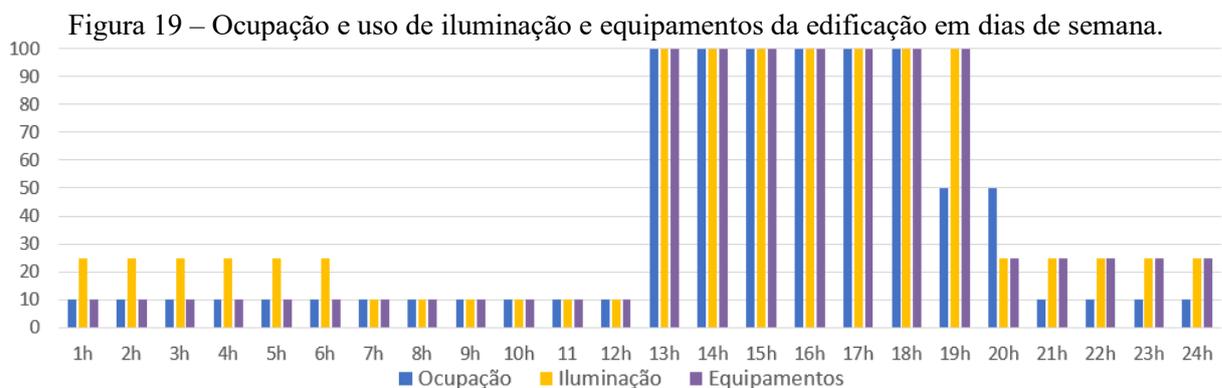
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Nos questionários, foi relatado o uso de iluminação também durante o período diurno. Durante a noite, 25% da iluminação permanece ligada. Após as 00 horas, somente 10% da iluminação permanece ligada. Nos finais de semana, a informação é que as delegacias funcionam em regime de plantão, o que foi relatado nos questionários como uma operação de 10%. A Figura 18 mostra o comportamento mediano do consumo mensal das 62 edificações que responderam ao questionário.



Fonte: Adaptado da planilha de consumo da PCSC (2019)

Sobre os equipamentos, percebeu-se a instalação de equipamentos de climatização antigos como equipamentos de janela ou com coeficiente de performance de 2,8 W/W segundo pesquisas em sites especializados, além de equipamentos de iluminação fluorescente e grande quantidade de frigobares e bebedouros elétricos em diversas salas. Este padrão de uso e ocupação foi confirmado também com o gerente de edificações da Polícia Civil. Sobre os equipamentos de ar condicionado, o gerente de edificações relatou que está em desenvolvimento um plano para atualizá-los por aparelhos mais eficientes, porém sem informações a respeito de projeto ou recursos alocados. A Figura 19 mostra um resumo com o padrão de uso e ocupação, além de iluminação e equipamentos relatado nos questionários.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

É importante ressaltar que este padrão de ocupação foi utilizado apenas para calibrar o modelo de simulação com os dados disponíveis. Posteriormente, a classificação de eficiência energética e a otimização com as MEE foram simuladas com os padrões que a INI-C determina, conforme está detalhado no tópico 4.2 sobre a classificação da eficiência energética da edificação.

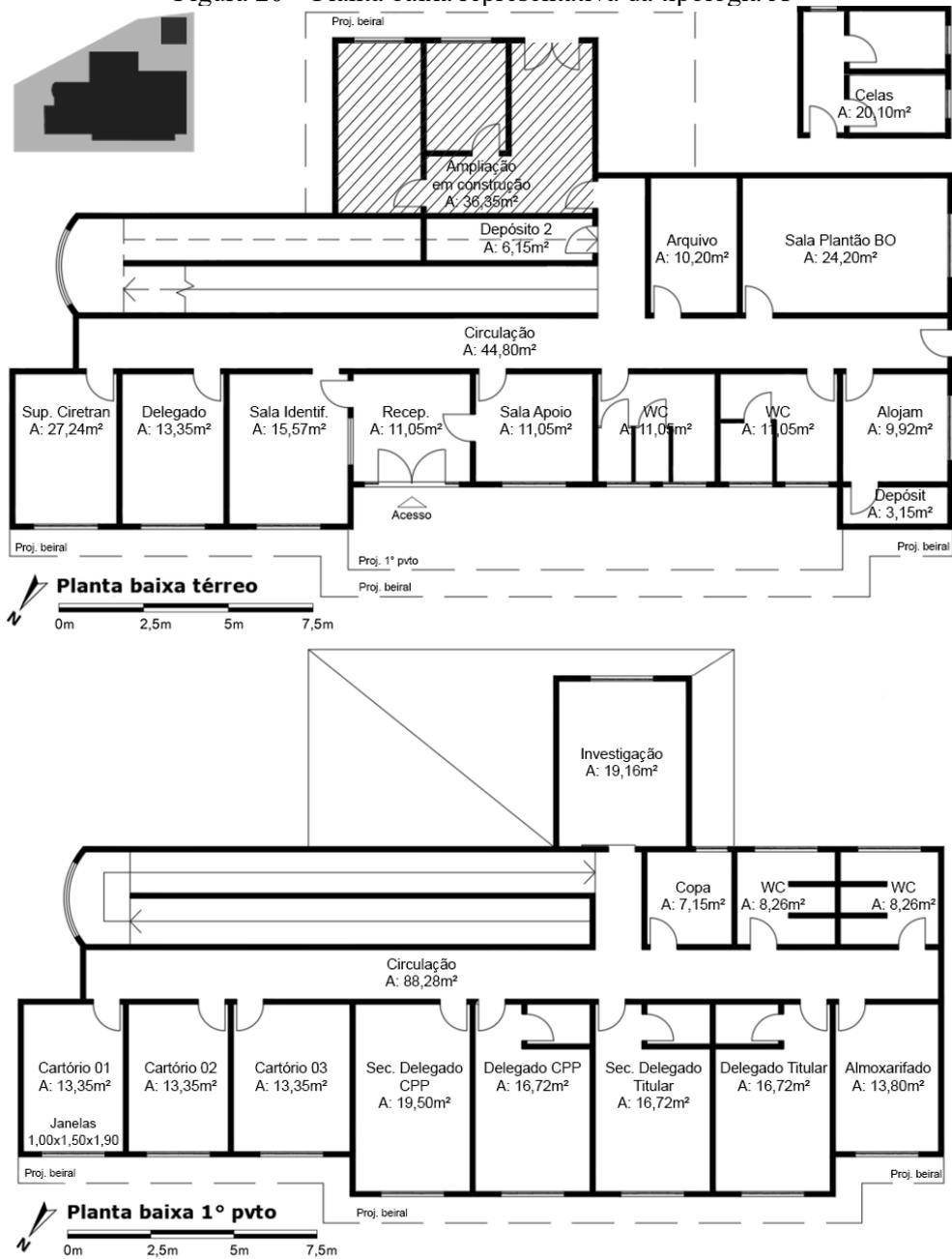
A respeito da envoltória, na cobertura foi relatado nos questionários a existência de laje de concreto e também identificado nos arquivos DWG disponibilizados pela Gerência de Edificações. Sobre as telhas, 50% dos respondentes apontaram a existência de telhas cerâmicas e 50% telhas de fibrocimento na cor natural da telha. Como a telha de fibrocimento apresenta um desempenho térmico pior comparado à telha cerâmica, além de que a edificação visitada possui telha de fibrocimento e as otimizações sugeridas nesta pesquisa buscam apontar os benefícios de melhorar a eficiência energética das edificações da PCSC servindo também para aquelas de melhor desempenho, esta foi escolhida para compor o arquétipo. Os valores de absorvância das paredes adotados para as cores disponíveis no questionário foram obtidos de Dornelles (2021) e resultaram na média de 0,53 para o arquétipo.

Uma característica que chamou atenção é a cor da pintura externa das paredes. Foram disponibilizadas 10 opções de cores para preenchimento no questionário. Cada cor foi então cruzada com os dados disponíveis no Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros (INMETRO, 2013) sobre revestimentos de paredes e foi adotado o seu respectivo valor de absorvância. Quando foi marcada mais de uma cor no questionário, foi adotado o valor médio da absorvância das respectivas cores. É comum que a comunicação visual da Polícia Civil seja nas cores preto e branco. A predominância respondida nos questionários foi da cor branca, com algumas edificações onde a parte inferior da parede é pintada de preto. Entretanto, chamou atenção que cinco edificações, cerca de 8% das edificações que responderam ao questionário, responderam que têm pintura externa na cor totalmente preta. É o caso de Delegacias nas cidades de Orleans, Correia Pinto, Anita Garibaldi, Santa Cecília e Itapiranga. Segundo apontam diversos estudos sobre o uso de cores como estratégia no projeto de edificações, a cor escura aumenta a carga térmica e uso de ar condicionado para refrigeração no verão, mas contribui no inverno já que todas as delegacias supracitadas se encontram nas zonas bioclimáticas 1 ou 2. Segundo as respostas do questionário, os vidros das aberturas são claros com 6 milímetros de espessura, que também foi identificado nos arquivos DWG recebidos.

4.1.3 Visita a uma edificação

A visita aconteceu na unidade da tipologia A, situada na Rua Fúlvio Vieira da Rosa, na cidade de São José, SC, que compreende a 2º Delegacia de Polícia de São José e também a Central de Plantão Policial. A Figura 20 apresenta o mapa de cheios e vazios no terreno, a planta baixa do pavimento térreo e primeiro pavimento da edificação.

Figura 20 – Planta baixa representativa da tipologia A

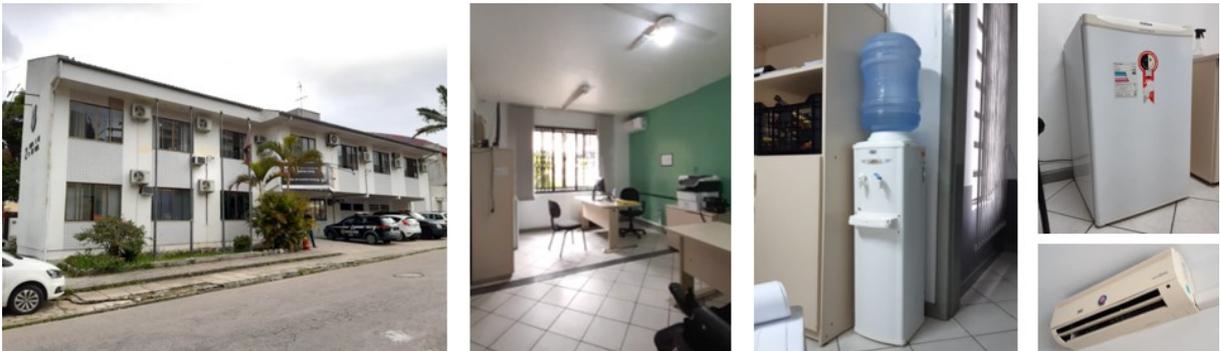


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Segundo levantamento arquitetônico desenvolvido pelo pesquisador, os pavimentos térreo e primeiro pavimento possuem 246,45 m² e 290,29 m² respectivamente.

A visita na edificação foi útil para levantar informações detalhadas para a construção do modelo do arquétipo para simulação, como os equipamentos existentes, o padrão de ocupação dos ambientes e o conhecimento sobre o comportamento cotidiano de uma Delegacia de Polícia com os usuários. A Figura 21 mostra fotos internas da edificação.

Figura 21 – Imagens do levantamento na 2ª Delegacia de São José

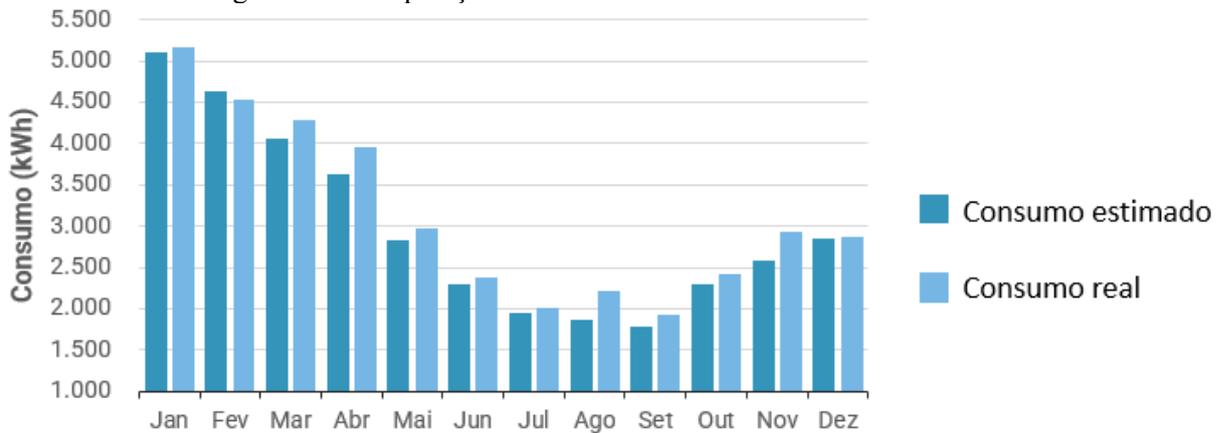


Fonte: Imagens capturadas pelo autor (2021)

De forma a facilitar o posterior cruzamento de dados, todas as informações levantadas pelo pesquisador compõem o questionário da unidade. Através de uma matriz de ocupação da edificação e outra de operação dos equipamentos, foram definidos valores percentuais para cada mês do ano e horas de operação diária para realizar aproximações dos usos finais. Conforme relatado pela Delegada que acompanhou o pesquisador, a edificação possui o mesmo padrão de uso e ocupação informado nos questionários recebidos das demais edificações sendo 20 pessoas das 12 horas às 19 horas mais as três pessoas em turno de plantão totalizando 23 pessoas. Nos finais de semana, o plantão funciona 24 horas. Também foi relatado que não é utilizado ventilador durante o ano todo ou, no inverno, ar condicionado para aquecimento.

Uma vez que esta foi a edificação que dispôs de mais informações, foi efetuada uma tabulação dos dados. A comparação entre o consumo estimado da edificação a partir do diagnóstico desenvolvido pelo pesquisador (35.872 kWh/ano e 66,83 kWh/m².ano) e o consumo real da edificação segundo informações presentes na planilha de consumo de energia elétrica da Polícia Civil (37.682 kWh/ano e 70,21 kWh/m².ano), pode ser verificada na Figura 22.

Figura 22 - Comparação do consumo real com o consumo estimado.



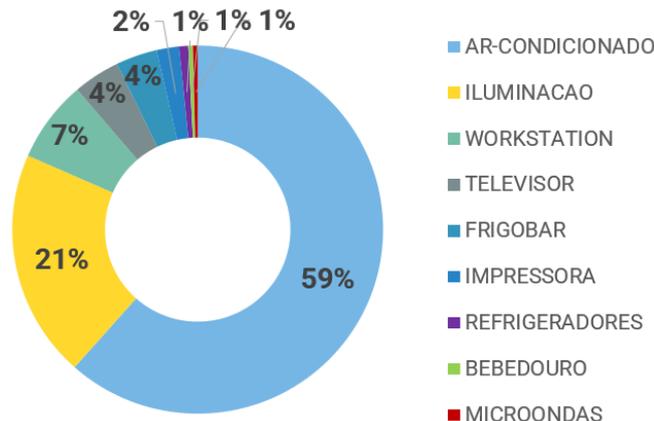
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Como os valores são bastante próximos, é possível concluir que as informações levantadas servem como base para estimar o uso e ocupação das edificações da Polícia Civil.

Ao longo da visita, também foi possível verificar que a edificação não possui divisão dos circuitos mais próximos das janelas. Notou-se a instalação de equipamentos de ar-condicionado antigos e, segundo relatado pelos usuários, com mais de cinco anos e não se tem informações a respeito de manutenção ou limpeza. Também chamou atenção que cada sala de delegado, cartório e secretaria possuía um frigobar modelo Consul Compacto 120 litros com etiqueta de consumo informando 19 kWh/mês para uso particular da equipe de cada sala. Em cinco salas foi verificada a existência de bebedouro elétrico Esmaltec, sendo três do modelo coluna com consumo 6,30 kWh/mês e dois de modelo compacto 97 Watts e 28 kWh/mês, o que contribui para uma maior porcentagem de usos finais para o consumo de equipamentos da edificação.

Através da tabulação do consumo energético estimado, também pode ser verificado o resumo dos usos finais na Figura 23, tendo o ar condicionado e a iluminação a maior participação no consumo, conforme esperado para o padrão de consumo de edificações de escritório.

Figura 23 - Resumo dos usos finais para o consumo energético estimado



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

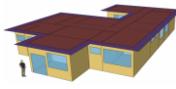
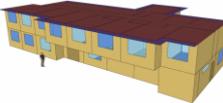
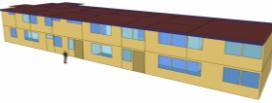
4.1.4 Desenvolvimento do arquétipo

A partir das informações recebidas da planilha de consumo da Polícia Civil, os dados reunidos nos questionários aplicados em 62 edificações, as informações levantadas na visita à 2ª Delegacia de São José, os arquivos DWG recebidos da Gerência de Edificações e as consultas ao *Google Earth*, buscou-se cruzar os dados para desenvolver um arquétipo das edificações da Polícia Civil de Santa Catarina. Se por um lado, devido a impossibilidade de visitar todas as edificações somado a dificuldade em conseguir todas as plantas baixas, não foi possível fazer o diagnóstico presencial, por outro lado, a tabela de levantamento pelo *Google Earth* e o questionário desenvolvidos para levantamento *in loco* pelos usuários possibilitou reunir e cruzar várias informações das edificações.

Através dos dados do questionário, o valor médio da absorvância das paredes foi de 0,53 e para as coberturas 0,8 considerando telha de fibrocimento. O pé direito foi definido em 3 metros de altura. Como cada cela possui 6,3m², então foi definida uma abertura de 1,10 x 1,10 m e 1,21 m² em cada cela. Este valor está de acordo com a área de abertura das celas das plantas-baixas recebidas.

A partir da análise das quatro plantas baixas que foram disponibilizadas pela gerência de edificações da Polícia Civil, a Tabela 12 mostra a porcentagem que cada ambiente ocupa a partir da modelagem 3D das mesmas. Com isso, o cruzamento do valor mediano de cada ambiente foi utilizado para formar a área dos ambientes para o arquétipo.

Tabela 12 – Lista de ambientes e resultado percentual de área das edificações.

Modelo					Med. %.m ²
Cidade	S. José do Cedro	São José	Joaçaba	São Miguel do Oeste	-
Tipologia	B3	A	A	C	-
Qtdd	9 unid.	2 unid.	2 unid.	3 unid.	-
Área	214,93 m ²	528,29 m ²	773,25 m ²	807,66 m ²	100
Área fachada	256,09 m ²	449,90 m ²	658,78 m ²	622,16 m ²	-
PAF	20,2	13,9	23,1	20,0	20
Copa	4,22	1,58	3,23	4,51	3,47
Circ.	13,52	34,81	22,42	27,50	18,45
Recep.	6,98	2,33	2,84	8,95	3,46
Identific.	8,16	3,34	1,01	5,46	6,24
Investig.	9,33	4,02	2,48	2,10	7,02
PlantBO	8,07	7,48	3,06	3,58	7,20
Cela	9,71	5,86	2,03	0,00	6,20
WC	9,46	11,00	8,39	4,65	9,12
Delegado	6,42	2,83	3,94	2,51	6,10
SecDeleg.	0,93	2,82	0,00	7,43	6,04
Cartório	6,83	8,93	14,25	7,26	6,08
ArqInfor	3,39	2,19	7,83	6,32	6,90
Ciretran	7,51	2,89	25,33	13,41	8,56
Alojam.	4,09	2,25	1,41	0,26	2,19
Almoxarif.	6,07	2,92	1,74	6,07	3,11

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

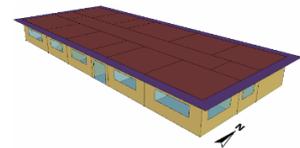
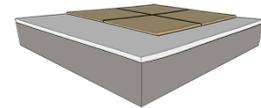
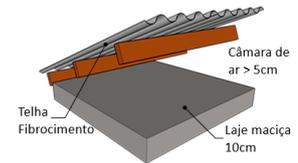
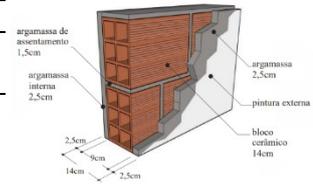
A modelagem e análise 3D dos percentuais de abertura de fachada das plantas baixas recebidas resultou em um PAFT médio de 20% para o arquétipo. De acordo com as respostas dos questionários, considerou-se COP de 2,8 em função dos equipamentos antigos para o ar condicionado e uso apenas no verão para refrigeração. No modelo de simulação, considerou-se a ventilação natural e o ar condicionado quando a temperatura operativa excede o limite de conforto pelo método de conforto adaptativo da ASHRAE Standard 55 (2017) para o clima de Florianópolis. Para os resultados de densidade de potência de iluminação e equipamentos, o cruzamento dos dados levantados na edificação visitada e os dados preenchidos pelos usuários das edificações no questionário indicaram 8,12 W/m² para iluminação e 14,98 W/m² para equipamentos. Ressalta-se que o valor da densidade de potência de equipamentos ficou extremamente próximo aos 15 W/m² que a INI-C define para adotar em edificações comerciais.

Portanto, conforme os trabalhos de Ballarini; Corgnati; Corrado (2014) e Corgnati *et al.* (2013) citados na bibliografia deste trabalho, a busca de um edifício exemplo a partir de uma análise profunda dos dados recebidos, informações levantadas no *Google Earth* e *Google Street View*, aplicação de questionários para os usuários da edificação, o esclarecimento de dúvidas

com os usuários das edificações e a condução de uma visita a uma edificação, acredita-se que as características geométricas e físicas definidas ao longo do processo representam um edifício típico da Polícia Civil de Santa Catarina, bem como seus dados de uso e operação. A Tabela 13 mostra as características finais adotadas no arquétipo.

Tabela 13 - Fonte e cruzamento final das características para construção do arquétipo

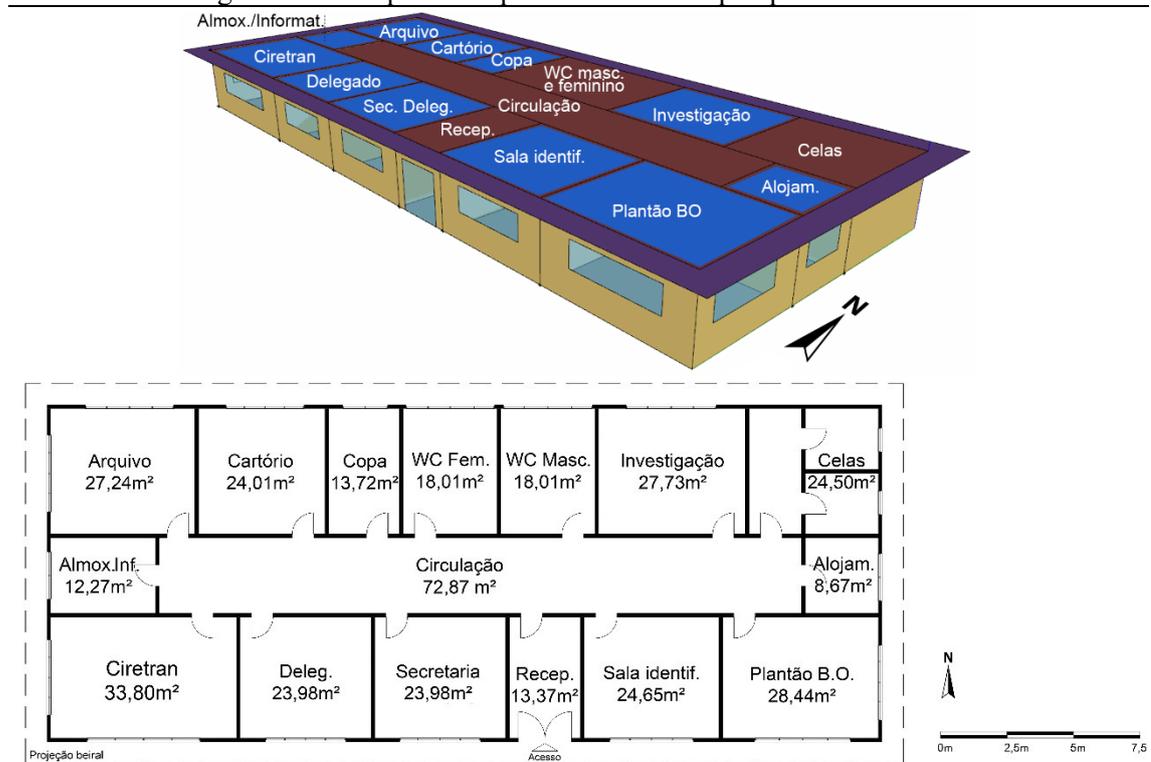
Característica	Fonte dos dados	Valor adotado (unidade)	Resultado final
Consumo de energia elétrica	Tabela PCSC	Resultado da simulação computacional	
Áreas	Google Earth	395,25 m ²	
Perímetro	Google Earth	87,02 m	
Parede: Tipo	Arquivos DWG	15 cm	
Parede: Transmitância e capacidade térmica	Arquivos DWG e Inmetro (2013)	U= 2.39 W/m ² K CT 152 KJ/m ² K	
Parede: Absortância a Radiação Solar (ARS)	Google Eath, questionário e Dornelles (2021)	$\alpha = 0,53$	
Cobertura: Tipo	Questionário	Telha fibrocimento com laje de concreto	
Cobertura: Transmitância e capacidade térmica	Questionário e Inmetro (2013)	U= 2,06 W/m ² K CT 233 KJ/m ² K	
Cobertura: Absortância a Radiação Solar (ARS)	Google Eath, questionário Dornelles (2021)	Cor natural de telha fibrocimento $\alpha = 0,8$	
Piso	Arquivos DWG	Piso cerâmico, Contrapiso (2cm) e laje maciça (10 cm) U= 3,40 W/m ² K CT 293,8 KJ/m ² K	
Vidro	Questionário	Simplex incolor 6 mm	
Percentual abertura das fachadas	Arquivos DWG	20 %	
Fator solar	Inmetro (2013)	0,82	
Densidade de potência de iluminação	Questionário e visita presencial	8,12 W/m ²	
Densidade de potência de equipamentos	Tabela A.1 INI-C	15,00 W/m ²	
Classificação de eficiência dos aparelhos de ar condicionado	Questionário e visita presencial	2,8	
Horário de funcionamento	Questionários	Seg - sex	12h – 19h
		Sáb - dom	Plantão 24h
Padrão de uso da edificação	Questionários	Seg - sex	12 pessoas 100 % ocup.
		Demais horários e finais de semana	1 pessoa 10% ocup.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A Figura 24 apresenta a perspectiva e a planta baixa com as áreas adotadas para cada ambiente no arquétipo desenvolvido. O arquétipo é composto por ambientes de apoio à atividade de segurança pública como sala de identificação, do delegado(a) e seus secretários, plantão para boletim de ocorrências, investigação, celas, cartório, arquivo e almoxarifado/informática. Ambientes de apoio como recepção, circulação, alojamento, copa e banheiros. Também a sala do Ciretran, que é responsável pela circunscrição de trânsito no âmbito da respectiva jurisdição. Em azul estão os 261,87 m² dos ambientes condicionados.

Figura 24 – Perspectiva e planta baixa do arquétipo desenvolvido

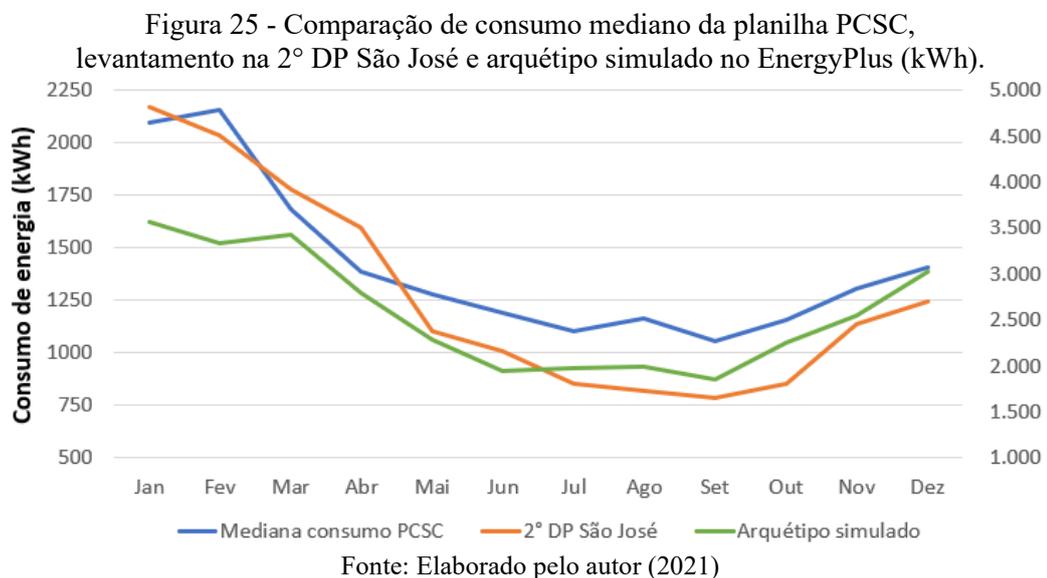


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para calibração, o arquétipo foi simulado no *Software EnergyPlus v9.4.0* e encontrou-se o resultado de 24.639,44 kWh/ano de consumo total de energia. Este valor dividido pela área da edificação resulta em 62,34 kWh/m².ano, que está de acordo com os valores de consumo por metro quadrado encontrados na tabela de consumo das edificações da Polícia Civil do Estado de Santa Catarina para a tipologia B. Isso pode ser explicado pela similaridade volumétrica e quantia de edificações desta tipologia na amostra trabalhada.

De forma a efetuar uma análise crítica do desempenho energético do arquétipo desenvolvido, a Figura 25 apresenta uma comparação das curvas de consumo das bases utilizadas e do arquétipo simulado no *Software EnergyPlus*. No eixo primário é possível

verificar a curva de consumo mediano constante na planilha da PCSC para as 62 edificações que responderam ao questionário. No eixo secundário, verifica-se o consumo estimado pelo pesquisador no levantamento energético efetuado na 2° DP São José além do consumo do arquétipo desenvolvido na simulação no *EnergyPlus* com o arquivo climático de Florianópolis. Os meses de janeiro e fevereiro apresentam as maiores diferenças de 15,3% e 16,8% respectivamente. A diferença nos demais meses é, em média, de 1,7%. Ainda que exista a pequena diferença nos meses de janeiro e fevereiro, é possível notar que existe uma forte relação entre as curvas anuais de consumo, de forma que o arquétipo desenvolvido apresente similaridade anual com os dados de consumo reais para ser utilizado nesta pesquisa.



Ainda que as bases abrangam um conjunto de tipologias e informações, buscou-se representar as tipologias seguindo as diretrizes dos estudos presentes na bibliografia consultada. Apesar dos desafios impostos durante o levantamento de dados, as análises medianas juntamente com o cruzamento dos dados para formação do arquétipo e a busca de informações de diversas bases possibilitaram atingir um resultado coerente. Assim, acredita-se que o método e o arquétipo desenvolvidos representem um edifício arquétipo da Polícia Civil de Santa Catarina de forma a utilizar nas próximas etapas desta pesquisa.

O próximo passo foi efetuar a classificação da eficiência energética do arquétipo desenvolvido. Os parâmetros utilizados para a edificação real (arquétipo) e edificação na condição de referência foram definidos conforme a tabela A.1 da INI-C. As edificações real e referência foram simuladas com a mesma geometria, orientação norte na maior fachada,

ocupação, densidade de equipamento e horários, conforme a Tabela 14. O valor de 15,82 W/m² da densidade de potência de iluminação da condição de referência foi resultante do cálculo pelo método das atividades do edifício. Na mesma tabela, os valores da coluna referente à condição real foram adaptados conforme os valores do arquétipo desenvolvido nesta pesquisa.

Tabela 14 - Valores de referência para edificações de escritório

Uso típico	Edificações de escritórios	
	Condição real	Condição de referência
Geometria		
Área (m ²)	395,25	
Orientação solar	0°	
Pé-direito (piso a teto) (m)	3,00	
Aberturas		
PAF - Percentual de área de abertura da fachada (%)	20 (0,20)	50 (0,50)
Componentes construtivos		
Parede	Argamassa int. (2,5 cm) bloco cerâm. furado (9x14x24) argamassa ext. (2,5 cm)	Argamassa int. (2,5 cm) bloco cerâm. furado (9x14x24) argamassa ext. (2,5 cm)
U _{par} - Transmitância da parede externa (W/(m ² .K))	2,39	2,39
α _{PAR} - Absortância da parede (adimensional)	0,53	0,50
CT _{par} - Capacidade térmica da parede externa (kJ/(m ² .K))	150	150
Cobertura	Telha de fibrocimento Câmara de ar (>5cm) Laje maciça concreto 10cm	Telha de fibrocimento, câmara de ar (>5 cm) e laje maciça de concreto (10 cm)
U _{cob} - Transmitância da cobertura (W/(m ² .K))	2,06	2,06
α _{COB} - Absortância da cobertura (adimensional)	0,8	0,8
CT _{cob} - Capacidade térmica da cobertura (kJ/(m ² .K))	233	233
Vidro	Vidro simples incolor 6 mm	Vidro simples incolor 6mm
FS - Fator solar do vidro (adimensional)	0,82	0,82
U _{vid} - Transmitância do vidro (W/(m ² .K))	5,7	5,7
AHS - Ângulo horizontal de sombreamento (°)	Simulação comput.	0
AVS - Ângulo vertical de sombreamento (°)	Simulação comput.	0
AOV - Ângulo de obstrução vizinha (°)*	0 - Não foi considerado a obstrução vizinha.	
Iluminação e ganhos		
DPI - Densidade de potência de iluminação (W/m ²)	8,12	15,82
Ocupação (m ² /pessoa)	10,0	
DPE - Densidade de potência de equipamentos (W/m ²) – escritório	15,0	
Horas de ocupação (horas)	10	
Dias de ocupação (N _{ano}) - escritório	260	
Situação do piso	Contato com o solo	
Situação da cobertura	Exposta	
Isolamento do piso	Com isolamento	Sem isolamento
Condicionamento de ar (refrigeração)		
COP - Coeficiente de performance (W/W)	2,80	2,60
Temperatura <i>setpoint</i> (°C)	AC: Carga térmica VN: Método adaptativo ASHRAE 55 (2017) para Florianópolis SC	24°
Aquecimento de água	Não será avaliado	

Fonte: Adaptado de Inmetro (2021)

4.2 CLASSIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA EDIFICAÇÃO

Para uma edificação ser NZEB, ela precisa primeiramente obter a classificação “A” de eficiência energética. A classe de eficiência energética do arquétipo foi avaliada segundo o método de simulação da Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C) na sua versão publicada através da Portaria N°42, de 24 de fevereiro de 2021.

4.2.1 Determinação da classificação da eficiência energética da envoltória

Com perímetro de 87,82 metros, pé direito de 3,00 metros e área da cobertura de 395,25 metros, o volume resulta em 1.185,75 metros cúbicos e o fator de forma resulta em 0,56. Através da tabela 8.11 da INI-C, para o grupo climático 1-B correspondente para a cidade de Florianópolis, o coeficiente de redução da carga térmica anual da classificação D para A ($CRCgTT_{D-A}$) resulta em 0,27.

Na avaliação da envoltória, foi encontrado o valor de 19.237,30 kWh/ano como somatório da carga térmica. Entretanto, calcula-se a carga térmica da edificação para as horas de conforto não atendidas pela ventilação natural, que resultaram em 19,59%. Isso representa 7.971,18 kWh/ano de refrigeração anual da edificação real ($CgTR_{real}$) e assim adotado como carga térmica total anual da edificação real ($CgTT_{real}$). A carga térmica de refrigeração anual de referência ($CgTR_{ref}$) resultou em 20.898,88 kWh/ano e adotado como carga térmica total anual de referência ($CgTT_{ref}$). Obteve-se então um coeficiente “i” de 1.880,90. Com este coeficiente foi elaborada a Tabela 15 com os limites dos intervalos das classificações de eficiência da envoltória.

Tabela 15 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética da envoltória

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 15.256,19	> 17.137,08	> 19.017,98	> 20.898,88
Limite inferior	≤ 15.256,19	≤ 17.137,08	≤ 19.017,98	≤ 20.898,88	-

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

Com o valor de $C_{gTT_{real}} = 7.971,18$ kWh/ano da edificação real, representa 61,86% de redução de consumo de carga térmica da envoltória. Dessa forma, foi identificada a classificação A de eficiência energética da envoltória da edificação real. Isso chama atenção, pois a edificação real possui muitas características parecidas com a edificação de referência. Entretanto, este resultado tão abaixo do nível mínimo para a classificação A se dá em função da consideração da ventilação natural no processo de simulação termoenergética. Se não fosse considerada a ventilação natural, o resultado de 19.237,30 kWh/ano da carga térmica sem ventilação natural resultaria em classificação D de eficiência energética.

Com a consideração da estratégia de ventilação natural, a edificação real resulta em 80,59% de horas ocupadas em conforto térmico e somente 19,41% das horas ocupadas não estão em conforto térmico, o que representa então a carga térmica para a envoltória de 7.971,18 kWh/ano de necessidade de refrigeração.

4.2.2 Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de condicionamento de ar

Os dados medianos do sistema de condicionamento de ar presentes nos questionários recebidos apontaram aparelhos de ar condicionado split de velocidade fixa com um valor mediano de COP 2,8 W/W, que resulta em um coeficiente de eficiência energética de 2,974 para a edificação real. Este valor representa um equipamento pouco eficiente, muito próximo do CEE_R de 2,6 considerado para a edificação de referência. Foi adotado que o sistema atende aos requisitos de qualidade de ar interior de conforto térmico da NBR16401. Com base nisso, o cálculo do percentual de redução de consumo para refrigeração da edificação real ($RedC_R$) é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 - Cálculo do percentual de redução de consumo para refrigeração

Edificação	C_{gTT} (kWh/ano)	COP	CEE_R	C_R (kWh/ano)	$RedC_R$ (%)
Referência	20.898,88	2,6	2,6	8.038,03	
Real	7.971,18	2,8	2,974	2.680,65	66,65

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Novamente considerando a carga térmica total de 7.971,18 kWh/ano para a edificação real a partir do uso da ventilação natural, obtém um resultado de $RedC_R = 66,65\%$ e uma

classificação do sistema de condicionamento de ar da edificação real resultou em classificação A, de acordo com os limites dos intervalos para o grupo climático 1b respectivo a Florianópolis.

Da mesma forma que a envoltória, aqui cabe uma discussão a respeito deste resultado, uma vez que a edificação real tenha um COP de 2,8 ou CEE_R de 2,974. Este é um valor bastante baixo e próximo do encontrado para edificação de referência classe D.

Com a classificação A de eficiência energética para a envoltória e o condicionamento de ar no processo de simulação, verifica-se então que a edificação real é bastante beneficiada pela avaliação considerando a ventilação natural como uma estratégia de economia de energia para ambos sistemas. Como o clima de Florianópolis é subtropical úmido e possui temperaturas mais amenas, a temperatura externa é menor do que a temperatura operativa interna dos ambientes em grande parte do ano. É possível fazer duas inferências: primeiro, que a ventilação natural é uma estratégia que influencia positivamente na diminuição da carga térmica da envoltória de edificações e consumo de ar condicionado para refrigeração. Segundo que o método de considerar a ventilação natural apenas na edificação real faz com que o consumo de energia para refrigeração seja menor em climas mais amenos como Florianópolis. Isso pode favorecer consideravelmente as edificações reais, que poderão receber classificações mais eficientes do que efetivamente deveriam, uma vez que unicamente tenham o seu consumo de energia diminuído por considerar a ventilação natural no processo de simulação quando comparadas às edificações reais, que não devem considerar a ventilação natural.

4.2.3 Determinação da classificação da eficiência energética do sistema de iluminação

Através do método das atividades do edifício, a Tabela 17 apresenta os valores de potência de iluminação limite para a classificação A (PI_{LA}) e para a condição de referência para a classificação D (PI_{LD}). A potência de iluminação total da edificação real (PI_T) foi encontrada para o arquétipo a partir das informações presentes nos questionários respondidos.

Tabela 17 – Cálculo das Potências de Iluminação pelo método das atividades do edifício e do Consumo de iluminação anual.

Ambiente	Área (m ²)	Método das atividades do edifício		$PI_{L,refA}$ (W)	$PI_{L,refD}$ (W)	DPI_{real} (W/m ²)	PI_{Treal} (W)
		$DPI_{atividade}$ (W/m ²)					
		A	D				
Arquivo	27,24	6	12,48	163,44	339,96	7,61	207,30
Cartório	24,01	10	19,04	240,10	457,15	8,24	197,84
Copa	13,72	6,8	18,40	93,30	252,45	8,79	120,60
WC	36,02	9,15	13,73	329,58	494,55	5,71	205,67

Investig	27,73	10	19,04	277,30	527,98	10,46	290,06
Celas	24,5	11,5	13,59	281,75	332,96	3,29	80,61
Alojam	8,67	6,65	10,47	57,66	90,77	5,46	47,34
PlantãoBO	28,44	10	19,04	284,40	541,50	8,03	228,37
Identific.	24,65	10	19,04	246,50	469,34	8,09	199,42
Recepção	13,37	7,55	9,6	100,94	128,35	15,75	210,58
Delegado(a)	23,98	10	19,04	239,80	456,58	8,34	199,99
Sec. Deleg.	23,98	10	19,04	239,80	456,58	8,98	215,34
Ciretran	33,80	10	19,04	338,00	643,55	8,88	300,14
Almoxarif.	12,27	10	19,04	122,70	233,62	6,64	81,47
Circulação	72,87	7,1	11,36	517,38	827,80	8,55	623,04
Total	395,25	-	-	3.532,65	6.253,14	-	3.207,77

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Avaliando a coluna DPI_{real} na Tabela 17, alguns resultados chamam atenção. No ambiente de recepção, foi observada uma grande quantidade de lâmpadas, o que explica o valor de DPI bastante alto. No ambiente de investigação isso também foi identificado, porém é aceitável por se tratar de um ambiente com atividade de maior exigência. Os ambientes carcerários foram relatados nos questionários e verificados na visita da edificação como possuindo apenas uma lâmpada em cada cela. Os demais ambientes apresentam DPI bastante parecida, resultando em um valor coerente entre os valores observados e uma DPI média de $8,12 \text{ W/m}^2$.

Para a potência de iluminação limite da classificação A e D, obteve-se $PI_{LA} = 3.532,65 \text{ W}$ e $PI_{LD} = 6.253,14 \text{ W}$ respectivamente. O cálculo da escala relativa à classificação de eficiência energética do sistema de iluminação “i”, calculado a partir da diferença entre a PI_{LD} e PI_{LA} e divisão entre três classes, resultou em 906,83 e a elaboração da Tabela 18 conforme o anexo B.III, subitem B.III.3.

Tabela 18 - Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética para o sistema de iluminação

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 3.532,65	> 4.439,48	> 5.346,31	> 6.253,14
Limite inferior	≤ 3.532,65	≤ 4.439,48	≤ 5.346,31	≤ 6.253,14	-

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

A partir do resultado da potência de iluminação da edificação real ($PI_{Treal} = 3.207,77 \text{ W}$) executa-se a comparação por meio dos limites da Tabela 18. Encontra-se 48,70% de diminuição no consumo de iluminação comparado a classificação D ($PI_{Tref} = 6.253,14 \text{ W}$) e verifica-se então que o sistema de iluminação do arquétipo desenvolvido obtém a classificação A de eficiência energética. Avaliando cada ambiente, percebe-se que a DPI_{real} está abaixo ou

próximo da classificação nível A do respectivo ambiente, resultando em uma DPI média de $8,12 \text{ W/m}^2$ encontrada a partir dos dados dos questionários. Isso indica que o sistema de iluminação do arquétipo desenvolvido é eficiente, entretanto a potência de iluminação de alguns ambientes pode estar subdimensionada necessitando uma avaliação mais aprofundada no local.

Embora o sistema de iluminação tenha atingido classificação A de eficiência energética, verificou-se a existência de algumas lâmpadas incandescentes, tanto na edificação visitada, como nos questionários das unidades, onde a predominância foi de lâmpadas fluorescentes para o arquétipo. Isso mostra que é possível otimizar a eficiência energética do sistema de iluminação com lâmpadas LED, conforme será desenvolvido na próxima etapa da pesquisa e atingir uma eficiência energética ainda maior do sistema de iluminação.

Ressalva-se que o resultado do consumo de iluminação na simulação do *EnergyPlus* forneceu $C_{IL,real} = 8.137,90 \text{ kWh}$ para a edificação real e $C_{IL,ref} = 15.863,92 \text{ kWh}$ para a edificação na condição de referência. Ao transformar para potência instalada e dividir por 260 dias de ocupação com 10 horas de uso, resulta em $P_{IL,real} = 3.129,96$ e em $P_{IL,ref} = 6.101,51$ respectivamente. Este resultado apresenta uma variação de 2,425% para ambas potências de iluminação comparado ao cálculo pelo método das atividades do edifício efetuado na Tabela 18. A redução do consumo de iluminação e a diferença da potência instalada resultou superior a três vezes a potência instalado na edificação referência inclusive atingindo os mesmos 48,70%, confirmando assim o nível A. Isso indica proporcionalidade e fidelidade no valor encontrado no *EnergyPlus*.

Com isso, para o sistema de iluminação, será utilizado os valores de $C_{IL,real} = 8.137,90 \text{ kWh}$ para a edificação real e $C_{IL,ref} = 15.863,92 \text{ kWh}$ para a edificação na condição de referência provenientes do resultado da simulação do *EnergyPlus* na classificação geral da edificação. Tomou-se esta decisão, uma vez que a busca sequencial dos dez conjuntos de retrofit também foram simulados no *EnergyPlus* e assim se garante a mesma metodologia entre todas avaliações e simulações de eficiência energética.

4.2.4 Classificação da eficiência energética geral da edificação

A partir da consideração da densidade de potência de equipamentos de 15 W/m^2 para a edificação real e de referência, o valor resultante total foi de $15.040,87 \text{ kWh/ano}$ para o sistema de equipamentos de ambas. Conforme os resultados do consumo de cada sistema nos tópicos anteriores, o consumo total de energia elétrica da edificação de referência resultou em

$C_{EE,ref} = 38.942,82$ kWh/ano e a edificação real $C_{EE,real} = 25.859,42$ kWh/ano. Isso representa um consumo de energia primária em quilowatt-hora/ano da edificação de referência de $C_{EP,ref} = 62.308,52$ kWh/ano e $C_{EP,real} = 41.375,08$ kWh/ano para a edificação de real.

Com o fator de forma 0,56 e o grupo climático 1-B, foi identificado na tabela 8.2 da INI-C o coeficiente de redução do consumo de energia primária da classificação D para A ($CRCEP_{D-A}$) corresponde a 0,36 e o coeficiente “i” que representa os intervalos entre as classes resultou em 7.477,02. Assim foi possível montar a tabela com os limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral da edificação conforme a Tabela 19.

Tabela 19 – Limites dos intervalos das classificações de eficiência energética geral

Classificação de eficiência	A	B	C	D	E
Limite superior	-	> 39.877,45	> 47.354,48	> 54.831,50	> 62.308,52
Limite inferior	≤ 39.877,45	≤ 47.354,48	≤ 54.831,50	≤ 62.308,52	-

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 20, uma vez que o consumo de energia primária resultou em 41.375,08 kWh/ano atingindo 33,60% de economia de energia em relação à edificação na condição de referência, a edificação real (arquétipo) obteve classificação B de eficiência energética.

Tabela 20 - Desempenho energético de acordo com a INI-C

Cidade	Fator de Forma	Grupo climático	Área condicionada (m ²)	Consumo anual de energia primária (kWh)		Economia de energia primária (%)	Classe de eficiência energética
				Referência	Real		
Florianópolis	0,56	1-B	261,87	62.308,52	41.375,08	33,60	B

Fonte: Adaptado de INI-C (2021)

É interessante notar que a edificação recebe classificação B, embora seus sistemas de envoltória, ar condicionado e iluminação sejam classificados como A. Ao somar todos os consumos dos sistemas e transformar para energia primária, foi verificado que o consumo de equipamentos impacta diretamente neste resultado, uma vez que deve ser considerado 15 W/m² para a densidade de potência de equipamentos para a edificação real e de referência. Como o consumo de equipamentos representa 58,16% do consumo de energia primária da edificação

real, isso representa a maior fatia no consumo da edificação e faz com que a classificação ultrapasse o limite de classificação B de eficiência energética.

Ainda que a consideração de 15 W/m² para equipamentos seja mandatório para a avaliação pela INI-C, o valor encontrado nas respostas dos questionários apontou uma densidade de equipamentos de 14,98 W/m² para o arquétipo. Isso reforça a necessidade da instalação e uso de equipamentos mais eficientes que contribuam na economia de energia.

A partir da avaliação pelos critérios e métodos da INI-C, o arquétipo desenvolvido na primeira etapa desta pesquisa para representar um conjunto de edificações de segurança pública do Estado de Santa Catarina não atingiu o nível mais alto da classificação de eficiência energética brasileira. Como a classificação final A é obrigatória para obtenção da edificação de energia quase zero (NZEB), segundo a INI-C, faz-se ainda mais necessário um processo de otimização com medidas de eficiência energética para melhorar seu desempenho energético, conforme está apresentado a seguir.

4.3 OTIMIZAÇÃO PARA O OBJETIVO NZEB

Na etapa de otimização para o objetivo NZEB, foram aplicadas separadamente as quatro medidas de eficiência energética formando os quatro conjuntos de retrofit iniciais. Isso aumentou a classificação de eficiência energética segundo a INI-C, então uma nova avaliação foi efetuada para confirmar a classificação A, que é pré-requisito para a definição NZEB. Em seguida, adicionou-se os módulos fotovoltaicos para produção de energia renovável no local para suprir a demanda de energia nas situações limites de 50% até 99,9% em comparação com o seu consumo de energia. Por último, efetuou-se o cálculo do custo de ciclo de vida para 25 anos. Em cada etapa, este processo resultou na posição de cada conjunto de renovação no processo de busca sequencial.

4.3.1 Resultado da otimização com os custos e entradas do ciclo de vida

Entre as medidas passivas adotadas estão a mudança da absorvância da parede e cobertura da envoltória para uma cor mais clara e a troca do vidro das aberturas para um fator solar menor. O valor de absorvância adotado para uma repintura foi $\alpha = 0,35$, com valor total de custo inicial de investimento para a aplicação de tinta acrílica branca para a área das paredes e a cobertura totalizando R\$ 7.042,38, conforme a Tabela 23. Já o vidro comum existente foi

testado a modificação para o vidro Cebrace Cool-Lite KNT 140 com 6 milímetros de espessura e fator solar de 39%. As características do vidro foram obtidas no Manual Técnico do Vidro Plano para Edificações (WESTPHAL, 2016) e o valor do material e instalação de Alves (2017), através de uma cotação com fornecedores da CEBRACE. O valor total do material mais instalação para a área envidraçada de 44,88m² do arquétipo foi de R\$ 37.250,40 e está detalhado na Tabela 23.

Nas medidas ativas de eficiência energética, foi proposta a diminuição da densidade de potência de iluminação a partir da instalação de lâmpadas LED e a troca dos aparelhos de ar condicionado por equipamentos mais eficientes. O levantamento de dados apontou a existência de lâmpadas fluorescentes predominantemente de 25 Watts, que atendem 4 m² de área cada uma. Para a área de 395,25m² do arquétipo desenvolvido, são necessárias 98 lâmpadas. Baseado nas pesquisas da revisão bibliográfica e na tabela publicada pela ABILUMI, pode-se estimar que a densidade de potência de iluminação de uma edificação ao trocar lâmpadas fluorescentes por LED seja diminuída, de forma conservadora, em 40%. Assim, estimou-se que, a densidade de potência do arquétipo diminuiu de 8,12 W/m² para 4,87 W/m². O valor total do custo inicial de investimento encontrado para a substituição dessas 98 lâmpadas foi de R\$ 16.731,25, conforme a Tabela 23.

Já a substituição do equipamento de ar condicionado por modelos mais eficientes partiu da busca na lista fornecida pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem na Categoria Classe A de Ar Condicionado do INMETRO (“Tabelas de consumo/eficiência energética - Condicionadores de Ar – índices novos (IDRS). Nesta tabela, procurou-se um equipamento com alta eficiência energética, com funcionamento inverter e disponível no mercado brasileiro para cotação. Para atender a área dos ambientes do arquétipo desenvolvido, foi escolhido o equipamento Ar Condicionado Inverter Springer Midea HiWall All Easy 3.516W 7,5IDRS 12.000 BTUs Quente Frio 42AVQA12M5 - 220V com preço do equipamento segundo pesquisa em lojas especializadas mais instalação com fornecedores locais totalizando R\$ 2.479,61 por unidade.

Durante o processo de otimização, a simulação seguiu a ordem de aplicar estratégias passivas (mudança da absortância solar das superfícies externas e fator solar dos vidros), em seguida as estratégias ativas (Lâmpadas LED e IDRS). Entretanto, a ordem de classificação mudou durante o processo de classificação de eficiência energética, de modo que a estratégia ativa de lâmpadas LED apresentou a melhor classificação de eficiência energética pela INI-C, já que possuiu a maior redução de consumo de energia primária. Já na busca sequencial, a ordem

referente ao menor valor do custo do ciclo de vida de cada estratégia também mudou ficando a absorvância solar na primeira colocação. As mudanças de ordem podem ser verificadas na Tabela 21.

Tabela 21 – Ordem resultante da aplicação das MEE, eficiência energética e CCV.

Ordem	Aplicação das MEE	Classificação de eficiência energética INI-C		Busca sequencial através do Custo do Ciclo de Vida 25 anos	
1°	Absortância solar	↗	LED	↘	Absortância solar (CR01)
2°	Fator Solar dos vidros	↘	Absortância solar	↗	LED (CR02)
3°	LED	↖	IDRS	→	IDRS (CR03)
4°	IDRS	↖	Fator Solar dos vidros	→	Fator Solar dos vidros (CR04)

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Dessa forma, para fins de entendimento da nomenclatura adotada para os conjuntos de retrofit, estabeleceu-se a ordem referente a terceira coluna da Tabela 21, que é do menor valor do custo do ciclo de vida e que resulta no caminho de ótimo custo-benefício. Isso resultou na ordem CR01 (Absortância solar), CR02 (LED), CR03 (IDRS) e CR04 (Fator solar dos vidros ou FSvidros), CR05 (Absort+LED), CR06 (Absort+IDRS), CR07 (Absort+FSvidros), CR08 (Absort+LED+IDRS), CR09 (Absort+LED+FSvidros) e finalmente CR10 (Absort+LED+IDRS+FSvidros).

Diante disso, novamente foi realizada a classificação de eficiência energética para confirmar que cada edificação otimizada resulta em classe A para poder receber a geração de energia renovável (módulos fotovoltaicos) e então ser NZEB no final do processo. Após a aplicação dos conjuntos de retrofit iniciais, além de repetir a classificação do arquétipo e a sua condição de referência, a Tabela 22 apresenta a nova classificação energética das dez edificações otimizadas em cada etapa.

Tabela 22 – Classificação das edificações otimizadas segundo a INI-C.

	PHOCT (%)	CgTT	C _{EE}	C _{REFRIG.}	C _{LUM.}	C _{EQUIP.}	C _{EP total}	RedC _{EP} (%)	Classif. Eficiência energética
Referência	-	20.898,88	2,6	8.038,03	15.863,92		62.308,52	-	D
Arquétipo	80,59	7.971,18	2,973	2.680,65	8.137,90		41.375,08	33,60	B
CR1 Abs	92,87	2.518,24	2,973	846,86	8.137,90		38.441,02	38,31	A
CR2 LED	81,83	7.305,77	2,973	2.456,88	10.612,48		35.810,61	42,53	A
CR3 IDRS	80,59	7.971,18	7,483	1.065,70	10.612,48	15.040,87	38.791,15	37,74	A
CR4 FSvid	82,44	7.101,87	2,973	2.388,31	10.612,48		40.907,33	34,35	B
CR05 AL	93,83	2.133,45	2,973	717,46	4.883,88		33.027,55	46,99	A
CR06 AI	92,87	2.518,24	7,483	336,67	8.137,40		37.624,71	39,62	A

CR07 AF	94,16	2.055,97	2,973	691,41	4.883,88	38.192,29	38,70	A
CR08 ALI	93,83	2,133,45	7,483	285,23	4.883,88	32.335,97	48,10	A
CR09 ALF	95,08	1.705,93	2,973	573,69	4.883,88	32.797,51	47,36	A
CR10 ALIF	95,08	1,705,93	7,483	228,07	4.883,88	32.244,52	48,25	A

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Os conjuntos de retrofit que resultaram em classificação B de eficiência energética foram o arquétipo e a edificação com a aplicação do CR04 (FSvidros), que apresentou 0,75% de aumento no percentual de redução de consumo de energia primária. Ambos não estão aptos a serem NZEB ao receber a aplicação do sistema de energia renovável. Entretanto, foi calculada a quantidade de módulos fotovoltaicos para suprir o consumo de energia também do arquétipo e CR04 para avançar com a busca sequencial a fim de comparar e avaliar de forma igual todas as edificações nas demais etapas da pesquisa. Para prevalecer esta observação, em todos os gráficos o arquétipo e o CR04 aparecerão com um símbolo de asterisco *.

Os outros nove conjuntos de retrofit otimizados atingiram a classificação A de eficiência energética estando aptos e serem NZEB ao atingirem 50% ou mais de sua demanda energética anual suprida por energia renovável gerada localmente. Após a verificação da eficiência energética dos conjuntos otimizados, foi efetuado o cálculo da quantidade de módulos fotovoltaicos para suprir os conjuntos de retrofit com energia renovável e atingir o objetivo NZEB.

O consumo de 25.859,42 kWh/m² do arquétipo resulta um consumo de 41.375,08 kWh/m².ano em energia primária. Como a geração de energia renovável estimada é de 431,97 kWh/m².ano em energia primária, calculou-se então que são necessários 95,78 m² de módulos fotovoltaicos ao custo de R\$ 52.065,12 para suprir 99,9% do seu consumo de energia. Este é o maior valor investido em módulos fotovoltaicos. Para os demais casos, onde a necessidade de geração de energia renovável diminui de forma gradual, o custo da instalação do sistema de geração de energia foi atingido multiplicando a área necessária para suprir as situações limites de 50% e 99,9% do consumo de energia pelo custo de instalação descontando a tarifa do custo mensal de disponibilidade de energia elétrica. Como foi considerado conexão bifásica, o valor mínimo a ser pago são 50 kWh, o que multiplicado pela tarifa de R\$ 0, 0,62813 da CELESC para o grupo B3 resulta em R\$ 376,88 anuais.

A partir das informações reunidas nos tópicos anteriores, a Tabela 23 apresenta os códigos do SINAPI e os custos iniciais de cada medida de eficiência energética com material e mão de obra, bem como com a instalação de módulos fotovoltaicos e inversores para produção de energia renovável no local prevendo a demanda máxima de 99,9% do consumo de energia.

Tabela 23 – Custos de cada MEE e produção de energia renovável.

MEE	Código SINAPI	Descrição	Unid	Qtdd	Valor unitário		Total	Qtdd.	Total
					Material	M.O.			
1	88416	Pintura paredes externas	m ²	1	6,89	5,24	12,13	214	7.042,38
	88489	Pintura telhado	m ²	1	6,89	4,36	11,25	395,25	
2	72119	Vidro temperado 6mm FS 0.39 + instalação	m ²	1	186,29	8,01	194,30	44,88	37.250,40
3	39390/1	Luminária LED + instalação	m ²	1	64,28	21,08	170,73	98	16.731,25
4	COT.	Ar Condicionado Split Inverter 3516W 7,5IDRS 12000 BTUs Quente Frio 220V 42AVQA12M5 + instalação	Un.	1	2.159,61	320,00	2.479,61	10	24.796,10
5	COT.	Módulo fotovoltaico 360W 2x1m ² Amerisolar 72 cells 360w AS-6M Monocristal. Fornecimento e instalação.	Un.	1	557,44	80,00	637,44	46	52.065,12 (arquetipo) ou R\$561,23/m ² médio
	COT.	Inversor fotovoltaico Growatt mic3000tl-x 3KW 220V – 3kw monofásico. Fornecimento e instalação	Un.	1	3.329,00	249,00	3.578,00	6	
								Total máximo	137.885,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em complemento, a Tabela 24 apresenta os valores de cada característica modificada no processo de otimização onde é possível efetuar uma comparação síntese entre os valores definidos para o arquetipo desenvolvido e os valores das otimizações, além dos custos de cada medida de eficiência energética que compôs os Conjuntos de Retrofit (CR) da primeira simulação e a produção de energia renovável.

Tabela 24 - Síntese das MEE e comparação dos valores adotados no processo de otimização

CR	Medida de eficiência energética	Arquetipo	Otimizado	Custos
01	Absortância (Pintura de cor mais clara)	$\alpha = 0,53$	$\alpha = 0,35$	R\$ 7.042,38
02	Lâmpadas LED e DPI (- 40%)	8,12 W/m ²	4,87 W/m ²	R\$ 16.731,25
03	Equip. de refrigeração mais eficiente (IDRS)	2,974 W/W	7,483 W/W	R\$ 24.796,10
04	Fator solar do vidro (FS)	FS 0,82	FS 0,39	R\$ 37.250,40
-	Geração de energia renovável	0%	50% e 99,9% do consumo de energia	R\$561,23/m ² médio

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

4.3.2 Cenários de renovação através da busca sequencial

Nesta etapa, a comparação da Intensidade de Uso da Energia (IUE), o Potencial de Economia de Energia (PEE), o Custo do Ciclo de Vida para 25 anos (CCV) e a Economia

Líquida entre o arquétipo e os casos otimizados com as medidas de eficiência energética foram preenchendo a Tabela 25 e a Figura 26 para informar o melhor custo benefício em cada uma das quatro etapas. Iniciando pelas medidas de eficiência energética de forma individual, cada conjunto de renovação foi nomeado conforme apresentaram a menor intensidade de economia líquida. Durante o processo, a opção de melhor custo-benefício foi encontrada e, com cada novo ponto ótimo, o processo iterativo foi repetido. No APÊNDICE E – Tabela resumo dos resultados da pesquisa, consta a tabela com os resultados detalhados da etapa de otimização desta pesquisa.

Tabela 25 - IUE, potencial de economia de energia, custos do ciclo de vida e economia líquida.

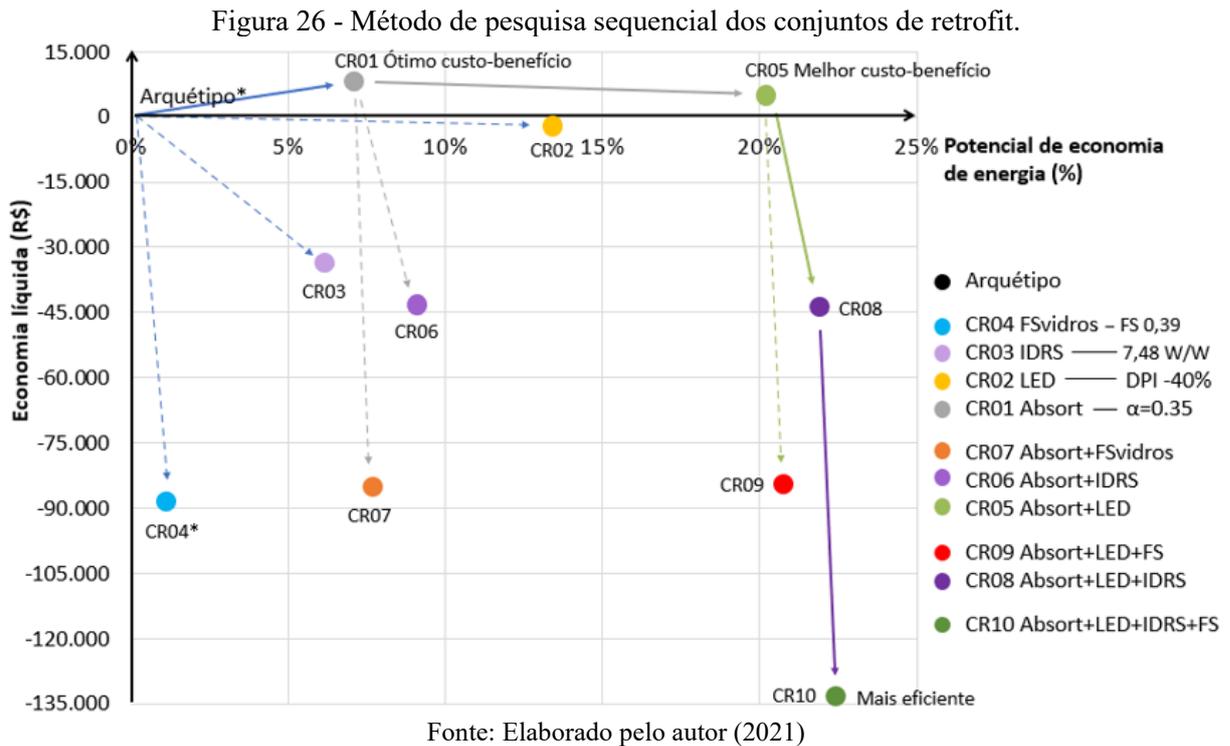
Quantidade de MEE	Conjunto de retrofit	Medida de eficiência energética	IUE em EP (kWh/m ² .ano)	PEE (%)	CCV 25 anos (R\$)	Economia Líquida (R\$)	Payback (anos)
	ARQ*	Arquétipo (caso base)	104,68	-	359.706,55	-	7,28
1 MEE individual	CR01	Absortância	97,26	7,09	355.084,74	4.621,81	9,03
	CR02	LED	90,60	13,45	362.417,49	-27.10,94	11,71
	CR03	IDRS	98,14	6,25	395.887,65	-36.181,11	13,00
	CR04*	Fator solar vidros (FS)	103,50	1,13	452.092,13	-92.385,59	15,92
2 MEE individual	CR05	Absortância+LED	83,56	20,18	356.093,77	3.612,77	14,10
	CR06	Absortância+IDRS	95,19	9,06	405.870,13	-46.163,58	15,51
	CR07	Absort+FSvidros (FS)	96,63	7,69	449.152,95	-89.446,41	19,99
3 MEE combinadas	CR08	Absortância+LED+IDRS	81,81	21,85	407.823,88	-48.117,33	28,05
	CR09	Absort+LED+FS	82,98	20,73	449.779,78	-90.073,23	35,21
4 MEE combinadas	CR10	LED+Absortância+IDRS+FS	81,58	22,07	503.100,38	-143.393,84	+50,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

O caminho ideal de custo para a implementação das medidas pode ser verificado nas linhas cheias da Figura 26, sendo que efetuar uma pintura mais clara com absortância de 0,35 nas superfícies externas (CR01), em seguida instalar lâmpadas LED com maior eficiência energética reduzido em 40% o consumo de energia para iluminação (CR02), um sistema de refrigeração mais eficiente com IDRS de 7,478 (CR03) e vidros com fator solar de 0,39 (CR04).

Na primeira rodada de simulações, somente o CR01 resultou no único valor positivo de economia líquida. Por apresentar economia de energia positiva e o maior valor de economia líquida entre os 10 conjuntos de renovação, o CR01 é classificado como a opção de ótimo custo-benefício. Na segunda etapa, o CR01 recebe adição do CR02, CR03 e CR04 separadamente. Ao adicionar CR01 e CR02, resulta no CR05 (Absortância + LED). É interessante que a adição de LED, até então com economia líquida negativa, resultou no conjunto CR05 com economia líquida positiva. Por ser o último conjunto de renovação com economia líquida positiva, o CR05

é classificado como o ponto de melhor-custo benefício. Na terceira etapa, o CR08 (Absortância+LED+IDRS) resulta na menor economia líquida comparada ao CR09. Na quarta etapa, o CR10 (Absortância+LED+IDRS+FSvidros) reúne todas as MEE. Ainda que tenha economia líquida negativa, por resultar na maior economia de energia dentre todos os conjuntos de retrofit, o CR10 recebe a classificação de conjunto de retrofit mais eficiente.



4.4 AVALIAÇÃO DE CUSTO-BENEFÍCIO

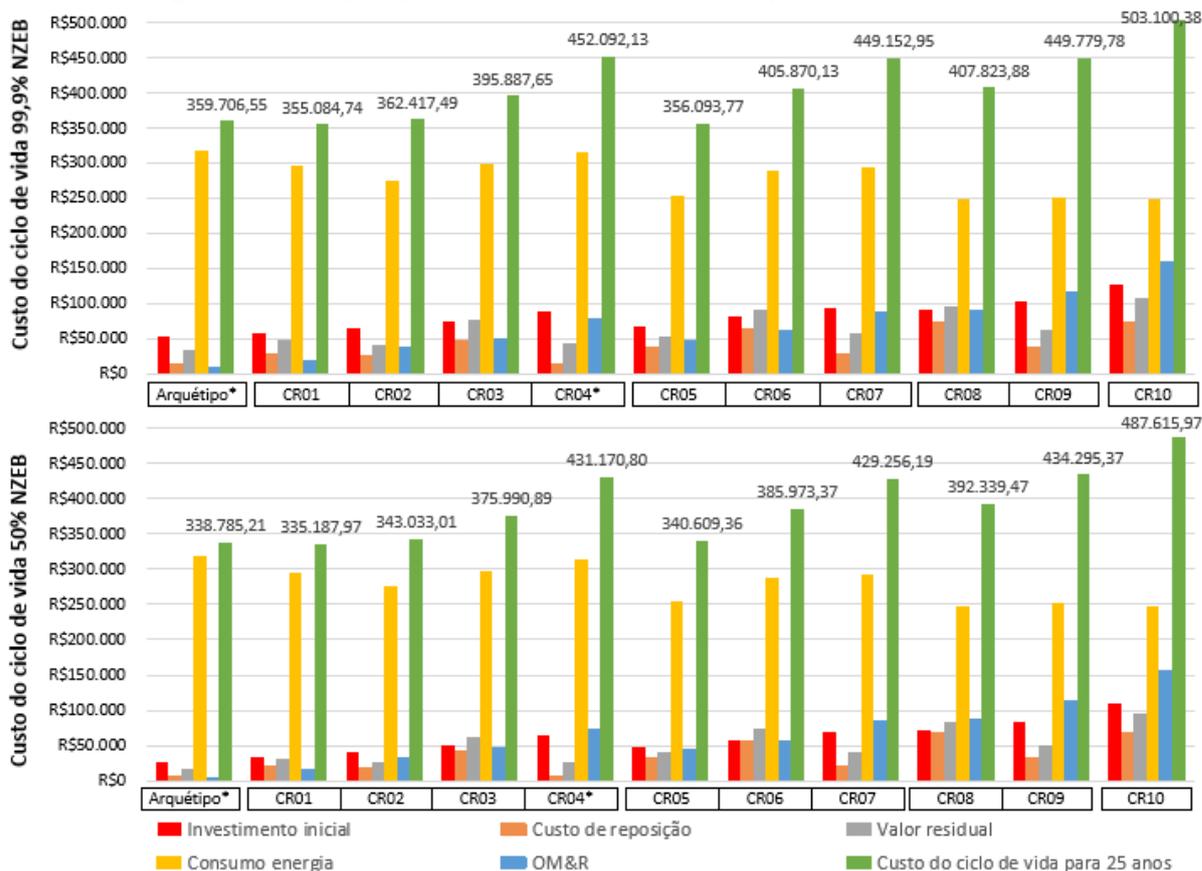
4.4.1 Comparação dos custos do ciclo de vida

Através da Figura 27 é possível efetuar uma comparação dos custos do ciclo de vida prevendo suprir as edificações com os limites de 99,9% e 50% de energia renovável no local. Principalmente que, na primeira etapa, o custo do ciclo de vida do CR01 (Absortância) é R\$ 4.621,81 menor que o custo do ciclo de vida de apenas inserir geração de energia renovável no arquétipo, pois diminuiu de R\$ 359.706,55 para 355.084,74. Na segunda etapa o CR05 (Absortância+LED) resultou em custo do ciclo de vida menor do que o CR02 somente com LED. Embora tenha um tempo de retorno do investimento superior, pois seu custo de manutenção e reposição são maiores desde os períodos iniciais, isso revela que a economia de energia das medidas de eficiência energética somado a diminuição da área de módulos

fotovoltaicos necessários contribuem para um melhor custo-benefício quando avaliados ao longo do ciclo de vida de 25 anos.

Inclusive, em todos os casos é possível observar que o consumo de energia (em amarelo) é o montante que mais se destaca, o que revela que economias de energia ao longo do ciclo de vida são importantes e impacta diretamente no investimento necessário de módulos fotovoltaicos, que é um custo inicial alto e a área disponível para instalação pode ser um limitante em edificações que desejam o objetivo NZEB. Os valores exatos dos custos podem ser verificados no APÊNDICE D – Resumo dos dados de custo do ciclo de vida para nzeb 99,9%.

Figura 27 – Comparação dos custos do ciclo de vida para 99,9% e 50% NZEB



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

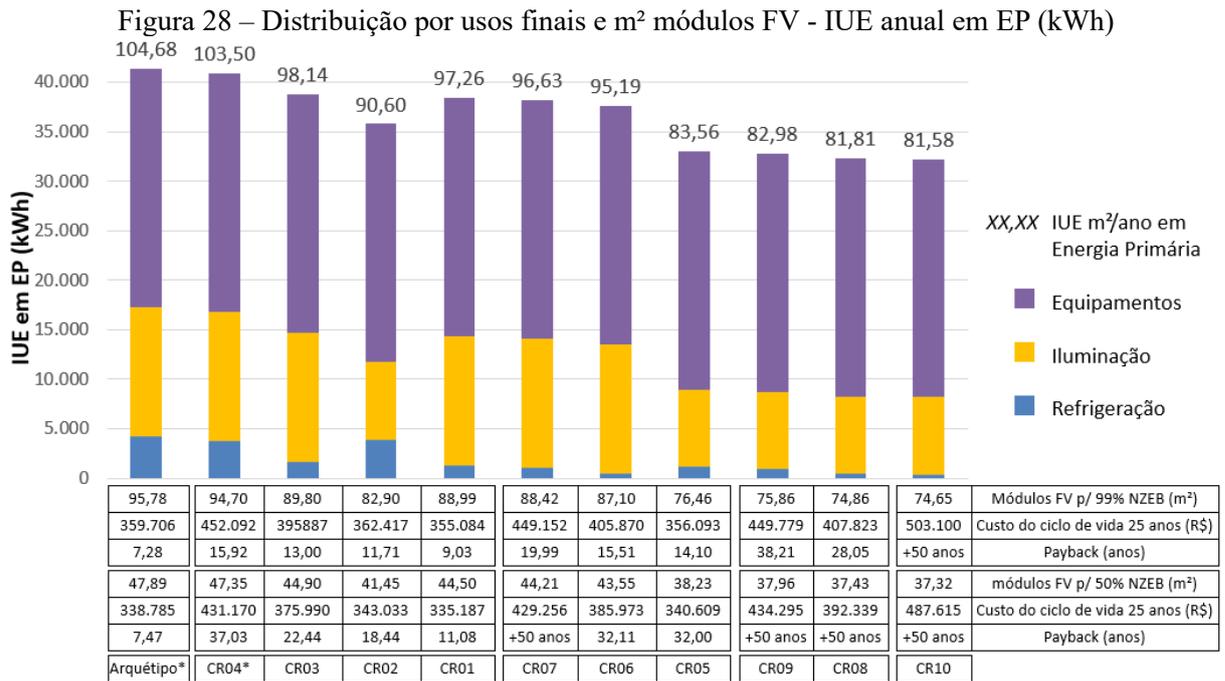
Ainda na Figura 27, uma comparação entre os dados revela que o custo do ciclo de vida para 99,9% e 50% NZEB diminui de R\$ 359.706,5 para R\$ 338.785,21 no caso do arquétipo e de R\$ 503.100,38 para 487.615,97 para o CR10, respectivamente. Estes valores representam uma diminuição de 5,82% para o arquétipo até 3,08% para o CR10, sendo ligeiramente menor já que o principal fator que influencia é o investimento inicial na quantidade

de módulos fotovoltaicos. Para o conjunto de melhor custo-benefício em 99,9% NZEB, a diferença é de 4,35% para 50% NZEB. Isso revela que a diferença de custos entre 99,9% e 50% NZEB é menor que 6% para todos os conjuntos de renovação resultando em um valor bastante baixo comparado com todo o montante envolvido e indicando que investir em 99,9% NZEB é mais vantajoso que 50% NZEB.

4.4.2 Consumo de energia por uso final

Avaliando o consumo de energia por usos finais em energia primária e m^2 /ano na Figura 28, chama atenção que o consumo final com refrigeração apresenta quantidades menores que iluminação e equipamentos, além de que existe uma diferença com as quantidades medidas na edificação da 2ºDP de São José na Figura 23. Essa diferença acontece a partir do uso mais acentuado de ar condicionado, além de máquinas antigas verificadas na visita à edificação da 2ºDP. Além disso, nos resultados da simulação computacional do arquétipo, também pode ser explicada pela possibilidade presente na INI-C de considerar a ventilação natural como estratégia de resfriamento nos períodos em que a temperatura operativa não ultrapassa os limites do conforto térmico com base no arquivo climático da cidade, no caso Florianópolis. Como as temperaturas de Florianópolis são mais amenas fazendo com que o sistema de ar condicionado seja menos acionado, resulta em um menor consumo do sistema de refrigeração no arquétipo.

Abaixo das barras, é informada a quantidade necessária de módulos fotovoltaicos em metros quadrados para suprir 50% e 99,9% do consumo da edificação por energia renovável e manter a definição NZEB. Na Figura 28, cada conjunto de renovação é apresentado em ordem decrescente do IUE para facilitar o entendimento de como cada MEE impacta ao longo do processo de otimização até o CR10.



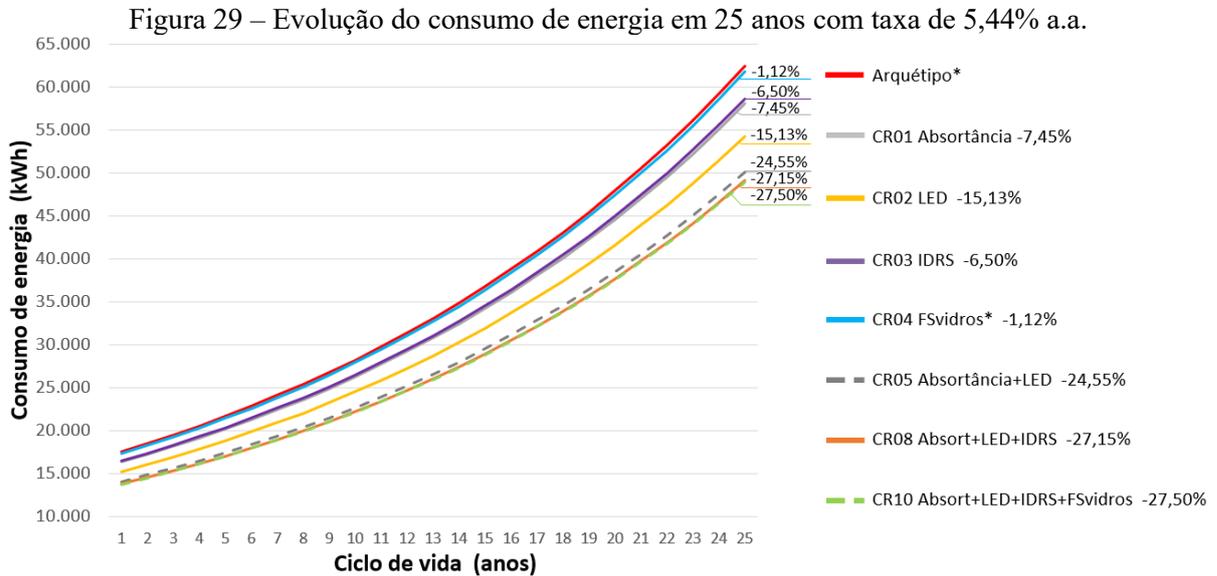
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

A quantia referente a equipamentos permanece igual em todos os casos, pois foi considerado 15 W/m² constante para todos os conjuntos de renovação, conforme a avaliação de eficiência energética da INI-C determina. Isso mostra como é fundamental a posse de equipamentos mais eficientes, os quais podem impactar para atingir um consumo de energia em edificações ainda maior. Destaca-se que a presença da MEE da absorvância resulta em conjuntos de retrofit com os menores usos do sistema de refrigeração.

4.4.3 Consumo de energia na operação da edificação

A respeito do consumo de energia ao longo do tempo, os resultados mostram como este consumo é impactado quando se insere conjuntos de retrofit em uma edificação. Na Figura 29 é possível notar o comportamento do consumo de energia ao longo dos 25 anos do estudo, considerando uma taxa de aumento da energia de 5,44% ao ano. Foram destacados apenas os conjuntos de retrofit individuais (CR01, CR02, CR03, CR04) e aqueles que apresentam melhor custo-benefício nas outras três etapas da busca sequencial (CR05, CR08 e CR10). Nota-se que o cenário de melhor custo-benefício (CR05) atinge 24,55% de economia de energia, enquanto o cenário mais eficiente (CR10), ainda que com economia líquida negativa, pode chegar a um potencial de economia de energia de 27,50%. Com isso, é possível verificar que a opção de melhor custo-benefício (CR05 – Absorvância+LED), representada pela linha cinza pontilhada,

atinge uma redução de consumo de energia que é apenas 2,94% menor do que a opção mais eficiente (CR10 Absortância+LED+IDRS+FSvidros) com 27,50% representada pela linha verde pontilhada acima da linha laranja.



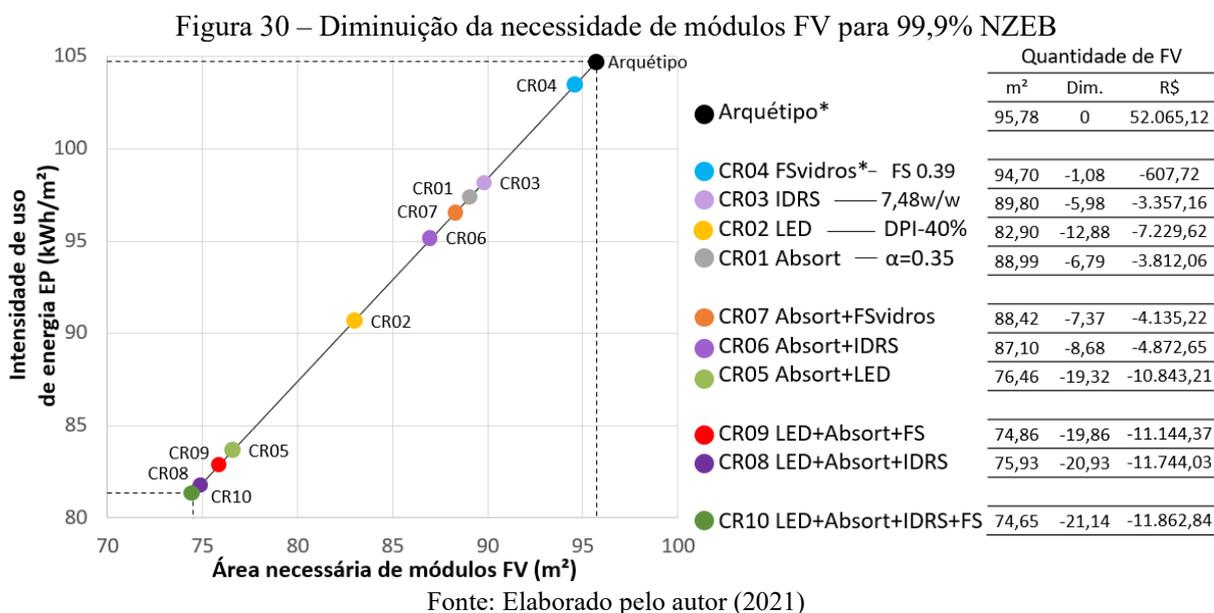
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Conforme mencionado anteriormente, a opção de inserir um vidro com fator solar mais baixo (FSvidros) nos conjuntos de renovações ainda fornece uma economia de energia, mas é bastante pequena porque o percentual de abertura de fachada é de 20% e resulta em menor impacto no desempenho geral da edificação e são conjuntos de renovações mais onerosos. Ressalta-se que ser mais oneroso não significa que o conjunto de retrofit não seja benéfico, uma vez que a diminuição de economia de energia operacional que ele permite é eficaz para conscientizar a respeito da economia potencial ao longo do ciclo de vida, que beneficia também a diminuição da necessidade de instalação de novas usinas de energia e fortalece o planejamento energético de longo prazo. Entretanto, este estudo buscou escolher a alternativa de melhor custo-benefício, que fornece o melhor retorno de investimento.

4.4.4 Quantidade de módulos fotovoltaicos para geração de energia

Ainda que os custos dos módulos fotovoltaicos estejam diminuindo, estes representam o maior investimento inicial. Dessa forma, conforme são integradas medidas de eficiência energética, o consumo de energia é diminuído acarretando também diminuição da quantidade de módulos fotovoltaicos necessários para produção de energia renovável. A Figura 30 fornece

uma relação entre a diminuição da intensidade de uso de energia em função da área de módulos fotovoltaicos necessários para suprir 99,9% da energia consumida do arquétipo e pelas edificações otimizadas. Para 50% NZEB os valores são a metade dos valores apresentados.

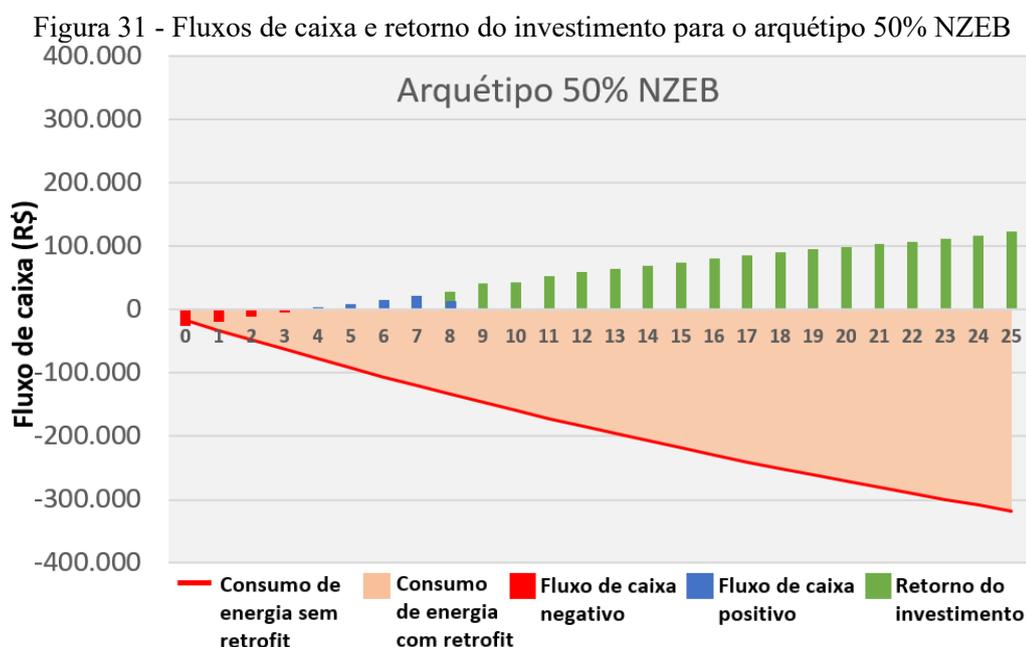


Como medida individual, enquanto o arquétipo necessita de 95,78m² de módulos fotovoltaicos, o CR02 (LED) necessita de 82,90 m². Esta diferença de 12,88m² o investimento inicial neste sistema, que tem um custo médio de R\$ 561,23 por metro quadrado. Este cálculo médio leva em conta a quantidade de módulos fotovoltaicos mais os inversores. Na Figura 30 também é possível verificar como o CR05, que possui melhor custo-benefício entre todos os conjuntos de renovação, apresenta uma diminuição de módulos fotovoltaicos apenas 1,82 m² comparado ao CR10, que é o mais eficiente por apresentar o maior potencial de economia de energia, mas economia líquida negativa em relação ao arquétipo.

4.4.5 Economia financeira e retorno do investimento

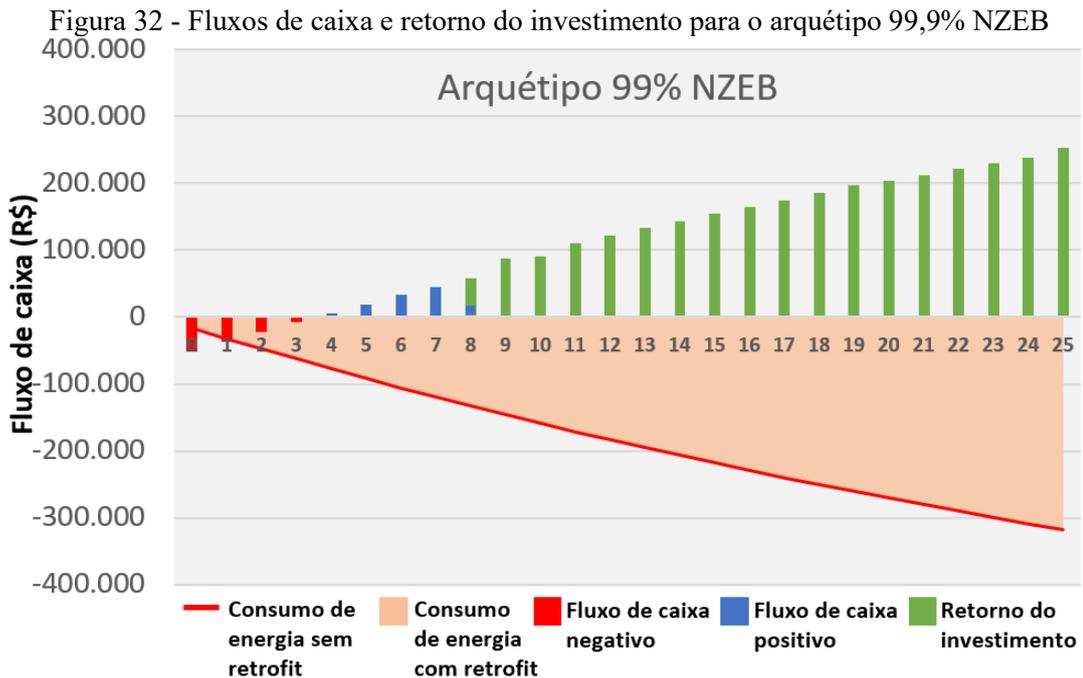
Em seguida, na Figura 31 e Figura 32, são apresentados o fluxo de caixa e o retorno do investimento para o arquétipo considerando um NZEB com 50% e 99,9% de balanço energético. Reforça-se que o arquétipo e o CR04 possuem classificação B de eficiência energética, mas receberam energia renovável apenas para efeito de comparação com as edificações otimizadas.

As barras estão divididas em cores, sendo vermelho quando o projeto ainda não obteve retorno, azul quando o acúmulo do fluxo de caixa se torna positivo até zerar os custos dos investimentos anteriores, em verde quando começa a obter retorno. Já a linha contínua vermelha na parte inferior do gráfico representa o consumo de energia do arquétipo sem nenhum conjunto de retrofit aplicado, enquanto a área alaranjada representa o consumo de energia com um conjunto de retrofit aplicado. No caso do arquétipo, a linha alaranjada permanece igual a linha contínua vermelha, pois o arquétipo não possui nenhum conjunto de retrofit aplicado. Dessa forma, no caso de 50% NZEB, o fluxo de caixa negativo inicia no ano zero com o investimento inicial, passa a ter fluxo de caixa positivo aos 3,68 anos e o retorno do investimento acontece aos 7,47 anos, que significa oitavo ano, uma vez que a barra azul de fluxo de caixa positivo termina aos 47% da barra do oitavo ano.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Para 99,9% NZEB, o retorno do investimento acontece um pouco antes, sendo 3,59 anos para o fluxo de caixa positivo e 7,28 anos para o retorno do investimento.

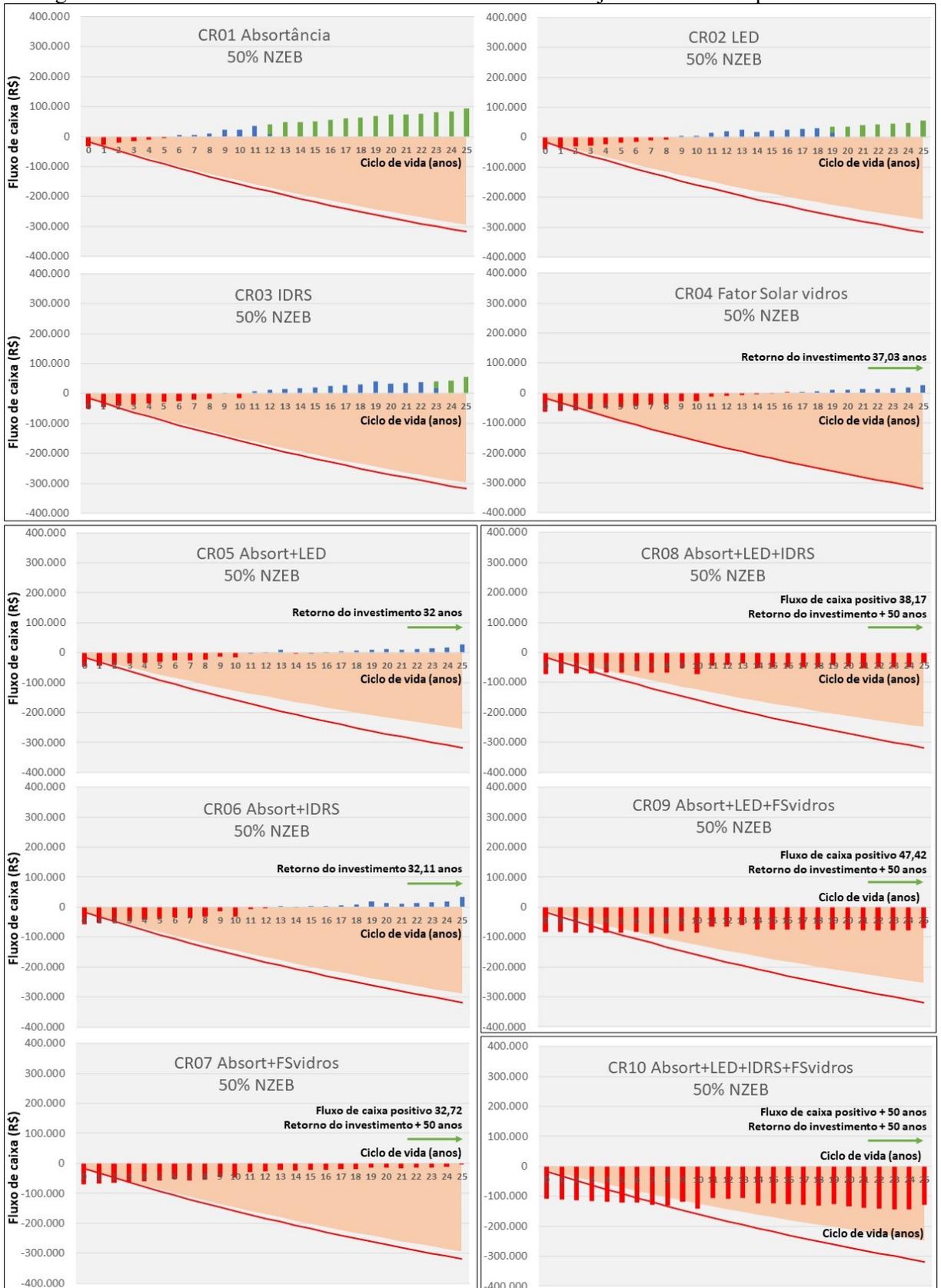


Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Em seguida, através da Figura 33, é possível verificar o intervalo de custo-benefício resultante para um NZEB que supere 50% do consumo de energia da edificação. Os conjuntos de retrofit simulados na mesma etapa da busca sequencial estão circundados por uma borda quadrada. O consumo de energia na cor salmão diminui conforme os conjuntos de renovação são aplicados. Um NZEB que supere 50% da energia renovável resulta em atingir um retorno do investimento em períodos acima de 11,08 anos desde o CR01 chegando a mais de 50 anos já no CR07. É sabido que a área disponível para instalar energia renovável seja uma limitação para algumas edificações se tornarem NZEB. Se tiver recursos financeiros e área disponível, é ideal que o investidor perceba que estará tendo prejuízo, se optar por economizar no investimento inicial e instalar apenas 50% ao invés de 99,9% NZEB.

Mesmo produzindo apenas 50% de energia renovável, é interessante verificar como o consumo de energia com retrofit se afasta da linha do consumo de energia sem retrofit, que mostra que a inserção de medidas de eficiência energética reduz consideravelmente o consumo de energia ao longo de todo o ciclo de vida da edificação.

Figura 33 - Fluxos de caixa e retorno do investimento dos conjuntos de retrofit para 50% NZEB



— Consumo de energia sem retrofit Consumo de energia com retrofit Fluxo de caixa negativo Fluxo de caixa positivo Retorno do investimento

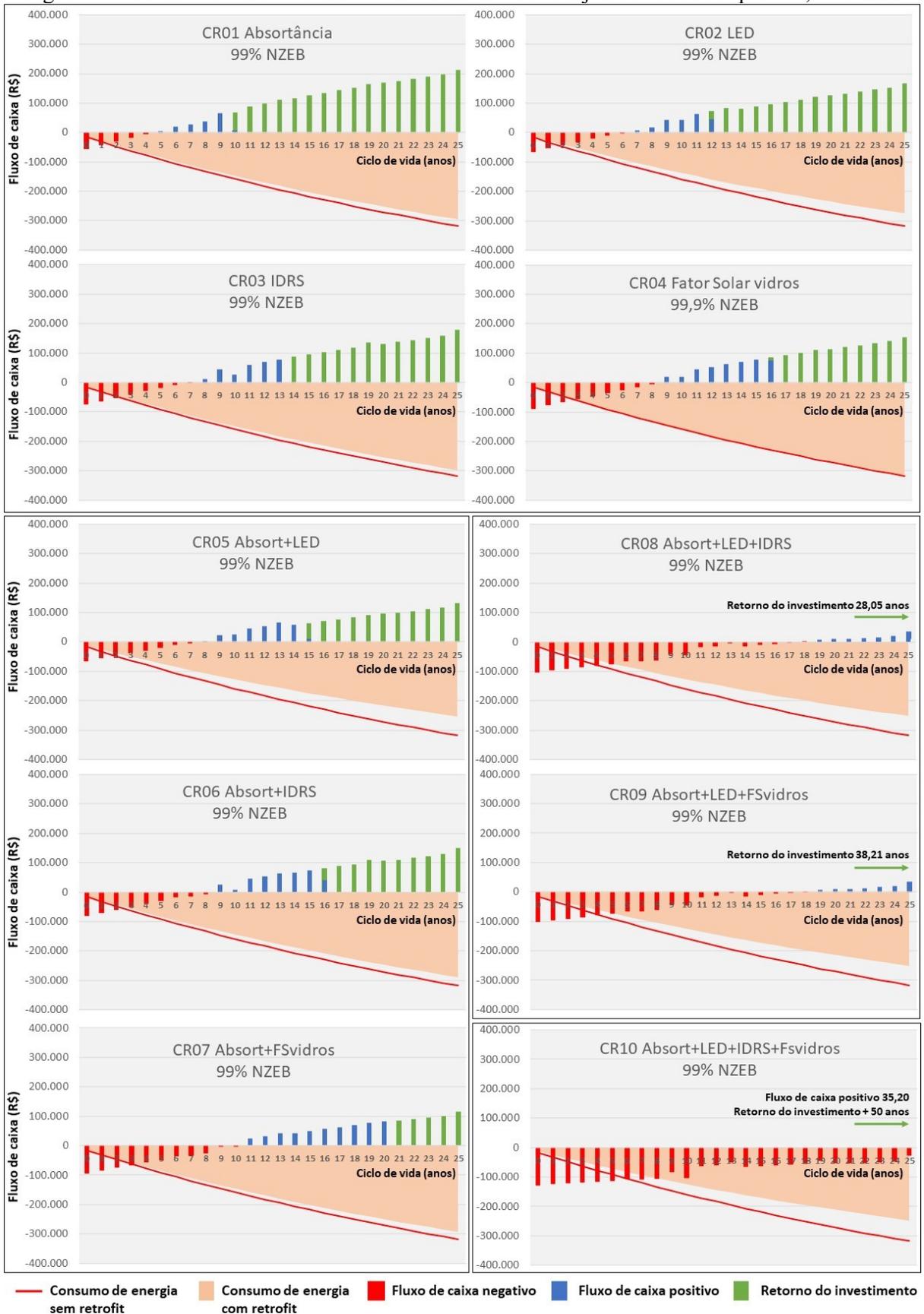
Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Sobre os custos de reposição, é possível verificar em todos os gráficos que se destaca a troca dos inversores no décimo ano, o que acarreta o maior degrau de forma negativa em todos os casos, pois foi estimado em 19% do custo de investimento inicial, segundo a revisão bibliográfica. Entretanto, a tecnologia está avançando e os preços deste equipamento estão diminuindo nos últimos anos, então este valor tende a ser menor nos próximos anos. Na segunda troca, no vigésimo ano, o fluxo de caixa está positivo para todos os conjuntos de renovação menos o CR10, que agrega os custos dos vidros com fator solar mais baixo e tem um impacto mais acentuado ao longo do ciclo de vida.

Na Figura 34 é apresentado o fluxo de caixa e retorno do investimento para NZEB com 99,9% de geração de energia renovável. Também se verifica o degrau negativo em todos os casos referente aos custos de reposição pela troca dos inversores no décimo ano. Sobre o consumo de energia ao longo do tempo, é possível verificar a diferença entre a linha vermelha que mostra o consumo de energia do arquétipo desenvolvido sem alterações com a diminuição do consumo de energia de cada conjunto de retrofit na cor salmão. Os valores estão com números negativos, pois o consumo de energia ao longo do tempo é um fluxo de caixa negativo, uma vez que é uma despesa. Salienta-se que foi considerada a taxa de custo de disponibilidade para sistema bifásico de 50 kWh/mês. O CR08 e CR10 são os gráficos onde a economia de energia em relação ao arquétipo é mais visível, economizando energia ao longo de toda a vida útil da edificação.

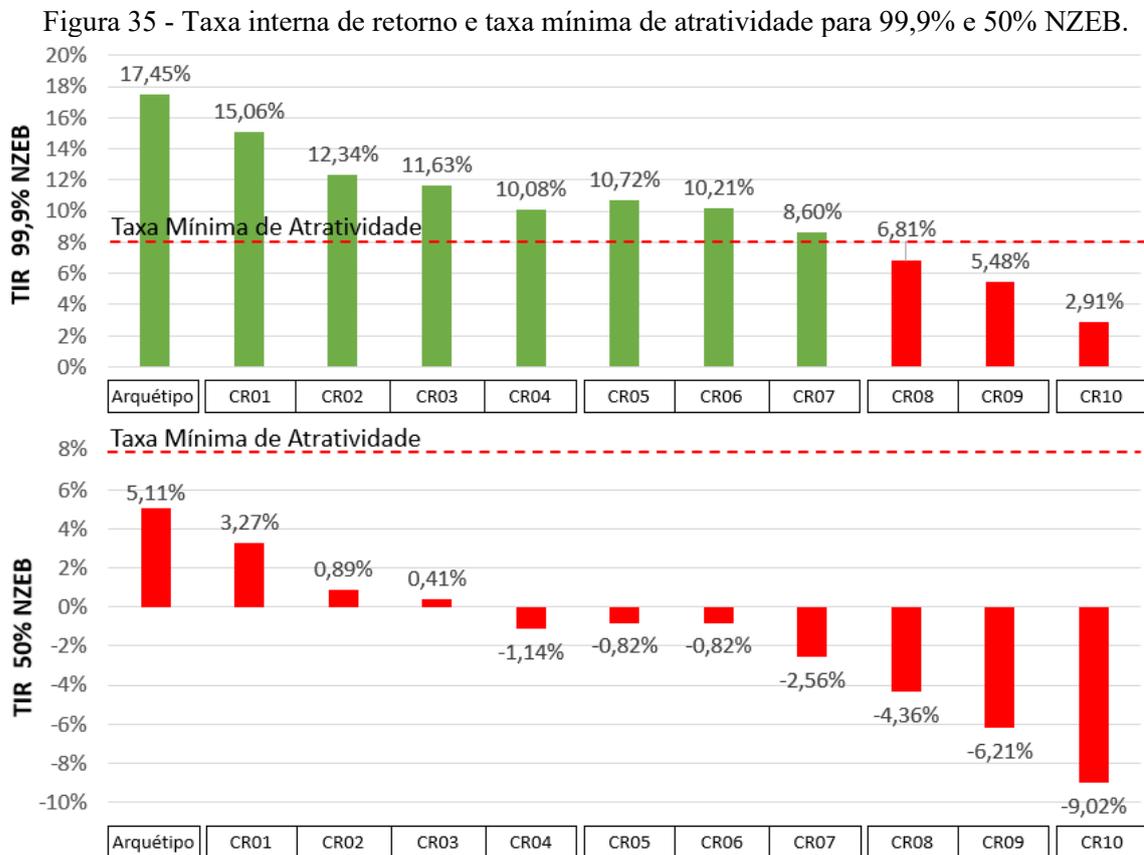
Sobre o retorno do investimento, o projeto é considerado viável se o tempo de retorno for menor que o período de vida útil. O conjunto de retrofit que tem o menor tempo de retorno é o CR01 (Absortância) com VPL positivo aos 4,53 anos para 99,9%NZEB e 5,41 anos para 50% NZEB. Este também é o conjunto de retrofit com menor custo de investimento inicial de R\$ 57.195,18. Entre todos os conjuntos, destaca-se o CR05 (Absortância+LED), que se classifica como o melhor custo-benefício em 99,9% NZEB proporciona retorno de investimento no início do décimo quinto ano, com uma viabilidade maior que o CR04 (FSvidros), que ainda está na primeira etapa e é um conjunto de retrofit com medida individual.

Figura 34 – Fluxos de caixa e retorno do investimento dos conjuntos de retrofit para 99,9% NZEB



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Por último, é apresentado o resultado da Taxa Interna de Retorno (TIR), que mostra se um projeto é viável para a avaliação da rentabilidade. Para isso, a TIR deve ser maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), estabelecida em 8% pela Empresa de Pesquisas Energéticas. Conforme a Figura 35, os conjuntos de retrofit para 99,9% e 50% NZEB que atingiram TIR acima da TMA estão representados em verde e em vermelho aqueles que não atingiram o índice da TMA. Em 99,9% NZEB os conjuntos de retrofit CR08, CR09 e CR10 apresentaram TIR abaixo de 8% e se mostram inviáveis através deste indicador para o ciclo de 25 anos. Já os demais conjuntos de retrofit até o CR07 apresentam TIR acima da TMA e se mostram viáveis para o mesmo período. Na primeira e segunda etapa todos os conjuntos de retrofit têm viabilidade, pois apresentam TIR acima da taxa mínima de atratividade de 8%. Na segunda etapa se destaca o CR05, classificado como o conjunto de melhor custo-benefício em função da maior economia líquida, com TIR de 10,72% comprovando sua viabilidade e rentabilidade. Para 50% NZEB, o arquétipo e três conjuntos de retrofit apresentaram TIR positiva, mas abaixo da TMA de 8% e se mostram inviáveis em todas as opções.



Fonte: Elaborado pelo autor (2021)

Ao comparar as Taxas Internas de Retorno para a situação de 99,9% e 50% NZEB, é possível que algumas edificações escolham investir 50% do seu consumo de energia renovável, uma vez que possam dispor de uma menor área de instalação de energia renovável. Entretanto, quando a edificação possuir área de instalação disponível para suprir 99,9% de seu consumo com energia renovável, os resultados mostram que esta é a opção mais viável e rentável ao longo de um ciclo de vida de 25 anos. Este resultado também fornece suporte a necessidades de subsídios ou financiamentos que contribuam para quebrar a barreira do alto investimento inicial permitindo renovações de eficiência energética e energias renováveis em edificações.

Em uma análise geral de custo-benefício, somente o CR01 (Absortância) e CR05 (Absortância+LED) atingiram economia líquida positiva com retorno de investimento de 9,03 anos e 14,10 anos, respectivamente. Os outros conjuntos de retrofit tiveram economia líquida negativa e, por isso, encontram-se na parte inferior do gráfico. Na primeira e segunda etapas da busca sequencial, todos os conjuntos de retrofit atingiram retorno do investimento dentro do ciclo de vida de 25 anos.

Em função das respostas dos questionários apontarem aparelhos de ar condicionado antigos e ineficientes, a troca por aparelhos mais eficientes (IDRS) foi sugerida no CR03, CR06, CR08 e CR10. A participação dessa estratégia não atingiu economias líquidas positivas devido ao custo dos equipamentos e a menor participação da refrigeração no consumo de energia final do arquétipo com conjuntos de retrofit em específico. Entretanto, CR03 e CR06 atingiram retorno do investimento apenas 10% maior do que os conjuntos de retrofit subsequentes das suas etapas (CR02 e CR06) e dentro do prazo de 25 anos estabelecido além de TIR superior aos 8% indicados pela Empresa de Pesquisas Energéticas. Sugere-se então uma análise mais detalhada caso a caso, que considere a eficiência dos aparelhos e o padrão de uso de cada Delegacia de Polícia que receba um retrofit. Essa análise pode resultar em caminhos de ótimo custo-benefício diferentes dos encontrados para o arquétipo desta pesquisa e indicar a troca dos aparelhos antigos por aparelhos com índices de desempenho mais eficientes para cada edificação em específico.

Também é importante observar que os resultados do potencial de economia de energia revelam que a economia de medidas combinadas nem sempre é uma adição linear da economia de medidas individuais, uma vez que isso depende de seus efeitos interativos. A combinação de CR01 com CR02, CR03 e CR04 não indicam uma adição linear. A adição de CR01 com CR03 e CR04 resultando em CR06 e CR07 apresentou resultados de potencial de economia de energia menores se fizesse uma adição linear dos seus PEE na primeira etapa. Na terceira etapa isso

também acontece, pois a adição de CR05 com CR03 resultaria 26,42%, entretanto resulta em 21,85% de PEE. Isso revela a importância da metodologia sequencial para averiguar as interações entre diversas medidas de eficiência energética.

Neste estudo, a maioria dos conjuntos de retrofit apresentou economia de energia líquida negativa. Acredita-se que isso se deve à grande parcela de consumo de energia por equipamentos, que mantém o consumo em todos os conjuntos de retrofit. Como MEE única ou combinada, a estratégia de inserir um vidro com fator solar mais baixo (FSvidros) para as aberturas resulta em economias de energia negativas. Diante disso, é necessário lembrar que o arquétipo desenvolvido possui percentual de abertura de fachada de 20%. Como a área de vidro é relativamente pequena, o seu efeito na contribuição na economia de energia também é pequeno. Os valores negativos de economia líquida não querem dizer que inserir um vidro com fator solar mais baixo seja ruim, apenas fornece uma informação que sua contribuição impacta menos em uma edificação com a proporção janela-parede igual ao arquétipo desenvolvido, além de ter sido escolhido neste estudo um vidro que possui custo elevado.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação buscou contribuir a respeito da avaliação de custo-benefício a partir de economias de energia ao pesquisar o custo-benefício de medidas de eficiência energética em edificações de segurança pública, através do estudo em Delegacias de Polícia considerando o custo do ciclo de vida para a cidade de Florianópolis. Enquanto o método de busca sequencial permite flexibilidade e adaptabilidade no estudo do caminho do custo ideal, as informações resultantes da avaliação do custo-benefício permitem compreender a viabilidade técnica e financeira de um investimento a partir de conjuntos de retrofit.

Este estudo permitiu a oportunidade de presenciar o cotidiano de uma edificação de segurança pública e de obter informações por meio de questionários aplicado a usuários totalizando 62 edificações que desempenham um importantíssimo papel para a sociedade. Embora as dificuldades impostas pela pandemia de COVID-19 e a estrutura disponível para obtenção dos dados, ressalta-se aqui o empenho de toda a equipe da Polícia Civil de Santa Catarina em contribuir com o levantamento de informações neste estudo ao mobilizar seu pessoal em atividades onde o tema é a eficiência energética em edificações e a contribuição na diminuição do consumo de energia pelo Governo do Estado.

Na primeira parte da pesquisa, a realização de um levantamento energético de um conjunto de 62 edificações de segurança pública existentes revelou informações a respeito de características físicas, padrões de uso e posse de equipamentos sobre esta tipologia. Na fase de levantamento dos dados através do *Google Earth* e posteriormente confirmado pelas respostas dos questionários, verificou-se que algumas edificações possuem pintura escura na totalidade ou em boa parte das paredes externas. Os aparelhos de ar condicionado relatados nos questionários foram em grande maioria equipamentos antigos ou desatualizados frente aos novos índices de desempenho mais eficientes. Entre os equipamentos presentes em uma delegacia, chamou atenção a grande quantidade de bebedouros e frigobar algumas salas das delegacias, mas compreende-se que o trabalho policial requer equipamentos que permitam que o policial civil permaneça focado em sua atividade por períodos mais longos. Diante da quantidade de dados levantados e cruzados de forma a desenvolver o arquétipo representativo, acredita-se que os resultados apresentaram condições satisfatórias, uma vez que a calibração do modelo com os dados recebidos da Gerência de Edificações e medidos na 2ª Delegacia de Polícia de São José obtiveram comportamento muito próximo das simulações do arquétipo desenvolvido.

A classificação da eficiência energética do arquétipo desenvolvido foi realizada pelo método de simulação computacional da INI-C. Os sistemas individuais da envoltória, condicionamento de ar e envoltória foram avaliados e resultaram todos em classificação A. Já a classificação geral resultou em classificação B de eficiência energética com 33,60% de economia em energia primária comparado a edificação na sua condição de referência. Isso acontece devido à alta quantidade de energia de equipamentos, que são iguais para ambas edificações no processo de avaliação da INI-C. Por serem iguais, a parcela referente a quantidade de energia para equipamentos da edificação real se sobressai perante aos consumos de refrigeração e iluminação fazendo com que a energia primária total da edificação real seja maior resultando em classificação B. Outro aspecto que chamou atenção é a consideração da ventilação natural somente para a edificação real, não incluindo a ventilação natural para a edificação na sua condição de referência. Isso contribuiu para a envoltória da edificação real ser classificada como A (mais eficiente), em detrimento de ter uma classificação menos eficiente, caso a edificação na condição de referência também pudesse considerar a ventilação natural.

No processo de otimização, a sugestão de medidas de eficiência energética buscou focar em modificações que sejam de rápida execução nas edificações existentes sem que

interferissem nas vedações verticais ou horizontais de forma profunda gerando obras que exijam muito tempo, gerem resíduo ou barulho. Com a introdução de módulos fotovoltaicos para gerar eletricidade em quantidade igual ao uso de energia primária, os sistemas utilizados não exigiram grandes modificações. Deste modo, as quatro medidas de eficiência energética individuais que resultaram no melhor desempenho energético, em ordem crescente de custo-benefício, foram a modificação na absorvância das paredes por uma cor mais clara, a troca das luminárias fluorescentes por lâmpadas LED, equipamentos de ar condicionado de alto desempenho e o fator solar dos vidros. Como medidas combinadas, as demais etapas da busca sequencial apontaram a união da absorvância com cor mais clara e lâmpada LED como a opção de ótimo custo-benefício, atingindo um custo do ciclo de vida menor que a opção de não fazer nenhuma modificação e apenas inserir os módulos fotovoltaicos no arquétipo. A maior diminuição do consumo de energia em uma medida individual se deu através da CR02 com as lâmpadas LED atingindo 13,45%. Já entre as medidas combinadas, o CR05 atingiu 20,18% de economia de energia ao longo do ciclo de vida. Dessa forma, o CR05 foi classificado como o melhor custo-benefício por resultar no maior potencial de economia de energia e também economia líquida positiva, que não acontece nos conjuntos de renovação posteriores. Isto reforça que a busca sequencial é uma abordagem útil para compreender as relações de economia de medidas de eficiência energética no processo de otimização de edificações.

Na operação e manutenção de edificações públicas, a economia de energia ao longo do ciclo de vida pode atingir economias consideráveis e é uma via que beneficia a todos pelo exemplo. As edificações gastam menos energia ao longo de seu período de uso diminuindo os gastos públicos. Já o usuário privado se beneficia tendo acesso à informação a respeito do consumo que diferentes equipamentos representam no seu cotidiano de forma a buscar equipamentos economizadores e com maior eficiência energética.

A partir do resultado das simulações com a variação do IUE, foi possível analisar o custo-benefício das alterações e a viabilidade da meta NZEB para a tipologia estudada com oportunidades significativas para melhorias de eficiência energética no estoque de edifícios de segurança pública de Santa Catarina. Entre todos os conjuntos de retrofit, o CR05 se mostrou o melhor custo-benefício para implantação com economia líquida positiva, TIR de 10,72% e retorno do investimento em 14,10 anos dentro do ciclo de vida considerado de 25 anos, o que é atrativo como projeto de economia de energia a longo prazo e sugestivo para ação de retrofit pelos gestores das edificações da Polícia Civil. Os demais conjuntos de retrofit apresentam TIR acima da TMA sendo viáveis, porém com períodos de retorno maiores que o CR05. O CR08,

CR09 e CR10 apresentam TIR menores que 8% sendo inviáveis, conforme indicação da Empresa de Pesquisas Energéticas. Na análise sobre a definição NZEB suprindo 50% e 99,9% do consumo de energia da edificação verificou-se que optar por 50% é menos vantajoso, uma vez que o tempo de retorno do investimento é igual ou maior que 99,9% e a diferença do custo do ciclo de vida ao final de 25 anos é menor que 6%.

A viabilidade financeira em alguns dos conjuntos de retrofit dentro do ciclo de vida considerado neste estudo permite o conhecimento de que o retrofit é vantajoso para diminuir o consumo de energia de edificações públicas. A eficiência energética e a aplicação de energias renováveis não irão zerar a conta de energia, pois ainda haverá a cobrança da taxa de disponibilidade da rede elétrica. Entretanto, as estratégias de aplicar uma cor mais clara nas paredes externas e trocar a iluminação por lâmpadas LED permitem reduzir o consumo de energia e enviar a produção de energia renovável para a rede e descontar seu valor ao longo dos anos atingindo o retorno do investimento. Isso dá segurança em difundir informações e a promoção de políticas públicas para expandir o retrofit de demais tipologias. Acredita-se que essas informações possam contribuir ao encorajar e dar segurança a investidores para entenderem que a integração de medidas que contribuam na diminuição do consumo de energia em edificações traz benefícios.

Os períodos de retorno de investimento acima de 7 anos podem ser considerados altos, mas não devem ser vistos de forma negativa, uma vez que trazem economias de energia no período considerado e as medidas de eficiência energética utilizadas neste estudo podem ser incorporadas nos novos projetos da Polícia Civil de Santa Catarina. Esses dados contribuem para que os responsáveis possam avaliar as barreiras específicas que afetam o mercado de renovação em cada região e buscar orientação técnica e financeira.

Os custos que foram considerados não contam com nenhum incentivo financeiro ou técnico. Mesmo assim, seus resultados positivos contribuem para apoiar a construção de políticas públicas e soluções de retrofit que visem a redução de consumo de energia. Como os investimentos iniciais são geralmente altos, subsídios e financiamento podem contribuir para implantar e dar acesso a ações mais ativas de proprietários de edifícios para empreenderem ações de retrofit em suas edificações. Principalmente, os órgãos públicos devem liderar pelo exemplo e se tornarem pioneiros ao promoverem a eficiência energética e diminuir o consumo de energia em suas edificações.

Com esta pesquisa, conclui-se que investir em eficiência energética primeiro com a aplicação do CR05 (Absortância+LED) e inserir geração de energia renovável local para atingir

o objetivo NZEB é viável tecnicamente e mais econômico do que não efetuar nenhuma modificação nas edificações. Sugere-se então para a Diretoria de Planejamento da Polícia Civil aplicar o conjunto de retrofit CR05 composto por aplicação de cor mais clara nas paredes externas e instalação de lâmpadas LED nas edificações do estoque de forma a economizar recursos públicos e otimizar as edificações de segurança pública do Estado de Santa Catarina para a cidade de Florianópolis.

5.1 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Apesar dos resultados encontrados acima e a disponibilidade das equipes da Polícia Civil, esta pesquisa encontrou obstáculos provocado pela pandemia de SARS-COVID-19 a partir do mês de março de 2020. Embora algumas informações não foram levantadas por pessoal técnico na área de edificações, os dados utilizados e as análises desenvolvidas não se limitaram aos questionários recebidos, mas também buscou-se dirimir dúvidas e demais referências com o objetivo de buscar o dado mais fiel possível para representar o estoque das edificações.

O novo método da INI-C também incorporou a possibilidade de efetuar a simulação de iluminação natural para as edificações nas quais se deseja computar o aproveitamento da mesma com maior precisão. Como o arquétipo apresentou nível A de eficiência energética no método das atividades do edifício, não foi efetuada a integração da iluminação natural neste trabalho.

Compreende-se que, também em função da pandemia de COVID-19, notou-se um aumento expressivo das taxas SELIC e a tarifa de energia após o mês de dezembro de 2020, de forma que a sugere-se o desenvolvimento para pesquisas futuras a considerar as variações ocorridas no período subsequente.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

De acordo com os resultados e conclusões deste estudo, as principais recomendações para trabalhos futuros são:

- Efetuar um diagnóstico energético presencial em mais unidades de Polícia Civil para aprofundar os dados para a pesquisa, bem como entender o uso de energia por parte dos usuários;

- Efetuar a avaliação de eficiência energética pela INI-C de acordo com o método de cálculo com a versão mais recente publicada, incluindo também o método de aproveitamento da integração da luz natural com artificial através de software específico;
- Desenvolver o cálculo considerando taxas de desconto e juros de acordo com os índices considerando cenários econômicos diferentes;
- A partir do cenário de mudanças climáticas, efetuar as simulações utilizando arquivos climáticos que considerem os diferentes cenários de mudanças climáticas e variações futuras de temperatura externa do ar.

6 REFERÊNCIAS

ABNT. **ABNT NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho, Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013a.

ABNT. **NBR ISO 50002 Diagnósticos energéticos - Requisitos com orientação para uso**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2014. Disponível em: www.abnt.org.br.

ABNT. NBR15220-3-2005: Desempenho térmico de edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 1–23, 2003. Disponível em: <https://doi.org/01.080.10; 13.220.99>

ABNT. **NBR15575-1 Edificações Habitacionais - Desempenho Parte 1 : Requisitos gerais**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2013b.

AKSAMIIJA, Ajla. Regenerative design and adaptive reuse of existing commercial buildings for net-zero energy use. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 27, p. 185–195, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.06.026>

ALAZAZMEH, Ayman; ASIF, Muhammad. Commercial building retrofitting: Assessment of improvements in energy performance and indoor air quality. **Case Studies in Thermal Engineering**, [s. l.], v. 26, n. January, p. 100946, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.100946>

ALVES, Tatiana *et al.* Assessing the energy saving potential of an existing high-rise office building stock. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 173, p. 547–561, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.05.044>

ALVES, Tatiana Paula. **Energy savings potential of the high-rise office building stock. A case study of Belo Horizonte, Brazil**. 2017. - Universidade Federal de Minas Gerais, [s. l.], 2017.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL Procedimentos do Programa de Eficiência Energética – PROPEE - Módulo 7 – Cálculo da Viabilidade. [s. l.], p. 49, 2018a.

ANEEL. Resolução Normativa 414/2010: Atualizada até a Resolução Normativa no 823 de 10 de julho de 2018. [s. l.], p. 85, 2018b. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/documents/656827/15201072/ren2010414+-+Texto+Atualizado+Compacto+%28rev+823+2018%29/b8ad993e-d34a-1b5d-20da-5a912c9ee89f>

ANEEL. Resolução Normativa nº 687 de 2015 da ANEEL. **Aneel**, [s. l.], p. 24, 2015.

ASHRAE STANDARD 55. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. Atlanta: [s. n.], 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE FABRICANTES E IMPORTADORES DE PRODUTOS DE ILUMINAÇÃO - ABILUMI. **Tabela de Equivalência de Tecnologias de Lâmpadas Abilumi (2020)**. [S. l.: s. n.], 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Abnt Nbr 15575. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, Rio de Janeiro, p. 306, 2013.

ATTIA, S. *et al.* Assessing gaps and needs for integrating building performance optimization tools in net zero energy buildings design. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 60, n. Maio, p. 110–124, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.01.016>. Acesso em: 16 jul. 2019.

BALLARINI, Ilaria; CORGNATI, Stefano Paolo; CORRADO, Vincenzo. Use of reference buildings to assess the energy saving potentials of the residential building stock: The experience of TABULA project. **Energy Policy**, [s. l.], v. 68, p. 273–284, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.01.027>

BECCHIO, Cristina *et al.* Cost optimality assessment of a single family house: Building and technical systems solutions for the nZEB target. **Energy and Buildings**, [s. l.], 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.12.050>

BECK, Elisa de Oliveira. **Desempenho luminoso e energético de LEDS para reformas de sistemas de iluminação de ambientes de escritório**. 193 f. 2016. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/194253>

BELUSSI, Lorenzo *et al.* A review of performance of zero energy buildings and energy efficiency solutions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 25, n. December 2018, p. 100772, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100772>

BP. **Energy Outlook - 2040 Brazil Fact Sheet**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/country-and-regional-insights/brazil-insights.html>.

BPIE. **A Guide to Developing Strategies For Building Energy Renovation**. [S. l.: s. n.], 2013.

BRASIL. Anexo Geral V – Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes, Coberturas e Vidros. **Anexo Da Portaria Inmetro Nº 50/ 2013**, [s. l.], v. Atualizado, p. 28, 2017. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/AnexoV_CatalogoPropriedadesTermicas_v27NOV2017.pdf

BRASIL. **Balanco energético nacional 2020: Ano base 2019**. [S. l.: s. n.], 2020a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf.

BRASIL. **CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. SINAPI: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil**. Brasília: [s. n.], 2020b. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/Paginas/default.aspx>.

CABEZA, Luisa F.; CHÁFER, Marta. Technological options and strategies towards zero energy buildings contributing to climate change mitigation: A systematic review. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 219, p. 110009, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110009>

CB3E. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Residenciais, de Serviços e Públicas**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/INIC_Dez_2020.pdf.

CBCS; MITSIDI; ELETROBRAS. **Guia Prático para Realização de Diagnósticos Energéticos em Edificações**. [s. l.], p. 29, 2016. Disponível em:

<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7B02A05065-372B-4133-B054-4369D8F37B3F%7D#1>

CEN. PD CEN / TR 15459-2 : 2017 BSI Standards Publication Energy performance of buildings — Economic evaluation procedure for energy systems in buildings. Part 2: Explanation and justification of EN 15459-1, Module M1-14. [s. l.], 2017.

CHIARADIA, Carlos Edilson. **Aplicação do conceito de edificações de energia zero e seu impacto nas cidades por meio de parâmetros técnicos, tecnológicos e ambientais**. 269 f. 2020. - Universidade Estadual Paulista, [s. l.], 2020.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. **Climate.OneBuilding.Org**. [S. l.], 2021. Disponível em: <http://climate.onebuilding.org/>. Acesso em: 10 set. 2020.

CONGEDO, Paolo Maria *et al.* Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates. **Energy**, [s. l.], v. 91, n. 244, p. 967–982, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.078>

CORGNATI, Stefano Paolo *et al.* Reference buildings for cost optimal analysis: Method of definition and application. **Applied Energy**, [s. l.], v. 102, p. 983–993, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.001>

COSTA, João Francisco Walter. **Edifícios de balanço energético nulo: um estudo para escritórios em Brasília**. 392 f. 2018. - Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, [s. l.], 2018.

COSTA, Joao Francisco Walter; AMORIM, Claudia Naves David; SILVA, Joara Cronemberger Ribeiro. Retrofit guidelines towards the achievement of net zero energy buildings for office buildings in Brasilia. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], p. 101680, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101680>

CRAWLEY, D.; PLESS, S.; TORCELLINI, P. Getting to Net Zero Energy Buildings. **ASHRAE Journal**, [s. l.], ano 51, n. September, 2009. p. 18–25. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/241962259_Getting_to_Net_Zero

D'AGOSTINO, Delia; MAZZARELLA, Livio. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 21, n. October 2018, p. 200–212, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2018.10.019>

D'AGOSTINO, Delia; PARKER, Danny. A framework for the cost-optimal design of nearly zero energy buildings (NZEBs) in representative climates across Europe. **Energy**, [s. l.], v. 149, n. 2018, p. 814–829, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.020>

D'AGOSTINO, Delia; ZANGHERI, Paolo; CASTELLAZZI, Luca. Towards nearly zero energy buildings in Europe: A focus on retrofit in non-residential buildings. **Energies**, [s. l.], v. 10, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10010117>

DE VECCHI, Renata *et al.* ASHRAE 55 adaptive model application in hot and humid climates: The Brazilian case. **Architectural Science Review**, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 93–101, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00038628.2014.981145>

DERU, Michael *et al.* U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock. **Publications (E)**, [s. l.], n. February 2011, p. 1–118, 2011. Disponível em: http://digitalscholarship.unlv.edu/renew_pubs/44

DIDONÉ, Evelise Leite; WAGNER, Andreas; PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay. Estratégias para edifícios de escritórios energia zero no Brasil com ênfase em BIPV. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 27–42, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1678-86212014000300003>. Acesso em: 16 jul. 2019.

DOE. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. **Building Energy Software Tools Directory**. Califórnia, EUA, [s. n.], 2016. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/

DOMINGOS, Renata Mansuelo Alves. **Análise comparativa do custo-benefício de medidas de eficiência energética e geração fotovoltaica em habitações de interesse social.** 89 f. 2020. - Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2020.

DORNELLES, Kelen Almeida. **Biblioteca de absorvância de telhas [recurso eletrônico] : base de dados para análise de desempenho termoenergético de edifícios.** São Carlos: IAU/USP, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/9786586810103>

DOU. **INSTRUÇÃO NORMATIVA SRF Nº 1700, de 14 de março de 2017 ANEXO III - Taxas anuais de depreciação.** [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?naoPublicado=&idAto=81268&visao=compilado>.

ELETROBRAS. Edital de Chamada Pública - 01/2018 - NZEB Brasil - Procel Edifica. [s. l.], p. 45, 2019. Disponível em: <https://eletrobras.com/pt/Paginas/Chamada-Publica-Procel-Edifica2019.aspx>

ELI, Letícia Gabriela. **O Impacto do Padrão de Uso no Desempenho Térmico de Edificações Unifamiliares no Brasil.** 98 f. 2020. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10080.23048>

EPE, Empresa de Pesquisa Energética -. **Atlas da eficiência energética no Brasil 2020 - Relatório de indicadores.** [S. l.: s. n.], 2020.

EPE. Nota Técnica PR 07/18: Premissas e Custos da Oferta de Energia Elétrica no Horizonte 2050. Série: Estudos de Longo Prazo. **Empresa de Pesquisa Energética**, [s. l.], p. 127, 2018.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Nota técnica EPE/DEA/SEE/007/2020: Ações para promoção da eficiência energética nas edificações brasileiras No caminho da transição energética.** [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/NT_DEA-SEE-007-2020.pdf.

EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. Commission Delegated Regulation (EU) No 244/2012 of 16 January 2012 supplementing Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings by establishing a comparative methodology framework for calculating. **Official Journal of the European Union**, [s. l.], p. 28, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.3000/1977091X.C_2012.115.eng

EUROPEAN UNION. **DIRECTIVE 2010/31/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 19 May 2010. Official Journal of the European Union.** [S. l.: s. n.], 2010.

EVOLA, G.; MARGANI, G.; MARLETTA, L. Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 68, n. PARTA, p. 7–18, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.026>

FENG, Wei *et al.* A review of net zero energy buildings in hot and humid climates: Experience learned from 34 case study buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 114, n. November 2018, p. 109303, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109303>

FERREIRA, M.; ALMEIDA, M.; RODRIGUES, A. Cost-optimal energy efficiency levels are the first step in achieving cost effective renovation in residential buildings with a nearly-zero energy target. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 133, n. November 2014, p. 724–737, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.017>

FERREIRA, Marco *et al.* Comparing cost-optimal and net-zero energy targets in building retrofit. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 188–201, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613218.2014.975412>

FERREIRA, Marco; ALMEIDA, Manuela; RODRIGUES, Ana. Impact of co-benefits on the assessment of energy related building renovation with a nearly-zero energy target. **Energy and Buildings**, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.066>

FGV/IBRE. **Índice Nacional de Custo da Construção**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://portalibre.fgv.br/incc>. Acesso em: 18 dez. 2020.

FREITAS, Plínio Lerner Lerner Borges. **Análise comparativa entre orçamentos elaborados com composições de preço unitário de dois bancos de dados – SINAPI E TCPO: estudo de caso no Distrito Federal**. 65 f. 2017. - Centro Universitário de Brasília - UNICEUB, [s. l.], 2017. Disponível em: <https://ejournal.poltektegal.ac.id/index.php/siklus/article/view/298%0Ahttp://repositorio.unan.edu.ni/2986/1/5624.pdf%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.jana.2015.10.005%0Ahttp://www.biomedcentral.com/1471-2458/12/58%0Ahttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&P>

GBC. **Compreenda o GBC Brasil Zero Energy**. [S. l.]: Green Building Council Brazil, 2020.

GERALDI, Matheus Soares; GHISI, EneDIR. Mapping the energy usage in Brazilian public schools. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 224, p. 110209, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110209>

GIELEN, Dolf *et al.* The role of renewable energy in the global energy transformation. **Energy Strategy Reviews**, [s. l.], v. 24, n. June 2018, p. 38–50, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>

GNECCO, Verônica Martins; *et al.* Avaliação dos custos de estratégias de eficiência energética para uma edificação de energia zero.pdf. **Anais do XVIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - ENTAC 2020**, [s. l.], p. 8, 2020. Disponível em: <https://entac2020.com.br/anais-2020/>

HOROWITZ, Scott *et al.* **an Enhanced Sequential Search Methodology for Identifying Cost-Optimal Building Pathways** SimBuild 2008. [S. l.: s. n.], 2008.

HU, Ming. *Does zero energy building cost more? – An empirical comparison of the construction costs for zero energy education building in United States. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], v. 45, n. November 2018, p. 324–334, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.026>

IEA. **Energy Technology Perspectives 2017**. [S. l.: s. n.], 2017.

IEA. **Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America 2020-2050**. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://globalabc.org/>.

INMETRO. **Instrução Normativa Inmetro para a Classificação de Eficiência Energética de Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (INI-C)**. [S. l.: s. n.], 2021.

INMETRO. Proposta de método para a avaliação da eficiência energética com base em energia primária de edificações comerciais, de serviços e públicas (INI-C). [s. l.], p. 151, 2017.

INSTITUTO IDEAL; AHK. **O Mercado Brasileiro de Geração Distribuída Fotovoltaica**. Brasil: [s. n.], 2019. Disponível em: <https://institutoideal.org/o-mercado-brasileiro-de-geracao-distribuida-fv-edicao-2019/>.

IPEEC. Delivering Energy Savings in Buildings - International Collaboration on Building Energy Code Implementation. [s. l.], p. 48, 2015.

IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2019. [s. l.], p. 2, 2020.

ISO. PD ISO / TS 50044 : 2019 BSI Standards Publication Energy saving projects (EnSPs) — Guidelines for economic and financial evaluation. [s. l.], 2019.

KAMIMURA, Artur Martins *et al.* **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. [S. l.: s. n.], 2020.

KING, Jennifer; PERRY, Christopher. Smart Buildings: Using Smart Technology to Save Energy in Existing Buildings. **American Council for an Energy-Efficient Economy**, [s. l.], n. February, p. 1–46, 2017. Disponível em: <https://www.aceee.org/sites/default/files/publications/researchreports/a1701.pdf>

KNEIFEL, Joshua; WEBB, David. Predicting energy performance of a net-zero energy building: A statistical approach. **Applied Energy**, [s. l.], v. 178, p. 468–483, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2016.06.013>. Acesso em: 17 out. 2019.

KURNITSKI, Jarek *et al.* Cost optimal and nearly zero (nZEB) energy performance calculations for residential buildings with REHVA definition for nZEB national implementation. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 11, p. 3279–3288, 2011. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.08.033>

LACCHINI, Corrado; ANTONIOLLI, Andriago Filippo; RÜTHER, Ricardo. The influence of different irradiation databases on the assessment of the return of capital invested in residential PV systems installed in different locations of the Brazilian territory. **Solar Energy**, [s. l.], v. 155, p. 893–901, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.07.004>

LACCHINI, Corrado; RÜTHER, Ricardo. The influence of government strategies on the financial return of capital invested in PV systems located in different climatic zones in Brazil. **Renewable Energy**, [s. l.], v. 83, p. 786–798, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.045>

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. [S. l.: s. n.], 2014. v. 3 edição *E-book*.

LARA, Rigoberto Arambula *et al.* Energy audit of schools by means of cluster analysis. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 95, p. 160–171, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.036>

LEAMAN, A.; BORDASS, B. Assessing building performance in use 4: The Probe occupant surveys and their implications. **Building Research and Information**, [s. l.], v. 29, n. 2, p. 129–143, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09613210010008045>

LECHNER, Norbert. **Heating, cooling, lighting : sustainable design methods for architects**. 4° editioned. [S. l.]: Wiley, 2014.

LI, Y. *et al.* Review of building energy performance certification schemes towards future improvement. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 113, n. June, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109244>

MAGRINI, Anna *et al.* From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge - The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. **Developments in the Built Environment**, [s. l.], v. 3, n. March, p. 100019, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100019>

MARSZAL, A. J. *et al.* Zero Energy Building - A review of definitions and calculation methodologies. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 971–979, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.022>

MAY, Neil; GRIFFITHS, Nigel. Planning responsible retrofit of traditional buildings. **Responsible Retrofit Series**, [s. l.], 2015. Disponível em: www.stbauk.org

NADEL, Steven. Programs To Promote Zero-Energy New Homes and Buildings. [s. l.], n. September, 2020. Disponível em: https://www.aceee.org/sites/default/files/pdfs/zeb_topic_brief_final_9-29-20.pdf

ORTIZ, Hamilton; BATISTA, Madson. EnergyBrain - Ferramenta de diagnóstico energético remoto como meio acessível de alavancar a retomada econômica. **Conferência Internacional Green Building Brasil**, Online, 2020. Disponível em:

<https://greenbuildingbrasil.org.br/sesoes-palestrantes/>

PACHECO-TORGAL, Fernando *et al.* **Cost-Effective Energy-Efficient Building Retrofitting**. [S. l.]: Elsevier; Woodhead Publishing, 2017.

PACHECO, Miguel; LAMBERTS, Roberto. Assessment of technical and economical viability for large-scale conversion of single family residential buildings into zero energy buildings in Brazil: Climatic and cultural considerations. **Energy Policy**, [s. l.], v. 63, p. 716–725, 2013. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.07.133>

PACHECO, Miguel Teixeira Gomes; GHISI, EneDir; LAMBERTS, Roberto. Proposição de estratégias para obtenção de Edifícios de Energia Zero. **Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E)**, [s. l.], p. 67, 2013. Disponível em: http://cb3e.ufsc.br/sites/default/files/ProposicaoEstrategiasEnergiaZero_28082013.pdf

PALLIS, Platon *et al.* Cost effectiveness assessment and beyond: A study on energy efficiency interventions in Greek residential building stock. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 182, p. 1–18, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.10.024>

PANAGIOTIDOU, Maria; FULLER, Robert J. Progress in ZEBs-A review of definitions, policies and construction activity. **Energy Policy**, [s. l.], v. 62, p. 196–206, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.099>

PARLAMENTO EUROPEU E CONSELHO DA UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2018/844 DO PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO de 30 de maio de 2018 que altera a Diretiva 2010/31/UE relativa ao desempenho energético dos edifícios e a Diretiva 2012/27/UE sobre a eficiência energética. **Jornal Oficial da União Europeia**, [s. l.], v. L156, p. 75–91, 2018. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L0844&from=EN>

PARLAMENTO EUROPEU E DO CONSELHO. **Directiva 2010/31/EU DO PARLAMENTO E DO CONSELHO de 19 de Maio de 2010 relativa ao desempenho energético dos edifícios (reformulação)** **Jornal Oficial da União Europeia**. [S. l.: s. n.], 2010. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:01:PT:HTML>.

PEREIRA, Enio *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PIKAS, E.; THALFELDT, M.; KURNITSKI, J. Cost optimal and nearly zero energy building solutions for office buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.039>

POLÍCIA CIVIL. **Planilha de Energia Elétrica - Acompanhamento 2019**. In: [S. l.: s. n.], 2019.

SANTA CATARINA. **Polícia Civil. Institucional**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.pc.sc.gov.br/>. Acesso em: 15 jun. 2020.

SCHAEFER, Aline; GHISI, EneDir. Method for obtaining reference buildings. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 128, p. 660–672, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.07.001>

SESANA, Marta Maria; SALVALAI, Graziano. Overview on life cycle methodologies and economic feasibility for nZEBs. **Building and Environment**, [s. l.], v. 67, p. 211–216, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.05.022>

SILVA, Carolina Oliveira da. **Delegacias Integradas de Palhoça: Um novo olhar sobre edificações de segurança**. 68 f. 2019. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216986>

SOLARGIS; WORLD BANK GROUP. **Global Solar Atlas**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://globalsolaratlas.info/map>. Acesso em: 5 ago. 2020.

SOLÍS-ALEMÁN, Ernesto M. *et al.* A study on the degradation rates and the linearity

of the performance decline of various thin film PV technologies. **Solar Energy**, [s. l.], v. 188, n. April, p. 813–824, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.067>

SOUSA, Raquel Fernandes de. **Análise Financeira de Medidas de Eficiência Energética e Geração de Energia em Habitações de Interesse Social**. 133 f. 2019. - Universidade Federal de Santa Catarina, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

SUN, Xiaonuan; GOU, Zhonghua; LAU, Stephen Siu Yu. Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.137>

TESTI, Daniele *et al.* An open access tool for building energy audits harmonizing European standards. **Building Simulation Applications**, [s. l.], v. 2013-Janua, p. 225–232, 2013.

THALFELDT, Martin *et al.* Facade design principles for nearly zero energy buildings in a cold climate. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 67, p. 309–321, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.08.027>

TOMAZI, JAKELINE O.; RODRIGUES, Leticia J.; SCHNEIDER, Paulo S. Auditoria Energética Em Edificação Pública Visando O Selo Procel De Economia De Energia Em Edificações. **XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**, [s. l.], n. 1, p. 2206–2215, 2018.

TORCELLINI, P.; CRAWLEY, D. Understanding zero-energy buildings. **ASHRAE J. 48**, [s. l.], p. 63–69, 2006.

TORCELLINI, P *et al.* Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition. **ACEEE Summer Study Pacific Grove**, [s. l.], p. 15, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1471-0846\(02\)80045-2](https://doi.org/10.1016/S1471-0846(02)80045-2)

VAN DEN BERGH, Sofie *et al.* Window spacers and edge seals in insulating glass units: A state-of-the-art review and future perspectives. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 58, p. 263–280, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.006>

VEIGA, Rodolfo K S *et al.* Análise da relação entre a área de abertura e o fator solar frente ao ganho de calor no contexto brasileiro. *In:* , 2019, João Pessoa. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído; Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído**. João Pessoa: XV ELACAC, ENCAC XI, 2019. p. 0–9.

VILAÇA GOMES, P. *et al.* Technical-economic analysis for the integration of PV systems in Brazil considering policy and regulatory issues. **Energy Policy**, [s. l.], v. 115, n. October 2017, p. 199–206, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.014>

WAGIMAN, Khairul Rijal *et al.* Lighting system control techniques in commercial buildings: Current trends and future directions. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 31, n. March, p. 101342, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101342>

WESTPHAL, Fernando Simon. **Manual Técnico do Vidro Plano**. São Paulo: [s. n.], 2016.

ZOMER, Clarissa; RÜTHER, Ricardo. Simplified method for shading-loss analysis in BIPV systems – part 1: Theoretical study. **Energy and Buildings**, [s. l.], v. 141, p. 69–82, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.042>

APÊNDICE A – Tabela tipológica das edificações do estudo

Planilha com as 100 edificações elencadas para o estudo em ordem de consumo por kWh/ano
Dados adaptados de Planilha de Acompanhamento do Consumo de Energia Elétrica - CELESC

Fonte das informações:

Gerência de Edificações Polícia Civil Santa Catarina, Google Earth e Google Street View

Observação 01: Filtrado na coluna Propriedade do Estado de Santa Catarina

Observação 02: Planilha organizada por consumo de energia em kWh/ano

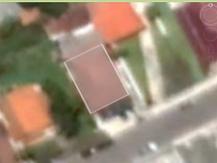
X: Volumetria sem características parecidas com outras edificações
A: 2 pav, alvenaria, laje + telha fibrocimento, duas águas, janelas modulares
B1: 1 pav, alongado, telha cerâmica, janela 4 folhas de vidro
B2: 1 pav, quadrado, telha cerâmica, janela 2 ou 4 folhas de vidro
B3: 1 pav, forma C, telha cerâmica, janela 3 folhas
B4: 1 pav, forma retangular, telha fibroc duas águas, janela 3 ou 4 folhas
C: Projeto padrão PC Civil ou próximo
Falta info: Falta informações

Legenda da fonte das informações

	Planilha Polícia Civil Santa Catarina
	Com apoio do Google Earth e Street View
	Calculados com o cruzamento das infos
	Resultado do agrupamento
62	Edificações que responderam ao questionário enviado

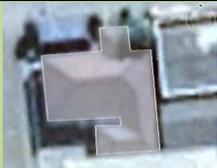
	DRP	Município	Projeç	Pvto	Área	Perimetr o	kWh/ ano	kWh/ ano/m ²	R\$/ano	Unid.	Tipo logia	Vista da rua	Vista superior	Forma	Zona Biocli m.	Absort	Tipo Cober tura	Tipo Janel a	Tipo Telha	Endereço	Proprie dade do Imóvel
3	11ª	Joaçaba	915	2	1830	131	49652	27,13	R\$ 30.519,39	DRP	A			2	2	2	2	2	1	Rua Tiradentes, 84, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
6	20ª	Ituporanga	450	2	900	103	45520	50,58	R\$ 25.254,98	DRP	C			7	2	1	2	3	2	Rua Vereador Joaquim Boing, 123, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
40	17ª	São João Batista	300	1	300	110	20110	67,03	R\$ 18.346,08	DPCo	B2			4	3	2	4	3	1	Rua Marechal Floriano Peixoto, 124, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
41	02ª	Joinville	415	1	415	107	20061	48,34	R\$ 11.011,75		B3			5	5	2	4	3	1	Rua David do Reis, s/n, Fátima	de propriedade do Estado de Santa Catarina
42	22ª	Canoinhas	500	2	1000	107	19845	19,85	R\$ 13.176,22	DRP+DPCA MI+DPCo	A			2	2	2	2	2	1	Rua Emilio Scholtz, 1212, Sossego	de propriedade do Estado de Santa Catarina

43	01ª	Biguaçu	595	1,5	892,5	101	19053	21,35	R\$ 14.545,23	DPCo	X			1	3	3	1	2	2	Rua Hermógenes Prazeres, 49, Centro,	de propriedade do Estado de Santa Catarina
44	02ª	São Francisco do Sul	410	1	410	107	18927	46,16	R\$ 11.538,35	DPCo	B3			5	5	2	4	3	1	Alameda Ipiranga, nº 250, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
45	03ª	Blumenau	185	2	370	65	18818	50,86	R\$ 12.378,97	SubDP Velha	X			1	3	1	1	2	2	Rua General osorio, 4535, bairro velha	de propriedade do Estado de Santa Catarina
46	23ª	Irineópolis	205	1	205	63	18730	91,37	R\$ 13.775,82	DPMu	B2			4	2	2	4	3	1	Rua Paraná, 845, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
47	25ª	Fraiburgo	470	1	470	115	18657,72	39,70	R\$ 10.879,83	DPCo	B4			8	2	1	2	4	2	Av. Caçador, s/n, São José	de propriedade do Estado de Santa Catarina
48	13ª	Itapiranga	315	1	315	77	18455	58,59	R\$ 11.081,18	DPCo	B4			6	2	1	2	4	2	Rua Jorge Lacerda, 12, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
49	08ª	Lages	512	1	512	94	18162	35,47	R\$ 18.092,44	DIC	B4			6	1	2	2	4	2	Rua Wenceslau Franklin, 158, Universitário	de propriedade do Estado de Santa Catarina

50	22ª	Canoinhas	345	1	345		18042	52,30	R\$ 12.214,01	DRP+DPCA MI+DPCo	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Emilio Scholtz, 1212, Sossego	de propriedade do Estado de Santa Catarina
51	06ª	Criciúma	440	1	440	87	17864	40,60	R\$ 9.549,05	SAER/Sul	X			1	2	2	1	4	2	Rua Dirceu Simon, S/N	de propriedade do Estado de Santa Catarina
52	14ª	Concórdia	365	1	365	84	17822	48,83	R\$ 11.079,91	DPCAMI+DI C	B4			6	2	1	2	4	2	Rua Anita Garibaldi, 199, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
53	19ª	Sombrio	500	1	500	115	17642	35,28	R\$ 9.967,32	DPCo	B3			5	2	1	4	3	1	Rua Telegrafista Adolfo Coelho, 789, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
54	07ª	Rio do Oeste	340	1	340	87	17221	50,65	R\$ 10.374,29	DPMu	B2			4	2	1	4	3	1	Rua Serafim Ronchi, 90, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
55	05ª	Jaguaruna	345	1	345		16849	48,84	R\$ 10.310,92	DPCo	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Hercílio Estácio da Luz, 150, Jardim Cristo Rei	de propriedade do Estado de Santa Catarina
56	29ª	Porto Belo	160	1	160	51	16800	105,00	R\$ 9.098,40	DPCo	B2			4	3	1	4	3	1	Rua Leopoldo José Guerreiro, 477, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina

57	03ª	Apiuna	455	1	455		16737	36,78	R\$ 9.745,27	DPMu	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Belo Horizonte, s/n, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
58	13ª	Maravilha	440	1	440	112	16470	37,43	R\$ 9.944,63	DPCo	B3			5	2	1	4	3	1	Av. Araucária, 931, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
59	12ª	Palmitos	375	1	375	108	16379	43,68	R\$ 9.769,28	DPCo	B3			5	2	1	4	3	1	Rua Euclides da Cunha, 191, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
60	18ª	Garopaba	380	1	380	100	16006	42,12	R\$ 13.331,14	DPCo	B2			4	3	1	4	3	1	Rua Rosalina Aguiar Lentz, 500, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
61	28ª	São Lourenço do Oeste	485	1	485	103	15671	32,31	R\$ 11.370,03	DRP	B1			3	2	2	4	2	2	Rua João Beux Sobrinho, 788, Brasília	de propriedade do Estado de Santa Catarina
62	13ª	Riqueza	160	1	160	54	15635	97,72	R\$ 9.375,99	DPMu	B4			6	2	2	2	4	2	Rua Cristian Scholl, 13, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
63	11ª	Capinzal	440	1	440	95	15600	35,45	R\$ 9.526,97	DPCo	B4			6	2	2	2	4	2	Rua Antônio Macarini, 460, Jardim da Serra	de propriedade do Estado de Santa Catarina

64	29ª	Bombinhas	145	1	145	52	14957	103,15	R\$ 8.484,09	DPMu	B4			4	3	2	4	3	2	Av. Fragatas, 560, Bombas	de propriedade do Estado de Santa Catarina
65	11ª	Erval Velho	205	1	205	62	14861	72,49	R\$ 10.191,21	DPMu	B2	Falta foto nível da rua		4	2		4	3	1	Rua Beira Rio, 99, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
66	11ª	Joaçaba	345	1	345		14710	42,64	R\$ 9.734,79	DRP	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Tiradentes, 84, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
67	08ª	Correia Pinto	390	1	390		14626	37,50	R\$ 9.860,19	DPCo	B4			8	1	3	2	4	1	Rua Hortêncio Alves Rodrigues, 13, Pereira Alves	de propriedade do Estado de Santa Catarina
68	02ª	Garuva	250	1	250	76	14611	58,44	R\$ 7.909,48	DPMu	B4			6	5	1	2	4	1	Esquina entre Avenida Celso Ramos, nº 637, Centro e Avenida Paraná, nº 637.	de propriedade do Estado de Santa Catarina
69	13ª	São João do Oeste	240	1	240	83	14517	60,49	R\$ 8.707,23	DPMu	B3			5	2	2	4	3	1	Rua 25 de Julho, 189, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
70	13ª	São Miguel do Oeste	400	1	400	151	14466	36,17	R\$ 8.487,96	DPCo	B2			4	2	1	4	3	1	Rua Rudolfo Spier, 320, Sagrado Coração de Jesus	de propriedade do Estado de Santa Catarina

71	07ª	Taió	345	1	345		14301	41,45	R\$ 8.545,06	DPCo	B3			8	2	2	4	3	1	Av. Nereu Ramos, 118, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
72	19ª	Balneário Gaivota	185	1	185	60	14276	77,17	R\$ 8.279,73	DPMu	B2			4	3		4	3	1	Rua 14, 1077, Jardim Ultramar	de propriedade do Estado de Santa Catarina
73	04ª	Penha	255	1	255	77,3	14033	55,03	R\$ 8.136,07	DPMu	B4			6	3	1	2	4	1	Rua Luiz José Nori, 77	de propriedade do Estado de Santa Catarina
74	07ª	Ibirama	300	1	300	81	13780	45,93	R\$ 10.223,71	DPCo	B2	Falta foto nível da rua		4	3		2	3	1	Rua Blumenau, 451, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
75	26ª	Campos Novos	525	2	1050	101	13730	13,08	R\$ 9.152,09	DRP+DPCo +DPCAMI	C			7	2	2	2	3	2	Rua Nereu Ramos, 1068	de propriedade do Estado de Santa Catarina
76	05ª	Capivari de Baixo	275	1	275	89	13120	47,71	R\$ 7.772,00	DPCo	B3			5	2	2	4	3	1	Esquina entre Praça Getúlio Vargas, nº 413, Centro e Rua Monteiro Lobato.	de propriedade do Estado de Santa Catarina
77	28ª	Campo Erê	365	1	365	90	13074	35,82	R\$ 8.168,71	DPCo	B2			4	2	2	4	3	1	Av. Maranhão, 491, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina

78	08ª	Otacílio Costa	475	1	475	117	13008	27,39	R\$ 8.348,19	DPCo	B3			5	1	1	4	3	1	Rod. SC 425 Km 55 – Bairro Poço Rico, s/nº	de propriedade do Estado de Santa Catarina
79	16ª	Abelardo Luz	245	1	245	84	12802	52,25	R\$ 8.575,00	DPCo	B3			5	2	1	4	3	1	Rua São Roque, nº 1772, Aparecida	de propriedade do Estado de Santa Catarina
80	16ª	Ponte Serrada	290	1	290	83	12516	43,16	R\$ 8.132,43	DPMu	B1			4	2	2	4	2	1	Rua Florianópolis, 72, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
81	14ª	Seara	270	1	270	75	12500	46,30	R\$ 9.569,30	DPCo	B4			6	2	2	2	4	2	Av. Paludo, 1044, São João	de propriedade do Estado de Santa Catarina
82	CORE	Florianópolis	175	1	175	61	12290	70,23	R\$ 8.046,97	CORE	X			1	3	2	1	2	2	Avenida Gustavo Richard, 50, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
83	03ª	Acurra	275	1	275	86	11930	43,38	R\$ 7.076,28	DPMu	B3			5	3	1	4	3	1	Av. Getúlio Vargas, 159, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
84	13ª	Dionísio Cerqueira	350	1	350	110	11916	34,05	R\$ 8.130,19	DPCo	B4			6	2	1	2	4	2	Rua Felipe Schmidt, 450, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina

85	14ª	Lindóia do Sul	155	1	155	52	11841	76,39	R\$ 10.755,87	DPMu	B4			6	2	2	2	4	1	Rua Barão do Rio Branco, 335, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
86	28ª	São Domingos	275	1	275	88	11520	41,89	R\$ 6.681,72	DPCo	B3			5	2	2	4	3	1	Rua Getúlio Vargas, 1132, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
87	19ª	Maracajá	195	1	195		11294	57,92	R\$ 6.690,10	DPMu	b3			8	2	1	4	3	1	Rua José Zilli, 113, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
88	15ª	Corupa	222	1	222	61	11139	50,18	R\$ 5.952,44	DPMu	B2			4	3	1	4	3	1	Rua Francisco Mess, 479, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
89	13ª	Cunha Porã	430	1	430	108	11060	25,72	R\$ 6.707,86	DPCo	B2			4	2	1	4	3	1	Rua Moura Brasil, 905, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
90	19ª	Araranguá	225	1	225	70	11039	49,06	R\$ 6.018,39	1ª DPCo	B2			4	2	2	4	3	1	Avenida XV de Novembro, 2009, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
91	28ª	São Lourenço do Oeste	225	1	225	62	11010	48,93	R\$ 8.114,32	DPCo	B4			6	2	2	2	4	2	Rua Pedro Álvares Cabral, 394, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina

92	09ª	Itaiópolis	345	1	345		10980	31,83	R\$ 5.943,01	DPCo	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Costa Carvalho, 388, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
93	10ª	Santa Cecília	430	1	430	121	10888	25,32	R\$ 8.115,09	DPCo	B3			5	2	3	4	3	1	Av. XV de Novembro, s/n, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
94	08ª	Anita Garibaldi	430	1	430		10548	24,53	R\$ 5.694,23	DPCo	B4			8	2	3	2	4	2	Rua Otacilio Granzotto, 115, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
95	01ª	Governador Celso Ramos	170	1	170	57	10406	61,21	R\$ 6.757,83	DPMu	B4			6	3	2	2	4	2	Rua SC 410, Km 13, S/N, Calheiros	de propriedade do Estado de Santa Catarina
96	09ª	Papanduva	215	1	215	64	10290	47,86	R\$ 6.337,46	DPCo	B4			6	2	2	2	4	2	Rua Jacob Schadeck, 560, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
97	21ª	São Bento do Sul	345	1	345		10259	29,74	R\$ 6.312,43	DRP+DPCo	FALTA INFO	Falta foto nível da rua	Falta imagem cobertura	8						Rua Jorge Zipperer, 544, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
98	08ª	Lages	340	1	340		10176	29,93	R\$ 13.625,32	3ª DPCo	B4			8	1	2	2	3	1	Rua Heliodoro Muniz, 500, Área Industrial	de propriedade do Estado de Santa Catarina

99	14ª	Itá	185	1	185	57	10049	54,32	R\$ 5.923,61	DPMu	B2			4	2	2	4	3	1	Rua 05, 86, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina
100	14ª	São José do Cedro	275	1	275	93	10010	36,40	R\$ 7.489,19	DPCo	B3			5	2	2	4	3	1	Rua Padre Aurélio, 376, Centro	de propriedade do Estado de Santa Catarina

APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO ENVIADO PARA AS UNIDADES



Diagnóstico das edificações da Polícia Civil de Santa Catarina

Olá!

Esta é uma pesquisa que tem como objetivo reunir informações sobre a situação atual das edificações da Polícia Civil de Santa Catarina com foco em características físicas e consumo de energia por equipamentos (quantidade, potência e frequência de uso).

A pesquisa é conduzida pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE-UFSC) através do estudante de Mestrado Rafael Fernando Giaretta orientado pela Profa. Dra. Michele Fosatti com permissão do Exmo. Delegado Gustavo Madeira da Silveira, Gerente de Planejamento e Avaliação.

Se possuir quaisquer dúvidas a respeito do preenchimento deste questionário, fique à vontade para contatar Rafael Fernando Giaretta pelo e-mail rgiaretta@gmail.com ou pelo telefone celular/whatsapp (54) 8135 8704.

Para as respostas, considere o padrão de uso antes da pandemia. Os dados aqui levantados são extremamente importantes pois são esses dados que vão fornecer as informações reais sobre as edificações. E esses dados ajudarão a sugerir melhorias para as edificações da Polícia Civil de Santa Catarina.

AVISO DE CONFIDENCIALIDADE: Esta é uma pesquisa para fins acadêmicos. Toda e qualquer informação conferida por meio de questionário ou confiada aos pesquisadores no âmbito deste estudo será sigilosa. Nenhum indivíduo será identificado em qualquer publicação dos resultados, e apenas os pesquisadores envolvidos neste trabalho têm acesso aos dados levantados.

DESDE JÁ, MUITO OBRIGADO POR CONTRIBUIR.

Sua resposta é extremamente importante para nossa pesquisa e definição de diretrizes para melhorar das edificações.

PRIMEIRO, FAÇA UM LEVANTAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DA EDIFICAÇÃO CONFORME AS ETAPAS ABAIXO:

1. PLANEJE UM ROTEIRO EM TODAS AS SALAS DA EDIFICAÇÃO

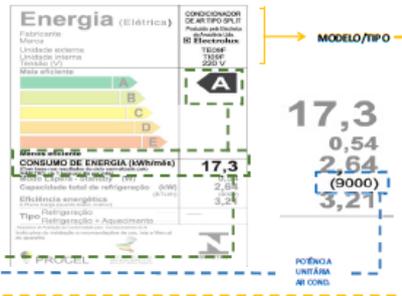


2. COM AUXÍLIO DA TABELA ENVIADA POR EMAIL, ANOTE AS SEGUINTES INFORMAÇÕES DE QUANTIDADE E CONSUMO DE TODOS OS EQUIPAMENTOS QUE CONSUMEM ENERGIA.

Se precisar, CLIQUE AQUI para abrir o navegador e baixar a tabela novamente.

Em cada sala, comece anotando as informações sobre as lâmpadas e depois os equipamentos.

NOME DO AMBIENTE	EQUIPAMENTO	QUANTIDADE	POTÊNCIA UNITÁRIA (W)	CONSUMO DE ENERGIA (KWh/mês)	MODELO/TIPO		FREQUÊNCIA DE USO	
					Quando não encontrar a potência, informe o modelo e registre em outra coluna.	Quando não encontrar a potência, informe o modelo e registre em outra coluna.	Tempo	Frequência
Copa/Cozinha	Lâmpadas	8	25	-	Fluorescente tubular	Das 08 às 20h	-	
	Micro-ondas	2	1200	-	Micro-ondas Electrolux ME275	10 minutos	/dia	
	Geladeira	2	500	50,8	Consor Consul	Sempre ligada	-	
	Geladeira	2	500	50,8	Arko Arko 14	10 minutos	2 vezes/dia	
Nome do sala 1	Lâmpadas	12	25	-	Fluorescente tubular	Das 08 às 20h	-	
	Ar condicionado	2	2000	17,3	Saer TOSH T105F	Das 08 às 18h	-	
	Televisão	2	200	-	42PL2500C/78	Das 08 às 15h	-	
	Computador	2	250	-	-	-	-	



INÍCIO DO QUESTIONÁRIO:

SEÇÃO 1 DE 5 - SOBRE A UNIDADE

1/14. Qual a nomenclatura da sua unidade?

Por exemplo:

01°DRP

São José

2° Delegacia de Polícia da Comarca + Central de Polícia de Plantão

DRP

Município:

Nome completo da(s) delegacia(s) que ocupam a edificação:

2/14. No total, quantas pessoas trabalham na edificação?

DIAS DE SEMANA

Das h às h

RINAIS DE SEMANA

Das h às h

3/14. Qual o horário de funcionamento da edificação?

DIAS DE SEMANA

Térreo

Das h às h

1° pavimento

Das h às h

Observações

Instruções de preenchimento:

Térreo

Das 8 h às 18 h

SEÇÃO 4 DE 5 - SOBRE A ILUMINAÇÃO

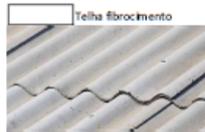
8/14. Em geral, quando as lâmpadas ficam ligadas em um dia de funcionamento?

- Durante o dia
- Apenas quando começa a escurecer/noite.
- Sempre ficam ligadas.

Instruções de preenchimento:
 Marcar a célula com um X

SEÇÃO 5 DE 5 - SOBRE A ENVOLTÓRIA

9/14. O telhado da edificação é em qual material?



10/14. Qual a cor predominante da telha?

- Cor natural da telha
- Telha com aplicação de cor. Qual?

11/14. Entre o piso mais superior e o telhado, existe:



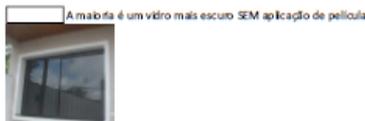
12/14. Qual a cor predominante da pintura externa da edificação?

Branco	Cinza	Preto	Palha	Amarelo antigo	Azul claro	Azul escuro	Verde claro	Verde escuro	Terracota
<input type="checkbox"/>									

Instruções de preenchimento:
 Marcar a célula com um X

Outra cor. Escreva abaixo o nome da cor:

13/14. Os vidros das janelas da edificação mais se parecem a qual tipo a baixo?



Outro. Qual?

14/14. As janelas da edificação são abertas para ventilação nos dias mais quentes ANTES de ligar o ar condicionado?

- Sim. Na maioria das vezes.
- Sim. Menos da metade das vezes, pois o ar condicionado é ligado preferencialmente.
- Não. O ar condicionado sempre é ligado como primeira opção.

Deseja compartilhar mais alguma informação?

Escreva na caixa abaixo:

Deixe seu e-mail se quiser receber o relatório ao final da pesquisa.

➡ AGORA, POR GENTILEZA, SALVE ESTE ARQUIVO E ENVIE PARA O EMAIL ABAIXO:
rgiaretta@gmail.com

FIM - MUITO OBRIGADO POR CONTRIBUIR!

Suas respostas serão extremamente importantes para a definição de diretrizes para a melhoria das edificações públicas.

APÊNDICE D – RESUMO DOS DADOS DE CUSTO DO CICLO DE VIDA PARA NZEB 99,9% E 50%.

Resumo dos dados de custo do ciclo de vida para NZEB 99,9%.

Número de MEE ¹ combinadas	Conjunto de retrofit	Medidas de eficiência energética	Valor Presente				CCV 25 ³ (R\$)	
			Investimento inicial (R\$)	Custo de reposição (R\$)	Valor residual (R\$)	Consumo energia (R\$)		OM&R ² (R\$)
		Arquétipo	52.065,12	14.628,87	33.787,81	317.863,88	8.936,48	359.706,55
MEE individuais	01	CR01 Absortância	57.195,18	29.326,43	46.921,57	295.322,99	20.161,70	355.084,74
	02	CR02 LED	64.971,73	25.506,26	41.328,27	275.114,85	38.152,92	362.417,49
	03	CR03 IDRS	74.948,90	48.926,68	77.169,20	298.012,89	51.168,38	395.887,65
	04	CR04 FSvidros	89.315,52	14.628,87	44.229,05	314.270,40	78.106,40	452.092,13
Duas MEE combinadas	05	CR05 Absortância + LED	66.523,79	39.198,49	52.140,07	253.747,55	48.764,01	356.093,77
	06	CR06 Absortância + IDRS	81.353,84	63.982,45	91.130,30	289.051,72	62.612,42	405.870,13
	07	CR07 Absortância + FS	94.445,58	29.326,43	57.362,81	293.412,14	8.9331,62	449.152,95
Três MEE combinadas	08	CR08 Absortância + LED + IDRS	90.682,45	73.854,51	96.348,81	248.420,99	91.214,73	407.823,88
	09	CR09 Absortância + LED + FSvidros	103.136,75	39.019,39	62.167,65	251.966,77	117.824,52	449.779,78
Quatro MEE combinadas	10	CR10 Absortância + LED + IDRS + FSvidros	127.932,85	73.854,51	106.790,05	247.718,41	160.384,65	503.100,38

¹ Medidas de Eficiência Energética.

² Operação, Manutenção e Reposição.

³ Custo do Ciclo de Vida em 25 anos.

Continua na próxima página.

Resumo dos dados de custo do ciclo de vida para NZEB 50%.

Número de MEE ¹ combinadas	Conjunto de retrofit	Medidas de eficiência energética	Valor Presente				CCV 25 ³ (R\$)	
			Investimento inicial (R\$)	Custo de reposição (R\$)	Valor residual (R\$)	Consumo energia (R\$)		OM&R ² (R\$)
		Arquétipo	26.032,56	7.314,44	16.893,90	317.863,88	4.468,24	338.785,21
MEE individuais	01	CR01 Absortância	32.437,50	22.370,20	30.855,00	295.322,99	15.912,28	335.187,97
	02	CR02 LED	40.851,49	18.729,13	25.675,37	275.114,85	34.012,91	343.033,01
	03	CR03 IDRS	50.191,22	41.970,45	61.102,64	298.012,89	46.918,96	375.990,89
	04	CR04 FSvidros	63.282,96	7.314,44	27.335,15	314.270,40	73.638,16	431.170,80
Duas MEE combinadas	05	CR05 Absortância + LED	47.256,43	33.784,89	39.636,47	253.747,55	45.456,95	340.609,36
	06	CR06 Absortância + IDRS	56.596,16	57.026,22	75.063,73	289.051,72	58.363,00	385.973,37
	07	CR07 Absortância + FS	69.687,90	22.370,20	41.296,24	293.412,14	85.082,20	429.256,19
Três MEE combinadas	08	CR08 Absortância + LED + IDRS	71.415,09	68.440,91	83.845,20	248.420,99	87.907,67	392.339,47
	09	CR09 Absortância + LED + FSvidros	83.869,39	33.605,79	49.664,04	251.966,77	114.517,46	434.295,37
Quatro MEE combinadas	10	CR10 Absortância + LED + IDRS + FSvidros	108.665,49	68.440,91	94.286,44	247.718,41	157.077,59	487.615,97

¹ Medidas de Eficiência Energética.² Operação, Manutenção e Reposição.³ Custo do Ciclo de Vida em 25 anos.

APÊNDICE E – TABELA RESUMO DOS RESULTADOS DA PESQUISA.

Edificação	PHOCT ¹ (%)	Consumo de energia em EP ² (kWh/m ² .ano)	99% NZEB						50% NZEB					
			Área de FV ³ para NZEB (m ²)	Custo do ciclo de vida 25 anos (R\$)	CCV ⁴ p/ 25 anos (R\$/m ²)	Taxa Interna de Retorno (%)	Fluxo de caixa positivo (ano)	Retorno do investimento (ano)	Área de FV ³ para NZEB (m ²)	Custo do ciclo de vida 25 anos (R\$)	CCV ⁴ p/ 25 anos (R\$/m ²)	Taxa Interna de Retorno (%)	Fluxo de caixa positivo (ano)	Retorno do investimento (ano)
Arquétipo	80,59	104,68	95,78	359.706,55	910,07	17,45	3,59	7,28	47,89	338.785,21	857,14	5,11	3,68	7,47
CR01	92,87	97,26	88,99	355.084,74	898,38	15,06	4,53	9,03	47,35	335.187,97	848,04	3,27	5,41	11,08
CR02	81,83	90,60	82,90	362.417,49	916,93	12,34	6,14	11,71	44,90	343.033,01	867,89	0,89	8,60	18,44
CR03	80,59	98,14	89,80	395.887,65	1.001,61	11,63	6,94	13,00	41,45	375.990,89	951,27	0,41	10,68	22,44
CR04	82,44	103,50	94,70	452.092,13	1.143,81	10,08	8,28	15,92	44,50	431.170,80	1090,88	-1,14	15,34	37,03
CR05	93,83	83,57	76,46	356.093,77	900,93	10,72	7,79	14,10	44,21	340.609,36	861,76	-0,82	15,29	32,00
CR06	92,87	95,19	87,10	405.870,13	1.026,87	10,21	8,20	15,51	43,55	385.973,37	976,53	-0,82	14,07	32,11
CR07	94,16	96,63	88,42	449.152,95	1.136,38	8,60	10,12	19,99	38,23	429.256,19	1086,04	-2,56	32,72	+50,00
CR08	93,83	81,81	74,86	407.823,88	1.031,81	6,81	10,94	28,05	37,96	392.339,47	992,64	-4,36	38,17	+50,00
CR09	95,08	82,98	75,93	449.779,78	1.137,96	5,48	17,79	38,21	37,43	434.295,37	1098,79	-6,21	47,42	+ 50,00
CR10	95,08	81,58	74,65	503.100,38	1.272,87	2,91	35,20	+50,00	37,32	487.615,97	1233,69	-9,02	+ 50,00	+ 50,00

¹ Percentual de Horas Ocupadas em Conforto Térmico

² Energia Primária

³ Fotovoltaico

⁴ Custo do Ciclo de Vida